МІНІСТЕРСТВО ЕКОНОМІКИ ТА ДОВКІЛЛЯ УКРАЇНИ
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ НАУКОВИЙ ЦЕНТР «ІНСТИТУТ МЕТРОЛОГІЇ»
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ
ПІВНІЧНО-СХІДНИЙ НАУКОВИЙ ЦЕНТР НАН І МОН УКРАЇНИ

XIII Міжнародна науково-технічна конференція

МЕТРОЛОГІЯ ТА ВИМІРЮВАЛЬНА ТЕХНІКА

(МЕТРОЛОГІЯ – 2026)

До 125-річчя започаткування національної метрології

ТЕЗИ ДОПОВІДЕЙ

8–9 жовтня 2026 р.
Харків

УДК 006.91

DOI: https://doi.org/10.5281/zenodo.23689328

Метрологія та вимірювальна техніка (Метрологія–2026). XIII Міжнародна науково-технічна конференція. 8–9 жовтня 2026 р.: Тези доповідей. Харків: ННЦ «Інститут метрології», 2026. 144 с.

До збірника включено тези доповідей, наданих на XIII Міжнародній науково-технічній конференції (Метрологія–2026), що відбулася 8–9 жовтня 2026 року в місті Харкові на базі Національного наукового центру «Інститут метрології».

© ННЦ «Інститут метрології», 2026

Зміст

ПЛЕНАРНЕ ЗАСІДАННЯ

Скляров В.В. Від традиції – до цифрового майбутнього ……8

Zakharov I.P., Botsiura O.A. Modern Trends in Measurement Uncertainty Evaluation…….10

Ащепков В.О., Бяллович Д.Ю., Скляров В.В. Джерела невизначеності машинного навчання у вимірювальних процесах……...12

Півненко С.М. Цифровий сертифікат калібрування: концептуальні засади та трансформація метрологічної довіри……..…14

Черепащук Г.О., Потильчак О.П. Метрологічні задачі в авіаційній техніці……..……..16

СЕКЦІЯ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ МЕТРОЛОГІЇ. ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНІ СИСТЕМИ

Полярус О.В., Медведовська Я.С. Метод зменшення шуму та випадкових похибок вимірювання на основі оброблення сигналів у просторовій області……19

Гур'єв М.В. Новий метод розрахування референсного значення ключових звірень та методика валідації алгоритму розрахунку……..21

Березовський Ю.Л., Середюк О.Є., Рибіцький І.В. Інформаційно-вимірювальні інтелектуальні системи керування кінетичними сонячними фасадами для підвищення енергоефективності будівель……...22

Стеценко В.В, Дядюра К.О. Метрологічне забезпечення системи контролю якості на основі блокчейн-технології у виробництві одягу …….24

Yefimenko N. Formation of a quality assessment model for an automated information system…….....26

Yefimenko N. The methodology for quality assessment of automated information systems at an enterprise……27

Юношев Д.Є., Штефан Н.В. Комплексне оцінювання якості програмного забезпечення інформаційно-вимірювальних систем за результатами тестування…….28

Коваль О.А. Байєсівська компенсація міжканальної гетерогенності вимірювальних каналів з урахуванням локальних температурних умов…….30

Коваль А.О. Вплив невизначеності опорного каналу на результати байєсівського калібрування гетерогенної інформаційно-вимірювальної системи…….……32

Кузь М.В., Безгачнюк Я.В., Незамай Б.С. Інформаційно-вимірювальна система оцінювання часових показників якості вебзастосунків…….……34

Мокій О.М., Дядюра К.О. Метрологічні аспекти створення цифрового двійника в інтелектуальній системі підтримки прийняття рішень швейного підприємства……36

Mosharenkov V., Kovalenko I. Application of hybrid artificial inteligence models for forecasting the need for an exchange fund of military measuring instruments……..38

Новосьолов О.А. Максимально допустима невизначеність на варті єдності вимірювань……....40

Бурцева В., Григорчук Р., Гаманчук Т. Особливості метрологічного обслуговування контрольно-перевірочної апаратури системи LINK 16 сучасних винищувачів F-16 …….……41

Мигаль М.М., Гамула П.Р. Метрологічні аспекти застосування високоентропійного сплаву MoNbTaVW у тензосенсорах інтелектуальних вимірювальних систем……..42

Бубела Ю.С., Скоропад П.І. Концептуальна модель кіберфізичної системи раннього виявлення та прогнозування надзвичайних ситуацій в умовах невизначеності…….……44

Перпері Л.М., Голобородько Г.М. Порівняння традиційного та байєсівського підходів до оцінювання вільних коливань технологічної системи……...46

Черкас А.І., Прохоренко С. Методологія побудови та метрологічне забезпечення біометричної системи неінвазивного моніторингу та реабілітації людини……48

СЕКЦІЯ 2. ЗАКОНОДАВЧА МЕТРОЛОГІЯ ТА МІЖНАРОДНЕ СПІВРОБІТНИЦТВО

Malisevych V., Kepeschuk T., Serediuk D. Transformation of the quality infrastructure. Digital representation and verification of metrological traceability chains……50

Петрище М.О., Мартинов І.В., Кудряшов В.О. Проблемні питання категорій законодавчо регульованих засобів вимірювальної техніки ……...51

Петрище М.О., Ковальчук В.О., Кудряшов В.О. Проблемні питання технічного регулювання повірки засобів вимірювальної техніки……...53

Олійник А.Є., Прокопов О.В. Практичне значення законодавчих змін 2024–2026 років для діяльності наукових установ……....54

Олійник А.Є., Прокопов О.В., Солдатов В.В. Залежність терміну окупності інвестицій в удосконалення первинних еталонів на сучасному рівні від необхідних витрат на навчання фахівців-метрологів……..56

Кепещук Т.В., Малісевич В.В., Юрків Я.А., Галабурда М.М. Перевірка метрологічних характеристик апаратів штучної вентиляції легень……...57

Завербний С.А., Топчак Н.В. Метод формування управлінських рішень за показниками якості продукції та послуг в інтелектуальній системі підтримки прийняття рішень……58

Петрище М.О., Кудряшов В.О. Оцінювання систем керування вимірюваннями……...60

Меркулов О.А, Мироненко О.В., Ніколенко В.В. Актуальні питання організації взаємодії метрологічної служби в системі Міністерства оборони України та національної метрологічної служби України…… …61

Осечко Н.М., Бубела Т.З. Метод вибору стратегії контролю вимірювальних систем……62

Tomilina T., Starkova I., Shushlyapina N., Trotsenko O. Application of artificial intelligence technologies to increase the efficiency of training of students of the faculty of dental technology.……64

СЕКЦІЯ 3. ТЕРМОМЕТРІЯ, ФОТОМЕТРІЯ ТА РАДІОМЕТРІЯ

Сергієнко Р.П., Пущин Р.В., Скляров В.В. Реалізація реперних точок срібла та міді для безконтактної термометрії…….....67

Півненко С.М., Пущин Р.В. Виявлення плато плавлення у самовалідованих термопарах методами машинного навчання……...68

Пущин Р.В., Півненко С.М., Юр'єв А.О. Підхід до застосування алгоритмів машинного навчання для автоматизації давачів зі самокалібруванням……..70

Кохан О.С., Дядюра К.О. Моделювання та оцінювання невизначеності вимірювань теплоти згоряння та виходу летких речовин енергетичного вугілля …….……71

Гасанов Ю.Н., Гулієв М.А., Гасанов Р.Г. Температура від термодинаміки……....73

Литвиненко А.С., Расчектаєва А.І., Татьянко Д.М. Нові можливості в застосуванні фотоприймача з концентратором……74

Нагірний В.І. Особливості вимірювання іонізаційного струму в системах контролю полум'я газових теплогенераторів …….....……76

СЕКЦІЯ 4. ЕЛЕКТРИЧНІ ВЕЛИЧИНИ. АКУСТИКА, УЛЬТРАЗВУК, ВІБРАЦІЯ

Огар В.І., Васильєва О.М., Кекерчень М.А., Копошилов Ю.І. Система компенсації магнітного поля землі для метрологічного забезпечення вимірювань малих магнітних індукцій ……..….79

Огар В.І. Метод калібрування вимірювачів нелінійних спотворень……..…81

Рибчин Б.Р., Середюк О.Є., Криницький О.С. Пристрій експрес-контролю якості електричної енергії…….....83

Krykhtin Yu., Klymchenko S., Ostafiichuk T. Investigating local transmission coefficient features of feed-through waveguide power standards near reference frequencies…… …85

Кравцов М.М., Бажинов О.В., Огар В.І. Вимірювання та розрахунок рівня електромагнітного випромінювання електротранспорту……..… …87

Назарова О.С. Інтелектуальна обробка вимірювальної інформації в системі діагностування електромеханічних процесів стана холодної прокатки……. …89

Kvasnikov V., Kyselov I., Ovcharov Y. Calibration and verification of devices implementing methods for remote determination of the phase of the reflection coefficient……. …91

Обнявко Т.С. Метрологічні аспекти інтелектуального моніторингу показників якості електричної енергії із застосуванням машинного навчання…… …93

Горяча І.О., Дуболазов Ю.О., Коротій О.О. Забезпечення метрологічної простежуваності військового еталона Збройних Сил України одиниці імпульсної напруги у діапазоні частот від 100 Мгц до 18 Ггц відповідно до ієрархічної схеми передавання одиниці імпульсної напруги……...…… ...95

Дзисюк О.В., Климченко С.В., Удніков О.М. Аналіз складових невизначеності проведення вимірювань на Військовому вторинному еталоні змінної напруги…… …96

Походило Є.В., Саф'яник В. Формування електричного стандартного зразка продукції неелектричної природи……. ..….97

Походило Є.В., Флінта М.Є. Ідентифікація зрілості бетону за параметрами адмітансу …99

СЕКЦІЯ 5. ПРОСТІР І ЧАС

Karlov V., Kuznietsov O., Korzhov A., Kovalchuk A., Biesova O., Barkhudaryan M. Consideration of wave phase-front fluctuations in the strobing process during tracking measurement of low-altitude air objects angular coordinates……101

Костріков О.Л., Ковшов С.Б. Безконтактний інтерферометр для вимірювання великих КМД…….....103

Солдатов В.В., Мироненко О.В., Ротарь А.Г., Рарог Р.М. Дослідження точності PTP-синхронізації шкали часу по волоконно-оптичній лінії……..…104

Солдатов В.В., Мироненко О.В., Ротарь А.Г., Рарог Р.М. Передача шкали часу за PTP без TRANSPARENT CLOCK у побутовій волоконній лінії та порівняння з міжнародними експериментами ……..…104

Strilets I., Soldatov V., Zadorozhny M. Effect of temperature on the stability of measurements on a time and frequency standard……..106

Strilets I., Soldatov V., Zadorozhny M. Traceability of the UTC UA Standard to International Standards…….….107

Sniosek O., Soldatov V., Nariezhnii O., Hrinenko T. Protection of time synchronization in an autonomous GNSS differential correction system using NTS……..……108

Прокопов О.В., Олійник А.Є., Шлома А.І. Щодо врахування систематичного впливу земної атмосфери на вимірювання відстаней електронними тахеометрами на трасах, близьких до горизонтальних …….....110

Тревого І.С., Перій С.С., Балян А.П. Послаблення впливу атмосферної рефракції при калібруванні еталонного лінійного базису електронним тахеометром……..…111

Чепела О.В., Калашніков Р.В., Калініченко О.С. Практичні аспекти вимірювань вибухової хвилі в розрізі вимог до часу відгуку давачів та їхніх частотних характеристик при проведенні випробувань механізованих засобів гуманітарного розмінування…….……112

Хіль Е.С. Оцінювання невизначеності координатних вимірювань геометричних параметрів авіаційних деталей з урахуванням алгоритмічної компенсації……..…..…114

СЕКЦІЯ 6. МАСА ТА ПОВ'ЯЗАНІ З НЕЮ ВЕЛИЧИНИ. ВИТРАТОМЕТРІЯ

Любецький С.Г., Редько О.О. Стан еталонної бази тиску та вакууму в Україні……...….118

Довженко Я.С., Тюпа С.Ю. Визначення твердості металів та сплавів за методами Роквелла, Брінелля та Віккерса……..……120

Должанський А.М., Брагинський О.Б., Бондаренко О.А. Експериментальне дослідження твердості за Лібом тонкостінних сталевих оболонок ……..…122

Малісевич В., Середюк Д., Пелікан Ю., Тисяк А. Особливості проведення випробувань ультразвукових лічильників газу промислового призначення ……...…123

Малісевич В., Середюк Д., Пелікан Ю., Катамай В. Забезпечення простежуваності вимірювань об'ємної витрати природного газу в діапазоні до 25000 м³/год у ДП «Івано-Франківськстандартметрологія»……..……125

Реуцький Є.А. Виявлення позаштатних режимів роботи газовимірювальних систем на основі аналізу часових рядів стандартного об'єму…….…….127

Moshchenko I. Modeling of the temperature field in a gas pipeline to increase the sensitivity of the optical-thermal method of gas flow measurement……..129

Труфан М.М., Середюк О.Є., Смаглюк М.В. Застосування методу подвійного контролю для метрологічного оцінювання інформаційно-вимірювальних інтелектуальних систем обліку природного газу на основі статистичного та фрактального аналізу…….…….131

Стеценко А.А. Вплив конструкції струмовипрямляча на чутливість двоканального ультразвукового витратоміра газу до напрямку закручування потоку…….……133

Бас О.А., Микитин О.Т. Установка еталонна проливна одиниць об'ємної та масової витрати рідини ……134

Ільницька Т.М., Яцук В.О., Дворник О.Є. Оцінювання метрологічної ефективності застосування давачів класу С5 в автомобільних та вагонних вагах ……...…135

СЕКЦІЯ 7. ІОНІЗУЮЧІ ВИПРОМІНЮВАННЯ

Неугодов Є.І., Озерський К.Л., Пустовий А.С. Реновації та міжнародні інтеграції метрологічної системи іонізуючих випромінювань ННЦ «Інститут метрології»……..…137

Banzak H., Banzak O. Development of statistical simulation model of the maintenance process …….……139

Banzak H., Banzak O. Development of reliability model for a complex technical system…

Banzak O., Banzak H. Modeling of CdZnTe-detector pulse-height spectra……..……140

Banzak O., Banzak H. Development of system for measuring the intrinsic gamma-radiation of spent nuclear fuel …….……141

Квасніков В.П., Швалюк Є.П. П'ятирівнева ієрархічна структура обробки інформації в інтелектуальних системах радіаційного моніторингу ……142

ПЛЕНАРНЕ ЗАСІДАННЯ

ВІД ТРАДИЦІЇ – ДО ЦИФРОВОГО МАЙБУТНЬОГО

(з нагоди 125-річчя з дня заснування ННЦ «Інститут метрології»)

Скляров В.В.

Харків, Україна. vladimir.skliarov@gmail.com

Небагато наукових інститутів можуть пишатися тим, що працюють уже понад 100 років. Це Фізико-технічний інститут Німеччини, заснований у 1887 р., Національна фізична лабораторія Великої Британії (1900 р.), Національна метрологічна лабораторія Франції (1901 р.), Національний інститут стандартів і технологій США (1901 р.).

До таких установ належить і Національний науковий центр «Інститут метрології». Це найстаріший в Україні науковий заклад у сфері метрології, який було засновано 8 жовтня 1901 р. Еталони, створені в нашому центрі, є основою метрологічної системи України й занесені до Державного реєстру наукових об’єктів, що становлять національне надбання.

Історія інституту починається з листа Д.І. Менделєєва від 12 червня 1901 р. до харківського губернського пробірера М.І. Страдомського з проханням про згоду на відкриття у Харкові повірочної палатки. Самого губернського пробірера було призначено завідувачем цієї палатки.

8 жовтня 1901 р. за новим стилем стало першим днем діяльності Харківської повірочної палатки й водночас першим днем функціонування метрологічної служби в Україні.

Протягом перших двадцяти років діяльність Харківської повірочної палатки зводилася переважно до перевірки й таврування найпростіших торгових мір та ваг, кількість яких рік у рік зростала.

У 1925 р. було організовано манометричну та термометричну лабораторії, а у 1930 р. термометрична лабораторія почала функціонувати як самостійна. У 1928 р. було відкрито лабораторію електровимірювань, а у 1930 р. –лабораторію високих частот. У 1933 р. організовано лабораторію часу, яка працювала спільно з астрономічною обсерваторією Харківського державного університету.

З 1936 р. при лабораторії високочастотних процесів почала функціонувати власна радіостанція із систематичним вимірюванням частот.

У 1939–1940 рр. створено первинний груповий стандарт частоти, стабільність якого повністю відповідала тогочасним вимогам метрології.

У 1943–1945 рр. розпочалися роботи зі створення кварцових резонаторів для кварцового годинника, першого маятникового годинника для астрономічних обсерваторій країни.

Із середини 40-х років XX століття у зв'язку зі зростанням ролі високотемпературних вимірювань перед інститутом було поставлено завдання термінової розробки еталонних та зразкових приладів для побудови та передачі шкали високих температур.

У 50-ті роки інститут розпочав цикл робіт зі створення високоточних оптичних та фотоелектричних приладів для вимірювання високих температур та побудови температурної шкали оптичними методами.

Одна з перших згадок про інститут у зарубіжній науковій пресі належить до 1957 р. Тоді Американський інститут фізики у своєму журналі опублікував

статтю нашого колеги Ф.М. Федченка «Астрономічний годинник АЧФ-1 з ізохронним маятником», матеріали для якої розроблялися у 1954–1955 рр. Сьогодні цю фундаментальну працю включено до міжнародної астрофізичної бази даних Національного Космічного Агентства США.

Роботи в цьому напрямку тривали, і на початку 70-х років було представлено експериментальний зразок молекулярного стандарту частоти для відтворення одиниці часу та частоти з похибкою 10^{-9}.

У Протоколах засідання Міжнародного бюро з мір та ваг відзначено досягнення в галузі пірометрії наших співвітчизників та колег, докторів наук Фінкельштейна та Кандиби.

У публікаціях квітня 1958 р. подано інформацію про метрологічні характеристики пірометра, створеного в нашому інституті.

Результат роботи групи наших учених – Сімкіна, Лукіна, Сікори та Стреленського – щодо визначення швидкості світла було відзначено у 1967 р. у журналі Reviews of Modern Physics.

У 1973 р. «Журнал фізико-хімічних опорних даних» опублікував інформацію про результати в галузі вимірювань гіромагнітного відношення протона в магнітних полях, які надали вчені від двох наукових інститутів: ХДНДІМ – Ягола, Зінгерман, Сепетий та NPL – Кіббл і Хант. Зазначено, що група Яголи отримала значення на 5 років раніше, ніж група Кіббла.

6 липня 1992 р. наш інститут було призначено Головною організацією щодо забезпечення єдності вимірювань в Україні, що означало його перехід до принципово нового статусу.

Починаючи з 2013 р. ННЦ «Інститут метрології» щорічно бере участь у науково-дослідних проєктах EURAMET як зовнішній фінансований партнер.

У 2018 р. до складу Міжнародного комітету з мір та ваг уперше було обрано представника України, колишнього Генерального директора ННЦ «Інститут метрології», професора Павла Неєжмакова.

Від початку повномасштабної війни було знищено всі еталони у галузі іонізуючих випромінювань, які зберігались у селищі Липці. Але вже у 2024 р. було відновлено два найбільш затребувані з них – еталони радону-222 та активності радіонуклідів. У 2025 р. було відновлено еталонне обладнання у галузі вимірювання твердості. Так, на стінах ще є тріщини та подряпини, але вся апаратура працює з еталонною точністю.

Станом на 1 січня 2026 р. в інституті зберігається 27 Державних еталонів, які визнані національними та мають простежуваність до одиниць SI.

Незважаючи на воєнний стан, в ННЦ «Інститут метрології» триває наукова робота. За часи війни співробітниками інституту захищено дві кандидатські дисертації. Наші науковці беруть участь у міжнародних конкурсах і посідають призові місця, активно відвідують міжнародні конференції. Вони є членами та спостерігачами у технічних та консультативних комітетах за видами вимірювань. Наукову активність вчених ННЦ «Інститут метрології» високо оцінено Національною академією наук України.

Ми пишаємося своєю історією. Після війни майбутнє Харкова – саме за цифровими технологіями. Це той напрямок, який має вивести повоєнну відбудову нашого міста на принципово новий сучасний рівень.

MODERN TRENDS IN MEASUREMENT UNCERTAINTY EVALUATION

Zakharov I., Botsiura O.
Kharkiv, Ukraine, newzip@ukr.net

Guidelines for the measurement uncertainty evaluation are developed by Working Group 1 (WG-1) of the Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM), operating under the chairmanship of the BIPM Director. The evolution of the "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement" (GUM) comprises the following four stages:

1. Development of GUM-93 [1-3] (1978–1992, 2008).
2. Implementation of a Bayesian approach to measurement uncertainty evaluation based on the Monte Carlo method; development of GUM supplements [4-8] (2008–2012, 2020).
3. An attempt to revise the GUM [9-12] (2012–2017) to align it with its supplements.
4. Transformation of the GUM and its supplements into a unified set of documents [13-14], beginning in 2017.

The unsuccessful attempt to revise the GUM led to the suspension of that effort. Nevertheless, the issue of revising the GUM remains relevant today, as a solution would yield a unified set of consistent documents. The approaches to updating the GUM proposed by the authors rely on the following methods they have developed.

1. The kurtosis method [15], which ensures that the expanded uncertainty values obtained via the GUM depend on the distribution laws of the input quantities.
2. The law of propagation of expanded uncertainty [16], which allows the number of measurements required to evaluate expanded uncertainty to be reduced to two.
3. The method of partial increments [17–18], which provides an unbiased estimate of the numerical value of the measurand and its standard uncertainty in the case of a non-linear model equation.
4. Uncertainty evaluation for indirect correlated measurements. The reduction method [15].
5. Uncertainty evaluation for indirect uncorrelated measurements. The transposition method [19].

The presentation outlines the essence of the proposed methods.

References

1. Giacomo P. The expression of Experimental Uncertainties (Recommendation INC-1), BIPM. *Metrologia*, 1981, no. 11, p. 73.
2. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. Geneva: ISO, 1993. 101 p.
3. JCGM 100:2008. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement.
4. JCGM 101:2008. Evaluation of measurement data − Supplement 1 to the «Guide to the expression of uncertainty in measurement» − Propagation of distributions using a Monte Carlo method.

5. JCGM 102:2011. Evaluation of measurement data – Supplement 2 to the «Guide to the expression of uncertainty in measurement» – Extension to any number of output quantities.

6 JCGM 104:2008. Uncertainty of measurement. Part 1: Introduction to the Expression of Uncertainty in Measurement.

7. JCGM 106:2012. Evaluation of measurement data – The role of measurement uncertainty in conformity assessment.

8. JCGM 103:2020. Evaluation of measurement data – Supplement 3 to the «Guide to the expression of uncertainty in measurement» – Developing and using measurement models.

9. Bich W. et al. Revision of the «Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement». *Metrologia*, 2012, vol. 49, pp. 702–705.

10. Bich W. Revision of the «Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement». Why and how. *Metrologia*, 2014, vol. 51 pp. 155–S158. doi: 10.1088/0026-1394/51/4/S155

11. JCGM 100:201X Committee Draft — Evaluation of measurement data — Guide to uncertainty in measurement. Issued to member bodies December 2014

12. Bich W., Cox M., Michotte C. Towards a new GUM – an update. *Metrologia*, 2016, vol. 53, pp. 149–159. doi: 10.1088/0026-1394/53/5/S149

13. JCGM GUM-6:2020. Guide to the expression of uncertainty in measurement — Part 6: Developing and using measurement models. JCGM, 2020. 103 p.

14. JCGM GUM-1:2023. Guide to the expression of uncertainty in measurement — Part 1: Introduction. JCGM, 2023. 17 p.

15. Zakharov Igor, Botsiura Olesia. Improving procedures for the expanded uncertainty evaluation at calibration measuring instruments. *Measurement Sensors*, vol. 38, Supplement, May 2025, 101732. doi: 10.1016/j.measen.2024.101732

16. Zakharov I., Botsiura O., Novoselov O. Obtaining estimates of measurement uncertainty when calibrating material measures that are close to the estimates obtained using the Monte Carlo method. *Ukrainian Metrological Journal*, 2026, no. 2, pp. 3–11. doi: 10.24027/2306-7039.2.2026.365990

17. Botsiura O., Zakharov I., Neyezhmakov P. Reduction of the measurand estimate bias for nonlinear model equation. *Journal of Physics: Conf. Series*, 1065 (2018) 212002. doi: 10.1088/1742-6596/1065/21/212002

18. Zakharov I.P., Neyezhmakov P.I., Botsiura O.A. Reduction of the bias of measurement uncertainty estimates with significant non-linearity of a model equation. *Journal of Physics: Conference Series* 1379 (2019) 012013. doi: 10.1088/1742-6596/1379/1/012013

19. Zakharov Igor, Botsiura Olesia, Neyezhmakov Pavel. Application of the Transposition Method to Uncertainty Evaluation of Uncorrelated Measurements. *ACTA IMEKO*, 2025, vol. 14(2), pp. 1–5. doi: 10.21014/actaimeko.v14i2.1391

ДЖЕРЕЛА НЕВИЗНАЧЕНОСТІ МАШИННОГО НАВЧАННЯ У ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПРОЦЕСАХ

Ащепков В.О., Бяллович Д.Ю., Скляров В.В.
Харків, Україна, ashhepkovvalera@gmail.com

Моделі машинного навчання дедалі частіше беруть участь у вимірювальному процесі – як заміна фізичного засобу вимірювальної техніки там, де пряме вимірювання неможливе, надто дороге чи надто повільне (*virtual metrology*), так і як складова обробки вже виміряного сигналу в кінцевий результат. В обох випадках, коли вихід моделі впливає на результат чи рішення, постає питання, чи має модель, подібно до будь-якого засобу вимірювальної техніки, власну невизначеність.

Чинна Настанова з подання невизначеності вимірювання (GUM) [1] передбачає детерміновану функціональну залежність між входом і виходом, тоді як стохастичні алгоритми машинного навчання цій умові не відповідають, а усталеного підходу до опису невизначеності таких моделей наразі не існує. Це питання перебуває на стадії дослідження, остаточної відповіді на нього немає. На основі наших досліджень та аналізу літератури пропонується розглядати таку невизначеність як таку, що складається щонайменше з трьох джерел різної природи, розташованих у різних точках ланцюга «вхід – модель – рішення»; повнота цього переліку потребує подальшої перевірки.

Перше джерело – невизначеність, привнесена вхідними (навчальними) даними, яка успадковується самою функціональною залежністю моделі. У метрологічній літературі її розглядають через розширення класичної моделі errors-in-variables на глибоку регресію [2], а також через аналітичне розповсюдження невизначеності вхідних змінних крізь навчені (фіксовані) регресійні моделі машинного навчання [3].

Друге джерело – невизначеність, привнесена самою обчислювальною процедурою: за стохастичної природи алгоритму числовий вихід моделі не обов'язково збігається між запусками навіть за незмінних вхідних даних. Теоретичні та емпіричні підходи до її оцінювання розробляються паралельно, від байєсівських методів [4] до прямого статистичного аналізу розкиду результату за багаторазового повторного запуску моделі [5, 6].

Третє джерело – невизначеність рішення, ухваленого на основі виходу моделі: подібно до повірки засобу вимірювальної техніки відносно еталона, вихід моделі потребує верифікації відносно незалежного критерію, і сама верифікація має власну межу довіри. Цю складову розглядають як окрему метрологічну задачу [7], а ризик прийняття рішення в умовах вимірювальної невизначеності формалізовано в JCGM 106:2012 [8] задовго до появи цієї проблематики.

Запропонований поділ на три джерела сформульований на концептуальному рівні як гіпотеза, що потребує подальшого дослідження та

обговорення в науковій спільноті. Відкритими залишаються питання про повноту цього переліку, характер взаємозв'язку між джерелами та узгодження відповідних оцінок із майбутніми нормативними вимогами.

Список літератури

1. JCGM 100:2008. Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement. BIPM, 2008. doi: https://doi.org/10.59161/JCGM100-2008E

2. Martin J., Elster C. Aleatoric Uncertainty for Errors-in-Variables Models in Deep Regression. *Neural Processing Letters*, 2023, vol. 55, no. 4, pp. 4799–4818. doi: https://doi.org/10.1007/s11063-022-11066-3

3. Thompson A. Analytical results for uncertainty propagation through trained machine learning regression models. *Measurement*, 2024, vol. 234, 114841. doi: https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.114841

4. Gal Y., Ghahramani Z. Dropout as a Bayesian Approximation: Representing Model Uncertainty in Deep Learning. *Proceedings of the 33rd International Conference on Machine Learning (ICML)*, 2016, vol. 48, pp. 1050–1059. URL: https://proceedings.mlr.press/v48/gal16.html

5. Ashchepkov V., Byallovich D., Skliarov V. Methodological challenges of outlier detection in metrology using machine learning models. *Ukrainian Metrological Journal*, 2025, no. 3, pp. 43–48. doi: https://doi.org/10.24027/2306-7039.3.2025.340615

6. Ashchepkov V., Byallovich D., Skliarov V. Assessing the reproducibility of numerical outputs of machine-learning algorithms for measurement tasks. *Ukrainian Metrological Journal*, 2025, no. 4, pp. 3–8. doi: https://doi.org/10.24027/2306-7039.4.2025.347983

7. Bilson S., Cox M., Pustogvar A., Thompson A. A metrological framework for uncertainty evaluation in machine learning classification models. *Metrologia*, 2025, vol. 62, no. 6, 064001. doi: https://doi.org/10.1088/1681-7575/ae1bae

8. JCGM 106:2012. Evaluation of measurement data – The role of measurement uncertainty in conformity assessment. Joint Committee for Guides in Metrology, 2012. doi: https://doi.org/10.59161/JCGM106-2012

ЦИФРОВИЙ СЕРТИФІКАТ КАЛІБРУВАННЯ: КОНЦЕПТУАЛЬНІ ЗАСАДИ ТА ТРАНСФОРМАЦІЯ МЕТРОЛОГІЧНОЇ ДОВІРИ

Півненко С.М.
Харків, Україна, spivnenko@gmail.com

Метрологія історично формувалася як система встановлення довіри до результатів вимірювань між людьми. Століттями матеріальним носієм цієї довіри залишався паперовий сертифікат – документ, у якому кваліфікований фахівець фіксував характеристики засобу вимірювальної техніки, а споживач зчитував ці дані для прийняття рішень. Навіть перехід до електронного документообігу у форматі статичних файлів (зокрема PDF) принципово не змінив суті процесу: документ залишився орієнтованим винятково на людське сприйняття. Водночас сучасна промисловість стрімко переходить до безлюдних технологій, автономних роботизованих комплексів і кіберфізичних систем. Для таких систем традиційний сертифікат є фактично непридатним: алгоритми керування не здатні самостійно інтерпретувати неструктурований текст. Виникає парадоксальний розрив: надсучасні цифрові виробництва змушені покладатися на ручне перенесення даних калібрування оператором, що перетворює метрологічне забезпечення на повільне та схильне до помилок вузьке місце [1].

Концептуальна відповідь на цей виклик полягає не в простому оцифруванні паперового бланка, а в докорінній зміні самої природи метрологічного документа. Цифровий сертифікат калібрування (Digital Calibration Certificate, DCC) слід розглядати не як електронний аналог свідоцтва, а як активний цифровий об'єкт, дані якого є машинозчитуваними, семантично визначеними та готовими до виконання обчислень. Головна мета концепції – перетворити метрологічну простежуваність із ретроспективної паперової довідки на дієвий інструмент, що функціонує в режимі реального часу. Це означає, що система керування технологічним процесом може самостійно отримати сертифікат, автоматично вилучити з нього математичну модель похибок приладу, внести поправки до поточних вимірювальних каналів та оцінити результуючу невизначеність без жодного втручання людини [1].

Ключовою проблемою машинного розуміння є семантична однозначність. Людина розуміє, що позначення на кшталт «10 В», «10 вольт» або колонка чисел із виноскою виражають ту саму фізичну величину. Для алгоритму це принципово різні символьні послідовності, будь-яка невизначеність у яких призводить до збою. Концепція DCC розв'язує цю проблему через принцип нерозривної єдності трьох складових кожного результату вимірювання: числового значення, строго формалізованої фізичної одиниці та метрологічно коректної оцінки невизначеності. Відмова від вільних текстових описів на користь єдиної цифрової системи одиниць і стандартизованих словників гарантує, що програмні комплекси однаково інтерпретуватимуть фізичну сутність даних. Машина отримує не просто набір цифр, а повний контекст їх походження та достовірності [2].

Реальне впровадження нових технологій неможливе шляхом раптової відмови від чинних виробничих і регуляторних процедур. Тому на рівні концептуальної архітектури DCC втілює принцип гармонійного співіснування двох середовищ – людського та машинного. Структуру сертифіката розділено на смислові шари. Зовнішній шар забезпечує звичне людинозчитуване надання результатів, необхідне для фахівців і аудиторів на перехідному етапі. Внутрішні шари містять строго формалізоване метрологічне ядро, призначене винятково для цифрових систем, а також однозначні адміністративні реквізити. Така модель дозволяє зберегти стабільність правового поля, відкриваючи шлях до наскрізної автоматизації.

У традиційному світі довіра до документа спиралася на матеріальні ознаки: особисті підписи, відбитки печаток і захищений папір. У глобальному цифровому просторі довіра набуває строго математичного характеру. Вона базується на механізмах криптографічного захисту, які дозволяють миттєво підтвердити цілісність даних і перевірити повноваження лабораторії, що видала документ. Це створює безперервний цифровий ланцюг довіри: від первинних еталонів національних метрологічних інститутів до конкретного сенсора на технологічній лінії. Будь-яка спроба несанкціонованої зміни показників чи використання нечинного сертифіката автоматично робить документ недійсним, що миттєво фіксується автоматизованими системами контролю.

Кінцевою метою розвитку концепції DCC є безшовна інтеграція метрологічних даних у цифрові двійники вимірювальних пристроїв. Обладнання перестає бути пасивним об'єктом періодичного нагляду – воно стає активним учасником системи, обізнаним про власні властивості, динаміку дрейфу та межі точності. Це відкриває шлях до переходу від жорстких календарних інтервалів калібрування до обслуговування за реальним станом точності приладу, мінімізуючи витрати та запобігаючи аваріям. Цифровий сертифікат калібрування постає не просто новим технічним форматом, а концептуальним фундаментом метрології майбутнього – універсальною інфраструктурою довіри, що поєднує фізичний світ вимірювань з алгоритмічним простором автоматизованого виробництва.

Список літератури

1. Hackel S., Härtig F., Hornig J., Wiedenhöfer T. The Digital Calibration Certificate. PTB-Mitteilungen, 2017, vol. 127, no. 4, pp. 75–81. doi: https://doi.org/10.7795/310.20170403

2. Hutzschenreuter D. et al. SmartCom Digital System of Units (D-SI) Guide. Version 2.0. Braunschweig, EURAMET/Zenodo, 2020. 48 p. doi: https://doi.org/10.5281/zenodo.3816686

МЕТРОЛОГІЧНІ ЗАДАЧІ В АВІАЦІЙНІЙ ТЕХНІЦІ

Черепащук Г.О., Потильчак О.П.
Харків, Україна, o.potylchak@khai.edu

Метрологічне забезпечення є невід'ємною складовою процесів проєктування, виробництва, випробувань та експлуатації об'єктів авіаційної техніки. На етапі проєктування основними метрологічними задачами є встановлення вимог до точності вимірювань, вибір засобів вимірювальної техніки та первинних перетворювачів, оцінювання похибок і невизначеності результатів вимірювань. Під час виробництва метрологічні задачі полягають у контролі геометричних, масових, електричних, механічних та інших параметрів деталей і вузлів, забезпеченні необхідної точності технологічних операцій, калібруванні засобів вимірювань. На етапі випробувань особливого значення набувають задачі створення вимірювальних систем, визначення характеристик об'єкта за експериментальними даними, оцінювання похибок та невизначеності вимірювань. На етапі експлуатації метрологічне забезпечення спрямоване на контроль технічного стану об'єкта, своєчасне виявлення відхилень його параметрів, контроль метрологічної надійності засобів вимірювань протягом усього строку служби авіаційної техніки.

У Харківському авіаційному інституті вирішенням перелічених задач, починаючи з 70-х років минулого сторіччя, займався колектив кафедри авіаційної метрології та вимірювальної техніки. Надалі робота за цією тематикою продовжилась у МДП «Інженерне бюро ХАІ», а потім у ТОВ «Інженерне бюро Авіаційного інституту». Результатом багаторічної роботи є велика кількість розробок у галузі метрології та вимірювальної техніки, які використовуються в авіаційній галузі.

Одними з перших розробок кафедри були системи управління міцнісними випробуваннями авіаційних конструкцій серії АСУН і АСОД. Призначенням цих систем є задавання, управління та вимірювання навантажень під час міцнісних і втомних випробувань. Подальшим їх розвитком стали системи Мультитест-КАМАК та блоки нормуючих перетворювачів ВНП-10 для автоматизованої системи управління навантаженням авіаційних конструкцій АСУ «Мультитест АН», котра експлуатується АТ «Антонов» дотепер.

Також були розроблені та виготовлені засоби автоматизації метрологічних випробувань засобів вимірювань сили. Це, зокрема, автоматизовані повірювальні комплекси серії АСМОД, призначені для проведення автоматизованих градуювань і повірок тензорезисторних давачів сили і тензодинамометрів, що використовуються під час статичних і повторно-статичних випробувань авіаційних конструкцій на міцність.

Більш сучасними розробками є системи для дослідження деформованого стану об'єктів авіаційної техніки під час статичних і повторно-статичних випробувань (система ВНП-8), динамічних випробувань (системи на базі цифрового запам'ятовуючого осцилографа С9-8, системи ВНП-9 і ВНП-13), а також у польоті (вбудована тензометрична система СТЛ-32).

Багатоканальна вимірювальна тензометрична система для статичних випробувань конструкцій ВНП-8 [1] призначена для вимірювання, накопичення, обробки та представлення значень вихідних сигналів тензорезисторних давачів. Система містить персональний комп’ютер (ПК), блок сполучення на базі промислового комп’ютера та один або декілька блоків дистанційного релейного перемикання (БДРП). Максимальна кількість вимірювальних каналів, які підключаються до одного БДРП, становить 100. Основна приведена похибка перетворення – не більше 0,2%.

Система для динамічних випробувань конструкцій ВНП-9 призначена для перетворення вихідних сигналів тензометричних давачів сили, переміщення, тиску, а також індуктивних давачів переміщення, прискорення, тиску, що встановлюються на об'єкти випробування, в уніфіковані сигнали постійного струму, а також у цифровий код із подальшою реєстрацією та обробкою вимірювальної інформації на ПК. Один вимірювальний блок системи містить 16 вимірювальних каналів із робочими частотами до 1500 Гц та основною приведеною похибкою не більше 0,5%.

У 2008 році було розпочато роботу над задачею зважування і визначення положення центру ваги літальних апаратів (ЛА). Результатом цієї роботи на сьогодні є більше 50 виготовлених стійкових та платформних авіаційних ваг [2] різних типів, котрі дозволяють визначати вагу та центрування широкої номенклатури літаків і вертольотів. Визначення центрування базується на вимірюванні складових ваги ЛА та геометричних параметрів за відповідною схемою вимірювань із подальшим автоматизованим розрахунком положення центру ваги за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення.

Однією з останніх розробок є багатокомпонентні аеродинамічні ваги, призначені для кріплення моделі літального апарату в аеродинамічній трубі, задавання кутів атаки, ковзання і крену та вимірювання аеродинамічних навантажень, що впливають на модель під час аеродинамічних експериментів. Конструктивно ваги складаються з внутрішньомодельного давача повітряних сил, державки з механізмом зміни аеродинамічних кутів, блока вимірювальних перетворювачів і ПК.

Виконані колективом розробки успішно впроваджені в експлуатацію на підприємствах авіаційної галузі, як в Україні, так і за кордоном. Незважаючи на безпекові виклики, пов’язані з війною, роботи за відповідною тематикою продовжуються й зараз.

Список літератури

1. Багатоканальна вимірювальна тензометрична система для статичних випробувань конструкцій ВНП-8. URL: https://inburo.com.ua/product/bagatokanalna-vimirjuvalna-tenzometrichna-sistema-dlja-statichnih-viprobuvan-konstrukcij-vnp-8/ (дата звернення: 04.09.2026).

2. Черепащук Г.О., Потильчак О.П., Чупова І.Л., Клімов С.В. Контроль центрування літальних апаратів і його метрологічне забезпечення. *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. 2023. № 3. С. 22–32. doi: https://doi.org/10.32620/aktt.2023.3.03

СЕКЦІЯ 1.

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ МЕТРОЛОГІЇ. ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНІ СИСТЕМИ

МЕТОД ЗМЕНШЕННЯ ШУМУ ТА ВИПАДКОВИХ ПОХИБОК ВИМІРЮВАННЯ НА ОСНОВІ ОБРОБЛЕННЯ СИГНАЛІВ У ПРОСТОРОВІЙ ОБЛАСТІ

Полярус О.В., Медведовська Я.С.
Харків, Україна, poliarus.kharkiv@gmail.com; yana.brovko@ukr.net

Методи зменшення випадкових похибок вимірювання є добре відомими в метрології, однак на практиці шум часто важко відокремити від випадкових похибок. Одним із перспективних напрямів є використання просторового подання вимірювальних сигналів. Запропонований метод ґрунтується на перенесенні реалізації випадкового процесу в геометричний простір, де сигнал і шум можуть бути розділені. Просторове подання реалізується у вигляді 2D або 3D зображення, що дозволяє застосовувати сучасні методи цифрового оброблення зображень. Реалізація випадкового процесу перетворюється на сукупність пікселів, які класифікуються як сигнальні, шумові та комбіновані. Комбіновані пікселі відповідають випадкам просторового накладання сигналу й шуму. Після класифікації шумові пікселі видаляються, а корисний сигнал відновлюється за сигнальними пікселями. За умови незначної кількості комбінованих пікселів забезпечується ефективне зменшення шуму та випадкових похибок вимірювання.

Запропонований підхід є новим для метрологічної практики. Метою роботи є оцінювання можливості використання методу оброблення сигналів у просторовій області для зменшення шуму та випадкових похибок вимірювання.

Найбільш прийнятним способом відображення випадкового процесу у просторову область є використання фазових портретів за допомогою вбудовування Такенса. Ця операція є лінійною, оскільки виконується принцип суперпозиції. Закон збереження енергії виконується. Для оброблення використовується дискретизована реалізація процесу. Кожній його часовій точці відповідає точка на фазовій траєкторії, що має дві координати на фазовій площині. Оскільки при обробці зображень використовуються пікселі, що розміщені на просторовій сітці, то реалізується операція перенесення фазового портрету з неперервними фазовими траєкторіями на таку сітку. У більшості випадків ці траєкторії не проходять через вузли сітки, і тому точки цих траєкторій переносяться до найближчих вузлів, що породжує дискретизований у просторі фазовий портрет (операція растеризації). Оператор растеризації може бути нелінійним. Сліпа класифікація пікселів здійснювалася у доповіді на основі морфологічного аналізу (Connected Component Labeling), геометричного аналізу (оцінка фрактальної розмірності), порогової фільтрації у просторовій області (Thresholding), ймовірнісних методів та кластеризації (k-means clustering, Otsu's Method, Median Filtering, ентропійні методи). Розраховані коефіцієнт промахів та коефіцієнт хибнопозитивних результатів кожного методу порівняно з опорними пікселями. Головним завданням є видалення шумових пікселів із зображення ФП. Найкращою ситуацією є така, коли шумові пікселі дійсно є такими, а не переплутаними з іншими типами. Відновлення сигналу відбувається за сигнальними пікселями. Якщо частина з них попадає у комбіновані пікселі, які

видаляються, то це спотворює форму ФП сигналу та вносить похибки у відновлений сигнал.

Важливим етапом запропонованого методу є відновлення сигналу за растеризованим фазовим портретом, для якого обґрунтовано вимоги до виконання цієї операції. Ефективність методу оцінювалася шляхом порівняння відновленого сигналу з еталонним. Для «сліпої» класифікації пікселів обрано однопороговий метод Otsu для виділення сигнальних пікселів та двопороговий ентропійний метод для класифікації шумових пікселів, які забезпечили найменші коефіцієнти промахів. Якість відновлення оцінювалася за середньоквадратичною похибкою, нормованою середньоквадратичною похибкою та коефіцієнтом кореляції Пірсона. За результатами аналізу встановлено, що:

1) результати моделювання мають статистичну значущість;

2) відносні похибки відновлення сигналу можуть шляхом налаштування методу зменшитися до допустимих для практики;

3) коефіцієнти кореляції відновленого сигналу з детермінованим показують високу схожість цих сигналів;

4) зазначені характеристики є близькими для Otsu's and Entropy Method.

Показано, що вибір розмірів сітки є компромісом між точністю відтворення фазових траєкторій та якістю класифікації пікселів. Визначено оптимальний діапазон розмірів сітки, рекомендований для практичного застосування. Моделювання методом Монте-Карло показало, що видалення 73% шумових пікселів забезпечує підвищення коефіцієнта подібності Жаккара приблизно на 23% та збільшення коефіцієнта кореляції між детермінованим і відновленим сигналами. Встановлено, що оптимальний вибір порогів середньої відстані та її середньоквадратичного відхилення між опорними й реальними точками фазових портретів забезпечує максимальну точність відновлення сигналу.

Таким чином, результати моделювання підтверджують працездатність запропонованого методу та обґрунтовують доцільність його подальшого дослідження і впровадження у практику оброблення вимірювальної інформації.

Список літератури

1. Poliarus O., Medvedovska Ya., Kuropiatnyk M. A method for assessing the impact of signal measurement errors at the input and output of a dynamic system on the quality of its identification. *Measuring Equipment and Metrology*, 2026, vol. 87(2), no. 2, pp. 123–133. doi: https://doi.org/10.23939/istcmtm2026.02.123

2. Gutman Y. Takens' embedding theorem with a continuous observable. *Ergodic Theory: Advances in Dynamical Systems*. Idris Assani (Ed). Berlin, Boston: De Gruyter, 2016, pp. 134–141. doi: https://doi.org/10.1515/9783110461510-006

3. Chunshi Sha, Jian Hou, Hongxia Cui. A robust 2D Otsu's thresholding method in image segmentation. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 2016, vol. 41, pp. 339–351. doi: https://doi.org/10.1016/j.jvcir.2016.10.013

НОВИЙ МЕТОД РОЗРАХУВАННЯ РЕФЕРЕНСНОГО ЗНАЧЕННЯ КЛЮЧОВИХ ЗВІРЕНЬ ТА МЕТОДИКА ВАЛІДАЦІЇ АЛГОРИТМУ РОЗРАХУНКУ

Гур'єв М.В.
Харків, Україна, nickgurev@gmail.com

Розроблено новий метод розрахунку еталонного значення ключових звірень (KCRV) [1] для вирішення проблеми неврахованої систематичної невизначеності (Dark uncertainty) учасників звірень, а також проблеми занадто консервативного підходу до оцінювання систематичної складової невизначеності. Обидві ці проблеми негативно впливають на точності обчислювання KCRV методом середньозваженого значення за невизначеністю кожного учасника звірень, корегованим за пороговим значенням, який є рекомендованим у правилах проведення ключових звірень [2].

Це стало можливим завдяки використанню нового підходу до розрахунку відмінності від KCRV, а також розробці нової формули розрахунку середньозваженого значення.

Для валідації методу розрахування особливу увагу та актуальність викликає моделювання звірень. Створення численних моделей на основі віртуально заданого справжнього значення фізичних величин артефактів, які звичайно використовуються в консультативних комітетах та в регіональних організаціях за видами вимірювань, на основі віртуально заданих значень заявленої невизначеності та результатів вимірювань кожного віртуального учасника ключових звірень, таким чином, щоб вони відповідали реальним значенням невизначеності, та результатів уже проведених ключових звірень, а також методології їх відбору моделей, дозволяє проводити аналіз алгоритмів розрахунку і порівнювати метод, який нині використовується, з новими розробленими методами.

Було розроблено 10 моделей звірень. За допомогою цих моделей проведено дослідження методів, які використовуються в ключових звіреннях, та розробленого нового методу. Результати свідчать про покращення точності розрахунку KCRV новим методом.

Список літератури

1. Huriev M. New KCRV calculation method and validation methodology of calculation algorithm. *Ukrainian Metrological Journal*, 2025, no. 4, pp. 9–12. doi: https://doi.org/10.24027/2306-7039.4.2025.347994

2. CCPR-G2. Guidelines for CCPR Key Comparison Report Preparation. Rev-4. January 62778:2014, IDT.

ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНІ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ КІНЕТИЧНИМИ СОНЯЧНИМИ ФАСАДАМИ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ БУДІВЕЛЬ

Березовський Ю.Л., Середюк О.Є., Рибіцький І.В.
Івано-Франківськ, Харків, Україна, yurii.berezovskyi@nung.edu.ua, orest.serediuk@nung.edu.ua, rybitsky@gmail.com

Сучасні тенденції розвитку будівельної галузі спрямовані на створення адаптивних оболонок будівель, здатних змінювати свої властивості залежно від умов інсоляції, температури та потреб внутрішнього мікроклімату [1]. Кінетичні сонячні фасади – це динамічні огороджувальні конструкції, елементи яких (ламелі, панелі, жалюзі з інтегрованими фотоелектричними модулями) здатні змінювати кут нахилу, орієнтацію або конфігурацію у відповідь на зміну зовнішніх умов [2, 3]. Ефективність функціонування таких систем визначається якістю інформаційно-вимірювального забезпечення та алгоритмів інтелектуального керування, що лежать в основі прийняття рішень щодо позиціонування рухомих елементів фасаду [4].

Метою роботи є розробка структури інформаційно-вимірювальної інтелектуальної системи керування кінетичним сонячним фасадом, яка забезпечує узгоджену оптимізацію двох критеріїв – максимізації виробітку електричної енергії фотоелектричними елементами та мінімізації тепло- та світлового навантаження на приміщення [5, 6]. Запропонована система містить три функціональні рівні: рівень первинних вимірювальних перетворювачів (піранометри, давачі освітленості, температури зовнішнього та внутрішнього повітря, давачі положення виконавчих механізмів), рівень попередньої обробки та фільтрації вимірювальної інформації, а також рівень інтелектуального прийняття рішень, реалізований на основі нечіткої логіки та нейромережевого прогнозування інсоляції на короткостроковому горизонті [7, 8].

Особливістю запропонованого підходу є використання прогнозувальної моделі, що на основі поточних вимірювань освітленості, температури та даних метеорологічного прогнозу формує випереджувальний керівний вплив на привод кінетичних елементів фасаду, що дозволяє уникнути коливань положення ламелей при короткочасній хмарності та зменшити знос виконавчих механізмів [2, 7]. Похибка вимірювального каналу освітленості не перевищує 2,5%, що є достатнім для коректного формування керівних рішень у реальному часі [2]. Алгоритм керування реалізовано у вигляді контролера на базі мікропроцесорного модуля з підтримкою бездротового обміну даними для інтеграції в систему автоматизації будівлі (BMS) [7].

Проведене імітаційне моделювання роботи системи, розробленої для кліматичних умов центральної України, показало, що застосування інтелектуального керування кінетичним сонячним фасадом дозволяє підвищити річний виробіток електричної енергії фотоелектричними модулями на 12–18% порівняно зі статичним розташуванням панелей [2, 5], а також знизити тепловий приплив у приміщення в літній період на 20–25%, що загалом

забезпечує зниження сукупного енергоспоживання будівлі на систему кондиціонування та освітлення [1, 4]. Отримані результати підтверджують доцільність подальшого розвитку інформаційно-вимірювальних інтелектуальних систем керування адаптивними фасадними конструкціями як складової концепції енергоефективних та «розумних» будівель [3, 6].

Список літератури

1. Loonen R.C.G.M., Trčka M., Cóstola D., Hensen J.L.M. Climate adaptive building shells: state-of-the-art and future challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, vol. 25, pp. 483–493. doi: https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.04.016

2. Svetozarevic B., Begle M., Jayathissa P., Caranovic S. et al. Dynamic photovoltaic building envelopes for adaptive energy and comfort management. *Nature Energy*, 2019, vol. 4, pp. 671–682. doi: https://doi.org/10.1038/s41560-019-0424-0

3. Nagy Z., Svetozarevic B., Jayathissa P., Begle M. et al. The Adaptive Solar Facade: from concept to prototypes. *Frontiers of Architectural Research*, 2016, vol. 5, no. 2, pp. 143–156. doi: https://doi.org/10.1016/j.foar.2016.03.002

4. Kuhn T.E. State of the art of advanced solar control devices for buildings. *Solar Energy*, 2017, vol. 154, pp. 112–133. doi: https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.12.044

5. Jayathissa P., Luzzatto M., Schmidli J., Hofer J., Nagy Z., Schlueter A. Optimising building net energy demand with dynamic BIPV shading. *Applied Energy*, 2017, vol. 202, pp. 726–735. doi: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.05.083

6. Powell D., Hischier I., Jayathissa P., Svetozarevic B., Schlüter A. A reflective adaptive solar façade for multi-building energy and comfort management. *Energy and Buildings*, 2018, vol. 177. pp. 303–315. doi: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.07.040

7. Chiesa G., Di Vita D., Ghadirzadeh A., Muñoz Herrera A.H., Leon Rodriguez J.C. A fuzzy-logic IoT lighting and shading control system for smart buildings. *Automation in Construction*, 2020, vol. 120, art. 103397. doi: https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103397

8. Huang C.-H., Pan H.-Y., Lin K.-C. Development of intelligent fuzzy controller for a two-axis solar tracking system. *Applied Sciences*, 2016, vol. 6, no. 5, art. 130. doi: https://doi.org/10.3390/app6050130

МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ НА ОСНОВІ БЛОКЧЕЙН-ТЕХНОЛОГІЇ У ВИРОБНИЦТВІ ОДЯГУ

Стеценко В.В, Дядюра К.О.
Одеса, Україна, spezkompl@spec-k.com.ua

Сучасне виробництво одягу, зокрема спеціального робочого одягу [1], висуває підвищені вимоги до точності та достовірності вимірювань на всіх етапах технологічного процесу – від вхідного контролю сировини і матеріалів до випробувань готової продукції [2]. Вимірювання геометричних розмірів, маси, кольору, міцності швів, стійкості фарбування, а також захисних властивостей матеріалів виконуються різноманітними засобами вимірювальної техніки (ЗВТ). Однак традиційна система збору, обробки та зберігання результатів вимірювань характеризується низькою захищеністю даних, відсутністю гарантованої хронологічної послідовності, складнощами у встановленні відповідальності за похибки та обмеженою простежуваністю результатів до державних еталонів. Це суттєво знижує достовірність контролю якості, ускладнює виконання вимог технічних регламентів та збільшує ризики випуску продукції, що не відповідає нормативним документам. Експериментальні дослідження та апробація запропонованої системи проводилися на базі приватного підприємства. Підприємство є виробником і постачальником робочого одягу, який відповідає стандартам якості України [1–3], та оснащене сучасним швейним обладнанням провідних світових виробників. На підприємстві виконується повний цикл виробництва спеціального одягу для працівників силових структур, сільського господарства, залізничної, нафтовидобувної, харчової, лісової та переробної промисловості. Асортимент продукції включає робочі костюми, халати, комбінезони, утеплений та камуфльований одяг, форму для охорони та силових структур. Уся продукція підлягає обов'язковій сертифікації та декларуванню відповідності згідно з вимогами технічних регламентів засобів індивідуального захисту. Запропоновано архітектуру інтегрованої системи метрологічного контролю якості, у якій технологія блокчейн використовується як розподілений реєстр для незмінної фіксації вимірювальних даних. Кожен акт вимірювання (результат, дата та час, ідентифікатор ЗВТ, сертифікат калібрування, умови навколишнього середовища, ідентифікатор оператора) записується в блокчейн із часовою міткою та електронним підписом відповідальної особи. Це забезпечує захист від ретроактивних змін, формує повний цифровий паспорт якості кожного виробу та створює умови для об'єктивного розподілу відповідальності за результатами вимірювань.

Ключовим напрямом розвитку запропонованої системи є створення моделі цифрового двійника (digital twin) технологічного процесу та засобів вимірювальної техніки. Цифровий двійник, інтегрований із блокчейн-реєстром, дає змогу здійснювати віртуальне моделювання метрологічних характеристик ЗВТ в умовах реальної експлуатації, враховуючи дрейф, старіння та зміни умов навколишнього середовища. Використання цифрового двійника дозволяє прогнозувати вихід ЗВТ за межі допустимих похибок до настання критичного збою, що дає можливість своєчасно планувати калібрування та метрологічне

обслуговування. Крім того, віртуальна модель виробничої лінії дозволяє імітувати вплив різних чинників (зміна натягу ниток, коливання температури праски, варіації швидкості розкрою) на кінцеві розмірні та механічні характеристики виробів, що суттєво підвищує ефективність системи управління якістю.

Для основних контрольованих параметрів (лінійні розміри, кутові відхилення, коефіцієнти відбиття кольору, розривне навантаження та подовження при розриві) виконано оцінку сумарної стандартної невизначеності згідно з керівництвом GUM. Враховано складові невизначеності, що зумовлені похибкою ЗВТ (тип B), варіацією умов вимірювань (температура, відносна вологість повітря), неоднорідністю матеріалів, операторським фактором та відліком показів (тип A). Розширена невизначеність (k=2, рівень довіри 95%) для лінійних вимірювань становить U = 0,12 мм, для вимірювань розривного навантаження – U = 2,8 Н, що відповідає вимогам чинних нормативних документів. Статистичний аналіз вимірювальних даних за період апробації (6 місяців) показав, що впровадження блокчейн-реєстру зменшує частку суперечливих результатів на 37% завдяки виключенню людського фактора при реєстрації та автоматичному контролі допустимих відхилень. Моделювання в середовищі цифрового двійника додатково дозволило скоротити час простоїв обладнання, пов'язаних із позаплановим калібруванням, на 22%.

Передбачено автоматичне звірення отриманих результатів із граничними допусками, причому збереження еталонних значень та процедур калібрування в блокчейні дозволяє оперативно виявляти дрейф характеристик ЗВТ і планувати періодичну повірку. Метрологічна простежуваність забезпечується через сертифіковані робочі еталони, дані про які також зберігаються в блокчейн-мережі. Запропонована система сприяє підвищенню продуктивності праці за рахунок скорочення часу на документування та узгодження даних на 28% без зниження точності контролю. Проведені дослідження підтверджують, що поєднання метрологічних принципів (оцінка невизначеності, калібрування, простежуваність до еталонів) з можливостями блокчейн-технології (незмінність, децентралізоване зберігання, смарт-контракти) та предиктивним моделюванням на основі цифрового двійника створює новий рівень достовірності та ефективності вимірювального контролю у легкій промисловості.

Список літератури

1. ДСТУ EN ISO 13688:2016. Одяг захисний. Загальні вимоги (EN ISO 13688:2013, IDT; ISO 13688:2013, IDT).

2. ДСТУ EN ISO 11612:2018. Одяг захисний. Одяг для захисту від тепла та полум’я. Мінімальні технічні вимоги (EN ISO 11612:2015, IDT; ISO 11612:2015, IDT).

3. ДСТУ EN ISO 15797:2022. Текстиль. Процедури промислового прання та оброблення для тестування робочого одягу (EN ISO 15797:2018, IDT; ISO 15797:2017, IDT).

FORMATION OF A QUALITY ASSESSMENT MODEL FOR AN AUTOMATED INFORMATION SYSTEM

Yefimenko N.
Zhytomyr, Ukraine, yefimenko-nadezhda@ukr.net

In modern conditions, the basis for the efficient operation and development of an organization is the effective provision of competitive quality of its products (services) and processes. Taking into account increasing competition and the rising technological capacity of production, the information support of the organization's activities is becoming increasingly important. The tasks of identification, traceability, description, collection, storage, and analytical processing of information about products and processes are solved through the use of information technologies, specifically automated information systems (AIS).

Specific aspects of quality management for programs and projects related to the creation of methods for ensuring the assessment and forecasting of product quality in the field of information technology have been addressed by both foreign and domestic scientists, such as: E. Barmenkov, A. Brytkin, S. Volkova, O. Trunov, M. Zuev, M. Klochkov, M. Larin, P. Myasoedov, O. Pomorova, T. Govorushchenko, N. Yakovlev, and others.

The increasing complexity and criticality of tasks solved with the help of AIS, as well as the potential for losses due to insufficient quality of the obtained results for the integrity of critical quality and safety data of manufactured products, have significantly increased the relevance of the task of accurately describing quality characteristics and evaluating them at various stages of the AIS lifecycle. The main feature of complex information systems can be considered the presence of several subsystems, each of which is a separate system, having, in particular, a separate infrastructure, development methodology and lifecycle, and development and quality assurance technologies.

It has been established that the main directions for solving the problems accumulated in this field are the improvement of the regulatory and methodological framework, the introduction of modern development technologies, and the implementation of end-to-end software quality control at all stages of their lifecycle.

The study [1] presents a functional and static model of the software quality assessment process using the method of integral evaluation of the characteristics of finished software tools and their components, based on a hierarchical four-level model.

The most important problems of AIS quality assurance are the formalization of quality characteristics and the methodology for their assessment. To determine the adequacy of operational quality, the availability of technical capabilities of the AIS for interaction, improvement, and development, it is necessary to use standards in the field of evaluating their quality characteristics.

References

1. Yefimenko N., Rajabzadeh M., Zaloga V., Fesenko D., Ryasnaya O. A Universal Quality Control System on Machine-Building Enterprises. *Advanced Manufacturing Processes IV (InterPartner 2022). Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham, 2023, pp. 391–399. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-031-16651-8_37

THE METHODOLOGY FOR QUALITY ASSESSMENT OF AUTOMATED INFORMATION SYSTEMS AT AN ENTERPRISE

Yefimenko N.
Zhytomyr, Ukraine, yefimenko-nadezhda@ukr.net

Assessing the quality of automated information systems (AIS) is a crucial task, the solution to which allows determining the software product's capability to satisfy planned needs under specified operating conditions throughout all stages of the lifecycle (LC). Quality management is based on three main components: quality control, quality assurance, and quality improvement. Quality management tools include quality planning, quality costs, statistical process control and management, and just-in-time delivery compliance. Quality control involves the use of operational methods and actions such as process management and eliminating the root causes of deviations and non-conformities. The main objectives in assessing AIS quality during the validation process are: planning the quality level (establishing acceptance criteria); monitoring the values of quality metrics at all LC stages by testing functional blocks based on risk assessment; and operational control of the specified quality level using change management procedures and periodic reviews of the AIS [1].

The dynamic state of any complex technical system at various stages of the LC can be characterized with a specified accuracy by a set of values that determine its behavior, i.e., state variables. For the effective selection and application of software quality characteristics (metrics), quantitative values must be selected, recorded, and accompanied by a methodology for their numerical measurement during testing. For each of them, a range of permissible numerical values and scales of reliability characteristics must be established. There is a large number of generally accepted methodologies for conducting validation processes. The sequence of reviewing validation characteristics reflects the process by which an AIS can be developed and evaluated. However, it is advisable to design the experiment so that the relevant validation characteristics are studied simultaneously, ensuring a correct and comprehensive understanding of the AIS functional capabilities. The comprehensive (integral) assessment of AIS quality is based on the proposed system of indicators depending on the level of system detail (category). The methodological framework for assessing the quality level in the defined subsystems consists of the normative approach, expert estimates, and empirical evaluations. When solving the problems of verifying a dynamic AIS, it is necessary to confirm that the requirements established by the mathematical description were fulfilled during project implementation. The primary method of AIS validation is based on a verification model in specialized test modes. However, verification can also be carried out in operating modes if the results of functional diagnostics are utilized.

References

1. Yefimenko N., Rajabzadeh M., Zaloga V., Fesenko D., Ryasnaya O. A Universal Quality Control System on Machine-Building Enterprises. *Advanced Manufacturing Processes IV (InterPartner 2022). Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham, 2023, pp. 391–399. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-031-16651-8_37

КОМПЛЕКСНЕ ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ТЕСТУВАННЯ

Юношев Д.Є., Штефан Н.В.
Харків, Україна, dmytro.yunoshev@nure.ua

Програмне забезпечення є важливою складовою сучасних інформаційно-вимірювальних систем (ІВС), оскільки забезпечує отримання, оброблення, збереження та передавання інформації, а також взаємодію між окремими компонентами системи. У процесі розроблення та супроводження програмного забезпечення для контролю його якості застосовуються функціональне та інтеграційне тестування, навантажувальні випробування, контроль надійності, перевірки захищеності, статичний аналіз програмного коду та аналіз тестового покриття. Результати таких перевірок характеризують різні властивості програмного продукту та можуть бути представлені у відсотках, одиницях часу, кількості дефектів, відмов, вразливостей та інших одиницях вимірювання.

Для систематизації результатів тестування може бути використана модель якості програмного продукту ISO/IEC 25010:2023, яка визначає характеристики та підхарактеристики якості програмного забезпечення [1]. Перехід від окремих вимірюваних показників до характеристик більш високого рівня також застосовується в сучасних ієрархічних моделях оцінювання якості програмного забезпечення [2, 3]. При цьому різнорідність первинних результатів тестування потребує їх приведення до порівнюваного вигляду перед подальшим формуванням комплексної оцінки.

Для приведення різнорідних результатів тестування до порівнюваного вигляду їх нормалізують за безрозмірною шкалою від 0 до 1. Для показників, зростання яких відповідає покращенню властивості, більше фактичне значення дає вищу оцінку; для показників зі зворотним напрямом застосовується протилежний принцип. Межі нормалізації встановлюються відповідно до допустимого діапазону показника. Після такого перетворення більше значення відповідає кращому результату незалежно від початкової одиниці вимірювання.

Для демонстрації формування оцінки розглянуто модельний набір результатів тестування програмного компонента ІВС. Значення показників та межі нормалізації наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Нормалізація результатів тестування програмного забезпечення

Показник	Результат	Межі вимірювання	q_i
Частка успішно виконаних тестів, %	96	80–100	0,80
Час відповіді, мс	180	100–500	0,80
Частота відмов, год$^{-1}$	0,08	0–0,50	0,84
Кількість критичних вразливостей, шт.	1	0–5	0,80
Тестове покриття, %	85	60–100	0,625

Наведені показники можуть бути пов'язані з відповідними характеристиками якості програмного забезпечення. Частка успішно виконаних тестів характеризує функціональну придатність, час відповіді – ефективність виконання, частота відмов – надійність, кількість критичних вразливостей – захищеність. Тестове покриття використовується як додатковий показник, що характеризує повноту виконаних процедур тестування.

За відсутності обґрунтованих підстав для різної значущості показників у прикладі використано однакові вагові коефіцієнти. Комплексну оцінку сформовано узагальненням нормалізованих значень п’яти показників; для наведеного набору результатів вона становить приблизно 0,77 за шкалою від 0 до 1.

Отримане значення характеризує узагальнений результат оцінювання, однак висока оцінка одних властивостей може компенсувати низький рівень інших. Для ІВС це є неприйнятним, якщо відповідна характеристика, зокрема надійність або захищеність, має критичне значення. Тому для таких характеристик додатково встановлюються мінімально допустимі рівні. Відповідність програмного забезпечення вимогам визначається лише тоді, коли комплексна оцінка досягає встановленого рівня, а всі критичні характеристики відповідають заданим мінімальним вимогам.

Наведений приклад демонструє можливість об'єднання різнорідних результатів тестування ПЗ ІВС у межах єдиної процедури оцінювання. Нормалізація забезпечує порівнюваність показників, а комплексна оцінка – отримання узагальненого результату. Практичне застосування підходу потребує визначення меж нормалізації, вагових коефіцієнтів і допустимих рівнів критичних характеристик відповідно до вимог конкретної ІВС.

Список літератури

1. ISO/IEC 25010:2023. Systems and software engineering – Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE) – Product quality model. Geneva, 2023.

2. Argotti Y., Kenfaoui Y., Baron C., Abran A., Esteban P. An Operational Quality Model of Embedded Software Aligned with ISO 25000. *ACM Transactions on Embedded Computing Systems,* 2025, vol. 24, no. 1, art. 9, pp. 1–41. doi: https://doi.org/10.1145/3691642

3. Zhang C., Li B., Wang L., Xu H., Shao T. A Hierarchical Model for Quality Evaluation of Mixed Source Software Based on ISO/IEC 25010. *International Journal of Software Engineering and Knowledge Engineering*, 2023, vol. 33, no. 2, pp. 181–205. doi: https://doi.org/10.1142/S021819402250070X

БАЙЄСІВСЬКА КОМПЕНСАЦІЯ МІЖКАНАЛЬНОЇ ГЕТЕРОГЕННОСТІ ВИМІРЮВАЛЬНИХ КАНАЛІВ З УРАХУВАННЯМ ЛОКАЛЬНИХ ТЕМПЕРАТУРНИХ УМОВ

Коваль О.А.
Харків, Україна, koval_al@ukr.net

Просторово розподілені інформаційно-вимірювальні системи (ІВС) містять сукупність вимірювальних каналів, розміщених у різних точках контрольованого об'єкта. Навіть за одночасного вимірювання спільної величини результати окремих каналів можуть суттєво відрізнятися через неідентичність метрологічних характеристик давачів – зокрема постійних зміщень, рівня шуму та чутливості до температури, оскільки за просторової неоднорідності температурного поля кожний канал працює за власної локальної температури.

Проблема метрологічного забезпечення сенсорних мереж активно досліджується в сучасних роботах [1]. Під час спільного опрацювання даних необхідно враховувати кореляції між каналами, зумовлені спільною величиною та просторово залежними впливними величинами [2]. Систематичні складові похибок доцільно розділяти на постійні та змінні компоненти [2]. Перспективним є застосування байєсівських методів об'єднання даних [3], а необхідність урахування температури підтверджується дослідженнями характеристик давачів у змінних умовах середовища [4].

Метою роботи є оцінювання ефективності байєсівського спільного визначення вимірюваної величини, постійних зміщень і температурних коефіцієнтів каналів для компенсації міжканальної гетерогенності вимірювань у просторово розподіленій ІВС.

Дослідження виконано на прикладі системи з дев'яти каналів вимірювання тиску, підключених до спільної гідравлічної лінії та розміщених за неоднакових локальних температурних умов. Похибка кожного каналу містила постійне індивідуальне зміщення, температурно-залежну складову та випадковий шум. Істинне значення тиску становило 1000 кПа. Для кожного каналу задавалася температурна залежність із власними середньою температурою, амплітудою, періодом і фазою; середні температури каналів відрізнялися в межах від 19 °C до 30 °C, а амплітуда коливань – від 1 °C до 3 °C. Постійні зміщення каналів мали стандартне відхилення близько 6 кПа, температурні коефіцієнти були неідентичними, а стандартне відхилення шуму становило від 1 до 3 кПа.

Байєсівське опрацювання полягало у спільному визначенні тиску, постійних зміщень і температурних коефіцієнтів каналів за слабкоінформативних апріорних розподілів. За апостеріорними оцінками для кожного каналу визначалась індивідуальна поправка, що враховувала постійне зміщення та відхилення локальної температури від опорної температури каналу. Ефективність компенсації перевірялася на незалежній валідаційній послідовності даних.

У базовому сценарії з фіксованими характеристиками каналів середньоквадратична похибка (СКП) до компенсації становила 5,923 кПа, після компенсації – 1,907 кПа (підвищення точності на 67,59%); за істинних

параметрів каналів СКП становила 1,891 кПа, тобто похибка після компенсації перевищувала практично досяжний рівень на 0,89%. Міжканальний розкид середніх похибок зменшився на 95,89%, а СКП усередненого показу дев'яти каналів зменшилася на 77,47%.

Для перевірки стійкості результатів проведено 500 випробувань Монте-Карло з випадковим формуванням постійних зміщень, температурних коефіцієнтів і рівнів шуму каналів. Середня початкова СКП становила 6,828 кПа, після компенсації – 2,076 кПа (зменшення 68,38%), а зменшення міжканальної гетерогенності – 96,21%; відхилення від результату за істинних параметрів становило в середньому 0,79%. У всіх 500 реалізаціях СКП системи зменшилась, одночасне покращення всіх каналів спостерігалося у 96,4% випробувань, а частка 95-відсоткових інтервалів охоплення, що містили істинні значення, становила близько 95%, що підтверджує узгодженість апостеріорних оцінок невизначеності з фактичним розсіюванням.

Результати показують, що байєсівське оцінювання розділяє спільну величину та систематичні похибки каналів: урахування температури компенсує змінну частину похибки, а оцінювання зміщень усуває неузгодженість, тому залишкова похибка визначається переважно шумом, а не гетерогенністю каналів.

Таким чином, порівняно з нескоригованими даними вимірювань каналів застосування байєсівського методу забезпечило зменшення СКП вимірювань у середньому приблизно на 68%, а міжканального розкиду середніх похибок каналів (тобто їхньої взаємної неузгодженості) – приблизно на 96%. Метод є стійким до випадкової зміни характеристик каналів і дає результати, близькі до компенсації за відомих істинних параметрів, що робить його доцільним у просторово розподілених ІВС із неоднаковими локальними температурними умовами.

Список літератури

1. Tabandeh S., Vedurmudi A.P., Soderblom H. et al. Sensor network metrology: Current state and future directions. Measurement: Sensors, 2025, vol. 38, art. 101798. doi: https://doi.org/10.1016/j.measen.2024.101798

2. Vandra A.B., Dregelyi-Kiss A. Distinguishing Constant and Variable Bias in Systematic Error: A New Error Model for Metrology and Clinical Laboratory Quality Control. Metrology, 2025, vol. 5, no. 4, art. 67. doi: https://doi.org/10.3390/metrology5040067

3. Li Y., Zhou E., Zhang F. A Distributed Bayesian Data Fusion Algorithm With Uniform Consistency. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2024, vol. 69, no. 9, pp. 6176–6182. doi: https://doi.org/10.1109/TAC.2024.3375254

4. Ren X., Wu K., Yang D. et al. Effects of Environmental Factors on the Performance of Ground-Based Low-Cost CO_2 Sensors. *Sensors*, 2025, vol. 25, no. 19, art. 6114. doi: https://doi.org/10.3390/s25196114

ВПЛИВ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ОПОРНОГО КАНАЛУ НА РЕЗУЛЬТАТИ БАЙЄСІВСЬКОГО КАЛІБРУВАННЯ ГЕТЕРОГЕННОЇ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ

Коваль А.О.
Харків, Україна, koval_andrey79@ukr.net

У багатоканальних інформаційно-вимірювальних системах (ІВС) точність колективного результату залежить не лише від характеристик робочих каналів, а й від метрологічної якості опорної інформації, за якою встановлюється абсолютний рівень вимірюваної величини. Це досліджується в сучасних роботах [1–5]: оцінювання невизначеності з урахуванням спільних складових і кореляцій [1], імовірнісні моделі калібрування для неоднорідних і неповних даних [2], байєсівське поєднання експериментальної й апріорної інформації [3], використання опорних даних для поправок робочих каналів [4] та поширення невизначеності за загальними метрологічними принципами [5]. Водночас наявність опорного каналу не гарантує необхідної точності калібрування. Незалежні випадкові складові робочих каналів частково зменшуються під час усереднення, тоді як невизначеність, успадкована від опорного каналу, є спільною для всіх скоригованих результатів. Вона не усувається збільшенням кількості каналів і може визначати граничну точність усієї системи. Тому актуальним є кількісне оцінювання впливу якості опорного каналу на параметри калібрувальної моделі та колективний результат.

Метою роботи є встановлення впливу стандартної невизначеності середнього результату опорного каналу на точність байєсівського оцінювання спільної вимірюваної величини, постійних зміщень і температурних коефіцієнтів робочих каналів, а також на результати компенсації їх гетерогенності та формування колективного результату.

Дослідження проведено для дев'ятиканальної системи вимірювання стаціонарного тиску. Байєсівське калібрування виконували за 180 відліками кожного каналу. Стандартну невизначеність опорного каналу змінювали від 0,05 до 0,80 кПа (сім рівнів, по 500 парних випробувань Монте-Карло на рівень), при цьому характеристики каналів і валідаційні дані в межах кожної пари залишали незмінними – це дало змогу виділити саме вплив опорної невизначеності.

Зі збільшенням невизначеності опорного каналу фактичне розсіювання оцінки спільного тиску зростало узгоджено з її апостеріорною стандартною невизначеністю. Середньоквадратична похибка оцінки тиску збільшилася від 0,049 до 0,747 кПа, а апостеріорна стандартна невизначеність – від 0,050 до 0,777 кПа. Частка охоплення істинного значення 95-відсотковим інтервалом охоплення залишалася в межах від 95,4% до 95,6%. Отже, модель не приховує втрату інформації, а коректно відображає її через розширення апостеріорного розподілу. Різна чутливість параметрів калібрувальної моделі пояснюється їхньою функціональною роллю. Невизначеність абсолютного рівня вимірюваної величини переноситься на адитивні поправки, тому середньоквадратична похибка оцінювання постійних зміщень зросла від 0,557

до 0,862 кПа. Натомість похибка оцінювання температурних коефіцієнтів залишалася близькою до 0,102 кПа/°C. Це пояснюється тим, що температурні коефіцієнти визначаються часовою залежністю показів від температури, а не абсолютним рівнем опорного результату. Таким чином, невизначеність опорного каналу найбільше впливає на оцінку тиску та постійні зміщення, майже не змінюючи точність оцінювання температурних коефіцієнтів.

Найсуттєвіший метрологічний ефект виявлено під час формування колективного результату. За збільшення стандартної невизначеності опорного каналу від типового для реального опорного давача значення 0,146 кПа до максимального рівня 0,80 кПа загальна середньоквадратична похибка скоригованих показів зросла на 6,75%. Водночас середньоквадратична похибка колективного результату збільшилася на 42,72%, а його стандартна невизначеність – на 54,16%. Це пояснюється тим, що під час усереднення дев'яти каналів незалежні шумові складові частково зменшуються, тоді як спільна складова від опорного каналу зберігається, тому її відносний внесок у невизначеність колективного результату стає визначальним. Це показує, що збільшення кількості робочих каналів само по собі не компенсує недостатню якість опорного каналу: після зменшення незалежних шумів саме невизначеність опорного каналу встановлює нижню межу точності системи. Тому вимоги до опорного каналу слід визначати не за точністю окремого каналу, а за допустимою похибкою колективного результату.

Список літератури

1. Harris P., Østergaard P.F., Tabandeh S. et al. Measurement Uncertainty Evaluation for Sensor Network Metrology. *Metrology*, 2025, vol. 5, no. 1, art. 3. doi: https://doi.org/10.3390/metrology5010003

2. Sousa J.A., Forbes A.B. Gaussian processes and sensor network calibration. *Measurement: Sensors*, 2025, vol. 38, art. 101512. doi: https://doi.org/10.1016/j.measen.2024.101512

3. Dumon M., Lebental B., Perrin G. Optimizing Sensor Calibration in Open Environments: A Bayesian Approach for Non-Specific Multisensory Systems. *The SMAI Journal of Computational Mathematics*, 2024, vol. 10, pp. 305–324. doi: https://doi.org/10.5802/smai-jcm.114

4. Koziel S., Pietrenko-Dabrowska A., Wójcikowski M., Pankiewicz B. Nitrogen Dioxide Monitoring by Means of a Low-Cost Autonomous Platform and Sensor Calibration via Machine Learning with Global Data Correlation Enhancement. *Sensors*, 2025, vol. 25, no. 8, art. 2352. doi: https://doi.org/10.3390/s25082352

5. JCGM 100:2008(E). Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement. Sèvres, BIPM, 2008. doi: https://doi.org/10.59161/JCGM100-2008E

ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА ОЦІНЮВАННЯ ЧАСОВИХ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ВЕБЗАСТОСУНКІВ

Кузь М.В., Безгачнюк Я.В., Незамай Б.С.
Івано-Франківськ, Україна, yaroslav.bezghachniuk@cnu.edu.ua

Швидкодія вебзастосунку безпосередньо впливає на сприйняття якості цифрового сервісу. Відповідно до ISO/IEC 25010:2023 ефективність виконання належить до характеристик якості програмного продукту [1]. Для вебсистем час відповіді формується мережевими й серверними операціями: DNS-пошуком, встановленням TCP-з'єднання, узгодженням TLS, передаванням HTTP-запиту, його опрацюванням сервером та передаванням відповіді. Тому однакове збільшення часу відповіді може мати різні причини, а загальний час не дає змоги достатньо обґрунтовано визначити джерело деградації.

Одним із базових показників вебпродуктивності є Time to First Byte (TTFB) – час від початку навігаційного запиту до надходження першого байта відповіді. Він включає, зокрема, DNS-пошук, встановлення з'єднання, TLS-узгодження та очікування відповіді сервера [2]. У рекомендаціях web.dev значення TTFB до 0,8 с розглядається як орієнтир доброї швидкодії, проте цей поріг є діагностичним, а не універсальною нормативною межею [2]. Для розподілених систем важливим є також аналіз хвостових затримок: навіть за прийнятної медіани окремі повільні запити можуть суттєво погіршувати якість сервісу. Значення tail latency для великих вебсистем обґрунтовано у роботі J. Dean та L.A. Barroso [3]. Тому поряд із медіаною доцільно використовувати 95-й процентиль часових показників.

Метою роботи є розроблення підходу до автоматизованого вимірювання й інтелектуального опрацювання часових характеристик вебзастосунку для оцінювання рівня затримки, її стабільності та внеску мережевої складової. Підхід узгоджується з концепцією інформаційно-вимірювальних систем як засобів отримання, перетворення й опрацювання вимірювальної інформації. Система багаторазово виконує HTTP(S)-запити та реєструє DNS lookup, TCP connection, TLS handshake, TTFB і повний час відповіді. Для кожної характеристики визначаються медіана, p95 та стандартне відхилення, формуючи статистичний профіль часової поведінки сервісу. Доцільність багаторазових HTTP-вимірювань та використання медіани, 95-го процентиля й показників розсіювання для оцінювання стандартизованих часових показників якості ПЗ також показано в роботі [4].

Для оцінки внеску мережевої складової запропоновано Infrastructure Attribution Coefficient (IAC), що визначається як відношення характерного значення часу встановлення TCP-з'єднання до відповідного значення TTFB. Для типового стану порівнюються медіани, а для хвостових затримок – значення p95. Коефіцієнт не трактується як пряме розкладання TTFB на незалежні мережеву та серверну складові, оскільки TTFB уже включає кілька етапів встановлення і виконання запиту. IAC використовується як відносний індикатор того, наскільки суттєвою є TCP-затримка порівняно із загальним часом до отримання першого байта.

Використання лише IAC може бути недостатнім за нестабільної мережі. Наприклад, за медіани повного часу відповіді 180 мс та медіани TCP 29 мс частка TCP становить приблизно 0,16, що свідчить про невеликий типовий мережевий внесок. Однак стандартне відхилення TCP 134 мс вказує на значне розсіювання окремих вимірювань. Отже, низький медіанний внесок не повинен автоматично інтерпретуватися як ознака стабільної мережі. Тому разом з IAC пропонується оцінювати відносну варіативність TCP-затримки як співвідношення її стандартного відхилення та медіани. Спільний аналіз показників дозволяє розрізняти стабільний мережевий внесок та епізодичні мережеві сплески. Конкретні межі між цими станами мають визначатися експериментально.

Для валідації підходу передбачається контрольований експеримент. Базовий сценарій відповідає нормальній роботі вебзастосунку. За мережевої деградації вноситься додаткова затримка каналу та досліджується вплив втрат пакетів. За серверної деградації мережеві умови не змінюються, а на сервері додається контрольована затримка опрацювання запиту або обчислювальне навантаження. Для кожного рівня впливу виконується серія повторних вимірювань. Залежність між внесеною мережевою затримкою та IAC пропонується оцінювати коефіцієнтом рангової кореляції Спірмена. За мережевої деградації очікується зростання IAC. За серверної деградації TTFB має збільшуватися без пропорційного збільшення TCP connection, тому IAC повинен зменшуватися. Відносна варіативність TCP окремо характеризуватиме стабільність мережі та дозволить виявляти режими з малою медіаною, але значними часовими сплесками.

Відома причина деградації в кожній експериментальній серії дає еталонні класи для перевірки діагностичної здатності системи. Порогові області IAC та показника варіативності доцільно визначати на навчальній вибірці, а якість розпізнавання перевіряти на незалежній тестовій частині за ROC-аналізом та показниками accuracy, precision, recall і F1. Підхід поєднує абсолютну швидкодію, внесок мережевого етапу та стабільність цього внеску. Очікуваним результатом є інформаційно-вимірювальна інтелектуальна система, здатна не лише фіксувати погіршення часових характеристик, але й формувати статистично обґрунтовану оцінку характеру деградації.

Список літератури

1. ISO/IEC 25010:2023. Systems and software engineering – Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE) – Product quality model. ISO, 2023.

2. Pollard B., Wagner J. Time to First Byte (TTFB). URL: https://web.dev/articles/ttfb

3. Dean J., Barroso L. A. The Tail at Scale. *Communications of the ACM,* 2013, vol. 56(2), pp. 74–80. doi: https://doi.org/10.1145/2408776.2408794

4. Kuz M. et al. Methods for quality assessment of standardized software time indicators. *Scientific Journal of TNTU,* 2026, vol. 121(1), pp. 88–98. doi: https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2026.01.088

МЕТРОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ СТВОРЕННЯ ЦИФРОВОГО ДВІЙНИКА В ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІЙ СИСТЕМІ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ШВЕЙНОГО ПІДПРИЄМСТВА

Мокій О.М., Дядюра К.О.
Одеса, Україна, spezkompl@spec-k.com.ua

Впровадження концепції Індустрії 4.0 у легку промисловість вимагає створення цифрових двійників (Digital Twins) на всіх етапах проєктування та виготовлення швейних виробів. Особливістю швейного виробництва є висока мінливість як вхідної геометрії (антропометричні параметри людини), так і властивостей об'єкта обробки (текстильних матеріалів). Традиційні статичні допуски на лекала не враховують варіабельність фізико-механічних характеристик тканини в межах однієї партії (усадка, розтяжність, анізотропія деформацій), що призводить до накопичення систематичних похибок, незадовільної посадки готового виробу та збільшення відсотка браку. Ефективне функціонування інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень (СППР) на етапах моделювання, конструювання та розкрою неможливе без належного метрологічного забезпечення, яке гарантує простежуваність, відтворюваність та точність вимірювальних даних, що надходять від різнорідних сенсорів та обладнання.

Метою дослідження є систематизація метрологічних аспектів та розробка концепції оцінювання невизначеності вимірювальних даних при створенні цифрового двійника у структурі СППР підготовчо-розкрійного виробництва.

Цифровий двійник у структурі СППР розглядається як динамічна вимірювально-інформаційна модель, яка об'єднує два основні вимірювальні канали. Геометричний канал забезпечує безконтактні вимірювання поверхні тіла людини (3D/4D сканування) та контроль геометричних параметрів плоских лекал і контурів настилу тканин. Фізико-механічний канал реалізує оперативне вимірювання деформаційних характеристик (розтяжність, релаксація) та структурних параметрів (щільність, товщина, анізотропія усадки, драпувальність). Інтеграція даних від обох каналів у СППР через метрологічний коректор дозволяє формувати скоригований цифровий двійник, який слугує основою для побудови оптимальних розкладок та параметрів розкрою.

Ключові метрологічні проблеми створення цифрового двійника включають три аспекти. По-перше, оцінювання та трансляція невизначеності (uncertainty propagation): вхідна невизначеність 3D-сканування переноситься на стадію побудови 2D-розгорток, а невизначеність вимірювання фізичних властивостей матеріалу (неоднорідність рулону, зміна натягу при настиланні) викликає відхилення геометричних розмірів деталей після розкрою. Відповідно до керівництва GUM, виконано оцінювання сумарної стандартної невизначеності для кожної вхідної величини: розширена невизначеність антропометричних вимірювань (k=2) становить $U_{\text{антр}}$ = 1,6 мм згідно з ISO 20685-1:2018 [1], для визначення усадки за ISO 5077 [2] – $U_{\text{усад}}$ = 1,8%, для розривного навантаження за ISO 13934-1 [3] – $U_{\text{нав}}$ = 2,2%. Похибка позиціонування розкрійного

комплексу – $U_{обл}$ = 0,20 мм. На основі цих даних СППР розраховує сукупну невизначеність та визначає динамічні допуски на розкрій.

По-друге, мультисенсорна інтеграція даних (data fusion) передбачає об'єднання геометричних точок 3D-моделі з фізичними векторами напружень матеріалу. СППР використовує виміряні коефіцієнти анізотропії тканини для автоматичного математичного перерахунку геометрії лекал безпосередньо перед розкладанням. Якщо виміряний коефіцієнт усадки партії перевищує допустимий поріг (наприклад, 2,0%), система автоматично збільшує величину припусків на шви та компенсаційних зон за формулою, що базується на законі накопичення похибок, враховуючи анізотропію деформацій.

По-третє, калібрування та адекватність цифрового двійника забезпечуються організацією зворотного метрологічного зв'язку: оптичні системи розкрійного столу (комп'ютерний зір) вимірюють фактичні геометричні контури зрізаних деталей та порівнюють їх із еталонним цифровим двійником. Встановлена розбіжність використовується СППР для самокалібрування моделей конструювання, що дозволяє компенсувати систематичні похибки, спричинені зношенням обладнання або зміною властивостей матеріалів.

Статистичний аналіз результатів апробації запропонованої концепції засвідчив зниження відсотка браку, пов'язаного з невідповідністю розмірів та посадки, на 34%, скорочення витрат матеріалів на 19% (у тому числі завдяки калібруванню допусків – на 1,5–3,0%) та підвищення продуктивності праці на 22% за рахунок автоматизованого перерахунку параметрів розкрою. Достовірність прогнозу посадки виробу за даними цифрового двійника досягла 94,2%, що підтверджує ефективність запропонованого метрологічного підходу.

Встановлено, що метрологічна спроможність СППР швейного підприємства визначається точністю оцінювання сукупної невизначеності вимірювальних каналів геометричних та фізико-механічних параметрів. Запропонована концепція цифрового двійника з елементами адаптивного калібрування на основі даних комп'ютерного зору розкрійного обладнання дозволяє перейти від реактивного контролю до проактивного управління якістю. Подальші дослідження будуть спрямовані на інтеграцію розробленої моделі з еталонними базами даних для забезпечення простежуваності результатів вимірювань, а також на впровадження методів машинного навчання для прогнозування зміни властивостей матеріалів у процесі експлуатації виробів.

Список літератури

1. ISO 20685-1:2018. 3-D scanning methodologies for internationally compatible anthropometric databases – Part 1: Evaluation protocol for body dimensions extracted from 3-D body scans.

2. ISO 5077:2007. Textiles – Determination of dimensional change in washing and drying.

3. ДСТУ EN ISO 13934-1:2018. Текстиль. Розривні властивості тканин. Частина 1. Визначення максимального зусилля та видовження за максимального зусилля методом прямокутного шматка (EN ISO 13934-1:2013, IDT; ISO 13934-1:2013, IDT).

APPLICATION OF HYBRID ARTIFICIAL INTELLIGENCE MODELS FOR FORECASTING THE NEED FOR AN EXCHANGE FUND OF MILITARY MEASURING INSTRUMENTS

Mosharenkov V., Kovalenko I.
Kharkiv, Ukraine, kovalenkoivan756@gmail.com

The relationship between the development of the military sphere and scientific and technological progress is reciprocal: advances in science and technology are widely applied to the development and improvement of armament and military equipment, while military needs stimulate the development of new technologies, equipment, and methods of their application. At the practical level, this process directly affects the reliability and efficiency of the metrological support system (MS) of armament and military equipment (AME), which depend on the timely provision of units with serviceable measuring instruments (MI) [1, 2]. Under conditions of intensive combat use and operation of AME, the growing number of failures, damage, and breakdowns of measuring equipment leads to an accumulation of repair, verification, calibration, and maintenance activities, resulting in a dynamic and nonlinear increase in the need for exchange-fund instruments [2]. This requires a revision of traditional approaches to determining the need for an exchange fund of military MI, which are based on regulatory indicators, statistical data, and expert assessments but do not always allow timely consideration of changes in the intensity of AME operation, equipment condition, number of failures, and volume of repair activities under dynamic operating conditions.

Therefore, the use of machine learning and artificial intelligence methods is a promising direction for improving forecasting. Unlike classical mathematical models, machine learning algorithms are capable of identifying complex nonlinear relationships between accumulated data and multidimensional factors characterizing the functioning of the MS system, making it possible to forecast future needs based on a comprehensive set of information parameters [3].

For practical implementation of this approach, hybrid artificial intelligence models are of particular interest, as they integrate the advantages of several forecasting methods [4]. Such an architecture makes it possible to simultaneously consider the time dynamics of changing demand and the influence of external and internal factors. One component of a hybrid model can be used to identify trends in time series, while another provides an assessment of the nonlinear influence of operational and organizational factors on the MS system [4].

The effective functioning of such models relies on a high-quality data basis. When forecasting the need for an exchange fund, it is advisable to use data on the actual use and replacement of MI, the number of failures, the results of maintenance and repair, the number of MI undergoing verification or calibration, the intensity of AME operation, as well as the structure and size of the existing MI inventory [2, 3].

A critical stage in developing such a system is the preliminary processing of information and the formation of informative features, since the quality and completeness of the input data directly determine the reliability of the forecast [3]. This process should account for missing data, anomalous values, changes in operating conditions, and possible transformations in the structure of the exchange fund.

After data preparation and algorithm configuration, the selected tools must be verified. To substantiate the feasibility of using a hybrid model, it is necessary to conduct a comparative analysis with individual forecasting methods. The performance of classical statistical methods, machine learning algorithms, and the proposed hybrid model should be evaluated using common accuracy criteria [3, 4]. This approach will make it possible to identify the advantages of combining methods and substantiate the selection of an optimal model structure considering the specific characteristics of the MS system.

A scientifically substantiated and verified model provides a basis for practical implementation, as forecasting results can be used to support management decisions concerning the formation, timely replenishment, and rational allocation of the exchange fund of military MI [2]. Integration of the hybrid model into an information-measurement system will make it possible to automate the collection and processing of primary data, generate forecasts of future needs, and timely identify the risk of shortages of individual categories of measuring instruments.

Summarizing the above advantages, it can be concluded that the application of hybrid artificial intelligence models is an important direction for improving the forecasting of the need for an exchange fund of military MI [4]. Combining time-dependence analysis and machine learning methods makes it possible to account for a broad range of influencing factors and creates conditions for a transition from responding to an existing shortage to predictive management of MS resources [3, 4]. Further research should focus on forming a representative dataset of real-world data, substantiating the optimal architecture of the hybrid model, and experimentally evaluating its performance under conditions of intensive combat use and operation of AME.

References

1. On Metrology and Metrological Activity. Law of Ukraine from 05.06.2014 No. 1314-VII. *Bulletin of the Verkhovna Rada of Ukraine*, 2014, no. 30, art. 1008. Available at: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1314-18 (Accessed: 14.08.2026) (in Ukrainian).

2. Guidelines on the Organization and Procedures for the Operation of Measuring Equipment in the Armed Forces: approved by Order No. 79 of the Deputy Minister of Defence for Armament – Chief of Armament of the Armed Forces of Ukraine dated June 1, 2001 (Regulatory document of the Ministry of Defence of Ukraine). Kyiv, 2001 (in Ukrainian).

3. Muth M., Lingenfelder M., Nufer G. The application of machine learning for demand prediction under macroeconomic volatility: a systematic literature review. *Management Review Quarterly*, 2025, vol. 75, pp. 2759–2802. doi: https://doi.org/10.1007/s11301-024-00447-8

4. Liu Z., Zhang Z., Zhang W. A Hybrid Framework Integrating Traditional Models and Deep Learning for Multi-scale Time Series Forecasting. *Entropy*, 2025, vol. 27, no. 7, art. 695. doi: https://doi.org/10.3390/e27070695

МАКСИМАЛЬНО ДОПУСТИМА НЕВИЗНАЧЕНІСТЬ НА ВАРТІ ЄДНОСТІ ВИМІРЮВАНЬ

Новосьолов О.А.
Кривий Ріг, Україна, oanovoselov@ukr.net

Єдність вимірювань досягається шляхом точного відтворення та зберігання встановлених одиниць вимірювання величин за допомогою еталонів і передачі їх розмірів робочим засобам вимірювальної техніки.

Згідно з ДСТУ ISO 10012:2005 [1], для забезпечення відповідності вимірювального обладнання вимогам щодо призначення необхідне метрологічне підтвердження придатності, яке включає калібрування та верифікацію обладнання. Однією з умов забезпечення єдності вимірювань є відповідність будь-якого вимірювального обладнання вимогам технічної специфікації, де вказані його нормовані метрологічні характеристики, з яких найбільш важливою є максимально допустима похибка (далі – *MPE* (maximum permissible error)).

Відповідно до п. 7.6.1 ДСТУ EN ISO/IEC 17025:2019 [2], калібрувальна лабораторія має ідентифікувати складові невизначеності вимірювання. Саме через невизначеність вимірювань завжди існує ризик помилкового ухвалення рішення щодо відповідності або невідповідності вимірювального обладнання встановленим вимогам, виходячи з визначеної оцінки систематичної похибки за результатами калібрування. Тому основним питанням під час калібрування вимірювального обладнання постає правильна оцінка невизначеності вимірювань, яка можлива шляхом обліку внесків усіх її значущих складових, виявлення та визначення яких залишається у сфері емпіричного досвіду персоналу калібрувальної лабораторії.

Умова щодо визначення максимально допустимої невизначеності (далі – *MPU* (maximum permissible uncertainty)), вказана у ДСТУ OIML G 19:2018 [3], – значення *MPU* повинно становити не більше 1/3 від *MPE*. Виходячи з цієї умови, значення цільової невизначеності вимірювань при калібруванні вимірювального обладнання має не перевищувати значення *MPU*.

Взагалі, результати калібрування вимірювального обладнання є корисними лише за умови, якщо невизначеність вимірювань є достовірною та достатньо малою для виконання конкретного калібрування.

Список літератури

1. ДСТУ ISO 10012:2005. Системи керування вимірюванням. Вимоги до процесів вимірювання та вимірювального обладнання (ISO 10012:2003, IDT).

2. 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).

3. ДСТУ OIML G 19:2018. Роль невизначеності вимірювання під час прийняття рішень про оцінку відповідності в законодавчо регульованій метрології (OIML G 19:2017, IDT).

ОСОБЛИВОСТІ МЕТРОЛОГІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ КОНТРОЛЬНО-ПЕРЕВІРОЧНОЇ АПАРАТУРИ СИСТЕМИ LINK 16 СУЧАСНИХ ВИНИЩУВАЧІВ F-16

[1]Бурцева В., [2]Григорчук Р., [2]Гаманчук Т.
[1]Харків, [2]Київ, Україна, r.v.hryhorchuk@post.mil.gov.ua

У рамках міжнародної військово-технічної допомоги, наданої країнами НАТО в умовах повномасштабної збройної агресії рф, Повітряні Сили ЗС України були оснащені багатоцільовими винищувачами F-16. Ці літаки оснащені інтегрованим комплексом цифрової авіоніки, до складу якого входять системи зв'язку, навігації, радіолокації, керування озброєнням і контролю функціонування силової установки. Під час його експлуатування застосовується широка номенклатура контрольно-перевірочної апаратури (далі – КПА), призначеної для діагностування технічного стану бортових систем, забезпечення їх справності та підтримання боєготового стану, шляхом виконання технічного обслуговування та поточного ремонту. Порівняно з винищувачами четвертого покоління радянського виробництва, такими як МіГ-29 та Су-27, взаємодія яких із наземними пунктами управління переважно здійснюється засобами аналогового радіозв'язку, літак F-16 інтегрований у мережево-центричну систему обміну даними Link 16, що забезпечує захищений обмін інформацією між учасниками операції в режимі реального часу та забезпечує безперервний обмін інформацією між пілотами. Обмін здійснюється за допомогою військової багатофункціональної системи розподілу інформації MIDS у діапазоні частот від 960 до 1215 МГц із застосуванням технології TDMA та псевдовипадкової перебудови робочої частоти.

На відміну від винищувачів четвертого покоління радянського виробництва, під час діагностування технічного стану систем зв'язку яких для вимірювання коефіцієнта амплітудної модуляції, девіації частоти, чутливості приймачів і контролю якості приймання досі застосовуються комбіновані прилади типу С3, С2, винищувач F-16 оснащений цифровою системою тактичного обміну даних Link 16. Це зумовлює необхідність підготовки особового складу з урахуванням набутого бойового досвіду, забезпечення доступу до технічної документації з боку країн-партнерів та застосування сучасної КПА для контролю радіочастотних параметрів передавально-приймального тракту й антенно-фідерної системи, зокрема вихідної потужності, коефіцієнта стоячої хвилі, втрат у фідерних лініях, спектральної чистоти сигналу, а також часових характеристик, а саме точності синхронізації з GPS і часових затримок приймально-передавального тракту, необхідних для коректної роботи Link 16. Для діагностування системи можуть застосовуватися векторні генератори сигналів, аналізатори спектра, GPS/GNSS-симулятори та вимірювачі потужності, метрологічна простежуваність яких можлива шляхом калібрування з використанням військових еталонів ЗС України. Крім того, важливими умовами підготовки персоналу є володіння технічною англійською мовою й навички роботи в навчальному середовищі ILIAS.

МЕТРОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ЗАСТОСУВАННЯ ВИСОКОЕНТРОПІЙНОГО СПЛАВУ MoNbTaVW У ТЕНЗОСЕНСОРАХ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ

Мигаль М.М., Гамула П.Р.
Львів, Україна, mykhailo.m.myhal@lpnu.ua

Розвиток інтелектуальних вимірювальних систем породжує потребу у сенсорних елементах, які можуть забезпечити стабільне перетворення механічної деформації в електричний сигнал навіть при складних умовах експлуатації. Перспективним матеріалом для таких елементів є рефрактерний високоентропійний сплав MoNbTaVW, утворений молібденом, ніобієм, танталом, ванадієм і вольфрамом. Багатокомпонентний склад та використання тугоплавких елементів визначають інтерес до цього матеріалу для тензорезистивних перетворювачів, зокрема у випадках, де важливими є структурна і термічна стабільність [1, 2].

Принцип роботи тензосенсора на основі MoNbTaVW полягає у перетворенні механічної деформації контрольованого об'єкта у зміну електричного опору чутливого елемента. Під час розтягу або стиску змінюються геометричні параметри та електрофізичний стан тензорезистивного шару. Зміна опору стає інформативним параметром, за яким визначають деформацію. Для забезпечення мініатюризації сенсорів доцільним є формування MoNbTaVW у вигляді тонкої плівки методом магнетронного розпилення. Параметри осадження при цьому впливають на структуру, залишкові напруження та електромеханічні властивості плівки [2–4].

З метрологічної точки зору практичне застосування MoNbTaVW вимагає встановлення функції перетворення тензосенсора та визначення комплексу його характеристик: коефіцієнта тензочутливості, робочого діапазону деформації, нелінійності, гістерезису, повторюваності та стабільності нульового сигналу. Важливою характеристикою є також температурна залежність електричного опору, оскільки одночасний вплив температури і механічної деформації може спричиняти додаткову складову похибки. Це особливо актуально для сенсорів, призначених для робототехнічних і промислових систем із нестабільними температурними умовами.

Калібрування тензосенсора на базі MoNbTaVW доцільно здійснювати шляхом створення контрольованої механічної деформації з одночасним прецизійним вимірюванням електричного опору чутливого елемента. За результатами серії вимірювань встановлюють калібрувальну характеристику та коефіцієнт тензочутливості. Додатково оцінюємо повторюваність результатів під час циклічного навантаження, стабільність після температурного впливу і відтворюваність параметрів сенсорних елементів, виготовлених за однаковою технологією.

Окремим і досить важливим завданням є оцінювання невизначеності результату вимірювання деформації. До її основних складових можуть належати невизначеність заданої деформації під час калібрування, невизначеність вимірювання електричного опору, температурний вплив, нестабільність

тензочутливого шару, нелінійність функції перетворення та повторюваність результатів. Формування бюджету невизначеності відповідно до загальних метрологічних принципів [5] дає змогу оцінити придатність сенсора для конкретного вимірювального завдання та порівнювати характеристики різних конструктивно-технологічних варіантів.

Перспективним напрямом є інтегрування тензосенсорів MoNbTaVW в інтелектуальні інформаційно-вимірювальні системи. Після аналого-цифрового перетворення сигналу може виконуватися температурна компенсація, цифрова фільтрація та обчислення деформації за калібрувальною характеристикою. Накопичення значних обсягів вимірювальних даних створює можливість ефективного застосування алгоритмів машинного навчання для своєчасного виявлення дрейфу метрологічних характеристик, компенсації впливу зовнішніх та внутрішніх величин, а також комплексного діагностування поточного технічного стану контрольованої конструкції.

Таким чином, MoNbTaVW є перспективним матеріалом для тензорезистивних сенсорних елементів інтелектуальних вимірювальних систем. Для метрологічного обґрунтування їх застосування необхідно експериментально визначити функцію перетворення, тензочутливість, температурну залежність, повторюваність і стабільність, провести калібрування та оцінити невизначеність вимірювання. Отримані метрологічні характеристики можуть стати основою для подальшої оптимізації сенсорів та їх застосування у робототехнічних і автоматизованих системах.

Список літератури

1. Miracle D.B., Senkov O.N. A critical review of high entropy alloys and related concepts. *Acta Materialia*, 2017, vol. 122, pp. 448–511.

2. Hamyla P., Myhal M. Application of high-entropy alloys in strain sensors. *Measuring Equipment and Metrology*, 2025, vol. 86, no. 2, pp. 43–47. doi: https://doi.org/10.23939/istcmtm2025.02.043

3. Uporov S.A., Evdokimov I.V., Ryltsev R.E. High entropy alloys as strain-sensitive materials. *Intermetallics*, 2024, vol. 170, 108334. doi: https://doi.org/10.1016/j.intermet.2024.108334

4. Gruber G.C. et al. Thermal stability of MoNbTaTiW, MoNbTaVW and CrMoNbTaW thin films deposited by high power impulse magnetron sputtering. *Surface and Coatings Technology*, 2023, vol. 454, 129189. doi: https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.129189

5. JCGM 100:2008. Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement. BIPM, Sèvres, 2008.

КОНЦЕПТУАЛЬНА МОДЕЛЬ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ РАННЬОГО ВИЯВЛЕННЯ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ

Бубела Ю.С., Скоропад П.І.
Львів, Україна, yulian.s.bubela@lpnu.ua

Сучасні системи моніторингу надзвичайних ситуацій (НС) функціонують в умовах значної невизначеності, неповноти та неоднорідності інформації. Дані надходять від сенсорних мереж, засобів дистанційного зондування, метеорологічних і гідрологічних служб, об'єктів критичної інфраструктури, соціально-економічних та інших зовнішніх інформаційних джерел. Відмінності у точності, часовій і просторовій роздільній здатності, наявність шумів, пропусків та суперечливих спостережень безпосередньо впливають на достовірність раннього виявлення небезпечних змін і прогнозування розвитку надзвичайної ситуації. Тому актуальним є формування єдиної концептуальної моделі виявлення та прогнозування НС, у якій оцінювання достовірності даних є важливою складовою [1, 2].

Запропонована концептуальна модель кіберфізичної системи передбачає послідовне перетворення мультиджерельних даних у формалізований інформаційний стан, придатний для виявлення передвісників, ідентифікації типу НС та просторово-часового прогнозування її розвитку. До складу моделі входять підсистеми мультисенсорного інформаційного забезпечення; попереднього опрацювання, синхронізації та оцінювання якості даних; моделювання невизначеності, неповноти й неоднорідності; інтелектуальної інтеграції даних; раннього виявлення аномальних змін; прогнозування розвитку НС; оцінювання ризику та достовірності прогнозу; формування раннього попередження і рекомендацій для прийняття рішень.

На першому етапі формуються вхідні дані, отримані з різних джерел: результати вимірювань, результати дистанційного зондування, метеорологічні й гідрологічні спостереження, інформація про стан інфраструктури та зовнішні інформаційні дані. Попереднє опрацювання охоплює просторово-часову синхронізацію, фільтрацію шумів, виявлення викидів, опрацювання пропусків, нормалізацію й уніфікацію. Для кожного джерела визначаються показники якості, які враховуються під час інтеграції інформації та оцінювання достовірності результатів.

Окремий блок моделі призначений для комплексного врахування невизначеності. Він поєднує невизначеність вимірювань, невизначеність, зумовлену неповнотою даних, неоднорідністю джерел, а також методичну невизначеність. Такий підхід узгоджується із сучасним розглядом невизначеності як багатовимірної характеристики кіберфізичних систем [1] і дає змогу простежувати її вплив на подальші етапи обробки, інтеграції, класифікації та прогнозування. Вагові коефіцієнти окремих джерел можуть коригуватися відповідно до ступеня їх достовірності, що підвищує стійкість системи до деградації або часткової втрати інформації.

У результаті інтелектуальної інтеграції формується узагальнений інформаційний вектор стану контрольованого середовища. На його основі визначаються аномальні зміни та індикатори-передвісники, оцінюється ймовірність виникнення надзвичайної ситуації та ідентифікується її тип. Просторово-часове прогнозування охоплює визначення майбутнього стану ситуації, масштабу, швидкості й напряму поширення, площі зони впливу та часу до досягнення критичного стану. При цьому прогноз подається не лише як точкова оцінка, а разом з інформацією про його невизначеність.

Важливою складовою запропонованої моделі є інтегральне оцінювання достовірності прогнозу. Воно базується на сукупному врахуванні рівня достовірності вхідних даних, комплексної невизначеності, результатів валідації прогнозної моделі, оціненої ймовірності виникнення надзвичайної ситуації та невизначеності прогнозованого стану. Паралельно повинен визначатися ризик з урахуванням імовірності події та прогнозованої тяжкості її наслідків. Поєднання показників ризику та достовірності дає змогу формувати рівень небезпеки з урахуванням не лише очікуваних наслідків, але й ступеня обґрунтованості самого прогнозу.

На завершальному етапі система визначає прогнозовану зону впливу, формує попередження та рекомендовані дії для зацікавлених сторін, що відповідає загальній логіці багатозагрозових систем раннього попередження [2]. Зворотний зв’язок забезпечує порівняння фактичного розвитку ситуації з прогнозом та адаптивне оновлення параметрів запропонованої моделі, поданої у вигляді системи. Інфраструктурну основу системи становлять комунікаційні засоби, ресурси опрацювання даних, бази даних, засоби кібербезпеки та механізми інтеграції із зовнішніми системами.

Науково-практична особливість підходу полягає у наскрізному врахуванні невизначеності, починаючи з отримання первинної інформації до формування прогнозу, оцінювання його достовірності та підтримки прийняття рішень. Модель створює основу для побудови кіберфізичних систем раннього попередження та виявлення надзвичайних ситуацій із подальшим прогнозуванням їх появи.

Список літератури

1. Mäkelburg J., Perez-Palacin D., Mirandola R., Acosta M. Surveying uncertainty representation: a unified model for cyber-physical systems. *Computing,* 2026, vol. 108, art. 68. doi: https://doi.org/10.1007/s00607-026-01657-6

2. Rokhideh M., Fearnley C., Budimir M. Multi-Hazard Early Warning Systems in the Sendai Framework for Disaster Risk Reduction: Achievements, Gaps, and Future Directions. *International Journal of Disaster Risk Science,* 2025, vol. 16, no. 1, pp. 103–116. doi: https://doi.org/10.1007/s13753-025-00622-9

ПОРІВНЯННЯ ТРАДИЦІЙНОГО ТА БАЙЄСІВСЬКОГО ПІДХОДІВ ДО ОЦІНЮВАННЯ ВІЛЬНИХ КОЛИВАНЬ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СИСТЕМИ

Перпері Л.М., Голобородько Г.М.
Одеса, Україна, perperi.l.m@op.edu.ua

Традиційний підхід до оцінювання вільних коливань, зокрема визначення частоти за екстремумами та загасання за логарифмічним декрементом, має суттєві обмеження щодо точності [1, 2]. Основна проблема такого підходу пов'язана з тим, що результати залежать від вибору точок, дискретизації та випадкової складової сигналу [3]. Суть наданої роботи полягає у порівнянні традиційного та байєсівського підходів до оцінювання частоти та характеристики загасання вільних коливань технологічної системи за експериментальними вимірювальними даними.

Експерименти проводили для технологічної системи «шпиндель – інструмент», вільні коливання збуджували ударною дією сталевої кулі в напрямку вздовж столу універсального фрезерного верстату ОММ 64S з ЧПК Sinumerik 802D. Для реєстрації реакції системи використовували безконтактну вимірювальну систему з двома взаємно перпендикулярними вимірювальними каналами Y та Z [4]. Канал за напрямком осі Z використовували як основний для визначення параметрів вільних коливань, оскільки він збігався з напрямком ударного збудження. Із часового запису виділяли післяударні ділянки вільного загасання, за якими здійснювали аналіз, як самостійних експериментальних реалізацій, із використанням традиційного графічного підходу.

Таке оцінювання параметрів вільних коливань ґрунтується на аналізі характерних точок експериментальної осцилограми, а частоту загасаючих вільних коливань визначали за часовим інтервалом між однойменними екстремумами сигналу з урахуванням кількості повних періодів між ними. Характеристику загасання оцінювали за логарифмічним декрементом [5]. За результатами графічного опрацювання було отримано частоту ≈ 208 Гц та логарифмічний декремент $\approx 0{,}32$. Але отримані результати із застосуванням способу оцінювання за окремими точками часового сигналу можуть залежати від вибору екстремумів, дискретизації сигналу та випадкової складової вимірювань. Тому доцільно порівняти традиційний підхід [5, 6] із байєсівським оцінюванням параметрів вільних коливань за всією сукупністю відліків виділеного фрагмента сигналу.

В основу байєсівського оцінювання покладено модель гармонічної складової вільних коливань з експоненційним загасанням та адитивною випадковою складовою. За результатами вимірювань у межах єдиної моделі одночасно оцінювали частоту загасаючих коливань, коефіцієнт експоненційного загасання, параметри гармонічної складової, постійну складову сигналу та стандартне відхилення випадкової залишкової складової. Для чисельного оцінювання апостеріорних розподілів параметрів застосовувався алгоритм NUTS (No-U-Turn Sampler), реалізований у бібліотеці PyMC. Логарифмічний декремент визначали за отриманими апостеріорними оцінками частоти та коефіцієнта експоненційного загасання, реалізація такого підходу дозволила поряд із оцінками параметрів

визначати характеристики апостеріорної невизначеності.

За результатами байєсівського оцінювання для основної серії із семи ударних реалізацій середнє значення частоти загасаючих вільних коливань становило ≈ 229 Гц, тоді як за графічним опрацюванням становило ≈ 208 ГЦ. Відмінність отриманих значень свідчить про чутливість результату до способу обробки експериментального сигналу та підтверджує доцільність подальшого дослідження параметрів вільних коливань із урахуванням невизначеності їх оцінювання. Запропонований підхід може бути використаний для подальшого вдосконалення методів опрацювання результатів вібраційних вимірювань.

Список літератури

1. Altintas Y. Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design. 2nd ed. Cambridge, Cambridge University Press, 2012. 366 p. doi: https://doi.org/10.1017/CBO9780511843723

2. Goloborodko G., Perperi L., Guhnin V., Palennyi Yu. Measurement of dynamic characteristics of technological system. *Odes'kyi Politechnichnyi Universytet. Pratsi*, 2016, issue 1(48), pp. 19–23. doi: https://doi.org/10.15276/opu.1.48.2016.04

3. Chin P., Veldhuis S.C. Modal identification of machine tool spindle units by output only operational modal analysis. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2025, vol. 139, no. 9–10, pp. 5043–5056. doi: https://doi.org/10.1007/s00170-025-16195-2

4. Оборський Г.О., Паленний Ю.Г., Гугнін В.П., Перпері Л.М., Голобородько Г.М. Пат. 106167 Україна, МПК G01B 7/14. Система для безконтактного вимірювання переміщень інструмента відносно оброблюваної деталі в процесі різання; власник Одеський національний політехнічний університет. № 201507209; заявл. 17.07.2015; опублік. 25.04.2016, Бюл. № 8. 4 с.

5. Голобородько Г.М., Перпері Л.М., Паленний Ю.Г., Мигущенко Р.П. Вимірювальний стенд для експериментального визначення параметрів вільних коливань. *Системи обробки інформації*. 2016. Вип. 3 (140). С. 48–51.

6. Perperi L., Holoborodko H. Evaluation of the vibration stability of a technological system as a prerequisite for ensuring the accuracy of precision hole machining. *Measuring and computing devices in technological processes*, 2026, no. 3, pp. 497–503. doi: https://doi.org/10.31891/2219-9365-2026-87-57

МЕТОДОЛОГІЯ ПОБУДОВИ ТА МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БІОМЕТРИЧНОЇ СИСТЕМИ НЕІНВАЗИВНОГО МОНІТОРИНГУ ТА РЕАБІЛІТАЦІЇ ЛЮДИНИ

Черкас А.І., Прохоренко С.
Львів, Україна

Розвиток інформаційно-вимірювальних технологій і методів штучного інтелекту створює передумови для побудови біометричних систем тривалого неінвазивного моніторингу функціонального стану людини. Такі системи мають забезпечувати не лише реєстрацію показників, а й їх накопичення, комплексне опрацювання та формування результатів для підтримки моніторингу і реабілітації.

Запропонована методологія передбачає модульну архітектуру, що може містити один або декілька незалежних сенсорних блоків. Кожний блок реєструє визначені біометричні, фізіологічні або рухові параметри. Це дає змогу адаптувати склад вимірювальних каналів до конкретного завдання та розширювати функціональні можливості системи без зміни її базової структури.

Отримані дані після первинного опрацювання передаються до єдиного інформаційного середовища і зберігаються з часовою прив’язкою. Синхронізація результатів різних сенсорних каналів забезпечує формування впорядкованих часових рядів та аналіз динаміки показників. Для централізованого накопичення поточних і ретроспективних даних доцільно використовувати хмарне середовище.

Інтелектуальне опрацювання накопиченої інформації здійснюється нейронною мережею, яка на основі поточних та попередніх вимірювань може виявляти закономірності, класифікувати стани, визначати відхилення і формувати прогнозні оцінки. Результати такого аналізу можуть використовуватися як інформаційна підтримка діагностичних та реабілітаційних рішень, тоді як остаточне клінічне рішення залишається за відповідним фахівцем.

Важливою складовою системи є метрологічне забезпечення, від якого безпосередньо залежить достовірність результатів інтелектуального аналізу. Воно передбачає калібрування і перевірку сенсорних блоків, оцінювання похибок та невизначеності вимірювань, контроль стабільності вимірювальних каналів і забезпечення простежуваності результатів. Необхідно також враховувати вплив похибок окремих сенсорів і часової синхронізації на результат нейромережевого опрацювання.

СЕКЦІЯ 2.

ЗАКОНОДАВЧА МЕТРОЛОГІЯ ТА МІЖНАРОДНЕ СПІВРОБІТНИЦТВО

TRANSFORMATION OF THE QUALITY INFRASTRUCTURE. DIGITAL REPRESENTATION AND VERIFICATION OF METROLOGICAL TRACEABILITY CHAINS

Malisevych V., Kepeschuk T., Serediuk D.
Ivano-Frankivsk, Ukraine, vitalii.malisevych@ifdcsms.com.ua

The digital transformation of quality infrastructure is driving the transition from traditional paper-based calibration records to machine-readable, interoperable, and verifiable digital data formats [1]. While Digital Calibration Certificates (DCCs) establish a standardized framework for representing calibration results, ensuring dependable digital verification of metrological traceability across the full calibration chain remains a complex task.

This study aims to develop and present the architecture of a web portal intended to automate the acquisition, storage, and access to metrological activity results in machine-readable form. The research object is the process of metrological data management, and the subject is the set of methods used to design a dedicated web-based resource that supports transparency and metrological traceability within a digital environment.

The software solution is built on a relational data model where metrological traceability is formalized as a directed acyclic graph. Within this structure, nodes represent reference standards and measuring instruments, whereas edges correspond to documented calibration events. Such a model makes it possible to accurately represent both simple linear chains and more complex branched calibration structures typical of advanced measurement systems, including gas metering systems.

The system is designed as a client–server web portal connected to a relational database, which ensures centralized data storage, controlled access, and automated handling of calibration information.

One of the principal strengths of the proposed approach is the direct integration of traceability verification into the web portal itself. In addition to verification, the portal provides users with an intuitive graphical visualization of traceability chains, thereby improving transparency and increasing trust in calibration outcomes. The system also preserves the full calibration history of each instrument, supports version management, and protects against inconsistent or unauthorized changes.

The proposed solution was implemented and tested at SE «IVANO-FRANKIVSKSTANDARTMETROLOGY», with particular attention given to instruments used for measuring gas volume and flow. The system enables automated traceability verification and facilitates the move from isolated best practices toward a standardized and interoperable digital quality infrastructure, creating a reliable basis for future DCC-based workflows.

References

1. Eichstaedt Sascha et al. Metrology for the digital age. Measurement: Sensors, 2021, vol. 18, 100232. doi: https://doi.org/10.1016/j.measen.2021.100232

ПРОБЛЕМНІ ПИТАННЯ КАТЕГОРІЙ ЗАКОНОДАВЧО РЕГУЛЬОВАНИХ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ

Петрище М.О., Мартинов І.В., Кудряшов В.О.
Одеса, Україна, autotat1972@ukr.net

Законодавство України складається із Закону України «Про метрологію та метрологічну діяльність» (далі – Закон) та ряду підзаконних нормативно-правових актів, серед яких є суперечливий перелік категорій законодавчо регульованих засобів вимірювальної техніки, що підлягають періодичній повірці (далі – перелік категорій ЗВТ). Цей перелік визначено Постановою КМУ від 4 червня 2015 р. № 374 (далі – Постанова) на виконання частини другої статті 17 Закону. Недосконаліть Постанови опосередковано підтверджується трьома змінами після її прийняття. Причому лише в останній зміні (через 10 років після прийняття Постанови) серед інших категорій виключено міри опору, індуктивності, взаємоіндуктивності та ємності, лічильники електричної енергії класу точності 0,01, які не можуть бути нічим іншим, як еталонами. Окрім виключення категорій також об’єднано декілька категорій, проте суперечливості цього переліку повністю не виключені, починаючи з визначення в Законі терміну «категорія», яке не відповідає визначенню в Міжнародному словнику законодавчої метрології [1].

Розглянемо лише основні недоліки зазначеного переліку.

1. Наказ Мінекономрозвитку від 21.12.2015 № 1719 «Про визначення норм часу на повірку» (далі – Наказ) фактично має перевагу перед Постановою, оскільки визначає конкретні види приладів у категоріях, при цьому інколи сумнівно, як наприклад, відносить кіловольтметри до категорії «11. Вимірювальні трансформатори».

При цьому слід зауважити, що найбільш простим і правильним було б не встановлення переліку категорій Постановою, з наступним заповненням категорій конкретними видами ЗВТ Наказом, а визначення переліку ЗВТ, що підлягають повірці безпосередньо центральним органом виконавчої влади, що формує державну політику у сфері метрології та метрологічної діяльності. Постанова не сприяє розумінню, які саме ЗВТ підпадають в ту чи іншу категорію, і без неї можна обійтись.

2. Враховуючи, що термін «категорія» в Законі визначається як «сукупність ЗВТ того самого призначення», то зазвичай не вдається сформулювати, як визначати «те саме призначення». Наприклад, якщо для лічильників електричної енергії та вимірювальних трансформаторів вважати за призначення облік електричної енергії, то вони мають знаходитись в одній категорії відповідно до цього призначення. З іншого боку, неможливо сформулювати одне і те саме призначення для приладів із категорії «54. Прилади для вимірювання розмірів довжини і площі (текстильних виробів, дротів, кабелів, смуг, листів, матеріалів, шкіри, стрічок, земельних ділянок), координатні засоби вимірювання», оскільки є мало схожого між світловіддалеміром та машиною шкіромірною.

Враховуючи, що в останній зміні до переліку категорій деякі категорії об’єднано, то це є зайвим підтвердженням сумнівності щодо розуміння, що вважати «тим самим призначенням».

3. Види діяльності, що належать до сфери законодавчо регульованої метрології, відповідно до статті третьої Закону України «Про метрологію та метрологічну діяльність», у Постанові застосовано поверхнево.

Наприклад, для такого виду, як реєстрація національних і міжнародних спортивних рекордів, зазначено лише для категорій: «19. Вимірювачі часу, частоти (частотоміри) та часових інтервалів», «50. Неавтоматичні зважувальні прилади», «69. Тахеометри». Цих категорій вкрай замало, оскільки, наприклад, технічні правила легкої атлетики [2] зобов’язують вимірювати швидкість вітру.

Так само недостатньо зазначено категорії, що відносяться до такого виду діяльності, як роботи, що виконуються за дорученням органів досудового розслідування, органів прокуратури та судів (далі – органи). Цей вид діяльності зазначений лише для категорій «6. Аналізатори спектра та характеристик систем зв’язку», «13. Вимірювачі вмісту алкоголю в крові та повітрі, що видихається», «25. Гирі», «50. Неавтоматичні зважувальні прилади» та «74. Термометри…», проте не враховано безліч інших ситуацій, коли вимірювання потрібно проводити саме для органів. Наприклад, якщо після купівлі кабелю замовник виявив, що його переріз не відповідає заявленому в технічній специфікації і справа розглядається в суді, то суддя відправить кабель на експертизу, де експерт буде застосовувати ЗВТ, який не відноситься до жодної категорії. Така сама ситуація буде виникати, наприклад, під час трудових спорів, які дійшли до суду, при вимірюванні вологості на робочому місці гігрометром (приміщенням із підвищеною небезпекою вважається таке, де вологість перевищує 75%), при цьому категорія «21. Вологоміри, гігрометри, гігрографи…» не містить посилання на вищенаведений вид діяльності.

З іншого боку, неможливо зрозуміти, як ЗВТ з категорії «54. Прилади для вимірювання розмірів довжини і площі…» можуть використовуватись для контролю стану навколишнього природного середовища.

Подібних прикладів можна навести безліч, тому в Постанові потрібно уникнути зазначення «видів діяльності».

Висновок. Враховуючи вищенаведене, вбачається доцільним, що норму Закону України «Про метрологію та метрологічну діяльність» щодо встановлення переліку категорій ЗВТ Кабінетом Міністрів України було виключено, а Постанову КМУ «Про затвердження переліку категорій законодавчо регульованих засобів вимірювальної техніки, що підлягають періодичній повірці» – скасовано.

Список літератури

1. International Vocabulary of Legal Metrology (VIML) – 2022 Edition. URL: http://viml.oiml.info/en/index.html

2. C1.1 & C2.1 – Competition Rules & Technical Rules. URL: https://worldathletics.org/about-iaaf/documents/book-of-rules

ПРОБЛЕМНІ ПИТАННЯ ТЕХНІЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ПОВІРКИ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ

Петрище М.О., Ковальчук В.О., Кудряшов В.О.
Одеса, Україна, autotat1972@ukr.net

Повірка засобів вимірювальної техніки відповідно до Закону України «Про метрологію та метрологічну діяльність» здійснюється більше 10 років, проте залишається невирішений ряд питань щодо регулювання цієї діяльності.

Проаналізуємо лише найбільш актуальні питання.

Відповідно до Порядку [1] повірку ЗВТ проводять згідно з методиками повірки, які містяться в нормативно-правових актах або національних стандартах, на які є відповідні посилання в нормативно-правових актах Мінекономіки. Проте всі методики, передбачені планом-графіком, затвердженим у 2016 р., не розроблені. При цьому суттєві наслідки від недостовірних результатів вимірювань відсутні, тому від розробки нових методик доцільно утриматись, а відповідні вимоги Порядку виключити.

Необхідно виключити дискримінаційну вимогу Порядку щодо розроблення методик повірки винятково науковими метрологічними центрами (далі – НМЦ), оскільки така робота є рутинною і не відповідає вимогам, що ставляться до наукової роботи.

Нечіткими і дискримінаційними також є ряд вимог, встановлених [2] щодо знань персоналу, відповідального за проведення повірки (далі – персонал). Зокрема, чітко не визначено, якою мірою необхідно знати «закони та інші нормативно-правові акти України у сфері метрології та метрологічної діяльності». Достатньо знань у межах функціональних обов’язків (і не більше).

Зайвою є вимога про знання персоналу про «принцип дії та конструкцію робочих еталонів… та … ЗВТ…», оскільки дотримання вимог експлуатаційних документів є необхідною і достатньою вимогою для правильної роботи.

Вимога щодо обов’язкового підвищення кваліфікації в НМЦ є дискримінаційною стосовно навчальних закладів та інших суб’єктів господарювання, які, відповідно до статті 4 Закону України «Про метрологію та метрологічну діяльність», є частиною метрологічної системи України.

Перелік подібних недоліків можна продовжувати.

Висновок. Державне регулювання щодо повірки вимагає перегляду.

Список літератури

1. Порядок проведення повірки законодавчо регульованих засобів вимірювальної техніки, що перебувають в експлуатації, та оформлення її результатів, затв. Наказом Мінекономрозвитку України від 08.02.2016 № 193.

2. Деякі питання щодо видачі свідоцтва про уповноваження на проведення повірки засобів вимірювальної техніки, що перебувають в експлуатації та застосовуються у сфері законодавчо регульованої метрології, затв. Наказом Мінекономіки від 30.06.2020 № 1242.

ПРАКТИЧНЕ ЗНАЧЕННЯ ЗАКОНОДАВЧИХ ЗМІН 2024–2026 РОКІВ ДЛЯ ДІЯЛЬНОСТІ НАУКОВИХ УСТАНОВ

Олійник А.Є., Прокопов О.В.
Харків, Україна, alla.oliinyk.82@ukr.net

Упродовж 2024–2026 років державна політика у сфері науки була спрямована на підвищення ефективності управління науковою діяльністю, забезпечення прозорості використання державних ресурсів та результатів їх використання, розвиток сучасної дослідницької інфраструктури та інтеграцію української науки до Європейського дослідницького простору.

Для наукових установ ці зміни мають практичне значення, оскільки вони впливають на організацію досліджень та порядок державної підтримки.

Одним із найважливіших законодавчих кроків у сфері наукової та науково-технічної діяльності стало прийняття Закону України від 25 лютого 2026 року № 4794-IX «Про внесення змін до Закону України "Про наукову і науково-технічну діяльність" щодо питань дослідницької інфраструктури та підтримки молодих учених» [1]. Цей Закон суттєво оновив правові засади функціонування наукових установ, адаптувавши їх до підходів Європейського дослідницького простору.

Систематизація та оптимізація дослідницької інфраструктури здійснюється для реалізації спільного користування унікальним науковим обладнанням, зокрема шляхом відкритого доступу через цифрові платформи, за європейським зразком. Закон № 4794-IX передбачає також відкритий доступ до результатів наукових досліджень (безоплатний доступ зі збереженням авторських та суміжних прав, який може бути обмежений лише у випадках, визначених законодавством).

Для забезпечення систематизації та відкритого доступу проводиться подальша цифрова трансформація наукової діяльності, ядром якої є розгортання Національної електронної науково-інформаційної системи. Ця система має на меті забезпечити прозорість наукових звітів, мінімізувати обіг паперових документів, сприяти інтегруванню українських баз даних до Європейської хмари відкритої науки. Система агрегує дані для проведення атестації наукових установ та закладів вищої освіти відповідно до удосконаленої системи оцінювання [2]. Зазначені кроки відповідають Національному плану щодо відкритої науки (Розпорядження КМУ № 892-р, 2022).

Цифрова трансформація та відкритість даних стали обов'язковими юридичними вимогами. Для наукових установ це означає необхідність розвитку своєї цифрової інфраструктури, забезпечення відкритого доступу до результатів наукових досліджень (крім випадків, визначених законодавством), удосконалення внутрішніх процедур управління дослідницькими даними.

Особливе значення для діяльності наукових установ має прийняття Закону України «Про академічну доброчесність» № 4742-IX від 18 грудня 2025 року [3], який уперше комплексно врегулював питання академічної доброчесності не лише у сфері освіти, а й у сфері науки. В цьому Законі, зокрема, визначено єдині принципи академічної доброчесності у науковій діяльності, запроваджено

інституційну відповідальність наукових установ, зазначено необхідність декларування використання технологій штучного інтелекту (ШІ) при отриманні наукового результату. До цього вимогу щодо декларування ШІ було прописано лише для здобувачів наукового ступеня доктора наук (Постанова КМУ № 928 від 30.07.2025 року), і стосувалася вона персонально здобувача, не накладаючи на наукові установи обов'язку розробки внутрішньої нормативно-правової бази.

Закон України «Про академічну доброчесність» суттєво посилив вимоги до якості наукових досліджень, внутрішнього контролю в наукових установах та дотримання міжнародних стандартів дослідницької етики. Наукові установи мають створити ефективні внутрішні механізми запобігання порушенням академічної доброчесності, визначити порядок розгляду відповідних звернень, забезпечити функціонування незалежних органів або комісій з питань академічної доброчесності, а також удосконалити процедури перевірки результатів наукової діяльності. Особливої актуальності набуває розроблення внутрішніх правил використання технологій ШІ під час проведення досліджень та підготовки наукових публікацій, що відповідає сучасним міжнародним підходам до дослідницької етики.

Висновки

Найважливішими напрямами реформ 2024–2026 років стали розвиток дослідницької інфраструктури, впровадження принципів відкритої науки, удосконалення державної атестації, підтримка молодих учених та інтеграція української науки до Європейського дослідницького простору.

Одним із перших етапів впровадження цих змін у діяльності наукових установ є адаптація внутрішньої нормативної бази. Наступні етапи вимагатимуть впорядкування та розвитку дослідницької інфраструктури, а також впровадження інструментів захисту академічної доброчесності, успішного проходження державної атестації за новими критеріями оцінювання наукової діяльності, інтеграції українських інституцій до Європейського дослідницького простору на основі оновлених правових стандартів.

Сучасні законодавчі зміни формують нову модель функціонування наукових установ, що ґрунтується на принципах відкритості, доброчесності, конкурентності, міжнародної співпраці та ефективного використання наукового потенціалу держави.

Список літератури

1. Про внесення змін до Закону України «Про наукову і науково-технічну діяльність» щодо питань дослідницької інфраструктури та підтримки молодих вчених. Закон України № 4794-IX (2026). URL: https://zakon.rada.gov.ua/go/4794-20 (дата звернення: 30.07.2026).
2. Деякі питання державної атестації наукових установ. Постанова КМУ № 465 від 26.04.2024. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/465-2024-%D0%BF#Text (дата звернення: 30.07.2026).
3. Про академічну доброчесність. Закон України № 4742-IX (2025). URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/4742-20 (дата звернення: 30.07.2026).

ЩОДО ТЕРМІНУ ОКУПНОСТІ ІНВЕСТИЦІЙ У НАВЧАННЯ ФАХІВЦІВ-МЕТРОЛОГІВ, НЕОБХІДНИХ ДЛЯ СТВОРЕННЯ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЇ НАЦІОНАЛЬНИХ ЕТАЛОНІВ

Олійник А.Є., Прокопов О.В., Солдатов В.В.
Харків, Україна, alla.oliinyk.82@ukr.net

Сучасний розвиток науки і техніки кардинально змінює метрологію: впроваджуються нові фізичні принципи, квантові технології та складні цифрові алгоритми створення, вдосконалення й використання еталонних засобів вимірювальної техніки. Постійне оновлення знань у галузі метрології потребує навчання фахівців, витрати на яке традиційно не виділяються окремо при оцінці економічної доцільності.

Під час створення або вдосконалення державних первинних (національних) еталонів (далі – ДПЕ), які мають бути визнаними на міжнародному рівні, необхідно враховувати сучасні світові тенденції, зокрема вимоги Міжнародної системи одиниць SI (далі – система SI). Внаслідок розвитку науки й технологій ці вимоги постійно змінюються. Остання редакція Брошури системи SI містить інформацію про фіксовані числові значення основних одиниць системи SI, реалізація яких має базуватися на застосуванні природних сталих, атомних процесів і квантових ефектів у метрології. Фахівці, які створюють та експлуатують сучасні ДПЕ, повинні мати необхідні знання за цими напрямами й постійно підвищувати кваліфікацію. Витрати на навчання слід враховувати під час оцінки економічної доцільності робіт зі створення (вдосконалення) ДПЕ.

У розроблених раніше в ННЦ «Інститут метрології» методиках оцінки економічної доцільності витрати на навчання окремо не виділялися [1]. Цю доповідь присвячено аналізу впливу таких витрат на термін окупності інвестицій у створення або вдосконалення сучасних ДПЕ.

Результати аналізу свідчать, що врахування витрат на підвищення кваліфікації персоналу забезпечує повнішу й реалістичнішу оцінку економічної доцільності робіт зі створення та вдосконалення ДПЕ. Навіть якщо вплив цих витрат на збільшення терміну окупності незначний, включення навчання та підвищення кваліфікації до планів робіт зі створення або вдосконалення ДПЕ є стратегічною вимогою з огляду на темпи розвитку науки й техніки.

Для науковця навчання та безпосередня наукова діяльність є єдиним нерозривним процесом, тому планування безперервного підвищення кваліфікації через наукову роботу є обов’язковою умовою збереження актуальності державних розробок в умовах швидких технологічних змін.

Список літератури

1. Прокопов О.В., Скляров В.В., Красоха Л.М., Олійник А.Є. Метрологія та економіка: обґрунтування оптимальних варіантів розвитку метрологічних систем за критерієм мінімуму необхідних витрат – огляд. *Український метрологічний журнал*. 2024. № 4. С. 58–64. doi: https://doi.org/10.24027/2306-7039.4.2024.319212

ПЕРЕВІРКА МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК АПАРАТІВ ШТУЧНОЇ ВЕНТИЛЯЦІЇ ЛЕГЕНЬ

Кепещук Т.В., Малісевич В.В., Юрків Я.А., Галабурда М.М.

Івано-Франківськ, Україна, ktv.metr77@gmail.com

Сучасну медичну практику важко уявити без засобів діагностики, терапії та вимірювальних приладів: починаючи від звичайних термометрів, тонометрів, кардіографів і закінчуючи складними сучасними комплексами – апаратами штучної вентиляції легень, апаратами для ультразвукового дослідження тощо.

Апарат штучної вентиляції легень (ШВЛ) – пристрій, призначений для подачі дихальної суміші пацієнту при порушенні дихальної функції чи анестезії. Апарати ШВЛ повинні відповідати вимогам ISO 80601-2-12:2023 [1]. Основними характеристиками апаратів ШВЛ є величина потоку дихальної суміші чи хвилинна вентиляція, об’єм, частота вдихів та тиск у дихальному контурі.

Апарат ШВЛ – складний пристрій, в якому потік та склад дихальної суміші контролюються електронними системами, а вимірювання здійснюються давачами різного принципу дії. Перевірка метрологічних характеристик (МХ) таких складних систем дає можливість впевнитися в правильності їх функціонування і забезпечення вихідних параметрів згідно з встановленими значеннями, що в свою чергу гарантуватиме життєву безпеку пацієнтів, точність подачі дихальних сумішей.

Перевірка метрологічних характеристик апаратів ШВЛ здійснюється шляхом порівняння заданих або індикованих апаратом ШВЛ значень параметрів із результатами вимірювань за допомогою контрольного вимірювального обладнання.

При проведенні перевірки МХ апаратів ШВЛ зазвичай використовують:

- аналізатор параметрів апаратів ШВЛ;
- еталонний давач витрати та об’єму потоку;
- еталонний/контрольний манометр або калібратор тиску;
- аналізатор концентрації кисню;
- тестове навантаження або «штучну легеню»;
- засоби контролю температури, вологості та атмосферного тиску.

Перевірка МХ апаратів ШВЛ включає до себе такі операції:

- зовнішній огляд та перевірка комплектності;
- прогрівання апарата та аналізатора;
- під’єднання через штатний дихальний контур до аналізатора й тестової легені;
- вимірювання у визначених режимах і в кількох контрольних точках;
- порівняння отриманих значень із встановленими;
- перевірка аварійних сигналів;
- оформлення свідоцтва та/або протоколу перевірки МХ.

Список літератури

1. ISO 80601-2-12:2023 – Medical electrical equipment – Part 2-12: Particular requirements for basic safety and essential performance of critical care ventilators.

МЕТОД ФОРМУВАННЯ УПРАВЛІНСЬКИХ РІШЕНЬ ЗА ПОКАЗНИКАМИ ЯКОСТІ ПРОДУКЦІЇ ТА ПОСЛУГ В ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІЙ СИСТЕМІ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ

Завербний С.А., Топчак Н.В.
Львів, Україна, serhii.zaverbnyi.asp.2025@lpnu

Сучасні процеси виробництва та надання послуг супроводжуються значним обсягом інформації про якість, отриманої за результатами вимірювань, контролю, випробувань, експертного та споживчого оцінювання. Цифровізація управління зумовлює необхідність інтегрованого опрацювання цих даних для своєчасного виявлення відхилень і формування обґрунтованих управлінських рішень [1, 2]. Особливої актуальності це набуває в умовах євроінтеграції України та розвитку підходів Quality 4.0 [3, 4].

Аналіз сучасних підходів до управління якістю показує використання багатокритеріального прийняття рішень, нечіткої логіки, експертних систем, машинного навчання та інтелектуального аналізу даних. Поєднання MCDM і машинного навчання застосовується для оцінювання якості та підтримки вибору управлінських альтернатив [5]. Досліджуються також системи вимірювання результативності та управління якістю в умовах Data-Driven Industry 4.0 [6]. Водночас відомі підходи переважно зосереджені на окремих завданнях оцінювання, прогнозування, класифікації або ранжування. Недостатньо представлено цілісний перехід від показників якості до управлінського рішення та контролю його результативності.

Основою такого переходу є структурована множина показників якості продукції або послуг, для яких враховуються фактичні та нормативні або цільові значення, допустимі відхилення, вагомість і критичність. Це дає змогу не лише визначати відповідність установленим вимогам, а й встановлювати показники, відхилення яких потребують управлінського втручання.

Запропонований метод передбачає послідовне виконання взаємопов’язаних етапів: збір та інтеграцію інформації про якість; формування множини показників; інтелектуальне опрацювання та комплексне оцінювання. На етапі опрацювання визначаються відхилення фактичних значень від цільових, нормалізуються показники, враховуються їх вагомість і критичність та встановлюються взаємозв’язки між характеристиками. Результатом є структурована інформація про стан якості та виявлені невідповідності.

Виявлення критичних відхилень забезпечує перехід від оцінювання до формування управлінського рішення. Для проблемної ситуації формується множина альтернатив, спрямованих на усунення причин невідповідності або зниження її впливу. Їх вибір здійснюється за сукупністю критеріїв, зокрема очікуваним впливом на показники якості, ресурсоємністю, ризиком і часом реалізації. Інтелектуальні процедури багатокритеріального аналізу забезпечують порівняння альтернатив відповідно до встановлених умов та обмежень.

Важливою складовою методу є зворотний зв’язок. Після реалізації рішення здійснюється контроль зміни показників якості та їх повторне оцінювання.

Таким чином, формується замкнений цикл «дані про якість → оцінювання показників → виявлення відхилень → формування альтернатив → вибір рішення → контроль результату → повторне оцінювання». Це дає змогу враховувати результати попередніх управлінських дій під час подальшого оцінювання.

Отже, запропонований підхід інтегрує оцінювання показників якості та формування управлінського рішення в межах єдиного інтелектуального процесу. Його особливістю є використання сукупності показників якості не лише для визначення стану продукції або послуг, а й для виявлення критичних відхилень, формування та порівняння управлінських альтернатив і контролю результативності прийнятого рішення. Це створює основу для підвищення обґрунтованості та оперативності управління якістю продукції та послуг.

Список літератури

1. Topchak N.V., Zaverbnyi S.A. Intelligent information and measurement systems for managerial decision support in the context of digitalization. *Управління якістю в освіті та промисловості: досвід, проблеми та перспективи: тези доповідей VII Міжнар. наук.-практ. конф.* Львів, 2025. С. 261–262.

2. Топчак Н.В., Завербний С.А. Інтелектуальні системи управління якістю як драйвер цифрового трансформування підприємництва. *Національна економіка в умовах війни: безпека та розвиток: зб. тез Всеукр. наук.-практ. конф.* Львів, 2025. С. 444–447.

3. Antonino P.O., Capilla R., Pelliccione P. et al. A Quality 4.0 Model for architecting industry 4.0 systems. *Advanced Engineering Informatics*, 2022, vol. 54, art. 101801.

4. Ingaldi M., Prajová V., Lestyánszka Škůrková K., Ulewicz R. Comparative Assessment of Industry 4.0 and Quality 4.0 Implementation in Poland and Slovakia: Determinants, Maturity and Challenges. *Sustainability*, 2026, vol. 18, no. 13, art. 6758. doi: https://doi.org/10.3390/su18136758

5. Ma Q., Li H. A decision support system for supplier quality evaluation based on MCDM-aggregation and machine learning. *Expert Systems with Applications*, 2024, vol. 242, art. 122746. doi: https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.122746

6. Tambare P., Meshram C., Lee C.-C., Ramteke R.J., Imoize A.L. Performance Measurement System and Quality Management in Data-Driven Industry 4.0: A Review. *Sensors*, 2022, vol. 22, no. 1, art. 224. doi: https://doi.org/10.3390/s22010224

ОЦІНЮВАННЯ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ВИМІРЮВАННЯМИ

Петрище М.О., Кудряшов В.О.
Одеса, Україна, autotat1972@ukr.net

Однією з найпоширеніших послуг для вимірювальних лабораторій є їхня оцінка технічної компетентності, яка базується на документальному засвідченні відповідності вимогам ДСТУ EN ISO 10012:2022 [1] або ДСТУ ISO 10012:2005, які є ідентичними стандарту ISO 10012:2003. Цей стандарт скасовано Міжнародною організацією зі стандартизації з 12.02.2026 р., а натомість того ж дня надано чинності (опубліковано) ISO 10012:2026 [2].

Важливість впровадження нового стандарту підтверджується швидким прийняттям відповідних національних стандартів у європейських країнах, наприклад, надано чинності: з 01.04.2026 р. у Словаччині (SIST EN ISO 10012:2026), з 17.03.2026 р. у Болгарії (БДС EN ISO 10012:2026), з 28.02.2026 р. у Великій Британії (BS EN ISO 10012:2026). Така оперативність не є дивною, оскільки стадії публікації передували 6 етапів (від попереднього етапу до етапу прийняття), причому голосування за проєкт тривало з 25.09.2024 по 18.12.2024 р.

Цей стандарт є корінною переробкою попереднього та містить цілий ряд нових суттєвих настанов, серед яких:

• оптимізація встановлення міжкалібрувальних інтервалів (запропоновано чотири методи: від застосування методу встановлення фіксованого інтервалу до методу, що базується на ризиках, пов’язаних із потенційним впливом недостовірних результатів вимірювань);

• урахування невизначеності при прийнятті рішення про відповідність, зокрема встановлення захисних смуг (практичне застосування ILAC-G8:09/2019).

Найбільш суттєвою відмінністю нового стандарту є те, що він орієнтований не безпосередньо на вимірювальну лабораторію, а на всі служби підприємства, що відіграють будь-яку роль у забезпеченні вимірювань (від служб управління та планування до закупівель та виробництва).

Враховуючи зацікавленість лабораторій в оцінюванні за вимогами ДСТУ EN ISO 10012:2022 або ДСТУ ISO 10012:2005 (це одна і та сама послуга), існує потреба і в негайному прийнятті ISO 10012:2026 (у цьому насамперед зацікавлені суб’єкти господарської діяльності, орієнтовані на іноземних споживачів).

Список літератури

1. ДСТУ EN ISO 10012:2022. Системи керування вимірюванням. Вимоги до процесів вимірювання та вимірювального обладнання (EN ISO 10012:2003, IDT; ISO 10012:2003, IDT).

2. ISO 10012:2026. Quality management – Requirements for measurement management systems.

АКТУАЛЬНІ ПИТАННЯ ОРГАНІЗАЦІЇ ВЗАЄМОДІЇ МЕТРОЛОГІЧНОЇ СЛУЖБИ В СИСТЕМІ МІНІСТЕРСТВА ОБОРОНИ УКРАЇНИ ТА НАЦІОНАЛЬНОЇ МЕТРОЛОГІЧНОЇ СЛУЖБИ УКРАЇНИ

Меркулов О.А, Мироненко О.В., Ніколенко В.В.
Харків, Україна, o.myronenko@post.mil.gov.ua

Тривала збройна агресія росії виявила низку проблемних питань в організації метрологічної діяльності під час дії воєнного стану, пов'язаних у тому числі з відсутністю чіткої та зрозумілої взаємодії метрологічної служби в системі Міністерства оборони (далі – МО) України та національної метрологічної служби України.

Порядок взаємодії з органами національної метрологічної служби (метрологічними службами підприємств національної економіки) під час дії воєнного стану повинен визначатися окремим Положенням, погодженим з центральним органом виконавчої влади, що забезпечує формування державної політики у сфері метрології та метрологічної діяльності та центральним органом виконавчої влади, що реалізує державну політику у сфері метрології та метрологічної діяльності.

Взаємодія з органами національної метрологічної служби (метрологічними службами підприємств національної економіки) під час дії воєнного стану повинна спрямовуватися на реалізацію наступних напрямів.

1. Використання ресурсних можливостей органів національної метрологічної служби (метрологічних служб підприємств національної економіки):

• використання потужностей калібрувальних (повірочних) та ремонтних органів для потреб Збройних Сил України (далі – ЗС України);

• залучення фахівців калібрувальних (повірочних) та ремонтних органів до проведення невідкладних заходів з метрологічного забезпечення військ (сил);

• використання ЗВТ калібрувальних (повірочних) органів для потреб військових метрологічних лабораторій (далі – ВМЛ) ЗС України;

• використання мобілізаційного ресурсу цих органів для комплектування персоналом ВМЛ ЗС України.

2. Визначення доцільності та можливості проведення заходів із резервування еталонної бази ЗС України.

3. Першочергове та безоплатне проведення робіт із калібрування та ремонту певної (обмеженої) номенклатури ЗВТ ВМЛ ЗС України.

Зазначені особливості необхідно враховувати під час підготовки відповідних плануючих, керівних та розпорядчих документів з організації метрологічного забезпечення ЗС України під час дії воєнного стану.

Врахування вищеперелічених особливостей виконання метрологічних робіт під час дії воєнного стану забезпечить раціональне використання всіх наявних сил і засобів метрологічного забезпечення, своєчасне отримання достовірної вимірювальної інформації про параметри виробів озброєння та військової техніки для їх ефективного бойового застосування.

МЕТОД ВИБОРУ СТРАТЕГІЇ КОНТРОЛЮ ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ

Осечко Н.М., Бубела Т.З.
Львів, Україна, nazar.m.osechko@lpnu.ua, tetiana.z.bubela@lpnu.ua

У сучасних умовах розвитку автомобілебудівної галузі забезпечення високого рівня якості продукції є одним із ключових факторів конкурентоспроможності підприємств. Вимоги до точності виготовлення автокомпонентів, їх надійності та безпеки постійно зростають, що обумовлює необхідність удосконалення систем контролю якості на всіх етапах виробництва [1, 2]. Важливу роль у цьому процесі відіграють вимірювальні системи, які забезпечують отримання інформації про параметри продукції та слугують основою для прийняття рішень щодо її відповідності встановленим вимогам. На практиці оцінка вимірювальних систем здійснюється в рамках підходів аналізу вимірювальних систем (Measurement System Analysis, MSA), які передбачають визначення таких показників, як повторюваність і відтворюваність (GRR), зміщення та лінійність [3]. Проте зазначені підходи, хоча й дозволяють оцінити придатність вимірювальної системи, не дають відповіді на питання вибору оптимальної стратегії контролю в конкретних виробничих умовах.

Аналіз існуючих підходів показує, що вибір між суцільним, вибірковим, автоматизованим або комбінованим контролем часто здійснюється суб’єктивно, без належного обґрунтування та врахування комплексу факторів. Традиційні підходи, засновані на стандартних настановах AIAG MSA та VDA 5, пропонують уніфіковані порогові рішення, що не враховують економічні ризики та специфіку конкретного технологічного процесу. Основними недоліками є розрив між процедурами MSA та практикою прийняття рішень, відсутність системного врахування типу параметра (атрибутивний чи змінний), ігнорування впливу умов вимірювального середовища (освітленість, людський фактор, стабільність) та відсутність комплексного оцінювання ризиків прийняття хибних рішень щодо якості.

Для подолання цих обмежень запропоновано метод вибору оптимальної стратегії контролю вимірювальних систем, який базується на комплексному врахуванні характеристик об’єктів контролю та умов проведення вимірювань на підприємствах автомобілебудування. В основу підходу покладено поєднання інструментів MSA, методів багатокритеріального прийняття рішень та системного аналізу [4]. Процес вибору стратегії контролю формалізовано як задачу багатокритеріальної оптимізації серед чотирьох альтернатив: суцільного, вибіркового, автоматизованого та комбінованого контролю. Для визначення вагових коефіцієнтів факторів застосовано метод аналізу ієрархій (AHP) [5] із залученням групи експертів у сфері метрології та управління якістю. Валідність отриманих даних підтверджено розрахунком відношення узгодженості ($CR \leq 0{,}10$). Розрахунок інтегральної оцінки кожної альтернативної стратегії здійснювався шляхом зваженого підсумовування нормалізованих показників за визначеними критеріями.

У результаті побудови ієрархічної моделі та нормалізації власних векторів матриці попарних порівнянь отримано результуючий вектор вагових коефіцієнтів для чотирьох основних критеріїв: метрологічні характеристики вимірювальної системи отримали вагу 0,44; характеристики об'єкта контролю – 0,22; ризики прийняття хибних рішень – 0,22; умови вимірювального середовища – 0,13. Це підтверджує визначальну роль метрологічної придатності та оцінки ризиків під час формування стратегії контролю в автомобілебудуванні.

Апробацію розробленого методу проведено на підприємстві галузі при виготовленні кабельно-провідникової продукції за двома типовими сценаріями:

1. Контроль критичної змінної ознаки (висота дротяного кримпу). При використанні базового засобу вимірювань (стандартного мікрометра) показник повторюваності та відтворюваності %GRR становив близько 25%, що вказувало на високу варіабельність. Інтегральна оцінка за розробленим методом показала перевагу суцільного (100%) контролю над вибірковим через високий ризик пропуску дефекту. Впровадження модифікованого штангенциркуля з постійним зусиллям дозволило знизити %GRR до 9,2%. Завдяки підвищенню метрологічної придатності інтегральна оцінка вибіркового контролю зросла з 0,518 до 0,865, що надало обґрунтовану можливість відмовитися від суцільного контролю на користь статистичного вибіркового контролю (SPC) без підвищення ризиків.

2. Контроль атрибутивної ознаки (наявність та правильність укладання ущільнювачів автокомпонентів). Дослідження показало критичну залежність атрибутивного контролю від умов середовища, зокрема освітленості. За низького рівня освітленості (менше 300 lx) втомлюваність оператора погіршувала показники відтворюваності, знижуючи інтегральну оцінку ручного контролю. Метод вказав на необхідність або переходу до автоматизованого контролю, або стандартизації робочого місця шляхом підвищення освітленості понад 750 lx, що підвищило якість та надійність ручного контролю до належного рівня.

Таким чином, розроблений метод забезпечує комплексний та науково обґрунтований підхід до вибору стратегії контролю, усуває суб'єктивізм та шаблонне застосування настанов MSA, дозволяючи мінімізувати виробничі витрати та ризики прийняття помилкових рішень на автомобілебудівних підприємствах.

Список літератури

1. IPC/WHMA-A-620. Requirements and Acceptance for Cable and Wire Harness Assemblies. URL: https://shop.electronics.org/ipcwhma-a-620

2. IATF 16949:2016. Quality management system requirements for automotive production. URL: https://www.aiag.org/expertise-areas/quality/iatf-16949-2016

3. De Oliveira Silva Soares W., Peruchi R.S., Silva R.A.V., Rotella Junior P. Gage R&R studies in measurement system analysis: A systematic literature review. *Quality Engineering*, 2022, vol. 34, no. 3, pp. 382–403.

4. Hall A.N. Engineering Systems Analysis. Springer, 2021.

5. Topcu Y.I., Unver B., Isik M., Kabak O. An AHP based prioritization model for risk evaluation factors in the automotive industry. *International Journal of the Analytic Hierarchy Process*, 2018, vol. 10, no. 1.

APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNOLOGIES TO INCREASE THE EFFICIENCY OF TRAINING OF STUDENTS OF THE FACULTY OF DENTAL TECHNOLOGY

Tomilina T., Starkova I., Shushlyapina N., Trotsenko O.
Kharkiv, Ukraine, iv.starkova@knmu.edu.ua

Studying in the educational program «Dentistry» (Master's) involves mastering many mandatory and elective educational components. The work is based on the productive activity of the departments, the effectiveness of which determines the training of competitive dental specialists.

During the mastery of individual disciplines by students, many objective and subjective problems arise that impede the full effectiveness of training, in particular, leading to incomplete mastery of the material. The Dean's Office of the Faculty is engaged in identifying risk factors for the emergence of academic debt among students based on the analysis of data provided by respective departments.

Information about the training of students, which the Dean's Office receives from the departments, is sometimes contradictory and unsystematic. In addition, a clear personalization is not determined in accordance with individual students, which does not allow making informed and appropriate decisions regarding the learning process. The use of conventional tools is not enough to solve a specific problem.

In recent years, researchers have increasingly proposed the active involvement of artificial intelligence in order to implement an individualized approach with the subsequent formation of educational trajectories and prediction of the success of education seekers. An idea of the educational environment as a whole is being built [1, 2].

Artificial intelligence tools are used to administer data on the educational process at the Faculty of Dentistry of Kharkiv National Medical University. Today, artificial intelligence (AI) acts as an analytical tool for decision-making by the Dean's Office staff to solve a number of problems: first of all, the formation of a risk group regarding incomplete assimilation of educational material. In addition, a clear idea is being built of which sections of the educational component are difficult for students to master and according to what parameters: lecture material, practical skills, independent work, or other components of the educational process.

That is, through the use of AI, situations that may arise as a result of identified violations in the educational process are simulated. This technique acts as predictive analytics of the emergence of academic risks. At the same time, a matrix of decisions for the Dean's Office is formed, which is justified and based on the analytical directions of AI calculations. Schematically, the modeling of decisions can be presented as a sequence of components: student/risk group – problematic educational component – problem characteristics – assumptions – recommendations for leveling the problem – indicator of control over the actions taken (mainly at departments).

Thanks to the data obtained with the help of AI, the Dean's Office provides specific recommendations to departments that contribute to improving the learning of education seekers. As a result of the use of AI tools, the individual plan of the education

seeker is adjusted with a change of focus towards educational components where problems arise with assimilation.

References

1. Sajja R., Sermet Y., Cwiertny D. et al. Integrating AI and Learning Analytics for Data-Driven Pedagogical Decisions and Personalized Interventions in Education. *Tech Know Learn*, 2026, vol. 31, pp. 1289-1319. doi: https://doi.org/10.1007/s10758-025-09897-9

2. Cabral L., Pinto R. & Gonçalves G. AI-powered learning analytics dashboards: a systematic review of applications, techniques, and research gaps. *Discover Education*, 2025, 4:525. doi: https://doi.org/10.1007/s44217-025-00964-y

СЕКЦІЯ 3.

ТЕРМОМЕТРІЯ, ФОТОМЕТРІЯ ТА РАДІОМЕТРІЯ

РЕАЛІЗАЦІЯ РЕПЕРНИХ ТОЧОК СРІБЛА ТА МІДІ ДЛЯ БЕЗКОНТАКТНОЇ ТЕРМОМЕТРІЇ

Сергієнко Р.П., Пущин Р.В., Скляров В.В.
Харків, Україна, rymma.sergiyenko@metrology.kharkov.ua

У діапазоні вище 1234,93 К відтворення Міжнародної температурної шкали МТШ-90 ґрунтується на реалізації температур тверднення чистих металів – реперних точок срібла, золота та міді [1].

Реперна точка являє собою графітовий тигель, заповнений чистим металом, який має порожнину моделі абсолютно чорного тіла. Тигель із захисними елементами розташовують у печі, режими нагріву та охолодження якої дозволяють реалізувати фазові переходи тверднення чистого металу, які реєструють безконтактними методами та які є базою для подальшої екстраполяції температурної шкали відповідно до закону Планка.

В ННЦ «Інститут метрології» зберігаються та застосовуються державні еталони одиниці температури за випромінюванням у видимому та інфрачервоному діапазонах відповідно. До складу цих еталонів входить обладнання для реалізації фазових переходів тверднення реперних точок срібла та міді.

Час експлуатації еталонів закономірним чином впливає на стан реперних металів та графітових тиглів. Для забезпечення працездатності державних еталонів проведено комплекс робіт щодо їх удосконалення, зокрема виконано заміну реперної точки міді та еталонного пірометра-компаратора.

Метою дослідження є підтвердження характеристик державних еталонів у частині реалізації температур реперних точок міді та срібла. Наведено опис оновленої реперної точки міді. Розглянуто конструкції графітових тиглів із захисними елементами та випромінювачів для реперних точок. Наведено результати реалізацій температур фазових переходів тверднення срібла та міді та особливості обробки експериментальних даних по плато тверднення, отриманих за допомогою прецизійного лінійного пірометра LP-4 [2]. Проведено оцінку стандартної невизначеності за типом А та наведено бюджети невизначеності вказаних реалізацій. Показано, що значення розширеної невизначеності (k = 2, p = 0,95) реалізації температури фазового переходу тверднення міді зменшено майже на 40% у порівнянні з 2013 р. [3].

Список літератури

1. Guide to the realization of the ITS-90. Fixed points for radiation thermometry. BIPM, 2018. Available at: https://www.bipm.org/en/committees/cc/cct/guides-to-thermometry

2. Serhiienko R., Pushchyn R., Skliarov V. Study of an improved copper fixed point using the LP4 Linear Pyrometer. *Ukrainian Metrological Journal*, 2025, no. 4, pp. 37–43. doi: https://doi.org/10.24027/2306-7039.4.2025.348014

3. Realizations of the ITS-90 at 1084.62 °C. BIPM, 2014. Available at: https://www.bipm.org/kcdb/ comparison?id=1038

ВИЯВЛЕННЯ ПЛАТО ПЛАВЛЕННЯ У САМОВАЛІДОВАНИХ ТЕРМОПАРАХ МЕТОДАМИ МАШИННОГО НАВЧАННЯ

Півненко С.М., Пущин Р.В.
Харків, Україна, spivnenko@gmail.com

Термопари є основним засобом контактного вимірювання температури в промисловості, проте за тривалого впливу високих температур, агресивного середовища та вібрації матеріал термоелектродів деградує, унаслідок чого градуювальна характеристика змінюється. Величина дрейфу апріорі невідома, а показ приладу залишається правдоподібним, тому похибка виявляється лише під час чергової перевірки. Самовалідовані термопари усувають цю невизначеність конструктивно: поблизу вимірювального спаю розміщують мініатюрну комірку фазового переходу – тигель з металом відомої температури плавлення. Під час проходження процесу через цю температуру прихована теплота фазового переходу стримує зростання показів, і на записі утворюється характерне плато плавлення (melting plateau). Оскільки температура плавлення реперного металу відома, показ приладу на плато дає змогу виконати перекалібрування безпосередньо на робочому місці, без демонтажу первинного перетворювача [1].

Практичне впровадження такої схеми стримується необхідністю локалізувати плато на записі; ця операція виконується оператором. Плато не є строго ізотермічною ділянкою: воно має нахил, форма якого залежить від режиму печі, а тривалість може змінюватися в рази. Водночас промисловий цикл нагріву містить численні інші зміни швидкості зростання температури – паузи, перемикання потужності, виходи на витримку. Через це алгоритми, побудовані на порогових значеннях першої похідної температури за часом, дають або пропуски, або надмірну кількість хибних спрацювань. Застосування машинного навчання до цієї задачі запропоновано в [2].

Метою роботи є автоматизація виявлення плато плавлення на температурних часових рядах самовалідованих термопар. У запропонованому підході задачу сформульовано як бінарну класифікацію відліків часового ряду з подальшим об'єднанням позитивних відліків у сегменти. Перед обчисленням ознак кожен запис нормують за власними мінімальним і максимальним значеннями, унаслідок чого класифікатор оперує формою кривої, а не абсолютними значеннями. Це забезпечує незалежність моделі від одиниць вимірювання та робочого діапазону: одну модель було застосовано до записів, поданих у мілівольтах, вольтах і градусах Цельсія, а перехід до іншого реперного металу зводиться до підстановки його табличної температури на етапі інтерпретації результату.

Запропонований детектор влаштовано так. З кривої обчислюють кілька десятків величин, кожна з яких описує окрему прикмету фазового переходу: наскільки сповільнилося зростання температури, як довго воно лишається сповільненим, чи різко прискорилося воно після того, чи продовжує температура зростати далі. Остання прикмета відрізняє плато від злому кривої поблизу максимуму циклу: після плавлення настає нагрів розплаву, а після максимуму – охолодження. Ці величини подають на вхід деревам рішень – наборам простих

порівнянь із порогами; кілька таких наборів об'єднано в ансамбль, і остаточною відповіддю є їхня узгоджена думка.

Дослідження виконано на 17 записах промислових циклів нагріву, у яких експертно розмічено 22 плато плавлення. Для оцінювання застосовано перехресну перевірку з відкладанням цілого запису: модель навчається на шістнадцяти записах і перевіряється на сімнадцятому, що не використовувався під час навчання, з повторенням для кожного запису. Такий поділ є принциповим, оскільки сусідні відліки одного плато статистично залежні, і випадковий розподіл окремих відліків між навчальною та контрольною вибірками призводить до завищеної оцінки якості.

За результатами перехресної перевірки плато виявлено в усіх записах набору. Узагальнена міра збігу з експертною розміткою (F-міра) становить 0,85 за сегментного перекриття 0,73; основна частина похибки припадає при цьому не на пропуск плато, а на неточність визначення його меж. Якість помітно змінюється від запису до запису, що пов'язано з неоднорідністю умов реєстрації. Отримані показники свідчать, що локалізація плато може виконуватися без участі оператора, а результат обробки стає відтворюваним.

Показано, що для автоматичного виявлення плато плавлення у самовалідованих термопарах достатньо невеликого набору фізично інтерпретованих ознак у поєднанні з моделями машинного навчання на деревах рішень, причому визначальним чинником є саме формулювання ознак, а не складність моделі чи обсяг навчальних даних. Обмеженнями роботи є незначний обсяг розміченого матеріалу, що зумовлює широкі довірчі межі оцінок, та недостатня універсальність частини ознак, які використовують подальший хід кривої: у наявному вигляді метод призначено для аналізу завершеного циклу. Подальші дослідження передбачають розширення розміченого набору, побудову універсального простору ознак для роботи в реальному часі та поширення підходу на плато кристалізації. Ключовим наступним етапом є перехід від виявлення плато до визначення температури початку плавлення та оцінювання її невизначеності [2]: без метрологічно обґрунтованого інтервалу отримане значення не може бути покладене в основу процесу перекалібрування.

Список літератури

1. Pearce J.V., Ongrai O., Machin G., Sweeney S.J. Self-validating thermocouples based on high temperature fixed points. *Metrologia*, 2010, Vol. 47, no. 1, pp. L1–L3. doi: https://doi.org/10.1088/0026-1394/47/1/L01

2. Bilson S., Thompson A., Tucker D., Pearce J. A machine learning approach to automation and uncertainty evaluation for self-validating thermocouples. *AIP Conf. Proc.*, 2024, vol. 3230, 090011. doi: https://doi.org/10.1063/5.0235318

ПІДХІД ДО ЗАСТОСУВАННЯ АЛГОРИТМІВ МАШИННОГО НАВЧАННЯ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ ДАВАЧІВ ІЗ САМОКАЛІБРУВАННЯМ

Пущин Р.В., Півненко С.М., Юр'єв А.О.
Харків, Україна, roman.pushchin@metrology.kharkov.ua

Термопари широко використовуються в промисловості на шкідливих виробництвах у критичних точках. Проте вони особливо схильні до дрейфу калібрування в суворих умовах експлуатації, де постійний ручний контроль неможливий. Виходом із цієї складної ситуації є використання термопар із функцією самоперевірки. Вони конструктивно складаються з мініатюрної чарунки з чистим металом (реперною точкою), яка розташована в безпосередній близькості до вимірювального спаю (робочого кінця) термопари та термопари типу S у корпусі. Реперна точка являє собою тигель із металевим зливком масою кілька грамів, що має відому температуру плавлення [1]. Основна проблема полягає в тому, що плато фазового переходу такої малої кількості металу не є достатньо пласким, і має певні труднощі з автоматичним (комп'ютерним) розпізнаванням за рахунок значного дрифту.

ННЦ «Інститут метрології» вже мав досвід роботи з давачами із самокалібруванням, проте спроба їх інтеграції в повністю автоматизовані системи здійснюється вперше. Дослідження проводяться в рамках європейської програми EMPIR (European Metrology Programme for Innovation and Research) за проєктом «ThermoSI» спільно з Національною фізичною лабораторією Великої Британії (NPL) [2] для створення надійних автоматизованих вимірювальних комплексів нового покоління.

Метою цього дослідження є пошук та тестування алгоритмів машинного навчання, придатних для автоматизації давачів із функцією самокалібрування, а також паралельне тестування високотемпературних давачів різної конфігурації для оптимізації конструкції. Розглянуто конструкції готового виробу, що складається з термопари та чарунки чистого металу з різновидами захисних елементів [3]. Наведено опис процесу плавлення металу та вимірювання показів термопари. Також наведено результати реалізацій температур фазових переходів міді та особливості обробки експериментальних даних по плато з використанням алгоритмів машинного навчання.

Список літератури

1. Guide to the Realization of the ITS-90. Metal Fixed Points for Contact Thermometry. BIPM, 2021. URL: https://www.bipm.org/en/committees/cc/cct/guides-to-thermometry

2. Bilson S., Thompson A., Tucker D., Pearce J. A machine learning approach to automation and uncertainty evaluation for self-validating thermocouples. *AIP Conference Proceedings*, 2024, vol. 3230, 090011. doi: https://doi.org/10.1063/5.0235318

3. Pearce J.V. et al. Progress towards in-situ traceability and digitalization of temperature measurements. *Acta IMEKO,* 2023, vol. 12, no. 1, pp. 1–6. doi: https://doi.org/10.21014/actaimeko.v12i1.1386

МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОЦІНЮВАННЯ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ВИМІРЮВАНЬ ТЕПЛОТИ ЗГОРЯННЯ ТА ВИХОДУ ЛЕТКИХ РЕЧОВИН ЕНЕРГЕТИЧНОГО ВУГІЛЛЯ

Кохан О.С., Дядюра К.О.
Одеса, Україна, sanyakohan97@stud.op.edu.ua

Енергетичне вугілля залишається одним із ключових енергоносіїв, якість якого визначається комплексом фізико-хімічних показників. Найвища теплота згоряння та вихід летких речовин є критичними параметрами для технологічних розрахунків, енергетичного балансу та комерційних операцій. Методи їх визначення регламентовані міжнародними стандартами ISO 1928:2006 [1] та ISO 562:2015 [2]. Обидва методи є непрямими, багатостадійними та чутливими до значної кількості факторів: маса навішування, чистота реактивів, стабільність температури, точність хронометражу, кваліфікація оператора, однорідність випробувальної проби та умови навколишнього середовища.

Метою роботи є розробка комплексної моделі оцінювання сумарної стандартної та розширеної невизначеності результатів визначення найвищої теплоти згоряння та виходу летких речовин енергетичного вугілля на основі керівництва GUM (JCGM 100:2008) з ідентифікацією домінуючих складових та обґрунтуванням методів зменшення систематичних похибок лабораторного аналізу. Дослідження виконано на базі випробувальної лабораторії, акредитованої згідно з ДСТУ ISO/IEC 17025.

Процедура визначення найвищої теплоти згоряння передбачає спалювання наважки палива в калориметричній бомбі в атмосфері кисню під тиском та вимірювання підвищення температури води в калориметричному посуді. Визначення виходу летких речовин полягає у нагріванні наважки палива в закритому тиглі без доступу повітря при температурі 900 °C протягом 7 хвилин з наступним зважуванням залишку та внесенням поправки на вміст вологи в аналітичній пробі.

Основними джерелами невизначеності для теплоти згоряння є: вимірювання маси наважки (внесок до 5%); визначення теплоємності калориметра за сертифікованою бензойною кислотою (до 30%); вимірювання підвищення температури (до 40%); поправка на теплообмін (до 15%); неоднорідність випробувальної проби (до 10%). Для виходу летких речовин домінуючими факторами виступають: точність терморегулювання печі (до 20%); тривалість нагрівання (до 10%); маса наважки (до 5%); втрати маси при випаровуванні вологи (до 15%); неоднорідність проби (до 30%). Розширена невизначеність (k=2, рівень довіри 95%) для типових зразків енергетичного вугілля становить U = 0,28–0,32 МДж/кг для теплоти згоряння та U = 1,0–1,4% (абс.) для виходу летких речовин. Встановлено кореляцію між показниками на рівні $r \approx -0{,}6$, що відображає хімічну природу палива: чим вища теплота згоряння, тим менший вихід летких речовин.

Для зменшення систематичних похибок запропоновано комплекс заходів: застосування автоматизованих калориметрів з ізотермічним або адіабатичним режимом та компенсацією дрейфу температури; регулярна перевірка

калібрування калориметра за сертифікованою бензойною кислотою з відстеженням дрейфу теплоємності; використання стандартних зразків складу вугілля для внутрішнього контролю якості; багаторазові паралельні визначення з відкиданням аномальних результатів за критерієм Граббса; контроль умов зберігання та підготовки проб; застосування методу найменших квадратів для врахування поправки на теплообмін замість емпіричних коефіцієнтів Режо-Пфаундлера.

Важливим напрямом розвитку дослідження є створення цифрового двійника (digital twin) процесу калориметричного аналізу. Цифровий двійник являє собою віртуальну копію вимірювального обладнання та технологічного процесу, яка на основі історичних даних калібрувань, результатів контрольних вимірювань, параметрів навколишнього середовища (температура, вологість, атмосферний тиск) та характеристик конкретної партії палива дозволяє прогнозувати очікувану невизначеність результату ще до початку експерименту. Така модель дає змогу оперативно коригувати процедуру вимірювань залежно від прогнозованого рівня невизначеності, що підвищує ефективність роботи лабораторії та зменшує ризик отримання недостовірних результатів. Крім того, цифровий двійник використовується для симуляції впливу різних факторів (наприклад, зміна теплоємності через забруднення калориметра) та планування періодичності технічного обслуговування обладнання.

Проведені дослідження дозволяють зробити такі висновки. Розроблена модель оцінювання невизначеності за GUM є ефективним інструментом метрологічного аналізу результатів визначення теплоти згоряння та виходу летких речовин енергетичного вугілля. Домінуючим джерелом невизначеності для обох показників є неоднорідність проби, що обґрунтовує необхідність посилення вимог до процедур відбору, подрібнення та гомогенізації. Впровадження запропонованих методів зменшення систематичних похибок дозволяє знизити сумарну невизначеність на 20–25% без зміни матеріально-технічної бази лабораторії. Застосування цифрового двійника забезпечує додаткове зниження невизначеності на 8–10% за рахунок предиктивного коригування умов вимірювань та оптимізації процедур. Подальші дослідження передбачають застосування методу Монте-Карло для верифікації результатів GUM-аналізу, особливо для випадків нелінійних моделей та несиметричних розподілів вхідних величин, а також інтеграцію цифрового двійника з автоматизованою лабораторною інформаційною системою для реального часу моніторингу та управління якістю вимірювань.

Список літератури

1. ДСТУ ISO 1928:2006. Палива тверді мінеральні. Визначення найвищої теплоти згоряння методом спалювання в калориметричній бомбі та обчислення найнижчої теплоти згоряння (ISO 1928:1995, IDT).

2. ДСТУ ISO 562:2015. Вугілля кам’яне та кокс. Визначення виходу летких речовин (ISO 562:2010, IDT).

ТЕМПЕРАТУРА ВІД ТЕРМОДИНАМІКИ

Гасанов Ю.Н., Гулієв М.А., Гасанов Р.Г.
Баку, Азербайджан, ramiz.hesenov@metrology.gov.az

Було встановлено існування абсолютного нуля температури. Його значення наразі прийнято як -273,15 °C. У 1848 році В. Томсон (лорд Кельвін) запровадив поняття термодинамічної температури, незалежної від властивостей обраної термометричної речовини. Він запропонував узяти абсолютний нуль за відправну точку для вимірювання температури, а градус – за одиницю температури. Ця шкала стала відома як абсолютна шкала Кельвіна. Пропозицію Кельвіна було прийнято лише в 1948 році. Наразі для визначення термодинамічної одиниці температури використовується Кельвін (К), потрійна точка води, яка приймається за 273,16 К і яку можна більш стабільно та надійно вивести з точки плавлення льоду [1].

Енергія, що випромінюється тілом, пропорційна четвертому степеню його температури. Таким чином, з одного квадратного метра поверхні за температури 300 К випромінюється до 450 ват енергії. Це пояснює, наприклад, охолодження поверхні Землі нижче температури навколишнього середовища вночі. Променista енергія абсолютно чорного тіла описується законом Стефана-Больцмана.

Слово «температура» виникло, коли люди думали, що гарячіші об’єкти містять більше певної речовини (більше калорій), ніж холодніші. Тому температуру вважали міцністю суміші речовини та калорій в об’єкті. Через це одиниці вимірювання алкоголю та температури називаються градусами.

У рівновазі температура має однакове значення для всіх макроскопічних частин системи. Коли два тіла в системі мають однакову температуру, між ними не відбувається передачі кінетичної енергії (тепла) частинок. Якщо є різниця температур, тепло переходить від тіла з вищою температурою до тіла з нижчою температурою, оскільки загальна ентропія збільшується. Температура, як і «спека» та «холод», пов’язані із суб’єктивними відчуттями, які залежать від виділення або поглинання тепла живою тканиною.

Деякі квантово-механічні системи можуть перебувати в стані спадної, незростаючої ентропії при додатковому введенні енергії, що формально відповідає негативній абсолютній температурі. Однак такі стани не є «нижче абсолютного нуля», а «вище нескінченності», оскільки в такій системі енергія передається від системи до об’єкта, коли він контактує з тілом із позитивною температурою, і навпаки [2].

Список літератури

1. Гасанов Ю.Н. Кількісні одиниці на основі фундаментальних фізичних констант. Баку, 2023.

2. Deffner S., Campbell S. Quantum Thermodynamics, 2019. doi: https://doi.org/10.1088/2053-2571/ab21c6

НОВІ МОЖЛИВОСТІ В ЗАСТОСУВАННІ ФОТОПРИЙМАЧА З КОНЦЕНТРАТОРОМ

Литвиненко А.С., Расчектаєва А.І., Татьянко Д.М.
Харків, Україна, litvinenko_as@ukr.net

При вимірюванні потужності випромінювання використовуються фотоприймачі, що складаються зазвичай із концентратора випромінювання та фотодетектора. Як концентратор використовуються лінзи, призми, дзеркала, дифракційні решітки, які фокусують випромінювання на фотодетекторі, такому як фотодіод, фоторезистор тощо. В роботі розглядається можливість застосування розробленого фотоприймача з концентратором на основі дифракційних решіток для використання його, наприклад, при конструюванні головок самонаведення (ГСН).

Наведення і цілевказівка в системах високоточної зброї здійснюються цілевказуванням оператора, лазерним освітленням цілі розвідником або яскравою точкою (факел двигуна, випромінювання локатора, корабель на поверхні моря тощо). Конструкції головок різняться залежно від цілей, що вражаються, цілевказування та ін. Наприклад, керована ракета ПЗРК 9К38 «Ігла» [1] оснащена спеціально розробленою головкою самонаведення. Двоканальна інфрачервона ГСН 9Э140 створювалася з урахуванням підвищення завадостійкості та поліпшення характеристик комплексу. При цьому вона здійснює просторову селекцію цілей, спектральну селекцію інфрачервоного випромінювання цілей, що вражаються, помилкових теплових цілей, фонових перешкод і захист від них, а також здійснює перетворення інфрачервоного випромінювання вибраної для обстрілу цілі в електричний сигнал помилки стеження, захоплення, автоматичне супроводження цілі та формування сигналу управління ракетою. Оптична частина ГСН використовується для відокремлення за допомогою фільтра випромінювання Сонця та його фонових відображень, максимум інтенсивності випромінювання якого досягається при довжині хвилі λ=1 мкм, і помилкових теплових цілей, що використовують для захисних маневрів і мають максимум випромінювання при довжині хвилі λ=2 мкм, та формує і спрямовує корисний для управління ракетою сигнал на фотоприймач.

Авторами запропоновано конструкцію фотоприймача [2], який може бути використаний при розробці ГСН. Фотоприймач складається з концентратора у вигляді світловода, одна з плоских поверхонь якого виконана у вигляді дифракційної решітки, та фотодетектора для вимірювання випромінювання. Нагріті елементи сопел реактивних двигунів і вихлопних патрубків поршневих двигунів, а також їх вихлопні газові струмені мають інфрачервоне (теплове) випромінювання у вузькому діапазоні довжин хвиль, який відрізняється від максимуму спектральної інтенсивності випромінювання Сонця, його фонових відображень та помилкових теплових цілей. Формуючи дифракційну решітку [3] з урахуванням кута повного внутрішнього відбиття в світловоді, який визначається матеріалом, із якого виготовлений світловод, можна визначити: випромінювання якої довжини хвилі буде спрямовуватись на

фотодетектор для перетворення в електричний сигнал для управління ракетою, а які довжини хвиль, по аналогії з ГСН 9Э140, будуть відфільтровані, тобто зробити спектральну селекцію інфрачервоного випромінювання цілей, що вражаються, та помилкових теплових цілей. Це збільшує можливості виявляти і вражати цілі, незалежно від їх захисних маневрів.

Застосування фотодетектора інфрачервоного випромінювання дозволить спростити конструкцію, порівняно із застосуванням охолоджуваного фоторезистора та світлофільтра у відомій ГСН, що, на нашу думку, дозволить зменшити ціну головки. Звичайно, у цьому контексті виникає потреба у детальному дослідженні та практичній розробці нових оптичних рішень, здатних задовольнити специфічні вимоги систем самонаведення.

Список літератури

1. Технічна підготовка (стрілець-зенітник переносних зенітних ракетних комплексів 9К38 (9К310)): навч. посіб. Військова частина А3435. Україна, 2019. 110 с.

2. Литвиненко А.С. Фотоприймач. Патент на корисну модель № 121820. Опубл. 27.07.2020, бюл. №14/2020.

3. Miler M. Holografie: teoretické a experimentální základy a její využití. Praha, SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1974. 272 s.

ОСОБЛИВОСТІ ВИМІРЮВАННЯ ІОНІЗАЦІЙНОГО СТРУМУ В СИСТЕМАХ КОНТРОЛЮ ПОЛУМ'Я ГАЗОВИХ ТЕПЛОГЕНЕРАТОРІВ

Нагірний В.І.
Львів, Україна, vasyl.i.nahirnyi@lpnu.ua

Системи контролю наявності полум'я є важливою складовою сучасних побутових газових теплогенераторів. Одним із найпоширеніших методів контролю є іонізаційний метод, принцип дії якого ґрунтується на вимірюванні електричного струму через плазму полум'я [1, 2]. З метрологічної точки зору такий струм є малим вимірюваним сигналом, величина якого залежить не лише від властивостей самого полум'я, а й від умов електроживлення та формування вимірювального кола.

Фізичною основою методу є одностороння провідність плазми полум'я, яка виникає внаслідок асиметрії площ електрода і поверхні пальника. Іонізаційний електрод розташований у зоні горіння, а корпус пальника електрично з'єднаний із захисним провідником PE [3]. За наявності змінної напруги між електродом та пальником у колі виникає іонізаційний струм, постійна складова якого використовується електронною системою керування для визначення наявності стабільного полум'я [1, 2]. У досліджуваних системах напруга на вимірювальному колі може становити близько 70–150 В, а величина іонізаційного струму – одиниці мікроампер. Тому під час вимірювання іонізаційного струму необхідно враховувати сукупність факторів впливу, до яких належать параметри електроживлення, зокрема величина і частота напруги, форма її кривої, наявність визначеного нульового потенціалу відносно захисного провідника, а також параметри самого вимірювального кола [4]. Додатковий вплив можуть мати конструкція пальника та іонізаційного електрода, монтажні провідники, паразитні ємності, характеристики системи фільтрації сигналу та умови горіння. Таким чином, отримане значення іонізаційного струму доцільно розглядати як результат вимірювання, сформований під впливом сукупності електричних, конструктивних та експлуатаційних факторів.

Особливу увагу потрібно приділити електроживленню газового теплогенератора від автономних джерел. На відміну від стаціонарної мережі, невизначений потенціал відносно локального заземлення можуть мати вихідні кола інверторів, джерел безперебійного живлення та генераторних установок. У такому випадку параметри електричного кола іонізаційного контролю відрізняються від умов живлення від мережі з визначеним нейтральним провідником. Для частини автономних джерел характерний «плаваючий» вихід, що може створювати електричну систему з ознаками IT-мережі [5].

Невизначеність потенціалу нульової точки змінює умови формування струмового кола між іонізаційним електродом, полум'ям, пальником та системою захисного заземлення. У результаті навіть за наявності стабільного горіння величина сигналу іонізаційного контролю може відрізнятися від значення, отриманого за аналогічних умов у стаціонарній мережі. Практичні дослідження, наведені в роботі, показали випадки нестабільного запуску або

виникнення помилки контролю полум’я під час живлення газових теплогенераторів від автономних джерел.

Для забезпечення визначених умов роботи вимірювального кола запропоновано використовувати роздільний трансформатор із коефіцієнтом трансформації 1:1. Первинна обмотка трансформатора підключається до виходу автономного джерела живлення, а вторинна має гальванічний зв’язок із первинною лише через електромагнітне поле. Один із виводів вторинної обмотки з’єднується з локальним захисним провідником PE. У результаті формується визначена локальна точка відліку потенціалу, відносно якої напруга живлення газового теплогенератора має стабільніші умови формування вимірювального кола іонізаційного контролю [3].

Щодо метрологічної точки зору, запропоноване рішення можна розглядати як спосіб стабілізації умов вимірювання іонізаційного струму. Формування визначеного потенціалу відносно провідника PE зменшує вплив невизначеності вихідного потенціалу автономного джерела на вимірювальне коло. Це створює передумови для підвищення відтворюваності результатів контролю полум’я під час використання різних джерел автономного електроживлення.

Практичні випробування із застосуванням автономних джерел живлення та роздільного трансформатора показали стабільний запуск і роботу досліджуваних газових теплогенераторів після формування визначеної локальної нейтралі.

Отже, при дослідженні іонізаційного контролю полум’я як вимірювальної системи необхідно враховувати не тільки характеристики первинного вимірювального сигналу – іонізаційного струму, а й параметри джерела живлення та потенціалу відносно системи заземлення. Для автономних електроенергетичних систем формування визначеної локальної точки потенціалу за допомогою роздільного трансформатора може бути використане як технічний засіб стабілізації умов вимірювання та забезпечення відтворюваності роботи системи іонізаційного контролю.

Список літератури

1. BS EN 298:2012. Automatic burner control systems for burners and appliances burning gaseous or liquid fuels. Brussels, CEN, 2012. 68 p.

2. Siemens Building Technologies, HVAC Products; Riello. Burner Controls RMO88.53..., RMG88.62..., RMG/M88.62...: Data Sheet CC1N7136en. 11.12.2002. 21 p.

3. IEC 60364-4-41:2005. Low-voltage electrical installations – Part 4-41: Protection for safety – Protection against electric shock. Geneva, International Electrotechnical Commission, 2005. 123 p.

4. ДСТУ EN 50160:2014. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності.

5. Правила улаштування електроустановок (ПУЕ). 5-те вид., перероб. і доп. Київ: Мінпаливенерго України, 2017. 760 с.

СЕКЦІЯ 4.

ЕЛЕКТРИЧНІ ВЕЛИЧИНИ. АКУСТИКА, УЛЬТРАЗВУК, ВІБРАЦІЯ

СИСТЕМА КОМПЕНСАЦІЇ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛІ ДЛЯ МЕТРОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВИМІРЮВАНЬ МАЛИХ МАГНІТНИХ ІНДУКЦІЙ

Огар В.І., Васильєва О.М., Кекерчень М.А., Копошилов Ю.І.
Харків, Україна, valeriy.ogar@nure.ua

Вимірювання малих значень магнітної індукції в діапазоні від 10 мкТл до 10 мТл є актуальним завданням магнітометрії та метрології, яке постало при виконанні проєкту 24RPT02 MetroMag «A European infrastructure for low magnetic field metrology», що фінансується Euramet у рамках програми «Горизонт Європа» [1]. Під час вимірювань у лабораторних умовах суттєвою перешкодою є природне магнітне поле Землі, величина якого досягає 50…60 мкТл. На результат вимірювань також впливають металеві конструкції, електронні пристрої, кабелі та змінні магнітні поля промислової частоти. Для калібрування та повірки магнітометрів необхідно створити контрольоване магнітне середовище, в якому фонове поле може бути зменшене до низького рівня, а задана магнітна індукція відтворена з відомою невизначеністю. Метою роботи є створення тривісної системи компенсації магнітного поля Землі, яку може бути використано як основу для метрологічного забезпечення вимірювань малих магнітних індукцій і досліджень ядерного магнітного резонансу (ЯМР).

Основна ідея полягає у поєднанні тривісної системи компенсації і каліброваного джерела магнітної індукції. Для компенсації магнітного поля Землі використовується система з трьох взаємно перпендикулярних пар квадратних котушок Гельмгольца зі сторонами a та оптимальними відстанями між котушками d=0,544 a. Розміри котушок по осі X становлять 1200×1200 мм, з відстанню між котушками d=653 мм, по осі Y 1350×1350 з відстанню 735 мм, по осі Z 1500×1500 з відстанню 816 мм. Тривісна система забезпечує незалежне керування трьома складовими магнітного поля та дозволяє створити в центральній робочій області 190×190×190 мм рівномірне поле з похибкою 0,1%. Вісь X орієнтована вздовж магнітного меридіана. Система розташована на відстані 1 м від підлоги та стелі лабораторії, і 3 м від стін та вікон.

Для компенсації магнітного поля Землі використовується тривісний цифровий магнітометр-давач MMC5603, який працює на основі анізотропного магніторезистивного ефекту і має середньоквадратичний рівень шумів 0,2 мкТл. Магнітометр надсилає дані вимірювань через кабель інтерфейсу I^2C до мікроконтролера Arduino nano, а з нього через кабель інтерфейсу USB до персонального комп’ютера (ПК). Вихідні дані індикуються на дисплеї ПК.

Для отримання достовірних результатів необхідно враховувати основні похибки давача: нульові зміщення, масштабні коефіцієнти, неперпендикулярність осей та взаємний вплив вимірювальних каналів магнітометра. Визначення параметрів калібрування проводиться за набором вимірювань при різних орієнтаціях давача у просторі. На першому етапі визначаються постійні зміщення, після чого виконується матрична корекція результатів вимірювань. Для побудови коригувальної матриці використовується розклад Холєцького, що дозволяє перетворити еліпсоїд точок вимірювань у

сферу. Основним критерієм якості коригування є стабільність модуля вимірюваного магнітного поля при обертанні давача в однорідному зовнішньому полі. Абсолютну величину магнітного поля Землі визначають калібруванням по значеннях, розрахованих за допомогою Світової магнітної моделі високої роздільної здатності (WMMHR) для координат місця вимірювання, дати та висоти давача [2].

За результатами вимірювань трьох складових зовнішнього магнітного поля у робочій області встановлюються струми в компенсаційних котушках відповідних осей до 200 мА. Спочатку регулювання виконується вручну до досягнення мінімуму поля послідовно за координатами X,Y,Z. Це дозволяє перевірити відповідність напрямків осей та знаків струмів. Після перевірки система може працювати в автоматичному режимі й струми коригуються вихідними сигналами Arduino через стабілізатори струму на операційних підсилювачах LM358 і транзисторах КТ819. Ітераційний процес, закладений у програмі Arduino, дозволяє зменшувати залишкове поле приблизно до 1,6 мкТл із середньоквадратичним відхиленням 0,2 мкТл. Отриманий результат підтверджується показаннями Fluxgate-магнітометра типу Magnetoscope 1.069.

Для відтворення заданих малих магнітних індукцій усередині тривісної системи передбачається встановлення спеціального соленоїда. Соленоїд калібрується методом ЯМР від еталона одиниці магнітної індукції Тесла. Це забезпечує метрологічну простежуваність його коефіцієнта перетворення до державного еталона України [3] в діапазоні від 50 мТл до 2 Тл. Таким чином, створюється джерело магнітної індукції для калібрування та повірки магнітометрів. Показання досліджуваного магнітометра порівнюються зі значенням індукції, відтвореним у соленоїді. Поблизу нульового значення невизначеність зростає. Подальше зменшення залишкового поля Землі для підвищення достовірності вимірювань потребує підвищення точності калібрування MMC5603, використання більш досконалого давача, покращення його позиціонування, підвищення стабільності струмів, зменшення впливу магнітного фону промислової частоти.

Список літератури

1. MetroMag: a European infrastructure for low magnetic field metrology. URL: https://sites.google.com/inrim.it/metromag

2. International Geomagnetic Reference Field (IGRF). URL: https://www.ncei.noaa.gov/products/international-geomagnetic-reference-field

3. Зінгерман В.І., Зільберштейн Я.А., Багалій О.Ю., Кондратюк В.Б. Державний спеціальний еталон одиниці магнітної індукції. *Український метрологічний журнал*. 1996. Вип. 2–3. С. 36–40.

МЕТОД КАЛІБРУВАННЯ ВИМІРЮВАЧІВ НЕЛІНІЙНИХ СПОТВОРЕНЬ

Огар В.І.
Харків, Україна, valeriy.ogar@nure.ua

Вимірювання коефіцієнта гармонік (зарубіжний аналог Total harmonic distortion – THD) необхідне при оцінці характеристик підсилювачів сигналів звукових систем, для калібрування генераторів з нормованим коефіцієнтом гармонік (Кг), вимірювачів параметрів якості електричної енергії, приладів систем зв'язку. Для вимірювання нелінійних спотворень застосовуються промислові вимірювачі коефіцієнта гармонік типів С6-8, С6-11 та імпортні аналізатори спектра, а для їх калібрування використовується робочий еталон типу СК6-10. Він відтворює сигнали із заданим коефіцієнтом гармонік Кг1 від 0,03% до 100% в діапазоні частот від 20 Гц до 200 кГц. Схема робочого еталона СК6-10 базується на апаратному випрямленні синусоїди, компаруванні, урівноваженні амплітуди першої та вищих гармонік, ослабленні вищих гармонік у відоме значення разів та змішуванні першої гармоніки з вищими складовими. Робочий еталон, у свою чергу, потребує калібрування, і для цього служить Державний еталон одиниці коефіцієнта гармонік [1]. На жаль, СК6-10 вже майже вибрали свій ресурс, а нові не випускаються. Надана робота пропонує цифровий алгоритмічний метод формування тестових сигналів із нормованим Кг за допомогою генераторів довільної форми.

DDS генератори Direct Digital Synthesis і їх новітня модифікація – Trueform генератори – можуть відтворювати довільну форму сигналів – синусоїди, трикутних коливань, імпульсів, але не відтворюють сигнали із заданим коефіцієнтом гармонік. DDS та Trueform генератори формують із цифрових кодів ступінчасті форми сигналів із подальшим фільтруванням частоти дискретизації. Для імітації спектрального складу реальних квазісинусоїдних сигналів із перевагою парних гармонік (що характерно для підсилювальних каскадів і магнітного запису) застосовано операцію двонапівперіодного випрямлення синусоїди. Вилучення постійної складової формує сигнал, що складається винятково з вищих гармонік без першої складової. Завдяки розрахованому співвідношенню середньоквадратичних значень першої та вищих гармонік вихідний сигнал із потрібним рівнем спотворень будується шляхом математичного додавання масштабованого гармонічного сигналу та підсиленої суміші вищих гармонік.

Невизначеність відтворення методу визначається шумом квантування ЦАП та джитером. Застосування технології Trueform дозволило знизити джитер у 10 разів порівняно зі звичайним DDS та зменшити власні спотворення до рівнів 0,01%.

Методику було апробовано на двох типах обладнання:

• Комп'ютерне моделювання (Sound Card Oscilloscope V1.46) [2]. Формування сигналу проводиться завданням необхідної формули з дискретністю вибірок 16-біт при частоті вибірок fs = 44,1 кГц. Виміряне значення THD показало абсолютне відхилення 0,02%.

• Промисловий генератор (Keysight 33611A Trueform) [3], 14 біт із частотою дискретизації 660 МГц.

Розрахунок 14-бітних масивів точок проведено у середовищі Excel з експортом у .txt формат. Для запобігання пропускам точок кількість відліків оптимізовано під частоту дискретизації. Для забезпечення максимальної точності аналого-цифрового перетворення розраховано оптимальну кількість вибірок для кожного частотного діапазону (із дотриманням вимоги кратності 8): 200 кГц: 3296 точок на період, 100 кГц: 6600 точок на період, 20 кГц: 33 000 точок на період, 10 кГц та нижче (включаючи 20 Гц): 65 536 точок із застосуванням автоматичної децимації частоти дискретизації. Масиви вибірок зберігаються у вигляді текстових файлів із роздільниками-комами та завантажуються в енергонезалежну пам'ять генератора Keysight 33611A через USB-інтерфейс.

Перевірку проведено шляхом подачі сформованого сигналу з генератора Keysight 33611A на автоматичний вимірювач нелінійних спотворень С6-11 і порівняння з результатами калібрування за допомогою робочого еталона СК6-10.

Розроблений алгоритмічний метод дозволяє формувати високоточні калібрувальні сигнали із заданим коефіцієнтом гармонік без використання складних аналогових узгоджувальних блоків. Метод забезпечує відтворювання заданого коефіцієнта гармонік від 0,03 до 100% у діапазоні частот від 20 Гц до 200 кГц з невизначеністю 0,1% і придатний для автоматизації процесів повірки та калібрування сучасних вимірювачів спотворень і аналізаторів спектра.

Список літератури

1. Павленко Ю.Ф., Красовський В.Д., Огар В.І., Голякова Т.М. Новий державний первинний еталон одиниці коефіцієнта гармонік. *Український метрологічний журнал*. 2009. № 4. С. 17–23.

2. Sound Card Oscilloscope V1.46. URL: https://iowin.net/oscilloscope/

3. Keysight 33500B and 33600A Series Trueform Waveform Generators Data Sheet. Keysight Technologies. URL: https://www.mouser.lt/datasheet/2/878/5992_2572EN-1628380.pdf

ПРИСТРІЙ ЕКСПРЕС-КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

Рибчин Б.Р., Середюк О.Є., Криницький О.С.
Івано-Франківськ, Україна, mivt@nung.edu.ua

Якість електричної енергії (ЯЕЕ) є одним із визначальних чинників надійності, ефективності та безпеки функціонування електричних мереж. Нормативні показники ЯЕЕ – відхилення напруги та частоти, флікер, коефіцієнт гармонічних спотворень, провали і перенапруги напруги, коефіцієнт потужності – регламентуються стандартом ДСТУ EN 50160 [1] і вимірюються спеціалізованими приладами (аналізаторами гармонік, флікерметрами, вольтметрами тощо) за різних часових інтервалів усереднення. Це унеможливлює формування єдиної узагальненої оцінки стану електропостачання серійними засобами вимірювальної техніки, оскільки жоден із них не поєднує вимірювання всіх показників з обчисленням комплексної оцінки якості.

Авторами запропоновано методику визначення комплексного показника якості (КПЯ) електричної енергії на засадах кваліметрії, яка ґрунтується на обчисленні середньозваженого арифметичного нормованих одиничних показників якості [1]. З відповідними запропонованими авторами методиками визначення коефіцієнтів вагомості [2]. Однак технічну реалізацію такої методики вимірювання – тобто засобу вимірювання, здатного вимірювати показники, обчислювати КПЯ у реальному часі та відображати чи передавати результати контролю, – досі не розроблено.

Метою роботи є розроблення пристрою експрес-контролю якості електричної енергії, який реалізує вимірювання диференційних показників ЯЕЕ, обчислення комплексного показника якості з врахуванням вагових коефіцієнтів відображення та автоматизоване збереження і передавання результатів вимірювань.

У розробленому пристрої реалізовано принцип, за яким вимірювання кожного з диференційних показників ЯЕЕ здійснюється окремим спеціалізованим вимірювальним блоком, а обчислення нормованих значень і їх зважене агрегування у комплексний показник якості виконується єдиним мікропроцесорним обчислювачем з подальшим автоматичним зберіганням і передаванням результату.

Пристрій експрес-контролю якості електричної енергії містить: давачі напруги та струму; блок вимірювання напруги, струму, частоти; блок вимірювання флікера; блок вимірювання коефіцієнта гармонічних спотворень; блок вимірювання провалів та перенапруг напруги; блок вимірювання коефіцієнта потужності; мікропроцесорний обчислювач комплексного показника якості; електронний відліковий пристрій; блок передавання і зберігання вимірювальної інформації.

Розроблюваний пристрій працює наступним чином. Миттєві значення напруги та струму контрольованої мережі електропостачання надходять з давачів паралельно на входи вимірювальних блоків. Блок вимірювання напруги частоти і струму визначає діючі значення напруги та частоти мережі і обчислює

нормовані показники якості напруги q_U та частоти q_f відповідно до допустимих відхилень ±10% від номінальної напруги 230 В та (+4…–6)% від номінальної частоти 50 Гц [1]. Блок вимірювання флікера за однохвилинним алгоритмом визначає короткочасний показник флікера P_{st} і формує нормований показник q_{yst}. Блок вимірювання гармонік обчислює сумарний коефіцієнт гармонічних спотворень напруги K_{THD} та відповідний нормований показник q_{THD}. Блок вимірювання провалів і перенапруг фіксує провали та перенапруги напруги, їх глибину і тривалість та формує нормовані показники $q_{Uз}$ і q_{Un} за методом узагальнення багаторазових подій. Блок вимірювання коефіцієнтів потужності визначає коефіцієнт потужності cos φ і обчислює нормований показник $q_{P\varphi}$.

Нормовані значення одиничних показників з усіх вимірювальних блоків надходять на входи мікропроцесорного обчислювача, в якому за формулою середньозваженого арифметичного з попередньо визначеними коефіцієнтами вагомості [2] обчислюється комплексний показник якості електричної енергії КПЯ. Обчислене значення КПЯ, а також поточні значення всіх показників одночасно відображаються на електронному відліковому пристрої та автоматично зберігаються і передаються. Це забезпечує можливість дистанційного моніторингу стану електропостачання в реальному часі та накопичення статистичних даних для подальшого аналізу.

На відміну від серійних аналізаторів якості електричної енергії, зокрема Power Master [3], які реєструють диференційні показники якості без їх узагальнення та потребують подальшого ручного аналізу результатів, розроблений пристрій забезпечує безпосереднє обчислення комплексного показника якості в місці вимірювання та автоматизоване передавання результатів контролю. Крім того передбачається вимірювання коефіцієнта потужності, що передбачається у відомих приладах для визначення якості електричної енергії. Архітектура запропонованого пристрою з єдиним обчислювальним блоком та каналом зберігання і телекомунікаційного передавання даних, підтверджує ефективність такого підходу для комплексного контролю якісних показників електричної енергії. Використання розробленого пристрою дозволить перейти від розрізненого вимірювання окремих показників якості електричної енергії до єдиної автоматизованої системи її оперативного оцінювання та моніторингу.

Список літератури

1. ДСТУ EN 50160:2023. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності (EN 50160:2022, IDT). [Чинний від 2023-12-18]. Київ, 2023. 36 с.

2. Середюк О.Є., Рибчин Б.Р., Криницький О.С. Експрес-контроль якості електричної енергії на засадах кваліметрії. *Метрологія та прилади*. 2026. № 1. С. 63–67. doi: https://doi.org/10.30837/2663-9564.2026.1.10

3. Power Master XT / Power Master / Master Q4 MI 2893 / MI 2892 / MI 2885 (HW:9.0) Instruction manual. URL: https://manuals.plus/metrel/mi-2893-power-master-xt-manual

INVESTIGATING LOCAL TRANSMISSION COEFFICIENT FEATURES OF FEED-THROUGH WAVEGUIDE POWER STANDARDS NEAR REFERENCE FREQUENCIES

Krykhtin Yu., Klymchenko S., Ostafiichuk T.
Kharkiv, Ukraine, krykhtin79@gmail.com

The report presents the results of studies on the frequency dependence of transmission coefficients (TC) for KMM-11A and M1-25/2 power calibrators, which serve as reference feed-through power standards (hereinafter termed as the reference wattmeter, RW) with rectangular waveguide cross sections of (11×5.5) mm and (3.6×1.8) mm correspondingly, in the vicinity of the following control frequencies: 25.86 GHz for the first RW, and 71 GHz, 75 GHz, 77 GHz for the second RW. A sharp change in the TC within a small frequency neighbourhood (±0.1% for the first RW and ±0.05% for the second RW) can lead to a significant increase in the TC measurement uncertainty; therefore, this phenomenon must be taken into account. The research results are divided, respectively, into two parts, each containing a description of the measurement equipment used for the experiment, the main observation results, the data processing methodology, and recommendations for practical application.

1. Experimental results at 25.86 GHz.

An irregularity detected in the TC frequency response of the KMM-11A power calibrator at a frequency of 25.86 GHz can lead to an increase in the working standards and working wattmeters calibration error by up to 30% compared to the permissible limits of ±1.6% and ±5% correspondingly. Studies of this phenomenon were conducted using the automated measurement system constructed according to the classic scheme for calibrating microwave power meters by direct comparison with a RW [1]. The system consisted of a signal generator and two paths (for power and for frequency measurement), the simultaneous operation of which was provided by a directional coupler [2]. The first path comprised a series connection of a RW and M5–44 thermistor power sensor, each connected to an appropriate bridge circuit. The voltage across the operating thermistor was measured using a digital multimeter connected to a personal computer via a standard interface – GPIB or USB. The frequency measurement path included a digital frequency counter operating in either manual or remote mode.

The experimental part of the research involved determining the effective efficiency (EE) of three M5-44 sensors in the frequency range 25.86 GHz ±0.1%. For each sensor, 13 points were obtained; and because all three sensors exhibited matching response patterns, the resonance phenomenon was confirmed to originate within the power calibrator. Six potential regression functions were evaluated to fit the observed EE values: N-th degree polynomial (N ranges from 1 to 5), linear-over-quadratic rational function, Hill model, Weibull model, dose-response multistage-S model for S=1 and S=2, and logistic function. The left side of the curve (prior to the EE peak) was best fitted using a rational function, whereas the right side (following the EE peak) was modelled using a logistic function, with parameters optimized via the least squares method. By solving the nonlinear equation, we find the abscissa of the frequency response peak: 25.87 GHz. In addition, a temperature sensitivity was revealed, under which an increase in temperature from +15 °C to +25 °C (i.e., within normal conditions) shifts this peak lower by 4 MHz.

The results indicate that to reduce this issue (to ensure the permissible calibration error), the control frequency should be shifted lower within acceptable bounds – specifically targeting (25.841±0.006) GHz for RW and working standards, (25.848±0.012) GHz for working wattmeters.

2. Experimental results at 71 GHz, 75 GHz, and 77 GHz.

The identified local features of the M1-25/2 TC frequency response exhibit different characteristics and lead to varying error values: in the vicinity of 71 GHz, the RW exhibits an increasing TC trend, where the frequency error can exceed 2%; in the vicinity of 75 GHz, the TC response resembles a bell-shaped curve, with the frequency error potentially exceeding 1%; in the vicinity of 77 GHz, the RW exhibits a decreasing TC trend, and the frequency error can exceed 5% (the maximum calibration errors for the working standards and working wattmeters are ±2% and ±10%, respectively). The automated measurement system is similar to the previous one, except for certain specific features: instead of three M5–44 sensors, three differential calorimeters with dry load M646A were used [3]. In addition, due to the absence of a direct-reading frequency counter, a heterodyne-type frequency converter was used.

The experiment consisted in measuring the calibrator TC using calorimeters in the frequency ranges 71 GHz±0.05%, 75 GHz±0.05%, 77 GHz±0.05%. For each calorimeter, from 8 to 9 points were obtained; and because all three calorimeters exhibited matching response patterns, the specific local features were also attributable to the calibrator. Seven potential regression functions were evaluated to fit the observed values: N-th degree polynomial (N ranges from 1 to 5), dose-response multistage-S model (S ranges from 1 to 4), truncated Fourier series, Bleasdale-Nelder model, reciprocal quadratic function, hyperbolic decline function, and sinusoidal function. Under certain assumptions, the TC behaviour can be modelled by a 2nd degree polynomial near 71 GHz, a sinusoidal function near 75 GHz, and a 4th degree polynomial or dose-response multistage-4 model near 77 GHz, where the transfer coefficient undergoes the most significant variation. To achieve the required calibration accuracy of working standards and wattmeters, it is proposed to reduce the generator frequency setting error to ±0.01% at these frequencies, with an additional correction based on the determined regression function applied for working standards at 77 GHz.

References

1. DSTU GOST 8.569:2003. Metrology. Low-power microwave wattmeters in the frequency range 0.02–178.6 GHz. Verification and calibration procedure (GOST 8.392-80 regarding verification of power meters of a terminating type) (in Ukrainian). Kyiv, 2003. 14 p.

2. Krykhtin Yu., Klymchenko S. Study of the anomalous property of the transmission coefficient of the centimeter range standard waveguide wattmeter near the upper control frequency. *Systems of Arms and Military Equipment*, 2025, no. 4(80), pp. 74–81(in Ukrainian). doi: https://doi.org/10.30748/soivt.2024.80.09

3. Akhiezer A., Senko A., Seredniy V. Millimeter wave power standards. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1997, no. 46(2), pp. 495–498. doi: https://doi.org/10.1109/19.571894

ВИМІРЮВАННЯ ТА РОЗРАХУНОК РІВНЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ

Кравцов М.М., Бажинов О.В., Огар В.І.
Харків, Україна, Super-mikvich@ukr.net, valeriy.ogar@nure.ua

Стрімкий розвиток та впровадження екологічно чистого транспорту – електромобілів (BEV), гібридних автомобілів (HEV/PHEV), є ключовим трендом сучасної транспортної інфраструктури. Електромагнітна сумісність (технічний аспект): високий рівень внутрішніх завад може негативно впливати на роботу бортових інформаційно-вимірювальних систем, засобів зв'язку та оптико-електронних систем моніторингу стану водія, викликаючи збої у критично важливих вузлах керування. Вимірювання напруженості ЕМП електромобіля Nissan Leaf на різних швидкісних режимах проводилось на навантажувальному стенді автомобільно-технічної лабораторії (АТЛ) кафедри інжинірингу систем автомобільного транспорту імені М.Я. Говорущенка (ІСАТ) Харківського національного автомобільно-дорожнього університету 30 травня 2025 року з 11:00 до 12:30. Вимірювання проводилися аналізатором електричного та магнітного поля NARDA EHP-50F в діапазоні частот від 1 Гц до 400 кГц із невизначеністю 5%.

Результати експерименту вимірювань напруженості ЕМП показали залежність інтенсивності ЕМП від швидкості руху: спостерігається чітка нелінійна залежність напруженості електричного поля від швидкості електромобіля. На низьких швидкостях (від 4 до 40 км/год) рівень поля залишається фоновим і безпечним, коливаючись у межах 0,15–0,60 В/м. Критична швидкість (60 км/год): при досягненні швидкості 60 км/год зафіксовано різке зростання напруженості електричного поля (до 10 В/м), що у десятки разів перевищує показники на менших швидкостях. Із підвищенням обертів електродвигуна та збільшенням частоти роботи силового інвертора генерація електричного поля суттєво посилюється. Водночас магнітна компонента поля залишається майже стабільною: 0,12 мкТл у широкому діапазоні частот. Це свідчить про те, що основний сплеск випромінювання ЕМП під час розгону викликаний швидкими змінами напруги імпульсів інвертора.

Значення магнітної індукції в салоні автомобіля добре оцінюється розрахунками на основі формул електродинаміки для контурів з відомими геометричними розмірами та значенням струмів. Значення напруженості електричного поля корелюють із розрахунками на основі значень індуктивностей і частот імпульсів високовольтних шин інвертора.

Результати вимірювань наведено в табл. 1, де проведено порівняння із чинними санітарними нормами України (зокрема ДСН 239-96) [1], в якому встановлений гранично допустимий рівень напруженості електричного поля промислової частоти (50 Гц) для зон перебування населення. Цей критерій, разом із міжнародними стандартами (ICNIRP, CISPR 25) [2], визначено як базовий орієнтир для оцінки екологічної безпеки транспортнх засобів.

Таблиця 1

Результати експериментальних досліджень та розрахунку

№ поз.	Швидкість електромобіля (км/год)	Місце виміру	Показання приладу	Розрахований рівень відносно ГДР (%) та примітки
1	4	праве колесо / місце салону / переднє сидіння	0,28 0,30 0,27–0,30	56% 60% 54–60% (в межах норми)
2	10	праве колесо / місце салону / заднє сидіння	0,15 0,34 0,31	30% (в межах норми) 68% (в межах норми) 62% (в межах норми)
3	20	праве колесо / місце салону / заднє сидіння	0,31 0,30 0,42	62% (в межах норми) 60% (в межах норми) 84% (наближення до межі)
4	40	праве колесо / місце салону / заднє сидіння	0,20 0,30 0,60	40% (безпечний рівень) 60% (допустимий рівень) 120% (перевищення норми на 20%)
5	60	праве колесо / місце салону / заднє сидіння	10,00 3,74 2,70	2000% (критичне перевищення у 20 разів) 748% (перевищення у 7,48 раза) 540% (перевищення у 5,40 раза)
6	0 – max	праве колесо / місце салону / заднє сидіння	0,12 мкТл	Показники магнітної складової стабільні та мінімальні відносно граничних нормативів

Електромобіль демонструє високий рівень електромагнітної екологічності на міських швидкостях до 40 км/год. Проте режим руху на швидкості 60 км/год та вище є найбільш «навантаженим» з точки зору випромінювання ЕМП в салоні, створює загрозу для електромагнітної сумісності бортового обладнання та безпеки людей і вимагає додаткової уваги до якості екранування силових елементів авто.

Список літератури

1. ДСН 239-96. «Державні санітарні норми і правила захисту населення від впливу електромагнітних випромінювань» (затверджені наказом МОЗ України від 01.08.1996 № 239-96). Ключовий документ для встановлення гранично допустимих рівнів (ГДР) електромагнітних полів в Україні.

2. Керівні принципи ICNIRP. Керівні принципи щодо обмеження впливу електромагнітних полів (від 100 кГц до 300 ГГц) та Керівні принципи щодо обмеження впливу змінних у часі електричних та магнітних полів (від 1 Гц до 100 кГц). Основні міжнародні рекомендації, що використовуються для встановлення безпечних рівнів електромагнітних полів (SAR, напруженість поля) у всьому світі.

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА ОБРОБКА ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ІНФОРМАЦІЇ В СИСТЕМІ ДІАГНОСТУВАННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ПРОЦЕСІВ СТАНА ХОЛОДНОЇ ПРОКАТКИ

Назарова О.С.
Запоріжжя, Україна, nazarova16@gmail.com

Сучасні електромеханічні комплекси прокатного виробництва потребують постійного моніторингу технічного стану, ефективність якого значною мірою визначається достовірністю та повнотою вимірювальної інформації. Набуває актуальності діагностування за умов обмеженого обсягу даних, для чого перспективним є застосування методів інтелектуальної обробки інформації [1]. Сучасним напрямом розвитку систем моніторингу є поєднання інтелектуальних систем із цифровими вимірювальними двійниками та врахуванням невизначеності вимірювальної інформації [2]. Тому актуальним є розроблення підходу до інтелектуальної обробки багатоканальної вимірювальної інформації для підвищення достовірності діагностування електромеханічних процесів стана холодної прокатки.

Мета – підвищення ефективності використання вимірювальної інформації в системі діагностування електромеханічних процесів стана холодної прокатки шляхом інтелектуального аналізу багатоканальних даних та формування діагностичних висновків на основі бази знань і нечіткої логіки.

Для досягнення поставленої мети вирішено такі завдання: визначено інформативні діагностичні параметри електромеханічних процесів стана холодної прокатки; сформовано базу даних режимів функціонування обладнання; реалізовано інтелектуальну обробку вимірювальної інформації з використанням методів нечіткої логіки; оцінено ефективність запропонованого підходу для підвищення достовірності діагностування технічного стану електромеханічних систем.

Для отримання вимірювальної інформації про електромеханічні процеси стана холодної прокатки було використано багатоканальний діагностичний комплекс, що забезпечує синхронну реєстрацію параметрів взаємопов’язаних електроприводів технологічної лінії. До контрольованих величин належать напруга та струм якірних кіл приводів, швидкість обертання механізмів, які характеризують технічний стан електромеханічної системи та якість перебігу технологічного процесу [3].

Проведений аналіз результатів моніторингу показав, що окремі аварійні та передаварійні режими супроводжуються характерними змінами вимірюваних параметрів. Зокрема, для випадків порушення стабільності процесу прокатки спостерігаються різкі зміни струму та напруги електропривода розмотувального механізму, а також зміна натягу смуги металу, що прокатується. Такі параметри можуть бути використані як інформативні діагностичні ознаки для оцінювання поточного стану обладнання та своєчасного виявлення небезпечних режимів роботи.

На основі накопичених результатів вимірювань сформовано базу даних електромеханічних процесів стана холодної прокатки [3]. До її складу включено

реалізації нормальних, перехідних та аварійних режимів роботи взаємопов'язаних електроприводів. Використання бази даних дозволяє перейти від аналізу окремих сигналів до комплексного оцінювання сукупності параметрів електромеханічних процесів.

Особливістю задачі діагностування є наявність невизначеності вимірювальної інформації, обумовленої зміною технологічних режимів, впливом зовнішніх збурень та неповнотою відомостей про поточний стан об'єкта. З огляду на це для інтерпретації результатів вимірювань доцільним є використання інтелектуальних методів обробки даних. У роботі застосовано підхід, заснований на використанні нечіткої логіки, який дозволяє формалізувати експертні знання про роботу стана холодної прокатки та формувати діагностичні висновки за сукупністю вимірюваних параметрів. Для цього вхідними змінними системи прийняття рішень обрано напругу та струм електропривода розмотувального механізму, а також значення натягу смуги металу. На виході формується інтегральна оцінка технічного стану електромеханічної системи.

З позицій метрологічного забезпечення запропонований підхід дозволяє підвищити ефективність використання результатів вимірювань за рахунок переходу від контролю окремих параметрів до їх комплексного аналізу. Поєднання багатоканальних вимірювань, бази даних електромеханічних процесів та інтелектуальної обробки інформації забезпечує підвищення достовірності діагностування технічного стану електроприводів і створює передумови для подальшого розвитку цифрових систем моніторингу та предиктивного обслуговування прокатного обладнання.

Висновки. Визначено найбільш інформативні параметри електромеханічних процесів стана холодної прокатки для оцінювання його технічного стану. Сформовано базу даних режимів функціонування електромеханічної системи для накопичення та аналізу вимірювальної інформації. Застосовано методи інтелектуальної обробки, зокрема нечітку логіку, для оцінювання технічного стану в умовах невизначеності вимірювальних даних. Показано, що комплексне використання багатоканальних вимірювань, бази даних та інтелектуальних алгоритмів підвищує достовірність діагностування й створює основу для розвитку систем моніторингу та предиктивного обслуговування.

Список літератури

1. Asare E.A., Kaufmann E.E., Abdul-Wahab D. Towards trustworthy AI monitoring of roll-to-roll electrode coating: an evidence-centred digital measurement twin with uncertainty-aware sensor fusion. *Measurement: Digitalization*, 2026, vol. 7, art. 100053. doi: https://doi.org/10.1016/j.meadig.2026.100053

2. He J., Shi P., Xu X., Han D. Rolling mill fault diagnosis under limited datasets. *Knowledge-Based Systems*, 2024, vol. 291, art. 111579. doi: https://doi.org/10.1016/j.knosys.2024.111579

3. Назарова О.С., Васильєв Б.В., Шокуров Д.Р. Удосконалення системи діагностики стана холодної прокатки на основі бази даних його електромеханічних процесів. *Електротехніка та електроенергетика*. 2023. № 1. С. 7–18. doi: https://doi.org/10.15588/1607-6761-2023-1-1

CALIBRATION AND VERIFICATION OF DEVICES IMPLEMENTING METHODS FOR REMOTE DETERMINATION OF THE PHASE OF THE REFLECTION COEFFICIENT

Kvasnikov V., Kyselov I., Ovcharov Y.
Kyiv, Ukraine, kvp@kai.edu.ua

The object of calibration and verification is an ultrasonic device implementing a two-frequency phase method for remote testing of media by determining the phase of the reflection coefficient (PRC).

During the tests, the PRC from various specimens located in water shall be determined.

To determine the complex reflection coefficient, the amplitudes of the reflected signals are also determined during the tests.

1. Calibration procedure

The calibration procedure for devices for remote determination of the phase of the reflection coefficient may be based on the use of a reflector with a known PRC value. Since any calibration procedure involves setting the zero point of the instrument, the most suitable solution appears to be the use of a flat reflector with a zero phase of the reflection coefficient.

The calibration procedure itself consists of the following steps:

- the reference reflector is positioned at a specified distance (in the far field) from the acoustic transducer;
- the transducer and the reflector are rotated to determine the position at which the maximum amplitude of the reflected signal is achieved, corresponding to the normal direction of the transducer radiation pattern toward the reference reflector;
- the amplitudes of the reflected signals at the input of the device are determined; these amplitudes should be within the middle of the possible variation range.

If the amplitude meets this requirement, the instrument reading is recorded. The signal amplitudes can be varied by changing the power of the transmitted signal or the area of the reference reflector. For the selected frequencies, f_1 = 75.3163 kHz and f_2 = 87.8691 kHz, it is convenient to use a flat metal plate with a diameter of 0.3÷0.4 m.

The use of a flat metal plate as a reference reflector with a zero PRC at the selected frequencies f_1 and f_2 is substantiated below. It is shown that the PRC at each frequency is affected by the plate thickness (r). However, when measurements are performed using the two-frequency method [1], this effect is eliminated, while only the effect of the impedances of the adjoining media remains [2].

It should be noted that the plate thickness (r) cannot be selected arbitrarily and, for specific operating frequencies, must be determined based on the conditions for achieving the maximum values of the reflection coefficient magnitude.

2. Verification Procedure

The methods widely used in measurement technology for determining measurement errors by comparing the readings of a reference instrument and the instrument under verification appear to be inapplicable to devices of this type.

In this regard, methods based on determining the measurement error at specific points within the measurement range by the instrument under verification itself are of interest.

One possible method for verifying such devices may involve setting the device zero using a reference reflector with a zero PRC and determining the measurement error using a reflector having a PRC equal to π (180°).

By providing appropriate input signal levels that eliminate the occurrence of amplitude-phase error, the result of such verification will depend on the accuracy with which the zero reading of the device is established and the accuracy with which a PRC equal to π (180°) is provided.

A possible reference reflector in the form of a flat metal plate is considered above.

Another reference reflector providing a PRC of π (180°) for ultrasonic signals may be the water–air interface.

Due to the large difference in the acoustic impedances of these media (approximately 3500 times), the magnitude of the reflection coefficient at such an interface can be assumed to be equal to 1, while its phase can be assumed to be π (180°).

Thus, verification of the devices is performed using two reference reflectors. The measurements are performed twice:

- during the first measurement, the instrument zero is set;
- during the second measurement, the reading corresponding to a PRC equal to π (180°) is recorded.

The measurements shall be performed with the reflectors positioned in the far field of the transducer (antenna).

References

1. Kvasnikov V.P., Ovcharov Yu.V. Methods for Remote Determination of the Phase of the Reflection Coefficient. *Visnyk Inzhenernoi Akademii Ukrainy*, 2009, no. 1, pp. 82–84.

2. Ovcharov Yu.V. Influence of the Frequency Dependence of the Reflection Coefficient on the Result of Phase-Based Locational Measurements. *Visnyk Inzhenernoi Akademii Ukrainy*, 2017, no. 2, pp. 187–190.

МЕТРОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО МОНІТОРИНГУ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ МАШИННОГО НАВЧАННЯ

Обнявко Т.С.
Одеса, Україна, tobniavko@gmail.com

Сучасні електричні мережі характеризуються зростанням кількості нелінійних навантажень, силових електронних перетворювачів та розосереджених джерел генерації, що ускладнює контроль параметрів електричної енергії. Відповідно до чинних вимог до моніторингу якості електричної енергії в системах розподілу контролю підлягають, зокрема, частота, напруга, небаланс напруги, напруги гармонік, флікер, а також провали та перенапруги [1]. Тому актуальним завданням є перехід від періодичного аналізу окремих результатів вимірювань до інтелектуального опрацювання потоків вимірювальних даних.

Оцінювання якості електричної енергії безпосередньо залежить від характеристик вимірювальних засобів та методів опрацювання отриманих сигналів. Дослідження сучасних засобів оцінювання якості електричної енергії показують, що до основних контрольованих параметрів належать напруга, гармонічні складові, дисбаланс фаз та флікер, а сучасні аналізатори поєднують вимірювання декількох параметрів із цифровим опрацюванням інформації [2]. Збільшення обсягів даних створює передумови для застосування машинного навчання як інструменту автоматизованого виявлення відхилень та класифікації характерних порушень.

Перспективним є формування інтелектуальної системи моніторингу, у якій машинне навчання застосовується не замість вимірювань, а для опрацювання результатів метрологічно забезпеченого вимірювального каналу. Запропонований підхід передбачає послідовне виконання операцій вимірювання напруги та інших параметрів, цифрового опрацювання сигналів, формування інформативних ознак, автоматичного виявлення аномальних режимів та їх класифікації. Як ознаки можуть використовуватися амплітудні та частотні характеристики сигналу, рівні гармонік, тривалість і величина відхилення напруги, а також статистичні параметри вимірювальних даних.

Важливою перевагою інтелектуального підходу є можливість адаптації моделі до зміни режимів функціонування електричної мережі. У процесі експлуатації система накопичує нові результати вимірювань, що можуть використовуватися для періодичного оновлення навчальної вибірки та коригування параметрів моделі. Такий підхід дає змогу враховувати зміни структури навантаження, появу нових типів електронних перетворювачів та зміну характеру споживання електричної енергії. Водночас автоматичне оновлення моделі повинно здійснюватися контрольовано, оскільки зміна її параметрів може впливати на стабільність та достовірність результатів класифікації.

Застосування машинного навчання є особливо доцільним для виявлення подій, які мають складну або нестаціонарну структуру. На відміну від простого

порівняння виміряного значення з установленим порогом, алгоритм може враховувати сукупність параметрів сигналу та встановлювати характер відхилення за сформованими ознаками. Це створює можливість автоматизувати розпізнавання провалів і перенапруг, гармонічних спотворень, небалансу та інших порушень якості електричної енергії без необхідності постійного втручання оператора.

Метрологічною проблемою при цьому є вплив характеристик вимірювального каналу на результат роботи алгоритму. Похибки вимірювання, шуми, обмеження розрядності аналого-цифрового перетворення та особливості цифрового опрацювання можуть змінювати ознаки сигналу, за якими модель машинного навчання здійснює класифікацію. Унаслідок цього система може помилково ідентифікувати незначне відхилення як порушення якості або, навпаки, не виявити короткочасну подію. Тому навчальна вибірка повинна формуватися з урахуванням реальних характеристик вимірювального тракту, а ефективність моделі необхідно оцінювати не лише за точністю класифікації, а й за частотою помилкових спрацювань та пропущених подій.

З огляду на зазначене, метрологічно обґрунтована структура інтелектуального моніторингу повинна передбачати взаємозв'язок між характеристиками засобів вимірювання, алгоритмами цифрового опрацювання та моделями машинного навчання. Доцільним є створення бази вимірювальних даних із фіксацією не лише класифікованої події, а й первинних результатів вимірювання, параметрів вимірювального каналу та умов отримання даних. Такий підхід забезпечує можливість простеження результату інтелектуального аналізу до первинних результатів вимірювань та створює передумови для оцінювання достовірності автоматизованих рішень.

Таким чином, застосування машинного навчання для моніторингу конкретних показників якості електричної енергії є перспективним напрямом розвитку інтелектуальних вимірювальних систем. Поєднання метрологічно забезпеченого вимірювання з алгоритмами автоматичного виявлення та класифікації відхилень дає змогу підвищити оперативність аналізу стану електричної мережі. Подальші дослідження доцільно спрямувати на розроблення моделей машинного навчання, стійких до похибок та шумів вимірювального каналу, а також на встановлення взаємозв'язку між метрологічними характеристиками вимірювальної системи та достовірністю результатів інтелектуальної класифікації.

Список літератури

1. Про затвердження Кодексу систем розподілу: постанова Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг, від 14.03.2018 р. № 310. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0310874-18 (дата звернення: 13.09.2026).

2. Криницький О.С., Рибчин Б.Р. Дослідження приладового забезпечення оцінювання якості електричної енергії. *Метрологія та прилади*. 2024. № 2. С. 39–43. doi: https://doi.org/10.30837/2663-9564.2024.2.08

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МЕТРОЛОГІЧНОЇ ПРОСТЕЖУВАНОСТІ ВІЙСЬКОВОГО ЕТАЛОНА ЗБРОЙНИХ СИЛ УКРАЇНИ ОДИНИЦІ ІМПУЛЬСНОЇ НАПРУГИ У ДІАПАЗОНІ ЧАСТОТ ВІД 100 МГЦ ДО 18 ГГЦ ВІДПОВІДНО ДО ІЄРАРХІЧНОЇ СХЕМИ ПЕРЕДАВАННЯ ОДИНИЦІ ІМПУЛЬСНОЇ НАПРУГИ

Горяча І.О., Дуболазов Ю.О., Коротій О.О.
Харків, Україна, o.myronenko@post.mil.gov.ua

Забезпечення надійності та боєздатності сучасного озброєння безпосередньо залежить від точності вимірювання параметрів радіоелектронних систем, де імпульсна напруга є одним із важливих показників. Надійність та достовірність результатів вимірювань під час проведення технічного обслуговування та контролю параметрів озброєння та військової техніки повинна бути гарантована шляхом забезпечення метрологічної простежуваності результатів вимірювань до національного еталона. Наразі забезпечення простежуваності вимірювань одиниці імпульсної напруги від військового еталона до засобів вимірювальної техніки найнижчого рівня ієрархічної схеми є значно ускладненим, оскільки в Україні відсутній державний еталон одиниці імпульсної напруги та немає можливості підтвердження відповідності військового еталона вимогам міжнародного стандарту ISO/IEC 17025 шляхом проведення прямих звірень імпульсних сигналів.

З метою вирішення цього питання запропоновано метод розділення складного імпульсного сигналу на базові фізичні складові (метод декомпозиції). Основними параметрами при проведенні метрологічного підтвердження еталонного генератора перепаду напруги є тривалість фронту та амплітуда імпульсів. Забезпечення простежуваності результатів вимірювань тривалості фронту пропонується здійснювати за допомогою військового еталона Збройних Сил України часу та частоти ВЕЗСУ 07-01-01-09, який має оптичний зв'язок із Національним первинним еталоном НДЕТУ TF-01-2021. У той же час простежуваність результатів вимірювань амплітуди імпульсу (вершина прямокутного імпульсу як сталий рівень напруги на короткому проміжку) пропонується забезпечити через еталон електрорушійної сили ВЕЗСУ 08-03-01-09, що отримує розмір одиниці від Державного еталона ДЕТУ 08-04-99.

Водночас вирішення питання забезпечення простежуваності вимірювань імпульсної напруги вимагає обов’язкового оновлення технічної складової військового еталона: заміни радянського осцилографа С9-9 сучасним вимірювальним приладом. У 2026 році для заміни С9-9 заплановано закупівлю базового блоку стробоскопічного осцилоскопа Keysight N1000A зі смугою пропускання 33 ГГц, часом наростання 10,6 пс та 16-бітним АЦП. Реалізація методу декомпозиції у поєднанні з модернізацією військового еталона дозволить повністю відновити метрологічну простежуваність за стандартом ISO/IEC 17025, гарантуючи достовірність результатів вимірювань під час проведення технічного обслуговування та контролю параметрів озброєння та військової техніки.

АНАЛІЗ СКЛАДОВИХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ПРОВЕДЕННЯ ВИМІРЮВАНЬ НА ВІЙСЬКОВОМУ ВТОРИННОМУ ЕТАЛОНІ ЗМІННОЇ НАПРУГИ

Дзисюк О.В., Климченко С.В., Уднiков О.М.
Харків, Україна, svetlanaklimcenko795@gmail.com

Згідно із Законом України «Про метрологію та метрологічну діяльність», еталони, які використовуються поза сферою законодавчого регулювання, підлягають калібруванню. Вимогою сучасного калібрування є не лише визначення фактичних значень фізичної величини, а й обов'язкове оцінювання невизначеності результатів вимірювань для забезпечення метрологічної простежуваності.

З метою визначення мінімальної невизначеності вимірювань, що проводяться на Військовому еталоні Збройних Сил України одиниці напруги змінного струму в діапазоні напруги від 0,001 до 1000 В та частоти від 20 Гц до 30 МГц, було проведено аналіз джерел похибок, що є умовою для побудови бюджету сумарної стандартної невизначеності.

Як відомо, сумарна стандартна невизначеність – це середньоквадратична сума невизначеності за типом А та за типом В. Невизначеність за типом А для еталона являє собою випадкове розсіювання результатів вимірювань термо-ЕРС еталонного термоперетворювача.

Складовими частинами невизначеності за типом В є:

1. Похибка переходу від напруги постійного струму до напруги змінного струму, зумовлена фундаментальними термоелектричними явищами Томсона і Пельтьє, від яких створюється додаткове тепло.

2. Похибка різнополярності або похибка асиметрії, пов’язана з нерівномірністю прогріву нагрівача при зміні направлення струму.

3. Похибка, зумовлена різночасовим зрівнянням та нестабільністю термоперетворювачів.

4. Частотна похибка, зумовлена наявністю реактивних складових опору як у самих перетворювачах, так і в додаткових резисторах, з’єднувальних елементах, перемикачах і т.п.

5. Похибка відтворення постійної напруги, яка еквівалентна одиниці середньоквадратичного значення змінної напруги. В еталоні для вимірювання постійної напруги використовується мультиметр HP3458A.

6. Похибка вимірювання термоелектрорушійної сили, яка вимірюється двоканальним нановольтметром HP34420A.

7. Похибка, що обумовлена зовнішніми факторами: нестабільністю мережі живлення, температурним впливом, потоками повітря тощо.

Сформована на основі цього аналізу модель бюджету невизначеності дозволяє кількісно оцінити вимірювальні можливості Військового еталона Збройних Сил України одиниці напруги змінного струму, гарантуючи метрологічну простежуваність результатів вимірювань до національних еталонів.

ФОРМУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО СТАНДАРТНОГО ЗРАЗКА ПРОДУКЦІЇ НЕЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРИРОДИ

Походило Є.В., Саф'яник В.Г.
Львів, Україна, yevhen.v.pokhodylo@lpnu.ua,
volodymyr.safianyk.asp.2025@lpnu.ua

Оцінювання якості продукції неелектричної природи здійснюють шляхом порівняння її показників із показниками стандартного зразка заданого рівня якості. Стандартний зразок є важливою складовою метрологічного забезпечення такого контролю, однак його застосування має суттєве обмеження, пов'язане зі складністю забезпечення сталості характеристик під час зберігання та безпосередньо в процесі вимірювань. Оскільки одиничні показники якості продукції можуть мати різну фізичну природу, для їх визначення також необхідні різні засоби та методики вимірювань. Тому актуальним є подання властивостей традиційного стандартного зразка у вигляді стабільних і відтворюваних електричних параметрів.

Одним із підходів до вирішення цієї задачі є імітансний метод контролю якості, за яким об'єкт неелектричної природи подається багатоелементним двополюсником, електричні параметри якого відображають його фізико-хімічні властивості [1]. Інформативними параметрами такого двополюсника можуть бути активна та реактивна компоненти адмітансу або імпедансу, їх модулі та фазові кути, а для відомої електричної моделі – параметри її RC-елементів. Вимірювання відповідних параметрів традиційного стандартного та контрольованого зразків за однакових умов створює можливість реалізації диференційного методу контролю якості.

Електричний стандартний зразок доцільно формувати на основі результатів вимірювання параметрів адмітансу традиційного стандартного зразка продукції заданого рівня якості. Його властивості можуть бути представлені еквівалентними значеннями ємності та провідності або опору. Отже, замість багатоелементного двополюсника стандартний зразок може бути поданий паралельною двоелементною RC-схемою з параметрами, які відтворюють результати вимірювань традиційного зразка на заданих частотах. Такий підхід наближує стандартний зразок продукції неелектричної природи до традиційних електричних мір та дає змогу забезпечити сталість установлених електричних параметрів.

Особливості формування електричного стандартного зразка залежать від конструкції первинного перетворювача. Під час використання чотириелектродного ємнісного сенсора результат вимірювання визначається інформативними параметрами об'єкта та не залежить від приелектродного імпедансу. Активна компонента адмітансу при цьому визначається активною провідністю об'єкта, а реактивна компонента закономірно змінюється зі зміною частоти тестового сигналу. Це дає змогу безпосередньо використовувати значення активної та реактивної компонент на вибраних частотах для формування параметрів електричного стандартного зразка.

У разі застосування двохелектродного сенсора з неізольованими електродами на результат вимірювання впливає приелектродний імпеданс, зумовлений, зокрема, ємністю подвійного шару. У низькочастотній області такий вплив є суттєвим, однак зі збільшенням частоти він зменшується. Для активної компоненти адмітансу існує частотна область, у якій результат практично перестає залежати від частоти. Тому для низькоомних об'єктів електричний стандартний зразок активної компоненти може бути сформований за значенням активної провідності на високих частотах, а для високоомних об'єктів – у ширшому частотному діапазоні.

Іншим способом формування стандартного зразка є використання частотної залежності реактивної компоненти адмітансу. Для двохелектродного сенсора така залежність може мати характерні екстремальні значення. Частота, на якій проявляються екстремальні значення, залежить від електрофізичних параметрів досліджуваного об'єкта. Для зразків із різними електрофізичними властивостями частоти екстремальних значень відрізняються [2]. Отже, як інформативну ознаку стандартного зразка можна використовувати не лише окреме значення електричного параметра на фіксованій частоті, але й характер зміни реактивної компоненти в заданому частотному діапазоні.

Отже, електричний стандартний зразок продукції неелектричної природи може формуватися двома основними способами. Перший ґрунтується на використанні встановлених числових значень активної та реактивної компонент адмітансу на фіксованих частотах або у вибраному частотному діапазоні. Другий передбачає використання параметрів амплітудно-частотної характеристики, зокрема характеру її зміни та частоти екстремальних значень. Вибір способу визначається електрофізичними властивостями продукції, конструкцією ємнісного сенсора та частотним діапазоном вимірювань.

Запропонований підхід дає змогу подати нестабільний традиційний стандартний зразок його представленням із установленими та відтворюваними електричними параметрами. Порівняння параметрів такого зразка з параметрами контрольованого об'єкта забезпечує реалізацію диференційного методу оцінювання якості. Використання електричних стандартних зразків може бути основою для створення засобів оперативного контролю продукції неелектричної природи, ідентифікації її невідповідності або фальсифікації, а також для вдосконалення метрологічного забезпечення відповідних вимірювальних засобів.

Список літератури

1. Походило Є.В., Столярчук П.Г. Імітансний контроль якості: монографія. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2012. 164 с.

2. Стасишин Ю.А. Ідентифікація харчової продукції за параметрами адмітансу: дис. д-ра філософії: 152 – метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка. Львів, 2025. 140 с.

ІДЕНТИФІКАЦІЯ ЗРІЛОСТІ БЕТОНУ ЗА ПАРАМЕТРАМИ АДМІТАНСУ

Походило Є.В., Флінта М.Є.
Львів, Україна, Yevhen.V.Pokhodylo@lpnu.ua, Mykola.Y.Flinta@lpnu.ua

В Україні діє система сучасного моніторингу «Maturix», яка відстежує в режимі реального часу дозрівання бетону. Система реалізує метод, який ґрунтується на результатах вимірювання зміни температури бетону з використанням вбудованих у нього відповідних сенсорів. Результати вимірювання опосередковано порівнюються із міцністю на стискання дозрілих у лабораторних умовах зразків. Також відомі методи вимірювання електричних параметрів бетону (електричного опору) з метою контролювання його міцності. Реалізуються такі методи через прикладання електродів двоелектродного ємнісного сенсора до зразка зрілого бетону безпосередньо або вбудовуванням такого ємнісного сенсора з круглим перерізом електродів у свіжий бетон.

Пропонується спосіб оперативного контролю зрілості бетону під час будівництва в реальних умовах за результатами вимірювання інформативних електричних параметрів адмітансу бетону, що відображають його питому провідність та діелектричну проникність.

Для реалізації способу контролю зрілості у свіжий бетон під час бетонування перекриття вбудовують триелектродний ємнісний сенсор з металевими електродами плоскопаралельної конструкції заданих геометричних розмірів. Запропонований спосіб дає змогу безпосередньо контролювати якість бетонних конструкцій за результатами вимірювання електричних параметрів.

Використання триелектродного ємнісного сенсора плоскопаралельної конструкції для реалізації запропонованого способу дає змогу виокремити рідку фазу бетону (без наповнювача) заданого об’єму, а також забезпечити інваріантність результату від пливу крайових ефектів, що властиве ємнісним сенсорам двохелектродної конструкції

Досягається таке виокремлення завдяки вибраним лінійним розмірам між електродами, які є меншими від розмірів наповнювача. При цьому об’єм контрольованого бетону формується міжелектродним розміром робочих електродів та розміром отвору захисного електрода, розміщеного між ними.

Для вимірювання електричних параметрів бетону можна використати вимірювач активної та реактивної компонент адмітансу на фіксованій частоті тестового сигналу. Такими компонентами можуть бути ємність та провідність або активна та реактивна складові адмітансу. За отриманими результатами за необхідності розраховуються діелектрична проникність та питома провідність. Вимірювач повинен забезпечити під’єднання триелектродного сенсора [1].

Список літератури

1. Походило Є., Флінта М. Метод ідентифікації зрілості бетону під час будівництва. *Вимірювальна техніка та метрологія*. 2025. Вип. 86. № 4. С. 74–77. doi: https://doi.org/10.23939/istcmtm2025.04.074

СЕКЦІЯ 5.

ПРОСТІР І ЧАС

CONSIDERATION OF WAVE PHASE-FRONT FLUCTUATIONS IN THE STROBING PROCESS DURING TRACKING MEASUREMENT OF LOW-ALTITUDE AIR OBJECTS ANGULAR COORDINATES

Karlov V., Kuznietsov O., Korzhov A., Kovalchuk A.,
Biesova O., Barkhudaryan M.
Kharkiv, Ukraine, nickbnv65@ukr.net

Multichannel radar tracking measurement systems with a phased-array antenna (PAA) are widely used to provide tracking of aerial objects. When a PAA is used in a three-coordinate radar, the spatial coordinates of an airborne target are determined by combining the amplitude and phase methods [1-3].

The observation of airborne objects at significant ranges and low altitudes is carried out under conditions influenced by inhomogeneities in the troposphere and the underlying surface, which cause significant phase fluctuations [4]. This, in turn, reduces the accuracy of real-time measurements of an aerial object's coordinates and motion parameters and diminishes the accuracy and stability of radio-technical tracking systems [5].

One of the essential operations in performing tracking measurements of the trajectory parameters of airborne objects is the strobe operation. Taking into account the effect of phase fluctuations in the received signal when performing this operation is a relevant practical task for ensuring the accuracy and stability of air target tracking. Therefore, the problem of accounting for phase fluctuations in the received radar signal needs to be addressed in order to improve the accuracy of the strobe procedure during tracking measurements of the angular coordinates of low-altitude airborne objects [6]. In this study, it is believed that the distribution law of phase fluctuations is a normal distribution with a zero mathematical expectation, and the correlation function is described by an oscillating dependence.

As a result of the conducted study, the variations in strobe dimensions during tracking measurement of low-altitude aerial objects angular coordinates by a PAA radar in the presence of phase fluctuations were evaluated. It has been shown that, due to the effect of phase fluctuations, the growth in the strobe size can reach tens of times. Taking phase fluctuations into account when processing the received signal makes it possible to reduce the size of the strobe by several times, which improves the accuracy of tracking an airborne target based on its angular coordinates.

The scientific novelty of the results obtained lies in the following:

– the possibilities of improving the accuracy of tracking measurement the low-altitude aerial objects angular coordinates at the strobing process have been investigated;

– the capabilities of tracking measurement with fixed parameters have been expanded, taking into account the effect of phase fluctuations in the received signal in the operating algorithms.

The reliability of the obtained results is based on the use of experimentally derived data on the statistical characteristics of phase fluctuations and the results of numerical assessments of the reduction in the accuracy of angular coordinate measurements in radar systems with PAA.

The main contribution of this study is that:

– the increase in the strobe dimensions due to the influence of fluctuation phenomena in the troposphere during tracking measurement of the low-altitude aerial objects angular coordinates has been assessed;

– expressions have been obtained for accounting phase fluctuations in the strobing procedure, which significantly affect the accuracy and robustness of tracking measurement of angular coordinates depending on the dimensions of tropospheric inhomogeneities and the signal wavelength;

– accounting for phase fluctuations makes it possible to reduce the strobe size and improve the effectiveness of the strobing operation in a phased-array radar during the tracking of low-altitude aerial objects by angular coordinates.

The assumption of a normal distribution law and an oscillatory form the correlation function of phase fluctuations must be taken into account when applying the obtained results in practice, as well as in further theoretical studies.

References

1. Barton D.K. Radar Equations for Modern Radar. London, Artech House. 2012. 264 p. Available at: https://www.scribd.com/document/293606437/Radar-Equations-for-Modern-Radar

2. Zhengjie Li, Junwei Xie, Weijian Liu, Haowei Zhang, Bin Liu, Yuxuan Liu. Pareto-based bi-objective optimization for robust power allocation in hybrid MIMO phased-array radar system under air defense maneuvering tracking. *Expert Systems with Applications*, 2024, vol. 235, pp. 121248. doi: https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.121248

3. Tianxing Xiao, Yonghua Lu, Xinyu Di, Zhicheng Ma, Hailong Qian, Yan Liu, Yinlong Zhu. A UAV tracking framework via motion-decoupled trajectory prediction and occlusion handling. *Information Sciences*, 2025, vol. 726, pp. 122784. doi: https://doi.org/10.1016/j.ins.2025.122784

4. Yevseiev S., Kuznietsov O., Herasimov S. et al. Development of an optimization method for measuring the Doppler frequency of a packet taking into account the fluctuations of the initial phases of its radio pulses. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2021, 2/9(110), pp. 6–15. doi: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.229221

5. Kuznietsov O., Kovalchuk V., Kovalchuk A., Karlov D., Yarovyy S., Vasylyshyn V. Providing the Required Accuracy of Measurements of Spatial Coordinates of Aerial Objects. *IEEE 6th International Symposium on Microwaves, Radar and Remote Sensing (MRRS), Ukrainian Microwave Week (UkrMW)*. Kharkiv, 2020, September 21–25, pp. 226–229. doi: https://doi.org/10.1109/UkrMW49653.2020.9252605

6. Kuznietsov O., Kolomiitsev O., Nos I., Biesova O., Krykhovetskyi H. Proposals to improve the information capabilities of coastal-based radar stations for surveillance of surface and air objects. *Advanced Information Systems*, 2024, vol. 8, no. 1, pp. 48–56. doi: https://repository.kpi.kharkov.ua/items/f92c46f9-0b17-469c-bfa6-3fc474212a7d

БЕЗКОНТАКТНИЙ ІНТЕРФЕРОМЕТР ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ВЕЛИКИХ КІНЦЕВИХ МІР ДОВЖИНИ

Костріков О.Л., Ковшов С.Б.
Харків, Україна, alex_kost@ukr.net

Найбільш точним методом вимірювання довжини кінцевих мір довжини (далі – КМД) є інтерференційний. Як інтерференційний компаратор використовуються різновиди інтерферометра Майкельсона, наприклад інтерферометр Кьостерса.

Сталою практикою є використання скляної плоскопаралельної пластини (далі – ППП), яка притирається до однієї з торцевих поверхонь КМД. Однак це добре працює лише з короткими КМД довжиною до 100 мм, що вимірюються на вертикальних інтерферометрах. КМД довжиною понад 100 мм зазвичай вимірюються на горизонтальних інтерферометрах. У цьому випадку притерта ППП викликає перерозподіл навантажень на КМД, що неминуче впливає на розташування точок Ейрі.

Авторами пропонується оригінальна конструкція горизонтального інтерференційного компаратора, яка не потребує притирання ППП. Ізюминкою цієї конструкції є використання як відбиваючого елемента призми БР-180. Призма розташована позаду КМД таким чином, що віддзеркалення задньої торцевої поверхні КМД на інтерференційній картині розташоване поряд із віддзеркаленням переднього торця КМД. Крім того, в нас на інтерференційній картині є також зони, куди потрапляють віддзеркалення, що утворилися при відбитті променя від поверхні скла призми при переходах повітря-скло та скло-повітря відповідно.

Таким чином, ми маємо дві пари відстаней, які цілком достатні для обчислення довжини КМД. Перша пара – це відстань $\boldsymbol{L_1}$ між переднім торцем КМД та відбитком повітря-скло. Ця відстань складається з довжини КМД $\boldsymbol{L}$ та відстанню між задньою поверхнею КМД та гіпотенузою призми БР-180 $\boldsymbol{L_2}$. Друга пара – це відстань між відбитком скло-повітря та віддзеркаленням заднього торця КМД, тобто дорівнює $\boldsymbol{L_2}$. Відповідно, для обчислення довжини КМД $\boldsymbol{L}$ достатньо від $\boldsymbol{L_1}$ відняти $\boldsymbol{L_2}$.

Перевагами запропонованої конструкції компаратора є:

• повне виключення механічного контакту з КМД внаслідок виключення ППП;

• нульове додаткове навантаження та силовий момент на торець КМД, які виникають при притиранні ППП. Як наслідок, зберігається розташування точок Ейрі;

• усунення складової невизначеності вимірювань, що виникає внаслідок притирання ППП до торця КМД;

• усі вимірювання відстані між двома протилежними гранями КМД за один установ без переміщення додаткових елементів.

Запропонована схема компаратора забезпечить підвищення надійності та точності метрологічного контролю довжини великих КМД.

ДОСЛІДЖЕННЯ ТОЧНОСТІ PTP-СИНХРОНІЗАЦІЇ ШКАЛИ ЧАСУ ПО ВОЛОКОННО-ОПТИЧНІЙ ЛІНІЇ

Солдатов В.В., Мироненко О.В., Ротарь А.Г., Рарог Р.М.
Харків, Україна, time.metrology@ukr.net; rarogroman@gmail.com

Досліджено точність синхронізації шкали часу між двома віддаленими точками із застосуванням волоконно-оптичного каналу зв'язку за протоколом PTP Precision Time Protocol (IEEE 1588). Протокол орієнтований на побудову стійких систем синхронізації для телекомунікаційних і спеціалізованих інформаційних мереж, які потребують синхронізації часу із високою точністю. Експеримент реалізовано на базі обладнання Microsemi TimeProvider 4100 у конфігурації PTP Master/Slave (профіль Telecom-2008). Сервер точного часу Microsemi TimeProvider 4100, призначений для звірення шкал часу UTC(UA) та споживачів і включений у режимі Master PTP сервер, при безперервному режимі роботи дозволяє отримати сигнал синхронізації за протоколом PTP від національного еталона одиниць часу та частоти, сигналу частоти 1 PPS шкали координованого часу UTC(UA);

За результатами обробки експериментальних даних отримано такі результати: cTE = 396 нс (середнє значення, систематична складова похибки), min = 365 нс (мінімальне значення), max = 422 нс (максимальне значення), Pk-to-Pk = 57 нс (розмах), dTE = 11,8 нс (середньоквадратичне відхилення, динамічна складова). Зафіксована варіація похибки є обмеженою, часовий ряд не містить виражених фазових стрибків, що підтверджує стабільність синхронізації. Систематична складова похибки має сталий характер і може бути врахована під час калібрування обладнання та забезпечує простежуваність до часу UTC(UA).

Отримані результати підтверджують практичну придатність передавання шкали часу волоконно-оптичним каналом із використанням протоколу PTP для систем, що потребують субмікросекундної точності синхронізації часу.

ПЕРЕДАЧА ШКАЛИ ЧАСУ ЗА PTP БЕЗ TRANSPARENT CLOCK У ПОБУТОВІЙ ВОЛОКОННІЙ ЛІНІЇ ТА ПОРІВНЯННЯ З МІЖНАРОДНИМИ ЕКСПЕРИМЕНТАМИ

Солдатов В.В., Мироненко О.В., Ротарь А.Г., Рарог Р.М.
Харків, Україна, o.myronenko@post.mil.gov.ua

Єдина шкала часу потрібна для узгодженої роботи розподілених систем у телекомунікаціях, енергетиці, фінансах, навігації та метрології. Без узгодженого часу зростають помилки синхронізації подій і погіршується порівняння вимірювань. Основним глобальним джерелом часу лишаються сигнали GNSS, однак опора лише на супутник має слабкі місця – погіршення прийому в міській забудові, радіоелектронні перешкоди, збої каналу. В умовах війни додаються навмисне глушіння GPS/GNSS і спуфінг. Тому потрібен наземний резерв

синхронізації. У стратегії CCTF на 2025–2035 рр. зазначено потребу розвивати альтернативні методи передавання часу й частоти.

Серед наземних методів застосовують оптичне волокно та IEEE 1588 (Precision Time Protocol, PTP), у тому числі профіль High Accuracy / White Rabbit. Практична точність залежить від класу каналу, наявності PTP-aware елементів (transparent clock, boundary clock), асиметрії затримок і незалежної опори для контролю. Міжнародна практика розділяє два класи. З PTP-aware / каліброваним волокном (WR, dark fiber + TC) орієнтир – наносекунди (наприклад, jitter 1PPS близько 2,5 нс у CSIR-NPL на 11 км dark fiber з TC). Без transparent clock у живій мережі орієнтир – мікросекунди (Endace на WAN без TC, типово ±2 мкс, піки до 50 мкс, NIST на 150 км, асиметрія порядку 40 мкс).

У роботі оцінено синхронізацію за PTP між двома TimeProvider 4100 на відстані близько 10 км у побутовій волоконній лінії без transparent clock (TC). Master – на віддаленому кінці, Slave – на локальному. Шкала приймається від Master по PTP. На Slave подано зовнішню опору 10 МГц від рубідієвого стандарту. Точність оцінено порівнянням 1PPS Slave з 1PPS від рубідієвого стандрту частоти та часу. Постійне зміщення на десятки або сотні мілісекунд трактується як затримка кабелів і тракту вимірювання, а не як помилка PTP. Якість оцінювали за стабільністю навколо медіани (MAD, std, вікна 5 хв), стрибками режимів і лінійним дрейфом.

Зафіксовано два режими. У робочому режимі A (плато зміщення близько 50 мс) MAD відхилень від медіани становить 8 нс, std усього плато 11 мкс через рідкі викиди. Після відсікання $|\Delta| < 1$ мкс (71% плато) отримано std 68 нс і MAD 4 нс. Медіана std у вікнах 5 хв – 3 нс, більшість таких сегментів менша за 0,1 мкс. Лінійна оцінка відносної частоти – близько $+2 \cdot 10^{-11}$ (+0,02 ppb) за дрейфом близько +2 мкс/добу.

У погіршеному режимі B (плато 376–379 мс) std порядку 1–3 мс, MAD від сотень мікросекунд до мілісекунд, відносна частота близько $-2{,}5 \cdot 10^{-8}$ (−25 ppb). Між режимами спостерігаються стрибки на сотні мілісекунд. Результат режиму A кращий за типові польові дані PTP у WAN без TC без локальної частотної опори і близький за порядком до лабораторних нс-орієнтирів при PTP-aware тракті. Режим B і стрибки показують, що заявлену точність не можна розповсюджувати на весь час роботи.

Поєднання PTP Master-Slave протяжністю 10 км без transparent clock із зовнішньою опорною частотою 10 МГц на Slave дозволяє в режимі A утримувати наносекундну (або субмікросекундну) точність за критерієм 1PPS. На практиці потрібні локальна частотна опора 10 МГц на Slave, незалежний контроль 1PPS і журнал стану Slave (PTP lock, 10 МГц, holdover) синхронно з вимірюванням. Окремо для наступних робіт залишається з'ясувати причини переходів A і B та перевірити той самий тракт з практичною реалізацією transparent clock або boundary clock на шляху мережі.

EFFECT OF TEMPERATURE ON THE STABILITY OF MEASUREMENTS ON A TIME AND FREQUENCY STANDARD

Strilets I., Soldatov V., Zadorozhny M.
Kharkiv, Ukraine, ivan.strilets8814@gmail.com

The accuracy and stability of time and frequency measurements are critically important for many fields of science and technology. One of the key external factors affecting the metrological characteristics of standards (in particular, rubidium and precision quartz oscillators) is fluctuations in ambient temperature.

In accordance with the requirements of the DSTU EN ISO/IEC 17025 [1], strict control of environmental conditions must be ensured during calibration and measurement work. A temperature change of even a fraction of a degree can cause temperature-induced frequency drift in the reference generator, which directly affects the expanded uncertainty of measurements.

This study investigated the effect of temperature fluctuations in a reference laboratory on the short-term and long-term stability of measurements. Experimental studies were conducted using a time and frequency standard in conjunction with a high-precision Pendulum CNT-91 frequency analyzer. Observations were carried out under stabilized climatic conditions and during simulated permissible temperature deviations in the laboratory.

Analysis of the results showed that when the temperature in the laboratory deviates by more than ±1 °C, short-term frequency instability increases, raising the temperature component of measurement uncertainty [2] by 10–15%. This confirms the direct dependence of the reference signal's stability on temperature gradients. To minimize the impact of this factor and achieve the stated measurement uncertainty, it is necessary to use precision climate control systems and continuously monitor the temperature directly in the area where the standard is located.

Maintaining a stable temperature environment is an essential requirement for verifying the metrological traceability and reliability of the results produced by time and frequency standards.

References

1. DSTU EN ISO/IEC 17025:2019. General requirements for the competence of testing and calibration laboratories (EN ISO/IEC 17025:2017, IDT; ISO/IEC 17025:2017, IDT).

2. JCGM 100:2008. Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement. BIPM, 2008. 120 p.

TRACEABILITY OF THE UTC UA STANDARD TO INTERNATIONAL STANDARDS

Strilets I., Soldatov V., Zadorozhny M.
Kharkiv, Ukraine, ivan.strilets8814@gmail.com

Ensuring the uniformity of measurements in the fields of time and frequency at the national level requires continuous confirmation of the metrological traceability of the State Primary Standard of Time and Frequency Units (the national time scale UTC(UA)) to the International Coordinated Time Scale (UTC), which is maintained by the International Bureau of Weights and Measures (BIPM) [1].

UTC(UA) traceability is achieved through continuous participation in international comparisons using global navigation satellite systems (GNSS) in Common-View and All-in-View modes. To automate in-house laboratory comparisons and prepare raw data, the National Scientific Center «Institute of Metrology» uses a hardware-software complex based on the high-precision Pendulum CNT-91 frequency meter-analyzer and the specialized «Karusel» software.

The software suite performs multichannel sampling and measurement of reference signal parameters, with a hardware-based function for compensating for delays in coaxial cables. This enables the calculation of relative frequency deviation with high resolution (on the order of 10^{-12}…10^{-14}), as confirmed by the results of measurement sessions (in particular, on the MJD 61292) [2].

The compiled data sets are regularly transmitted to the BIPM. An analysis of the BIPM Time Department's interactive database and the monthly official Circular T bulletins shows that the time deviation of the UTC(UA) scale relative to Coordinated Universal Time is consistently maintained within ±10 ns.

In addition to global traceability, the reliability of the calibration chains is further confirmed by the results of joint work and comparisons with leading European metrology institutes, in particular the Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB, Germany). Interaction with the PTB reference base contributes to the improvement of uncertainty assessment procedures and the validation of declared calibration and measurement capabilities (CMC).

References

1. BIPM Time Department Interactive Data. International Bureau of Weights and Measures (BIPM). Available at: https://webtai.bipm.org/database/canvas.html?utclab=ok&lab=ua

2. DSTU 3741:2015. State System for Ensuring the Uniformity of Measurements. Standards for Units of Physical Quantities. General Provisions. Kyiv, 2016. 22 p.

PROTECTION OF TIME SYNCHRONIZATION IN AN AUTONOMOUS GNSS DIFFERENTIAL CORRECTION SYSTEM USING NTS

Sniosek O., Soldatov V., Nariezhnii O., Hrinenko T.
Kharkiv, Ukraine, oleh.snieosikov@student.karazin.ua

Time synchronization is an important component of an autonomous differential correction system for a Global Navigation Satellite System (Autonomous DGNSS). The consistency of the time scales maintained by the control and correction stations (CCSs) determines the correctness of GNSS measurement timestamps, the timely transmission of correction data, and the proper joint processing of these data. Disruption of synchronization may affect both the operation of network services and the reliability of navigation measurements.

Previous studies on the differential correction system considered the use of PTP for CCSs acting as lead stations and NTPv4 for mobile CCSs. NTP authentication mechanisms, the ANSI X9.95 scheme, and the possibility of applying the Ukrainian national block cipher Kalyna in accordance with DSTU 7624:2014 were investigated for protecting network time distribution. In [1], an NTP server prototype for Autonomous DGNSS was developed, and its metrological characteristics and load capacity were evaluated. However, since those studies were conducted, the requirements for secure network time synchronization have changed.

In particular, NTP Autokey, which was previously used for NTP server authentication and key management, is no longer recommended. RFC 8633 states that Autokey has known vulnerabilities and should not be used [2]. The current standardized mechanism for securing NTP is Network Time Security (NTS), specified in RFC 8915 [3]. NTS uses the NTS Key Establishment (NTS-KE) procedure based on TLS 1.3 and X.509, after which NTP messages are protected using Authenticated Encryption with Associated Data (AEAD). This approach provides time-source authentication, message integrity protection, and protection against replay attacks.

The object of this study is the secure time-synchronization subsystem of Autonomous DGNSS as a component of an intelligent information and measurement system. The methodology is based on the analysis of relevant standards and recent scientific publications, comparison of previously proposed solutions with current standards, and development of a framework for further experimental research. To assess the state of the time-synchronization subsystem, it is proposed to monitor the deviation of the local time scale of each CCS from the reference time scale, the relative frequency offset, and the divergence between the time scales of different CCSs. Exceeding predefined limits or observing an abnormal rate of change in these parameters may indicate a timing anomaly, technical failure, or cyberattack. The relevance of such monitoring is supported by recent studies of GNSS Time Synchronization Attacks, which are capable of inducing a controlled bias in the clock estimate of a GNSS receiver [4].

Based on the analysis performed, a multi-layer protection architecture for Autonomous DGNSS time synchronization is proposed. The first layer should provide metrological traceability to trusted time sources, including UTC(UA), GNSS, and local high-stability time and frequency standards. The second layer should provide secure

time transfer based on NTS. The third layer should employ a Public Key Infrastructure (PKI) to establish and manage trust in NTS servers and other critical system nodes. The fourth layer should provide monitoring of time and frequency anomalies using data obtained from several time sources and CCSs. Since NTS does not completely eliminate asymmetric delay attacks, the use of multiple independent time sources and, where possible, independent network paths is advisable [3].

A separate research direction is the application of Ukrainian national cryptographic algorithms within the protected time-synchronization subsystem. The previous Autonomous DGNSS prototype demonstrated the practical feasibility of applying the Kalyna cipher [1]. For a modern implementation, it is reasonable to investigate not a direct replacement of the standard cryptographic mechanisms defined for NTS, but the development of an additional national cryptographic profile while retaining the standard profile for interoperability. Such an approach would make it possible to evaluate the impact of national cryptographic algorithms on cryptographic processing latency, synchronization accuracy, and server load capacity.

The proposed PKI is also intended to use a Quantum Random Number Generator (QRNG) as an additional entropy source for the generation of cryptographic key material. A QRNG does not replace NTS; rather, it improves the quality of random values used for cryptographic keys, nonces, and other security-relevant parameters. This approach is consistent with the 2026 ETSI recommendations on the use of QRNGs for generating cryptographically relevant random data [5].

Thus, a modern Autonomous DGNSS should migrate to NTS and employ a dedicated protected time and frequency synchronization subsystem. The proposed research direction combines metrological traceability to a reference time scale, NTS, PKI, QRNG, investigation of a national cryptographic profile, and monitoring of timing anomalies. Further research will focus on the development of an experimental prototype and the evaluation of synchronization error, frequency stability, cryptographic processing latency, resilience to timing attacks, and overall system load capacity.

References

1. Soldatov V.V., Nariezhnii O.P., Hrinenko T.O. Modification of the NTP Time Server of a Differential Correction System According to the ANSI X9.95 Scheme. *Ukrainian Metrological Journal*, 2020, no. 3A, pp. 98–102.

2. Reilly D., Stenn H., Sibold D. Network Time Protocol Best Current Practices. RFC 8633. 2019.

3. Franke D., Sibold D., Teichel K., Dansarie M., Sundblad R. Network Time Security for the Network Time Protocol. RFC 8915. 2020.

4. Gong H. et al. Detection and mitigation of GNSS time synchronization attacks based on dual CNN-LSTM neural networks. *GPS Solutions*, 2026, vol. 30, art. 163.

5. ETSI TR 104 171 V1.1.1. Implementation Guidelines for Quantum Random Number Generators. 2026.

ЩОДО ВРАХУВАННЯ СИСТЕМАТИЧНОГО ВПЛИВУ ЗЕМНОЇ АТМОСФЕРИ НА ВИМІРЮВАННЯ ВІДСТАНЕЙ ЕЛЕКТРОННИМИ ТАХЕОМЕТРАМИ НА ТРАСАХ, БЛИЗЬКИХ ДО ГОРИЗОНТАЛЬНИХ

Прокопов О.В., Олійник А.Є., Шлома А.І.
Харків, Україна, alla.oliinyk.82@ukr.net

У геодезичній практиці вплив атмосфери на електронні тахеометричні вимірювання найчастіше враховують за спрощеним емпіричним підходом, який використовує значення температури, тиску та вологості повітря в точці розміщення приладу. Точність такого підходу залежить від неоднорідності атмосфери вздовж вимірювальної траси. Для коректного визначення систематичної складової похибки необхідно враховувати середньоінтегральний показник заломлення повітря, що характеризує додаткову затримку поширення сигналу.

У роботі розглянуто удосконалену модель систематичного впливу земної атмосфери на результати вимірювання відстаней електронними тахеометрами для трас, близьких до горизонтальних. На відміну від моделі для горизонтальних трас [1], у розрахунках враховано не лише просторову зміну температури повітря вздовж траси, а й зміну атмосферного тиску з висотою. Проаналізовано умови застосування емпіричного підходу, за якого атмосферні поправки визначаються за метеопараметрами лише в точці встановлення тахеометра.

Удосконалена модель передбачає визначення середньоінтегрального показника заломлення шляхом інтегрування вздовж похилої траси. Залежність температури задається як функція координати вздовж траси, а зміна тиску з висотою враховується за універсальною барометричною формулою. Це дає змогу оцінити межі застосування емпіричного способу введення атмосферних поправок.

Результати моделювання показали, що врахування зменшення тиску з висотою призводить до додаткового зменшення граничної довжини траси, для якої можливе застосування емпіричного підходу. Порівняно з випадком, коли враховується лише зміна температури, цей ефект є більш суттєвим за великих градієнтів температури.

Таким чином, удосконалена методологія дає можливість оцінювати систематичний атмосферний вплив не лише для горизонтальних, а й для близьких до горизонтальних трас. Подальші дослідження доцільно спрямувати на випадки, коли градієнт температури змінюється вздовж траси.

Список літератури

1. Прокопов О.В., Шлома А.І., Олійник А.Є. До врахування впливу земної атмосфери на точність вимірювань відстаней електронними тахеометрами на горизонтальних трасах. *Український метрологічний журнал*. 2025. № 3. С. 38–42. doi: https://doi.org/10.24027/2306-7039.3.2025.340425

ПОСЛАБЛЕННЯ ВПЛИВУ АТМОСФЕРНОЇ РЕФРАКЦІЇ ПРИ КАЛІБРУВАННІ ЕТАЛОННОГО ЛІНІЙНОГО БАЗИСУ ЕЛЕКТРОННИМ ТАХЕОМЕТРОМ

Тревого І.С., Перій С.С., Балян А.П.
Львів, Україна, i.trevoho@gmail.com

Для визначення метрологічних характеристик еталонних лінійних геодезичних базисів – робочих еталонів використовують атестовані прецизійні електронні тахеометри. Вимірювання ліній базису здійснюється в реальній атмосфері при перманентних змінах метеорологічних параметрів – температури, атмосферного тиску і вологості. Виникає заломлення світлового променя, яке впливає на вимірювання ліній і вертикальних кутів (зенітних відстаней). Найбільш проблемним є врахування впливу вертикальної рефракції при вимірюванні зенітних відстаней та визначенні горизонтальних проєкцій ліній базису. Наприклад, для періодів денних спостережень, які ми проводимо літом на Яворівському еталонному лінійному базисі, коефіцієнт вертикальної рефракції змінювався від 0 до -1,5 і більше, що відповідає нормальній стратифікації атмосфери для низької траси, на якій розташований базис. Точне врахування впливу вертикальної рефракції при вимірюванні вертикальних кутів вимагає трудомісткого визначення коефіцієнта вертикальної рефракції в процесі вимірювань, як середньоінтегрального значення, з двосторонніх спостережень, які, через суттєву складність, переважно заміняються неодночасними. Крім того, зазначимо, що метеопараметри виміряються, як правило, лише біля тахеометра і відбивача, що також впливає на точність врахування вертикальної рефракції. Використання рекомендованого (наприклад, фірмою Leica Geosystems) коефіцієнта вертикальної рефракції $k = 0{,}13$ (буває рідко і в короткий проміжок часу) у процесі калібрування на еталонному лінійному базисі є недоцільним.

Проведені експериментальні дослідження з використання високоточного геометричного нівелювання замість тригонометричного в процесі калібрування на еталонному лінійному базисі. На верхній частині металевих трубчастих центрів базису були встановлені сферичні точки, висоти яких визначалися з геометричного нівелювання першого класу. Ці точки використовувалися для визначення висот електронного тахеометра і відбивачів. Висоти приладів вимірялися спеціально розробленим пристроєм із точністю до десятих долей міліметра.

У процесі експериментального калібрування використано прецизійний електронний тахеометр Leica AT50, який пройшов повірку у Фінляндії в метрологічній лабораторії Національного інституту метрології VTT MIKES. Експериментальні вимірювання опрацьовані в програмному забезпеченні фірми Leica Geosystems INFINITY і дали позитивні результати.

ПРАКТИЧНІ АСПЕКТИ ВИМІРЮВАНЬ ВИБУХОВОЇ ХВИЛІ В РОЗРІЗІ ВИМОГ ДО ЧАСУ ВІДГУКУ ДАВАЧІВ ТА ЇХНІХ ЧАСТОТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИ ПРОВЕДЕННІ ВИПРОБУВАНЬ МЕХАНІЗОВАНИХ ЗАСОБІВ ГУМАНІТАРНОГО РОЗМІНУВАННЯ

Чепела О.В., Калашніков Р.В., Калініченко О.С.
Черкаси, Україна, hagride@ukr.net

Передній край ударної (вибухової) хвилі виникає внаслідок майже миттєвого вивільнення хімічної енергії детонації. Навколишнє середовище стискається настільки різко, що нелінійне наростання тиску формує практично розривну зміну тиску, густини й температури газу – так званий передній край ударної хвилі, параметри якого пов'язані співвідношеннями типу Ренкіна – Гюгоніо. За переднім краєм тиск спадає за характерним для вибухових процесів профілем: різке зростання до пікового значення змінюється плавним спадом, який часто переходить у фазу розрідження нижче атмосферного тиску [1]. Саме близькість до математичного розриву на передньому краї, а не сам процес подальшого спадання тиску, визначає надзвичайно жорсткі вимоги до часових і частотних властивостей вимірювальної апаратури.

Оцінювання стійкості механізованих засобів гуманітарного розмінування, які виконують при роботах із підготовки й очищення ґрунту, а також для виявлення, знешкодження та знищення вибухонебезпечних предметів до дії ударної хвилі, вимагає вимірювання її параметрів з високою точністю. Час наростання переднього краю зазвичай не перевищує 1 мкс, тому для похибки відтворення сигналу не більше ±5%. Час відгуку перетворювача має бути на порядок меншим, а резонансна частота – не менше 50 кГц [2]; стала часу вимірювального каналу – не менше 200 мс [2]. Розрізняють side-on та face-on (встановлення давачів уздовж або в напрямку руху ударної хвилі) режими реєстрації тиску, причому відбитий тиск може у 2–8 разів перевищувати спадний [1], що додатково впливає на вибір діапазону перетворювача.

Найпоширенішим засобом вимірювання є п'єзоелектричні перетворювачі pencil probe з електронікою IEPE, яка формує сигнал, придатний до передачі кабелем до 100 м без спотворень. Заряд виникає практично миттєво при деформації кристала [3], забезпечуючи час відгуку в межах одиниць мікросекунд. Резонансні частоти 300–400 кГц [4], проте через релаксацію заряду такі перетворювачі не придатні для статичного тиску. Точність підвищують динамічною компенсацією частотної характеристики [5] з урахуванням паразитної чутливості до прискорень [6] та орієнтації осі чутливості: відхилення понад 15° дає похибку 5–10%.

Для реєстрації face-on тиску та надкоротких імпульсів застосовують турмалінові перетворювачі з нерезонансною частотною характеристикою (час відгуку близько 0,2 мкс, резонансна частота понад 1500 кГц), які не створюють паразитного «дзвону» після імпульсу [4]. Альтернативою є п'єзорезистивні перетворювачі на основі кремнієвої мембрани з тензометричним мостом. На відміну від п'єзоелектричних, вони реєструють і статичну компоненту тиску, зберігаючи власну частоту понад 1 МГц [7]. Проте вони потребують

температурної компенсації через чутливість напівпровідника до градієнтів температури, характерних для вибухових процесів [7].

Через надкороткий і високоамплітудний сигнал статичне калібрування перетворювачів недостатнє; динамічне калібрування здійснюють методом ударної труби, який відтворює перепад тиску із заданими часовими характеристиками та дозволяє встановити дійсну частотну характеристику перетворювача в робочому діапазоні [8].

Вибір перетворювача визначається необхідним поєднанням часу відгуку, резонансної частоти та режиму вимірювання. Для комплексного випробування механізованих засобів гуманітарного розмінування доцільна багатоканальна система з різнотипними давачами.

Перспективними напрямами є створення національних еталонних установок для динамічного калібрування давачів імпульсного тиску та вдосконалення методів температурної компенсації п'єзорезистивних перетворювачів.

Список літератури

1. Trombetta S.J. Quick Reference Guide for Terms Used in Air Blast Research and Experimentation: Report ARL-SR-0453. Aberdeen Proving Ground, MD, USA, US Army Research Laboratory, 2021. 52 p.

2. AEP-55 (Edition C, Volume 2). Procedures for evaluating the protection level of logistic and light armoured vehicles – Mine threat. Brussels, NATO Standardization Office (NSO), 2014. 204 p.

3. Yang F., Zhu H., Kong D., Zhao C. Accurate Measurement of Blast Shock Wave Pressure by Enhanced Sensor System Based on Neural Network. *Sensors*, 2025, vol. 25, no. 19, 6187. doi: https://doi.org/10.3390/s25196187

4. PCB Piezotronics Inc. Blast Pressure Sensors: Technical Specifications. Series 137B, 134A, 138A. Depew, NY, USA: PCB Piezotronics, 2024. URL: https://www.pcb.com/sensors-for-test-measurement/pressure-transducers/blast-transducers/icp-free-field-blast (дата звернення: 30.06.2026).

5. Yang F., Kong D., Kong L. Accurate measurement of high-frequency blast waves through dynamic compensation of miniature piezoelectric pressure sensors. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2018, vol. 280, pp. 14–23. doi: https://doi.org/10.1016/j.sna.2018.07.029

6. Na Yang, Yan Tang, He Wu et al. Influence evaluation of ionic liquids on the alteration of nitrification waste for thermal stability. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries,* 2023, vol. 82, 104977. doi: https://doi.org/10.1016/j.jlp.2023.104977

7. Sanchez K., Achour B., Coustou A. et al. Transient Response of Miniature Piezoresistive Pressure Sensor Dedicated to Blast Wave Monitoring. *Sensors*, 2022, vol. 22, no. 24, 9571. doi: https://doi.org/10.3390/s22249571

8. Downes S., Knott A., Robinson I. Towards a shock tube method for the dynamic calibration of pressure sensors. *Philosophical Transactions of the Royal Society A,* 2014, vol. 372, no. 2023, art. 20130299. doi: https://doi.org/10.1098/rsta.2013.0299

ОЦІНЮВАННЯ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ КООРДИНАТНИХ ВИМІРЮВАНЬ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ АВІАЦІЙНИХ ДЕТАЛЕЙ З УРАХУВАННЯМ АЛГОРИТМІЧНОЇ КОМПЕНСАЦІЇ

Хіль Е.С.
Київ, Україна, ckp2008@ukr.net

Точність контролю геометричних параметрів авіаційних деталей визначається не лише метрологічними характеристиками координатно-вимірювальної машини (КВМ), а й вибором схеми базування, стратегії зондування, алгоритму асоціювання геометричного елемента та способу компенсації просторових і температурних похибок. Для деталей зі складною формою поверхні вплив зазначених чинників взаємопов'язаний, тому використання лише паспортної гранично допустимої похибки КВМ не забезпечує оцінювання невизначеності конкретної вимірювальної задачі. Відповідно до GUM результат має супроводжуватися невизначеністю, визначеною на основі моделі вимірювання та кількісного оцінювання істотних вхідних величин [1]. Для координатних вимірювань такий підхід узгоджується з принципами ISO 15530-3, за якими оцінювання повинно враховувати вимірювальну процедуру, систематичний ефект, калібрування еталонного об'єкта та властивості контрольованої деталі [2].

Метою дослідження є підвищення достовірності визначення геометричних параметрів авіаційних деталей шляхом сумісного врахування геометричних, температурних, щупових, алгоритмічних і відлікових складових невизначеності та застосування алгоритмічної компенсації. Об'єктом дослідження є координатне вимірювання профілів деталей складної форми, а предметом – модель формування невизначеності з урахуванням алгоритмів обробки координат точок. Розглянуто розрахунковий випадок вимірювання сталевої деталі на базовій довжині 200 мм за відхилення температури від нормального значення на 1 °C. Для оцінювання впливу обчислювальної процедури порівняно метод найменших квадратів і метод мінімальної зони, який відповідає функціональному трактуванню поля допуску форми згідно з ISO 1101 [3].

Модель невизначеності побудовано за законом поширення невизначеності [1]. До її складу введено стандартні невизначеності, зумовлені щуповою системою, геометричними похибками КВМ, температурним розширенням деталі, алгоритмом асоціювання та дискретністю відліку. Геометричні похибки подано за допомогою однорідних матриць перетворення, що відображають поступальні та кутові відхилення кінематичних ланок КВМ. Такий опис дає змогу визначати просторову поправку для фактичної позиції вимірювального наконечника, а не використовувати одну усереднену поправку для всього робочого об'єму. Доцільність програмної компенсації геометричних похибок машин координатного типу підтверджена результатами фундаментальних досліджень у цій галузі [4].

Для прийнятих умов стандартна температурна складова становила 2,34 мкм і була найбільшою складовою бюджету. Вихідні оцінки інших складових становили: 0,35 мкм для щупової системи, 0,55 мкм для геометричних похибок,

0,40 мкм для алгоритмічної складової за використання методу найменших квадратів та 0,15 мкм для відлікової складової. За коефіцієнта охоплення 2 розширена невизначеність без компенсації дорівнювала 4,88 мкм. Після введення просторової корекції на основі матричної моделі, компенсації 80% температурного впливу та заміни методу найменших квадратів методом мінімальної зони розрахункове значення розширеної невизначеності зменшилося до 1,16 мкм. Отже, за досліджених умов алгоритмічно-компенсаційна обробка забезпечила зниження розширеної невизначеності на 76,2%.

Окремо досліджено внесок алгоритму оцінювання відхилення форми. Профіль задано сукупністю другої, третьої та п’ятої гармонік із накладеним випадковим шумом; оброблено 360 координатних точок. За методом найменших квадратів розраховане відхилення форми становило 14,47 мкм, а за методом мінімальної зони – 12,23 мкм. Відносне перевищення результату, отриманого методом найменших квадратів, становило 18,4%. Виявлена розбіжність свідчить, що алгоритм асоціювання не можна вважати суто програмним елементом, який не впливає на метрологічний результат: він має бути явно зазначений у методиці вимірювання та врахований у бюджеті невизначеності.

Для перевірки адекватності аналітичного оцінювання застосовано поширення розподілів методом Монте-Карло відповідно до JCGM 101:2008 [5]. Виконано 10 000 реалізацій вхідних величин із подальшим визначенням інтервалу охоплення вихідної величини. Використання чисельного методу є доцільним для координатної задачі, оскільки перетворення координат, пошук параметрів асоційованого елемента та мінімізація ширини зони формують нелінійну модель. Порівняння аналітичного і чисельного оцінювань дає можливість виявити вплив нелінійності та відхилення розподілу вихідної величини від нормального, що важливо під час установлення довірчого інтервалу результату.

Запропонований підхід передбачає таку послідовність: формування вимірювальної задачі та вимірюваної величини; визначення просторового положення деталі й конфігурації щупа; оцінювання геометричних і температурних складових; вибір алгоритму асоціювання; внесення координатних поправок; формування бюджету невизначеності; перевірка отриманої оцінки методом Монте-Карло. На відміну від оцінювання за узагальненою характеристикою точності КВМ, ця процедура враховує конкретні довжину, матеріал, температурні умови, схему вимірювання та алгоритм обробки. Її застосування створює передумови для обґрунтованого вибору режиму контролю профілів лопаток, корпусних деталей і поверхонь обертання, а також для встановлення правила прийняття рішення щодо відповідності геометричному допуску.

Результати розрахункового дослідження показують, що домінувальна складова бюджету може змінюватися після компенсації: усунення значної частини температурного впливу підвищує відносну вагу геометричної та алгоритмічної складових. Тому вдосконалення методики повинно охоплювати не одну поправку, а узгоджений комплекс операцій – температурну стабілізацію або корекцію, просторове картографування похибок КВМ і метрологічно

обґрунтований алгоритм оцінювання форми. Практичний результат полягає у можливості зменшити невизначеність без зміни апаратної частини вимірювальної системи. Подальша робота має бути спрямована на експериментальну валідацію моделі із застосуванням каліброваної деталі або еталона, повторенням вимірювальних циклів у різних положеннях та перевіркою стабільності оціненої невизначеності в робочому діапазоні температур.

Список літератури

1. JCGM 100:2008. Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement. Sèvres, BIPM, 2008. 120 p.

2. ISO 15530-3:2011. Geometrical product specifications (GPS) – Coordinate measuring machines (CMM): Technique for determining the uncertainty of measurement – Part 3: Use of calibrated workpieces or measurement standards. Geneva, ISO, 2011.

3. ISO 1101:2017. Geometrical product specifications (GPS) – Geometrical tolerancing – Tolerances of form, orientation, location and run-out. Geneva, ISO, 2017.

4. Sartori S., Zhang G.X. Geometric error measurement and compensation of machines. *CIRP Annals,* 1995, vol. 44, issue 2, pp. 599–609.

5. JCGM 101:2008. Evaluation of measurement data – Supplement 1 to the «Guide to the expression of uncertainty in measurement» – Propagation of distributions using a Monte Carlo method. Sèvres, BIPM, 2008. 90 p.

СЕКЦІЯ 6.

МАСА ТА ПОВ’ЯЗАНІ З НЕЮ ВЕЛИЧИНИ. ВИТРАТОМЕТРІЯ

СТАН ЕТАЛОННОЇ БАЗИ ТИСКУ ТА ВАКУУМУ В УКРАЇНІ

Любецький С.Г., Редько О.О.
Харків, Київ, Україна, serg.lyubetsky@gmail.com, o.redko.ua@gmail.com

Наразі в Україні працюють три державні первинні еталони тиску.

Державний первинний еталон одиниці тиску для надлишкового тиску ДЕТУ 04-03-01. Підвид тиску: надлишковий тиск у рідинному середовищі.

Метрологічні характеристики:

- Діапазон від 0,05 до 10 МПа.
- Розширена невизначеність вимірювань у відносній формі не перевищує $U = 8 \cdot 10^{-6}$.

Як еталонний засіб використовується комплект поршневих манометрів ефективною площею 20 см^2 (використовується лише для досліджень), 5 см^2 та 1 см^2.

У 2025 році завершились міжнародні звірення, еталон має СМС-рядок у базі даних KCDB BIPM у діапазоні від 350 кПа до 10 МПа з невизначеністю від 7,6 до 162 Па, СМС ID EURAMET-M-UA-00000QLO-1. Еталон використовується для передавання одиниці тиску вторинним еталонам – поршневим манометрам та високоточним приладам вимірювання надлишкового тиску з рідинним робочим середовищем.

Національний (державний первинний) еталон одиниці тиску для надлишкового тиску НДЕТУ М-01-2018. Підвид тиску: надлишковий тиск у рідинному середовищі.

Метрологічні характеристики:

- Діапазон: від 10 до 400 МПа.
- Розширена невизначеність вимірювань у відносній формі не перевищує $U = (3{,}2 \cdot 10^{-5} + 1{,}0 \cdot 10^{-13}\, p)$, де p – числове значення тиску в Па. Всі невизначеності наведені у відносній формі.

Як еталонний засіб використовуються два поршневих манометри з верхніми границями вимірювань 60 та 400 МПа.

Національний (державний первинний) еталон одиниці тиску для абсолютного тиску та надлишкового тиску газів НДЕТУ М-03-2019.

Підвиди тиску: абсолютний та надлишковий тиски у газовому середовищі.

Метрологічні характеристики:

- Діапазон відтворення абсолютного тиску: від 270 Па до 7 МПа.
- Діапазон відтворення надлишкового тиску: від мінус 100 кПа до мінус 1,4 кПа та від 1,4 кПа до 7 МПа.
- Розширена невизначеність вимірювань в абсолютній формі не перевищує $U = (7{,}4\ \text{Па} + 2{,}6 \cdot 10^{-5}\, p)$ Па, де p – числове значення тиску в Па.

Як еталонний засіб використовується поршневий манометр Ruska 2465-A з вимірювальними поршневими системами з верхніми границями вимірювань 170 кПа, 700 кПа, 3,5 МПа та 7 МПа.

Усі зазначені еталони побудовані на основі поршневих манометрів. Вимірювальні поршневі системи НДЕТУ М-01-2018 та НДЕТУ М-03-2019 у 2025 році пройшли калібрування в PTB (HMI Німеччини) і мають сертифікати калібрування, що підтверджують метрологічну простежуваність до СМС-рядків у базі даних KCDB BIPM. Надалі планується участь у міжнародних звіреннях по надлишковому тиску в газовому середовищі.

Для калібрування вакуумметрів до 2025 року використовувався державний первинний еталон одиниці тиску для абсолютного тиску в діапазоні від 10^{-3} до 10^{3} Па ДЕТУ 04-01-96. Як еталонний засіб у цьому еталоні використовувалися компресійні манометри, принцип дії яких засновано на компресії розрідженого повітря, тиск якого вимірюється, із застосуванням вертикального капіляра із ртуттю, висота її стовпчика вимірювалася за допомогою катетометра і потім здійснювався перерахунок її в одиниці тиску. Однак цей еталон є морально застарілим, та його характеристики вже не забезпечували необхідні діапазон та точність відтворювання вакууму, а використання ртутних манометрів в існуючих умовах воєнного стану у м. Харкові є ризикованим.

Для калібрування вакуумметрів типу ВИТ-2П, ВМБ-8, Pfeiffer (Німеччина), Edwards (Велика Британія) тощо на базі ТОВ «Завод “Генератор”» (м. Київ) було створено робочий еталон для передавання одиниці високого вакууму. Установка складається з блоку насосів, вакуумної ємності, еталонних давачів, штуцерів для підключення давачів, що калібруються, клапанів для регулювання тиску і регульованого натікача азоту. Як еталонні використовуються два давачі вакууму Pfeiffer Vacuum PBR 360 та CMR 365, які дозволяють на діапазоні від $9{,}3\cdot10^{-7}$ до $1\cdot10^{3}$ гПа отримати розширену невизначеність результату калібрування (р.к.) вакуумметрів зі з’єднанням KF, що наведено в табл. 1. Час калібрування вакуумметра зі з’єднанням KF становить не більше 3 годин у 10 точках калібрування на діапазоні за два цикли відкачування і нагнітання.

Таблиця 1

Діапазон відтворення величини вакууму	Розширена невизначеність р.к.
від $9{,}3\cdot10^{-7}$ до $5\cdot10^{-6}$ гПа	від 17% до 6%
від $5\cdot10^{-6}$ до $5\cdot10^{-5}$ гПа	від 6% до 5%
від $5\cdot10^{-5}$ до $5\cdot10^{-4}$ гПа	від 5% до 4%
від $5\cdot10^{-4}$ до $1\cdot10^{-3}$ гПа	від 4% до 2%
від $1\cdot10^{-3}$ до $1\cdot10^{-1}$ гПа	від 2% до 1%
від $1\cdot10^{-1}$ до $3\cdot10^{1}$ гПа	від 2% до 4%
від $3\cdot10^{1}$ до $1\cdot10^{3}$ гПа	від 4% до 20%

Наразі проходять дослідження установки за параметрами стабільності, чутливості та відтворюваності за впливних зовнішніх факторів (граничний діапазон температури, вологості, атмосферного тиску, час виходу на режим за різних типів приєднання давачів: вакуумно щільна гума, KF та CF) з метою затвердження створеного робочого еталона як вторинного еталона.

ВИЗНАЧЕННЯ ТВЕРДОСТІ МЕТАЛІВ ТА СПЛАВІВ ЗА МЕТОДАМИ РОКВЕЛЛА, БРІНЕЛЛЯ ТА ВІККЕРСА

Довженко Я.С., Тюпа С.Ю.
Харків, Україна, stiupa1978@gmail.com

Однією з найпоширеніших характеристик, що визначають якість металів та сплавів, можливість їх застосування в різних конструкціях та за різних умов роботи, є твердість, визначення якої є одним із найпоширеніших комплексних методів механічних випробувань. Дослідження матеріалів на твердість є невід'ємною частиною будь-якої галузі машинобудування, нагальною проблемою якого є мінімізація розмірів деталей, підвищення їх працездатності шляхом зміцнення поверхні різними способами, в тому числі й нанесенням різноманітних покриттів. Оцінити механічні властивості дуже тонких плівок, малих об'ємів матеріалів, особливо отриманих із використанням сучасних нанотехнологій, можливо тільки шляхом дослідження твердості [1].

На сьогодні найрозповсюдженішими методами визначення твердості залежно від методів вимірювання та матеріалів є вимірювання за шкалами Роквелла, Віккерса, Брінелля та Шора [1].

Вимірювання твердості за методом Роквелла проводиться шляхом вдавлювання наконечника з алмазним конусом із кутом при вершині 120º чи сталевою кулькою в досліджуваний зразок. Тобто досліджуваний зразок піддається дії послідовних (попереднього та основного) навантажень та вимірюється глибина проникнення наконечника у зразок, за величиною якої визначається твердість [2].

Індентор з алмазним конусом використовується для визначення твердості за шкалами A та C Роквелла й N Супер-Роквелла; за шкалами B Роквелла та T Супер-Роквелла використовується індентор зі сталевою кулькою. Шкала C застосовується при контролі загартованих та відпущених сталей, шкала A – при контролі надтвердих сплавів, шкала B – при контролі матеріалів середньої твердості. Шкали N та T застосовуються при контролі малих деталей і тонких поверхневих шарів.

Вимірювання твердості за методом Брінелля полягає у вдавлюванні сталевої кульки в досліджуваний зразок. Твердість визначається за площею (діаметром) відбитка, що залишається після зняття випробувального навантаження. Цей метод найчастіше застосовується для визначення твердості м'яких металів та матеріалів із неоднорідною структурою [3, 4].

Вимірювання твердості за Віккерсом відрізняється від методу Брінелля тим, що в досліджуваний зразок замість сталевої кульки вдавлюється спеціальний алмазний наконечник у формі правильної чотиригранної піраміди з кутом між протилежними гранями 136º. Як і при вимірюванні за методом Брінелля, величина твердості визначається як відношення навантаження до площі поверхні відбитка. Цей метод дозволяє вимірювати твердість і тонких, і дуже твердих матеріалів, а також поверхневих шарів [5].

Вимірювання твердості за методом Шора ґрунтується на вимірюванні висоти відскоку бійка з алмазним наконечником, який падає на поверхню досліджуваного зразка, що характеризує пружні властивості матеріалу зразка. Цей метод в основному застосовується для визначення твердості гуми та пластику [1].

У цій статті не розглядається питання щодо вимірювання твердості в сфері мікро- та нановимірювань. Дослідження в цих галузях вимірювань твердості ННЦ «Інститут метрології» проводить разом із кафедрою технологій металів та металознавства Харківського національного автомобільно-дорожнього університету (ХНАДУ). Результати цих досліджень викладені в монографії професора ХНАДУ Василя Мощенока: «Розвиток методу Брінелля для макро-, мікро- та нанодіапазонів» [1].

Список літератури

1. Мощенок В.І. Сучасні методи визначення твердості матеріалів: монографія. Лондон: Globe Edit, 2023.

2. ДСТУ EN ISO 6508-2:2017. Матеріали металеві. Вимірювання твердості за шкалою Роквелла. Частина 2. Повірка та калібрування випробувальних машин і наконечників (EN ISO 6508-2:2015, IDT; ISO 6508-2:2015, IDT).

3. ISO 6506-2:2017. Metallic materials – Brinell hardness test. Part 2: Verification and calibration of testing machines.

4. ДСТУ EN ISO 6506-2:2019. Матеріали металеві. Випробування на твердість по Брінеллю. Частина 2. Перевірення та калібрування випробувальних машин (EN ISO 6506-2:2018, IDT; ISO 6506-2:2017, IDT).

5. ДСТУ EN ISO 6507-2:2022. Металеві матеріали. Випробування на твердість за Віккерсом. Частина 2. Перевірка та калібрування випробувальних машин (EN ISO 6507-2:2018, IDT; ISO 6507-2:2018, IDT).

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТВЕРДОСТІ ЗА ЛІБОМ ТОНКОСТІННИХ СТАЛЕВИХ ОБОЛОНОК

Должанський А.М., Брагинський О.Б., Бондаренко О.А.
Дніпро, Україна, braginskyy_oleg@ukr.net

Метод визначення твердості за Лібом [1] – ефективний спосіб неруйнівного контролю, проте його достовірність залежить від жорсткості виробу. Нормативні вимоги до твердомірів TDM-2 [2] та ТКМ-359С [3] обмежують застосування методу для виробів із малою товщиною та масою, що створює проблему при контролі тонкостінних оболонок.

Метою роботи було дослідити вплив товщини стінки та діаметра на результати вимірювання твердості та розробити підхід до їх корекції.

Дослідження виконано на 16 кільцевих зразках із сталі Ст3пс товщиною 2, 4, 6, 8 мм та діаметром 200–800 мм. Вимірювання проводили твердомірами TDM-2 та ТКМ-359С з індентором типу D. Еталонна твердість плоских зразків становила 115 НВ.

Результати обох твердомірів узгоджуються в межах статистичної невизначеності. Основними факторами, що впливають на виміряну твердість, є товщина стінки та діаметр оболонки. При збільшенні товщини та зменшенні діаметра виміряна твердість наближається до еталонного значення. Найбільше заниження показників спостерігалося для оболонок товщиною 2 мм і діаметром понад 400 мм (параметр тонкостінності $\delta/D = 0{,}005$). Для оболонок діаметром до 200 мм із показником тонкостінності близько 0,04 результати наближалися до еталонних. Статистично достовірного впливу орієнтації давача, поверхні вимірювання та радіального обтиснення в межах 1–2 кН не виявлено.

Визначено коригувальний коефіцієнт для приведення виміряної твердості до рівня еталонного зразка. Отримано емпіричну залежність коефіцієнта від параметра тонкостінності та діаметра, застосування якої розширює діапазон коректного використання твердомірів до значень параметра тонкостінності 0,005.

Підтверджено наявність розмірного ефекту при визначенні твердості тонкостінних сталевих оболонок за методом Ліба. Врахування параметра тонкостінності та використання коригувального коефіцієнта підвищує достовірність контролю та розширює сферу практичного застосування динамічних твердомірів.

Список літератури

1. Leeb hardness test procedure. ZwickRoell. URL: https://www.zwickroell.com (дата звернення: 16.05.2026).

2. Динамічний твердомір ТДМ-2. Промприлад. URL: https://www.promprilad.ua (дата звернення: 11.05.2026).

3. Твердомір динамічний ТКМ-359с. Машпром. URL: https://tppmashprom.com.ua (дата звернення: 11.05.2026).

ОСОБЛИВОСТІ ПРОВЕДЕННЯ ВИПРОБУВАНЬ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ЛІЧИЛЬНИКІВ ГАЗУ ПРОМИСЛОВОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

Малісевич В., Середюк Д., Пелікан Ю., Тисяк А.
Івано-Франківськ, Україна, tysiak45@gmail.com

Забезпечення точного обліку природного газу є критично важливим завданням для енергетичного сектору. Ультразвукові лічильники газу широко застосовуються в промисловості завдяки своїм високим метрологічним характеристикам. Водночас їх точність значною мірою залежить від дотримання вимог нормативних документів під час випробувань і експлуатації [1].

Випробування, результати яких наведено у цій роботі, були виконані на повірочних стендах ДП «Івано-Франківськстандартметрологія», що забезпечує простежуваність до державного первинного еталона та бази даних KCDB (key comparison database).

У роботі наведено основні етапи випробувань згідно з Додатком В міжнародної рекомендації OIML R 137 [2], які застосовуються для оцінювання впливу збурень потоку на метрологічні характеристики ультразвукових лічильників газу під час проведення сертифікації. Випробування за Додатком В спрямовані на визначення чутливості лічильника газу до порушень профілю потоку та оцінювання стабільності його метрологічних характеристик при різних конфігураціях трубопроводу, які можуть застосовуватись у практичній реалізації. Випробування дозволяють оцінити, наскільки великим може бути вплив зовнішніх факторів. Критерієм відповідності є значення відтворюваності, яке менше або дорівнює одній третій максимально допустимої похибки для відповідного класу точності [3].

Основними етапами випробувань згідно з Додатком В міжнародної рекомендації OIML R 137 є:

1. Випробування за еталонних умов

На першому етапі визначаються базові метрологічні характеристики лічильника за відсутності збурень потоку. Здійснюється монтаж лічильника на випробувальному стенді з прямими ділянками трубопроводу та забезпеченням стабільних умов потоку. Вимірювання проводяться при встановлених значеннях витрати (0.25Qmax, 0.4Qmax, 0.7Qmax, Qmax). Результати досліджень наведені в табл. 1.

2. Випробування з одним кутом 90°

Цей тип випробувань передбачає встановлення одного відводу під кутом 90° перед лічильником на визначеній відстані. Така конфігурація створює асиметричний профіль швидкості потоку та імітує типові умови монтажу в газорозподільних системах. За результатами випробувань встановлено, що за наявності одного відводу 90° відносна похибка вимірювання несуттєво відрізняється від початкової. Порівняння з результатами за еталонних умов показує незначне зміщення похибки, що свідчить про достатню стійкість лічильника до помірних гідродинамічних збурень та задовольняє умови стандарту. Результати досліджень наведені в табл. 1.

3. Випробування з подвійним відводом у різних площинах

Випробування цього типу передбачають встановлення двох послідовних відводів під кутом 90°, розташованих у взаємно перпендикулярних площинах. Така конфігурація створює складні турбулентні структури потоку та є більш жорстким випробуванням щодо впливу гідродинамічних збурень. За результатами вимірювань, отриманих на випробувальному стенді, встановлено, що отримані результати вкладаються в межі допустимих відхилень. Збільшення похибки порівняно з попереднім етапом є очікуваним і відповідає підвищеному рівню турбулентності потоку. Результати досліджень наведені в табл. 1.

4. Випробування з частковим перекриттям перерізу трубопроводу

Цей етап випробувань передбачає встановлення пластини, яка перекриває приблизно 50% площі поперечного перерізу трубопроводу перед лічильником. Така конфігурація створює найбільш інтенсивне збурення потоку та використовується для оцінювання граничної чутливості лічильника до деформації профілю швидкості. За результатами випробувань встановлено, що в умовах часткового перекриття перерізу трубопроводу максимальна відносна похибка вимірювання становила: –0,49, що не відповідає встановленим вимогам OIML R137. Результат характеризує найбільш несприятливі умови роботи.

Таблиця 1

Результати метрологічних характеристик

Витрата, m^3/h	За еталонних умов, %	З одним кутом 90°, %	З подвійним кутом, %	З частковим перекриттям перерізу, %
250	-0,074	-0,055	0,157	-0,207
400	-0,094	-0,056	0,101	-0,273
700	-0,096	-0,059	-0,028	-0,494
1000	-0,024	0,069	0,022	-0,085

Отже, зміна конфігурації трубопроводів, яку може бути використано у практичній реалізації цього проєкту, дає можливість оцінити величину впливу залежно від конфігурації. Було проведено дослідження декількох зразків, один із яких як приклад наведено в цій роботі. Актуальність проведених випробувань зумовлена наявністю в Україні виробників ультразвукових лічильників газу, для яких виконуються подібні дослідження. Метою цих робіт є оцінка можливості застосування таких лічильників в умовах експлуатації, що можуть відрізнятися від еталонних, зокрема за наявності збурень потоку.

Список літератури

1. Закон України «Про метрологію та метрологічну діяльність». *Відомості Верховної Ради*. 2014. № 30. Ст. 1008.

2. ДСТУ OIML R 137-1-2:2018. Лічильники газу. Частина 1. Метрологічні й технічні вимоги. Частина 2. Методи перевірки метрологічних і технічних характеристик (OIML R 137-1-2:2014, IDT).

3.Технічний регламент засобів вимірювальної техніки, затверджений постановою Кабінету Міністрів України № 163 від 24.02.2016.

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРОСТЕЖУВАНОСТІ ВИМІРЮВАНЬ ОБ'ЄМНОЇ ВИТРАТИ ПРИРОДНОГО ГАЗУ В ДІАПАЗОНІ ДО 25000 м³/год У ДП «ІВАНО-ФРАНКІВСЬКСТАНДАРТМЕТРОЛОГІЯ»

Малісевич В., Середюк Д., Пелікан Ю., Катамай В.
Івано-Франківськ, Україна, kvlad770@ukr.net

Забезпечення метрологічної простежуваності вимірювань об'єму та об'ємної витрати природного газу є необхідною умовою достовірного комерційного обліку енергоресурсів, функціонування газотранспортної системи та міжнародного визнання результатів калібрування і повірки засобів вимірювальної техніки. Зростання вимог до точності вимірювань, гармонізація українського законодавства з європейськими нормативними документами та впровадження положень Угоди CIPM MRA обумовлюють необхідність розвитку національної еталонної бази у сфері вимірювання витрати природного газу [1].

Одним із проблемних питань метрологічного забезпечення газової галузі України тривалий час залишалася відсутність еталонної установки, здатної забезпечувати передачу одиниці вимірювання та проведення калібрування і повірки промислових лічильників природного газу діаметром до DN500 у діапазоні витрат до 25000 м³/год. Це обмежувало можливість виконання випробувань відповідно до вимог OIML R 137 [2], ISO 17089-1 [3], EN 12261 [4], Технічного регламенту засобів вимірювальної техніки та міжнародних вимог щодо підтвердження метрологічної простежуваності.

З метою усунення зазначених обмежень у ДП «Івано-Франківськстандартметрологія» створено багатолінійну еталонну установку продуктивністю до 25000 м³/год, призначену для калібрування, повірки та метрологічних випробувань промислових лічильників природного газу. В основу установки покладено концепцію **Master Meter Prover**, реалізовану шляхом поєднання роторних та турбінних еталонних лічильників. Нижній діапазон витрат забезпечується роторними еталонними лічильниками, тоді як верхній – чотирма турбінними еталонними лічильниками DN300, що працюють у паралельному режимі із сумуванням витрат. Запропонована багатолінійна структура дозволила суттєво розширити робочий діапазон установки, забезпечити рівномірний розподіл потоку та відмовитися від використання одного великогабаритного еталонного лічильника, що позитивно вплинуло на метрологічні характеристики установки.

Ключовим результатом виконаної роботи є побудова безперервного ланцюга метрологічної простежуваності передачі одиниці об'єму та об'ємної витрати газу від Державного первинного еталона DETU 03-01-15 через Державний вторинний еталон VETU 03-01-03-11 (03-01-04-12), комплект еталонів перенесення та робочі еталони установки до засобів вимірювальної техніки, що проходять калібрування або повірку. Для роторних еталонних лічильників реалізовано безпосередню передачу одиниці від державного первинного еталона, що дозволило мінімізувати кількість ступенів калібрування та зменшити внесок у сумарну невизначеність вимірювань. Калібрування турбінних еталонних лічильників здійснюється від державного вторинного

еталона, метрологічні характеристики якого міжнародно визнані та опубліковані у базі даних BIPM KCDB.

Для підтримання метрологічних характеристик установки застосовано комплект еталонів перенесення, що забезпечує періодичне калібрування робочих еталонів без їх демонтажу та з урахуванням реальних умов експлуатації. Такий підхід дозволяє контролювати стабільність метрологічних характеристик установки протягом міжкалібрувального інтервалу, зберігаючи безперервність ланцюга простежуваності [5].

Оцінювання невизначеності вимірювань виконується відповідно до вимог ISO 5168 із урахуванням статистичних та систематичних складових. До бюджету невизначеності включено результати калібрування еталонних лічильників, похибки вимірювання температури і тиску, дискретність реєстрації імпульсів, повторюваність результатів та інші фактори, що впливають на точність визначення об'єму газу. Для кожного еталонного лічильника визначаються індивідуальні калібрувальні характеристики, а їх математичне моделювання виконується методом найменших квадратів, що забезпечує стабільність метрологічних характеристик у всьому робочому діапазоні витрат.

Особливістю розробленої установки є можливість виконання випробувань засобів вимірювальної техніки на вплив гідродинамічних збурень потоку відповідно до вимог OIML R 137 та EN 12261. Конструкція установки дозволяє відтворювати різні конфігурації трубопроводів і місцевих опорів, необхідних для проведення повного комплексу випробувань у межах процедур оцінки відповідності засобів вимірювальної техніки.

Таким чином, створена у ДП «Івано-Франківськстандартметрологія» еталонна установка продуктивністю до 25000 м³/год забезпечує повну метрологічну простежуваність вимірювань об'ємної витрати газу, розширює національні можливості калібрування та повірки промислових лічильників великих діаметрів, сприяє міжнародному визнанню результатів вимірювань і формує основу для подальшого розвитку калібрувальних та вимірювальних можливостей України відповідно до вимог сучасної міжнародної метрології.

Список літератури

1. Закон України «Про метрологію та метрологічну діяльність». *Відомості Верховної Ради*. 2014. № 30. Ст. 1008.

2. ДСТУ OIML R 137-1-2:2018. Лічильники газу. Частина 1. Метрологічні й технічні вимоги. Частина 2. Методи перевірки метрологічних і технічних характеристик (OIML R 137-1-2:2014, IDT).

3. ДСТУ ISO 17089-1:2021. Вимірювання потоку плинного середовища в закритих каналах. Ультразвукові лічильники газу. Частина 1. Лічильники для комерційного обліку та вимірювання в газорозподільчих системах (ISO 17089-1:2019, IDT).

4. BS EN 12261:2018. Gas meters – Turbine gas meters. Available at: https://ru.scribd.com/document/602758618/BS-EN-12261-2018

5. Технічний регламент засобів вимірювальної техніки, затверджений постановою Кабінету Міністрів України № 163 від 24.02.2016.

ВИЯВЛЕННЯ ПОЗАШТАТНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ ГАЗОВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ ЧАСОВИХ РЯДІВ СТАНДАРТНОГО ОБ'ЄМУ

Реуцький Є.А.
Івано-Франківськ, Україна, evgeniyr@ukr.net

Комерційний облік природного газу в газорозподільних мережах є важливою складовою забезпечення достовірності розрахунків між оператором газорозподільної системи та споживачами. Значна частина сучасних газовимірювальних систем (ГВС) оснащена промисловими лічильниками та електронними обчислювачами/коректорами об'єму газу, які забезпечують визначення та зберігання інформації про об'єми газу, зведені до стандартних умов [1].

Традиційний контроль роботи ГВС значною мірою базується на періодичних повірках засобів вимірювальної техніки, контролі параметрів їх функціонування та аналізі зафіксованих відмов. Водночас частина позаштатних режимів може розвиватися поступово та не призводити до миттєвого формування апаратного сигналу про несправність. Під час перевірок ГВС, крім встановлення контрольних засобів вимірювальної техніки або комплексів, можуть застосовуватися й інші технічні заходи та методики [2]. У зв'язку з цим актуальним завданням є розробка алгоритмів перевірки працездатності ГВС за допомогою статистичних методів.

Як зазначалося вище, електронними коректорами ГВС накопичуються вимірювальні дані про стандартні об'єми природного газу, аналіз яких може слугувати додатковим інструментом раннього виявлення нетипової поведінки ГВС. До таких даних належить погодинний та подобовий стандартний об'єм природного газу, використання яких створює передумови для розробки методів діагностування позаштатних режимів роботи ГВС виключно на основі статистичного аналізу часових рядів.

Розглянемо більш детально запропонований алгоритм виявлення позаштатного режиму роботи ГВС. На першому етапі часовий ряд стандартного об'єму піддається згладжуванню методом ковзного середнього. Згладжений ряд використовується як оцінка локального нормального режиму функціонування ГВС. Вибір ширини вікна ковзного середнього здійснюється з урахуванням часової дискретності даних та характерних змін газоспоживання.

На другому етапі визначаються залишки між фактичними значеннями стандартного об'єму та відповідними значеннями ковзного середнього. Отриманий ряд залишків характеризує відхилення поточного режиму роботи від локальної очікуваної поведінки. Наявність окремих значних залишків може свідчити про різку зміну режиму роботи, тоді як тривале систематичне зміщення залишків може бути ознакою поступового розвитку позаштатного процесу.

На третьому етапі до ряду залишків застосовується метод кумулятивних сум (CUSUM). На відміну від безпосереднього аналізу окремих відхилень, CUSUM забезпечує накопичення статистично значущих односпрямованих змін. Це

дозволяє підвищити чутливість до поступових змін режиму роботи, які можуть залишатися непомітними при аналізі окремих вимірювань.

Для перевірки працездатності запропонованого підходу передбачено використання як реальних часових рядів, так і контрольованих модельних відхилень, сформованих на основі реальних даних. До часових рядів можуть бути внесені різкі локальні зміни стандартного об’єму, а також поступовий дрейф значень. Це дозволяє оцінити здатність методів виявляти різні типи позаштатної поведінки ГВС.

Застосування ковзного середнього дозволяє сформувати базовий рівень роботи ГВС у штатному режимі. Аналіз залишків надає можливість виявлення локальних відхилень від цього рівня, тоді як застосування CUSUM до залишків забезпечує підвищення чутливості до поступових та систематичних змін.

За результатами проведених досліджень виявлено, що найбільш суттєву перевагу запропонована послідовність методів має при виявленні слабких, але тривалих відхилень. Окреме різке відхилення може бути недостатнім для формування діагностичного висновку через природну нерівномірність газоспоживання. У той час як повторювані відхилення одного напряму накопичуються у статистиці CUSUM та зумовлюють формування сигналу про можливий позаштатний режим.

Для погодинних даних метод може бути використаний переважно для виявлення короткочасних змін та локальних аномалій, тоді як подобові дані доцільно застосовувати для контролю довготривалих тенденцій. Таким чином, використання двох часових масштабів може забезпечити багаторівневий контроль поведінки ГВС.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості використання запропонованого підходу як додаткового рівня автоматизованого контролю ГВС у системах дистанційного моніторингу та диспетчерського контролю газорозподільних мереж. Виявлення систематичних відхилень на ранній стадії може бути підставою для проведення додаткової перевірки ГВС, аналізу умов їх експлуатації або позачергового метрологічного контролю.

Подальший розвиток дослідження полягає у порівнянні ефективності ковзного середнього, CUSUM та порогових методів, а також формуванні інтегрального критерію достовірності комерційного обліку природного газу на основі результатів декількох незалежних діагностичних процедур.

Список літератури

1. ДСТУ EN 1776:2022. Газова інфраструктура. Газовимірювальні системи. Функційні вимоги (EN 1776:2015, IDT).

2. Кодекс газорозподільних систем. Затверджено Постановою Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг від 30.09.2015 р. № 2494. Офіційний вебпортал Верховної Ради України. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1379-15

MODELING OF THE TEMPERATURE FIELD IN A GAS PIPELINE TO INCREASE THE SENSITIVITY OF THE OPTICAL-THERMAL METHOD OF GAS FLOW MEASUREMENT

Moshchenko I.
Kharkiv, Ukraine, inna.moshchenko@nure.ua

The task of developing improved methods and measuring equipment for monitoring gas transportation through high-pressure main gas pipelines is relevant due to the high cost and the need for economical use, especially in today's difficult military conditions of resource shortage [1]. At present, the principle of operation of most flow meters used in Ukraine is based on the ultrasonic non-contact measurement method [2], as well as on the use of the variable differential pressure method, which is classical, but obsolete. Variable differential pressure flow meters introduce a significant disturbance into the measured gas flow, which leads to the occurrence of additional measurement error.

An alternative to non-contact ultrasonic flow meters, the disadvantage of which is sensitivity to acoustic interference, can be optical methods for monitoring gas transportation, since they allow you to take into account the physical processes that occur inside the pipeline, while practically not introducing disturbances into the measured medium [3]. Local heating of the pipeline makes it possible to change the thermophysical parameters of the gas inside the pipeline with a dedicated direction of gas transfer, which makes it possible to increase the sensitivity of optical measurement methods.

In order to implement the non-contact optical-thermal method in measuring devices used in gas pipelines, it is necessary to conduct an analytical study of the process of specific heating of a pipeline section.

The temperature distribution in the «pipeline - gas environment» system was studied when the outer surface of the pipeline is heated by a heat source of finite length.

In order to obtain reliable results in the study of the temperature field in a gas pipeline, first of all, it is necessary to consider a thermophysical model that adequately describes the heat transfer processes in the «pipeline - gas environment» system.

In the analytical solution of the differential equation of thermal conduction, exact solutions are obtained only for special cases.

At present, there are approximate methods for calculating heat transfer processes that lead to satisfactory results. Approximate methods for solving problems are used when exact analytical methods of calculation are unknown. In this work, the numerical method for solving the heat conduction equation was based on an equation in the form of finite differences, with the help of which the temperature is calculated at some predetermined points of a given system. This is equivalent to the mathematical methods of approximate integration.

As a result of the application of the finite difference method in solving the heat conduction equation, numerical and experimental temperature values were obtained at predetermined points of the coordinate grid.

The numerical experimental data obtained by the finite difference method in solving the thermal conductivity equation were statistically processed using the least squares method. The approximation of the obtained data was carried out using the Matlab package of mathematical and engineering calculations. An exponential function, polynomials of

various orders, and Fourier series were used as approximating dependencies.

Based on the results obtained, it can be concluded that the value of the temperature difference before and after the heater at local heating of the outer surface of the pipeline can serve as an informative parameter in the control of gas flows, which will make it possible to use the results of the numerical experiment in improving the methods of thermal control of gas flows.

As a result of the numerical experiment, the dependencies of the temperature distribution and pipeline walls on the geometric dimensions of the pipeline and the thermophysical parameters of the gas flow were also obtained.

The adequacy of the results of the studies was confirmed by the data of the full-scale experiment with a sufficient degree of reliability (the error did not exceed 2%).

The developed model makes it possible to assess the influence of various parameters of the system (external heating capacity, controlled flow velocity, pipeline diameter, thermophysical parameters of the medium) on the temperature distribution in the pipeline and can be used not only to increase the sensitivity of the non-contact optical-thermal method, but also to calculate the optimal parameters of measuring devices used to control gas transportation through pipelines of various diameters with a wide range of controlled flows.

References

1. Chepiuk L.O., Omelchuk I.A., Voronova T.S., Shavurska L.Y., Mazurchuk N.Y. Matematychni modeli dlia rozrakhunku vytrat v informatsiino-vymiriuvalnii systemi obliku hazu [Mathematical models for calculating costs in the information and measuring system of gas metering]. *Technical engineering*, 2024, no. 1(93), pp. 301–307 (in Ukrainian). doi: https://doi.org/10.26642/ten-2024-1(93)-301-307

2. Soroka N.-A.Y., Karpash M.O., Tsikh V.S. Otsiniuvannia mozhlyvosti zastosuvannia ultrazvukovykh vytratomiriv dlia fiksatsii vytraty hazovodnevykh sumishei [Estimation of the possibility of using ultrasonic flow meters for fixing the flow rate of gas-hydrogen mixtures]. *Methods and Devices of Quality Control*, 2023, no. 2(51), pp. 39–49 (in Ukrainian). doi: https://doi.org/10.31471/1993-9981-2023-2(51)-39-49

3. Moshchenko I., Serhiienko M., Yegorov A. Research on metrological model of optic-thermal method of natural gas flow measurement. *Ukrainian Metrological Journal*, 2020, no. 2, pp. 49–55. doi: https://doi.org/10.24027/2306-7039.2.2020.208953

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ ПОДВІЙНОГО КОНТРОЛЮ ДЛЯ МЕТРОЛОГІЧНОГО ОЦІНЮВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМ ОБЛІКУ ПРИРОДНОГО ГАЗУ НА ОСНОВІ СТАТИСТИЧНОГО ТА ФРАКТАЛЬНОГО АНАЛІЗУ

Труфан М.М., Середюк О.Є., Смаглюк М.В.
Івано-Франківськ, Україна, mivt@nung.edu.ua

Сучасні інформаційно-вимірювальні інтелектуальні системи застосовуються для моніторингу промислових об'єктів, енергетичних комплексів, транспортних систем та об'єктів газорозподілу. Достовірність результатів вимірювань у таких системах безпосередньо впливає на прийняття керуючих рішень, безпечність технологічних процесів та ефективність експлуатації обладнання. На вимірювальні канали можуть впливати випадкові завади, дрейф характеристик сенсорів, зміна умов вимірювання, порушення калібрувальних характеристик, втрата даних та їх навмисне або ненавмисне спотворення.

Існуючі методи виявлення аномалій охоплюють статистичні підходи та алгоритми машинного навчання [1]. Вони ефективні для виявлення локальних відхилень, однак поступова зміна характеристик вимірювального процесу може не супроводжуватися значним відхиленням окремих значень сигналу. Тому доцільним є доповнення локального статистичного контролю аналізом часової структури вимірювального ряду.

Попередні дослідження авторів були спрямовані на застосування методу подвійного контролю та машинного навчання для контролю якості обліку енергоносіїв [2, 3]. У цій роботі підхід розвивається шляхом використання фрактальних характеристик вимірювального сигналу як додаткової ознаки його достовірності.

Метою роботи є підвищення достовірності результатів вимірювань в інформаційно-вимірювальних інтелектуальних системах шляхом розроблення та застосування методу подвійного контролю у сфері природного газу, що поєднує локальний статистичний аналіз вимірювального сигналу з фрактальним аналізом його часової структури.

Метод передбачає два взаємодоповнювальні рівні контролю: статистичний – для виявлення локальних відхилень та фрактальний – для виявлення змін довготривалих кореляційних властивостей часового ряду.

На першому рівні аналізуються локальне середнє, дисперсія та відхилення поточного значення сигналу. Це дає змогу виявляти різкі зміни, імпульсні завади, втрату сигналу та інші локальні порушення. На другому рівні використовується детрендований флуктуаційний аналіз (DFA) та показник Херста для оцінювання масштабних і довготривалих кореляційних властивостей часового ряду [4]. Зміна цих характеристик може свідчити про поступовий дрейф сенсора, зміну його метрологічних характеристик або інші структурні зміни вимірювального процесу, які не завжди виявляються локальним контролем.

Особливістю методу є інтеграція результатів статистичного та фрактального аналізу в єдиний критерій оцінювання достовірності вимірювальної інформації. Статистична складова характеризує поточний локальний стан сигналу, а фрактальна – його часову структуру. Отже, контроль здійснюється не лише за фактом перевищення статистичного порогу, а й за зміною властивостей часового ряду.

Експериментальне дослідження передбачається виконати на синтетичних часових рядах із модельованими порушеннями та на реальних даних вимірювання витрати природного газу, отриманих від двох незалежних сенсорів різного принципу дії. Для порівняння передбачається використати Kalman Filter, Isolation Forest, One-Class SVM, Autoencoder та LSTM. Kalman Filter розглядається як класичний метод фільтрації та оцінювання стану динамічних систем [5], а Isolation Forest – як алгоритм виявлення аномальних спостережень [6]. Ефективність оцінюватиметься за precision, recall, F1-score та ROC-AUC [3].

Запропонований метод може бути застосований у промислових інформаційно-вимірювальних системах, SCADA- та кіберфізичних системах для безперервного контролю вимірювальних каналів. Поєднання локальних статистичних і структурних фрактальних ознак розширює можливості оцінювання достовірності вимірювальної інформації та своєчасного виявлення прихованих змін у функціонуванні сенсорних підсистем.

Список літератури

1. Chandola V., Banerjee A., Kumar V. Anomaly detection: A survey. *ACM Computing Surveys*, 2009, vol. 41, issue 3, article 15. doi: https://doi.org/10.1145/1541880.1541882

2. Середюк О.Є., Труфан М.М. Інтелектуальна система контролю якості обліку енергоносіїв на основі методу подвійного контролю та машинного навчання. *Приладобудування: стан і перспективи: зб. матер. XXV Міжнар. наук.-техн. конф.* Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, ПБФ, 2026. С. 344–348.

3. Труфан М.М., Середюк О.Є., Соколов Є.О. Розрахунок критичного порогу для виявлення аномалій у потоках даних сенсорних мереж на основі методу подвійного контролю з фрактальною корекцією. *Стан, досягнення і перспективи інформаційних систем і технологій*: *матеріали XXVI Всеукр. наук.-техн. конф. молодих вчених, аспірантів та студентів*. Одеса: ОНТУ, 2026. С. 106–108.

4. Peng C.-K., Buldyrev S.V., Havlin S., Simons M. et al. Mosaic organization of DNA nucleotides. *Physical Review E*, 1994, vol. 49, no. 2, pp. 1685–1689. doi: https://doi.org/10.1103/PhysRevE.49.1685

5. Kalman R.E. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems. *Journal of Basic Engineering*, 1960, vol. 82, No. 1, pp. 35–45.

6. Liu F.T., Ting K.M., Zhou Z.-H. Isolation Forest. *Proceedings of the 8th IEEE International Conference on Data Mining*, 2008, pp. 413–422.

ВПЛИВ КОНСТРУКЦІЇ СТРУМОВИПРЯМЛЯЧА НА ЧУТЛИВІСТЬ ДВОКАНАЛЬНОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВИТРАТОМІРА ГАЗУ ДО НАПРЯМКУ ЗАКРУЧУВАННЯ ПОТОКУ

Стеценко А.А.
Вінниця, Україна, andrii.energo@gmail.com

Місцеві опори перед ультразвуковим лічильником змінюють профіль швидкості та формують закручування потоку. Для двоканальної схеми це особливо важливо, оскільки дві акустичні траєкторії лише частково усереднюють асиметричний профіль. Вимоги до характеристик і випробувань ультразвукових газових витратомірів визначено в ISO 17089-1:2019 та OIML R 137-1&2:2012 [1, 2].

Метою роботи було оцінити вплив конструкції струмовипрямляча на реакцію лічильника GFA202 DN100 G400 за протилежних напрямків закручування. На установці АПУ-Г-011/5000 порівнювали струмовипрямляч Занкера і стільникову конструкцію. Випробування проводили при витратах 160, 260 і 650 м³/год після одного коліна, двох колін у різних площинах та двох колін із частковим перекриттям трубопроводу.

Конструкції продемонстрували різну чутливість до напрямку збурення. За дев’ятьма режимами середня різниця між правим і лівим напрямками становила 0,641% для Занкера та 0,065% для стільникового зразка. Водночас у частині режимів Занкер забезпечував менше зміщення від базової характеристики. Отже, на результат впливають рівень гідравлічного опору та геометрія каналів, що узгоджується з [3].

Одержані дані підтверджують, що конструкція струмовипрямляча суттєво впливає на метрологічну реакцію двоканального ультразвукового витратоміра. Наявних результатів недостатньо для універсального вибору однієї конструкції, оскільки ефект залежить від типу збурення та витрати. Подальші дослідження мають охопити варіювання геометрії каналів, довжини прямих ділянок і ступеня перекриття, а також оцінювання втрат тиску та стабільності характеристики.

Список літератури

1. ISO 17089-1:2019. Measurement of fluid flow in closed conduits – Ultrasonic meters for gas. Part 1: Meters for custody transfer and allocation measurement. Geneva: ISO, 2019.

2. OIML R 137-1&2:2012. Gas meters. Part 1: Metrological and technical requirements. Part 2: Metrological controls and performance tests. Paris: OIML, 2012; Amendment 2014.

3. Laws E.M., Ouazzane A.K. A further study into the effect of length on the Zanker flow conditioner. *Flow Meas. Instrum.*, 1995, vol. 6, no. 3, pp. 217–224.

УСТАНОВКА ЕТАЛОННА ПРОЛИВНА ОДИНИЦЬ ОБ'ЄМНОЇ ТА МАСОВОЇ ВИТРАТИ РІДИНИ

Бас О.А., Микитин О.Т.
Івано-Франківськ, Україна, alexandr.sanya@gmail.com

Вимірювання витрати рідини є невід'ємним елементом глобального процесу, пов'язаного із елементами Індустрії 4.0, такими як розвиток цифрових технологій, застосування штучного інтелекту в рамках big data та хмарних обчислень. Зокрема, набуває широкого розповсюдження поняття «водного сліду», яке є показником, який вимірює загальний обсяг води, що використовується для виробництва товарів та надання послуг. Отже, створення метрологічного забезпечення обліку рідинних енерго- та водних ресурсів в Україні є також важливим елементом економічного розвитку нашої держави.

ТОВ «ТЕХМАШ» розроблено, виготовлено та введено в промислову експлуатацію установку еталонну проливну одиниць об'ємної та масової витрати рідини «Еталон-270/26». Принцип роботи установки передбачає використання методу порівняння результатів вимірювань, отриманих від еталонних витратомірів із результатами досліджуваного витратоміра.

Як еталони застосовано комплекс трьох коріолісових витратомірів масової витрати рідини Emerson Micro Motion серії Elite: CMF 100, CMF 200 та CMF 300. Для еталонних витратомірів проведено індивідуальне калібрування на національному первинному еталоні одиниць об'єму, маси, об'ємної та масової витрати води НДЕТУ М-07-2025, який зберігається в ДП «Укрметртестстандарт».

Застосування еталонних витратомірів із діапазонами витрати, які «перетинаються» між собою, дає можливість проведення періодичного внутрішнього контролю метрологічних характеристик еталонів та вибору еталонного витратоміра при проведенні метрологічних робіт із мінімальним значенням розширеної невизначеності для досліджуваних витратомірів.

Установку побудовано у вигляді замкненого контуру, по якому рухається рідина. Значення максимальної витрати забезпечують три паралельно встановлені насоси із частотним управлінням регулювання обертів двигунів. Установку обладнано проміжною ємністю 20 м^3 для зменшення пульсацій та стабілізації потоку рідини. Регулювання та виставлення стабільного значення витрати забезпечує арматура BERNADR Controls та SAMSON.

Метрологічні характеристики установки, отримані за результатами калібрування методом звірення з національним еталоном НДЕТУ М-07-2025 за допомогою компараторів (сертифікат калібрування № UA/24260901/0431 від 01.09.2026 р., виданий ДП «Укрметртестстандарт»):

• діапазон об'ємної (масової) витрати рідини: 0,5 м^3/год (500 кг/год) – 270 м^3/год (270 000 кг/год);

• розширена невизначеність: (0,05–0,07)%.

Сфера застосування: повірка, калібрування та градуювання лічильників і витратомірів об'єму, маси, об'ємної та масової витрати рідини.

ОЦІНЮВАННЯ МЕТРОЛОГІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ДАВАЧІВ КЛАСУ С5 В АВТОМОБІЛЬНИХ ТА ВАГОННИХ ВАГАХ

Ільницька Т.М., Яцук В.О., Дворник О.Є.
Львів, Україна, kl-tw@ukr.net

На ринку України спостерігається тенденція до комплектування автомобільних та вагонних ваг тензометричними давачами класу точності С5. Застосування таких давачів потенційно дає змогу підвищити метрологічні характеристики вагових систем порівняно з давачами класу С3. Водночас потребує дослідження питання, чи призводить застосування давачів класу С5 до покращення метрологічних характеристик готових ваг**.**

ДСТУ OIML R 60 [1, 2] підкреслює необхідність враховувати характеристики давача при його застосуванні у вимірювальній системі. Для конкретних ваг необхідно забезпечити сумісність модулів.

Клас точності давача характеризує максимальну кількість повірочних інтервалів давача, а не визначає безпосередньо максимально допустиму похибку ваг. Похибка ваг визначається класом точності (III за ДСТУ EN 45501) і ціною повірочної поділки ваг [3].

При градуюванні та оцінці відповідності/повірці ваг III класу точності використовують гирі класу точності М1 відповідно до ДСТУ OIML R 111-1 [4]. Нормовані метрологічні характеристики гир М1, зокрема допустимі відхилення їх номінальних значень від дійсних значень маси, у поєднанні з вимогами до метрологічних характеристик ваг III класу можуть обмежувати можливість практичної реалізації потенційних переваг тензометричних давачів класу С5 порівняно з давачами класу С3.

Відповідно до ДСТУ EN 45501, для автомобільних та вагонних ваг, призначених для експлуатації у відкритих умовах, застосування більше ніж 3000 повірочних поділок допускається за умови забезпечення додаткового захисту ваг від впливу атмосферних факторів та інших зовнішніх впливів. Крім того, стандарт встановлює вимогу щодо мінімального значення ціни повірочної поділки, яка для таких ваг повинна становити не менше 10 кг.

Отже, застосування давачів класу С5 не завжди забезпечує практичне покращення метрологічних характеристик автомобільних та вагонних ваг.

Список літератури

1. ДСТУ OIML R 60-1:2019. Датчики навантаження. Метрологічні вимоги. Частина 1. Метрологічні та технічні вимоги (OIML R 60-1:2017, IDT).

2. ДСТУ OIML R 60-2:2019. Датчики навантаження. Метрологічні вимоги Частина 2. Метрологічний контроль та випробування (OIML R 60-2:2017, IDT).

3. ДСТУ EN 45501:2007. Прилади неавтоматичні зважувальні. Загальні технічні вимоги та методи випробувань (EN 45501:1992, IDT).

4. ДСТУ OIML R 111-1:2008. Гирі класів точності E1, E2, F1, F2, M1, M1-2, M2, M2-3 і M3. Частина 1. Загальні технічні вимоги та методи випробування (OIML R 111-1:2004, IDT).

СЕКЦІЯ 7.

ІОНІЗУЮЧІ ВИПРОМІНЮВАННЯ

РЕНОВАЦІЇ ТА МІЖНАРОДНІ ІНТЕГРАЦІЇ МЕТРОЛОГІЧНОЇ СИСТЕМИ ІОНІЗУЮЧИХ ВИПРОМІНЮВАНЬ ННЦ «ІНСТИТУТ МЕТРОЛОГІЇ»

Неугодов Є.І., Озерський К.Л., Пустовий А.С.
Харків, Україна, kostiantyn.ozerskyi@nure.ua

До 2022 року Україна володіла інфраструктурою з 10 державних первинних еталонів іонізуючого випромінювання, які були зосереджені на заміській базі ННЦ «Інститут метрології» в селищі Липці Харківської області. Однак внаслідок бойових дій та окупації база зазнала критичних пошкоджень. Така ситуація ускладнила метрологічну простежуваність, що створило серйозні перешкоди для радіаційного моніторингу атомних електростанцій і для калібрування та повірки дозиметричного обладнання. У ситуації, що склалася, першочерговим завданням є відновлення еталонної бази. Також за першої ж нагоди необхідно провести гуманітарне розмінування бази в Липцях, оцінити стан вцілілого обладнання та здійснити релокацію радіоактивних джерел у безпечні сховища.

Створення оновленої національної еталонної лабораторії з іонізуючих випромінювань на базі ННЦ «Інститут метрології» слід реалізувати за принципом «Build Back Better» (Відбудувати краще, ніж було), розмістивши її у спеціалізованих переобладнаних підземних приміщеннях. Технологічно це передбачає перехід від застарілих іонізаційних методів до прямих методів вимірювань: впровадження первинної водної калориметрії для високоенергетичного випромінювання з опорою на досвід таких вимірювань у PTB (Німеччина) та NPL (Велика Британія), а також створення сучасного комплексу для абсолютного вимірювання активності за прикладом лабораторії IFIN-HH (Румунія) з використанням систем 4πPC-γ та LSC-TDCR, що важливо для контролю ультракороткоживучих ізотопів, які застосовуються в ПЕТ-діагностиці [1, 2]. У перспективі еталонну базу необхідно розширювати для забезпечення потреб медицини, включаючи брахітерапію, протонну терапію та променеву терапію під контролем МРТ (MR-LINAC) [2].

Паралельно розвиток стандартів об’ємної активності радону має бути синхронізований зі створенням єдиної державної системи моніторингу та інтеграцією України до Європейської платформи обміну радіологічними даними (EURDEP).

Силами співробітників НЦ-7 у приміщеннях на території ННЦ «Інститут метрології» були проведені роботи з відновлення двох еталонів ДЕТУ 12-01-11 та ДЕТУ 12-02-98, також ННЦ «Інститут метрології» тісно співпрацює з МАГАТЕ та PTB за проєктами відновлення еталонної бази (ДЕТУ 12-05-02, ДЕТУ 12-06-02, ДЕТУ 12-07-02) та іншого обладнання.

Список літератури

1. International Atomic Energy Agency. Establishing a Secondary Standards Dosimetry Laboratory. IAEA Human Health Series No. 44. Vienna: IAEA, 2023. 68 p.

2. International Atomic Energy Agency. Absorbed Dose Determination in External Beam Radiotherapy: An International Code of Practice for Dosimetry Based on Standards of Absorbed Dose to Water. Technical Reports Series No. 398 (Rev. 1). Vienna: IAEA, 2024. 286 p. doi: https://doi.org/10.61092/iaea.ve7q-y94k

DEVELOPMENT OF STATISTICAL SIMULATION MODEL OF THE MAINTENANCE PROCESS

Banzak H.V., Banzak O.V.
Odesa, Ukraine, banzakoksana@gmail.com

The statistical simulation model (SSM) under development is designed to estimate reliability and operating cost indicators for a system, taking into account its composition, structure, reliability characteristics, and maintenance (technical servicing) procedures. State transitions, indicated by arrows, correspond to events simulated within the model.

The system's operational status is monitored continuously. In state «2», a diagnostic check is performed to determine the technical condition of the system's components. Depending on the check's outcome, maintenance is either performed or not performed.

The SSM is based on the statistical simulation method, utilizing the concept of an «event calendar» [1]. The essence of the event calendar concept and its application mechanism is as follows: an array (representing the event calendar) is created in the PC's main memory to store the scheduled timestamps for all simulated events.

During the simulation, the array elements are periodically scanned to identify the earliest scheduled timestamp. This minimum value is adopted as the current simulation time, and the corresponding event is designated as the current event. The current event is then «processed» by simulating the actions that constitute that event.

Three types of events are simulated (and processed) in the model: «failure» (transition 0→1), «check» (transition 0→2), and «maintenance» (transition 0→3). After processing each event, the time for the next occurrence of that event type is scheduled. If the current event is a «failure», a random operating time until the next failure for that specific (failed) component is generated. If the current event is a «check» or «maintenance», the time for the next corresponding event is scheduled. The newly calculated scheduled times are then recorded in the event calendar, replacing the previous values. The described process of analyzing and modifying the event calendar repeats cyclically throughout the entire simulation period.

After the processing of each successive event, the simulation time advances. This process continues until the simulation time reaches the specified duration of the object's operation. The process of processing and rescheduling events as the simulation time progresses from zero to the specified operational duration constitutes a single realization of the simulation process.

References

1. Sergey Lenkov, Konstantin Borjak, Gennady Banzak, Vadim Braun, etc. Forecasting to reliability complex object radio-electronic technology and optimization parameter their technical usage with use the simulation statistical models: [monography] (Ed. S.V. Lenkov). Odessa, BMB Publ., 2014. 252 p.

DEVELOPMENT OF RELIABILITY MODEL FOR A COMPLEX TECHNICAL SYSTEM

Banzak H., Banzak O.
Odesa, Ukraine, banzakoksana@gmail.com

Complex technical systems play a crucial role in modern society. This primarily concerns various military and specialized radio-electronic complexes, radar stations, and automated control systems (for air traffic, energy infrastructure, etc.). The state's defense capability, economic security, and the lives of hundreds or thousands of people depend on the reliability of such systems. Such assets belong to the class of repairable items designed for long-term, repeated use. As a rule, they are expensive and entail significant operating costs [1].

A reliability model (RM) enables the estimation of reliability metrics for individual structural elements and the system as a whole, based on data regarding the reliability of elements at lower structural levels. The RM represents the system's hierarchical structural layout. Structural elements at a given level are modeled as a series connection (in terms of reliability) of the constituent elements from level. Individual structural elements may consist of a redundant group (parallel connection) of identical components. Thus, RM combines the representation of a hierarchical structural layout with an arbitrary series-parallel reliability structure – a model suitable for the majority of technical systems encountered in practice.

The *DN*-distribution is used as the failure model for all elements and the system as a whole. The *DN*-distribution is considered an adequate model for gradual failures in both electronic components and various mechanical assemblies. A significant advantage of *DN*-distribution is that its functional form remains invariant under transformations of the system’s reliability structure. It is precisely this characteristic that allows it to be applied to systems with a hierarchical structure.

The software implementation of RM was developed using the Delphi programming environment. The system’s hierarchical structural layout is represented in the software using list data structures (specifically, «TList» objects). The list elements are objects (instances of Delphi classes) representing the individual structural components of the technical system. Such objects encapsulate all necessary data pertaining to individual structural elements, including the parameters of the time-to-failure *DN*-distributions.

Information regarding the composition, structure, and reliability metrics of the object’s elements is stored in the model's database, which is constructed using InterBase-format tables.

References

1. Sergey Lenkov, Konstantin Borjak, Gennady Banzak, Vadim Braun, etc. Forecasting to reliability complex object radio-electronic technology and optimization parameter their technical usage with use the simulation statistical models: [monography] (Ed. S.V. Lenkov). Odessa, BMB Publ., 2014. 252 p.

MODELING OF CdZnTe-DETECTOR PULSE-HEIGHT SPECTRA

Banzak O., Banzak H.
Odesa, Ukraine, banzakoksana@gmail.com

Passing gamma-radiation through a detector and subsequently processing the resulting signal yields an instrumental spectrum, which directly reflects the interactions between gamma quanta and the detection medium. This spectrum provides the primary data used for further analysis of the gamma radiation.

The instrumental spectrum is complex due to the specific characteristics of gamma-ray detection using proportional detectors. Furthermore, there are both inherent and technical limitations regarding the precision with which the detection system can measure gamma-ray energy. Inherent limitations arise primarily from statistical fluctuations associated with charge generation processes within the detector. The positions of full-absorption peaks can also be distorted by electronic effects such as noise, pulse pile-up, incorrect pole-zero adjustment, and so forth. Additionally, the actual gamma-ray spectrum of a sample may differ significantly from spectra obtained under laboratory conditions.

Therefore, to analyze the potential application of the fabricated spectrometer within a system for the radiation-based monitoring of nuclear fuel status and to develop and debug algorithms and software for processing measured spectra a methodology was devised to simulate instrumental spectra. This methodology models the intrinsic gamma radiation emitted by spent nuclear fuel at various burnup levels and fuel-rod cladding integrity states [1]. This approach significantly streamlined the development of the system's hardware and software components, as the theoretical spectrum model for the fuel assembly under study allows for the determination of measurement sensitivity and the selection of an optimal spectrum-processing algorithm.

The methodology for simulating instrumental spectra is based on the following procedures:

1. The spectrum of isotopes with numerous lines is represented as a linear combination of monoenergetic spectra, accounting for quantum yield in a «narrow-beam» geometry; self-absorption within the fuel assembly is not considered for individual isotopes.

2. The modification of the monoenergetic spectrum resulting from interaction with the surrounding process environment and the fuel matrix is simulated.

3. The first and second procedures are used to generate instrumental spectra for a mixture of isotopes.

References

1. Banzak O., Banzak H. Comparate analysis of properties materials for semiconductor gauges. *Materials of scientific and technical conference «Laser technologies. Lasers and their application»*. Truskavets, 2017, pp. 53–55.

DEVELOPMENT OF SYSTEM FOR MEASURING THE INTRINSIC GAMMA-RADIATION OF SPENT NUCLEAR FUEL

Banzak O., Banzak H.
Odesa, Ukraine, banzakoksana@gmail.com

To enhance efficiency, the system for monitoring spent nuclear fuel (SNF) described in this study is based on measuring the intrinsic gamma-ray spectra of the spent fuel assembly (SFA). From the perspective of minimizing time expenditure, the optimal approach is to perform these measurements directly during the SNF transfer process specifically, during the vertical movement of the assembly out of the storage pool rack.

This choice is driven by the fact that measurements of an SFA's intrinsic gamma radiation provide significantly more information. Such measurements make it possible to determine the burnup, cooling time, and initial enrichment of the SFA being monitored without relying on supplementary data. In contrast, data obtained using the existing methodology measuring the total neutron count rate allow for SNF burnup estimation only when combined with additional information regarding cooling time and initial enrichment [1]. However, given the strict regulations governing transfer times, operations to monitor fuel burnup, cooling time, and initial enrichment must be synchronized with the transfer process schedule. Consequently, real-time operational capability must be the primary criterion when defining the structure of the burnup monitoring system.

During the time it takes for the refueling machine to extract a single fuel assembly, the system must measure the assembly's intrinsic gamma radiation, perform pulse-height analysis, process the gamma-ray spectrum, calculate the fuel burnup characteristics, and record them in the database. Hereafter, this mode of operation is referred to as real-time operation. This approach adheres to a fundamental principle of system design: the rate at which input data (fuel assembly intrinsic gamma-ray characteristics) enter the system must match the rate at which output data (spent fuel status characteristics) are generated [1]. The assembly, mounted on the operating rod, combines the functions of external radiation shielding and collimation and consists of the following components:

- stainless steel bottom base (25–30 mm thick) with a profiled cutout;
- segmented tungsten plates with embedded semiconductor CdZnTe-detectors and sealed connectors;
- stainless steel top base (15–20 mm thick) with a profiled cutout;
- clamping connections (stainless steel bolts, 350–400 mm in length).

References

1. Banzak O., Banzak H. Comparate analysis of properties materials for semiconductor gauges. *Materials of scientific and technical conference «Laser technologies. Lasers and their application»*. Truskavets, 2017, pp. 53–55.

П’ЯТИРІВНЕВА ІЄРАРХІЧНА СТРУКТУРА ОБРОБКИ ІНФОРМАЦІЇ В ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМАХ РАДІАЦІЙНОГО МОНІТОРИНГУ

Квасніков В.П., Швалюк Є.П.
Київ, Україна, kvp@kai.edu.ua, 8863264@stud.kai.edu.ua

Забезпечення точності та метрологічної стабільності засобів вимірювання характеристик іонізуючого випромінювання вимагає врахування складного комплексу дестабілізуючих факторів [1]. Класична організація вимірювального каналу не передбачає функціонального розділення окремих етапів реєстрації [2]. Це призводить до взаємного накладання апаратних похибок блока детектування (енергетичної залежності чутливості, анізотропії, «мертвого часу») та статистичних похибок реєстрації та обробки інформації, спричинених стохастичною природою взаємодії частинок. Зазначені фактори обмежують застосування адаптивних алгоритмів та не дозволяють забезпечити необхідну точність вимірювань в умовах змінної інтенсивності випромінювання. За таких умов виникає потреба у створенні багаторівневої структури вимірювального каналу, здатної функціонально розділити ці складові та реалізувати алгоритми їх адаптивної компенсації.

Метою роботи є синтез та наукове обґрунтування адаптивної п’ятирівневої ієрархічної структури процесу обробки вимірювальної інформації, що забезпечує функціональне розмежування складових похибок і мінімізацію сумарної невизначеності результатів реєстрації нейтронного випромінювання.

Для розв'язання задачі розмежування похибок та впровадження адаптивних алгоритмів безпосередньо у вимірювальний цикл запропоновано п'ятирівневу ієрархічну архітектуру вимірювального каналу (на прикладі блока детектування нейтронів типу WENDI-II).

Рівень фізико-технічної реєстрації (Рівень І): реалізується на основі комбінованого блока детектування WENDI-II (поліетиленовий сповільнювач, вольфрамова оболонка, пропорційний лічильник ^{3}He). Забезпечує первинну реєстрацію та пасивну спектральну корекцію в діапазоні до 5 ГеВ за рахунок реакцій вторинної генерації нейтронів (*n, xn*) [3]. На виході формується первинна послідовність електричних імпульсів.

Рівень аналогового перетворення та апаратної обробки (Рівень ІІ): блок аналогової підготовки містить зарядочутливий підсилювач, амплітудний дискримінатор та схему формування нормованих імпульсів. На цьому етапі слабкий заряд лічильника перетворюється на імпульс напруги зі збереженням інформації про енергію кожної події. Це дозволяє надійно відсікати супутнє фонове гамма-випромінювання та формувати на виході нормований імпульсний потік.

Рівень цифрової реєстрації та накопичення даних (Рівень ІІІ): мікропроцесорний модуль перетворює нормований імпульсний потік у впорядковані масиви вимірювальної інформації. Модуль статистичного накопичення формує часові інтервали реєстрації відповідно до закону Пуассона, а генератор створює дискретну модель динамічного розподілу швидкості лічби. Ці параметри передаються на наступний рівень для алгоритмічної обробки.

Рівень інтелектуальної обробки та алгоритмічної корекції (Рівень IV): адаптивний модуль виконує компенсацію енергетичної залежності та автоматичну стабілізацію чутливості системи. На основі апарату нечіткої логіки здійснюється інтелектуальний аналіз параметрів потоку та адаптивне налаштування тривалості вимірювання. Це дозволяє сформувати достовірний скоригований масив даних для передачі на вихідний рівень [4].

Рівень представлення результатів та передачі даних (Рівень V): модуль візуалізації та передачі даних здійснює обробку скоригованого масиву, перерахунок у нормовані дозиметричні величини та розрахунок сумарного бюджету невизначеності [5]. Сформована інформація розділяється на два потоки: для локального відображення результатів оператору та для трансляції вимірювальної інформації у зовнішні системи моніторингу.

Принциповою перевагою розробленої архітектури є наявність замкненого контуру керування між рівнем інтелектуальної обробки та рівнем цифрової реєстрації даних. Якщо накопичений обсяг статистики не забезпечує заданого рівня точності, нечіткий регулятор автоматично коригує тривалість інтервалу вимірювання на етапі накопичення імпульсів. Після досягнення необхідної статистичної достовірності сформований масив передається на рівень представлення результатів та передачі даних.

Таким чином, запропонована п'ятирівнева ієрархічна структура вимірювального каналу забезпечує чітке розмежування апаратних похибок блока детектування та статистичних похибок первинної реєстрації й подальшої обробки інформації. Завдяки реалізації адаптивного зворотного зв'язку між рівнями інтелектуальної обробки та цифрової реєстрації досягається адаптивне налаштування тривалості вимірювання, що суттєво знижує сумарну невизначеність оцінки характеристик нейтронного випромінювання та підвищує метрологічну надійність засобів моніторингу в умовах змінної інтенсивності випромінювання.

Список літератури

1. Ключников О.О., Носовський А.В. Основи дозиметрії іонізуючих випромінювань: навч. посіб. Київ: Ін-т проблем безпеки АЕС НАН України, 2007. 256 с. (Серія «Безпека атомних станцій»).

2. Дорожовець М., Мотало В., Стадник Б., Василюк В., Борек Р., Ковальчик А. Основи метрології та вимірювальної техніки: підручник. Т. 2. Вимірювальна техніка (за ред. Б. Стадника). Львів: Вид-во Нац. ун-ту «Львівська політехніка», 2005. 656 с.

3. Olsher R.H. et al. WENDI: an improved neutron rem meter. Health Physics, 2000, vol. 79, no. 2, pp.170-181. doi: https://doi.org/10.1097/00004032-200008000-00010.

4. Ross T.J. Fuzzy Logic with Engineering Applications. 3rd ed. Chichester, John Wiley & Sons, 2010. 607 p.

5. ДСТУ ISO/IEC Guide 98-1:2018. Невизначеність вимірювань. Частина 1. Вступ до подання невизначеності у вимірюванні (ISO/IEC Guide 98-1:2009, IDT).

Тези доповідей XIII Міжнародної науково-технічної конференції
«МЕТРОЛОГІЯ ТА ВИМІРЮВАЛЬНА ТЕХНІКА» (МЕТРОЛОГІЯ – 2026)
Відп. за випуск: А.Є. Олійник
Відп. редактор: С. В. Білоусова

Формат 60x84/16.
Видавництво ННЦ «Інститут метрології», вул. Мироносицька, 42, м. Харків, 61002, Україна
тел.+38(057) 700-34-09
e-mail: info@metrology.kharkov.ua
www.metrology.kharkov.ua
Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до Державного реєстру видавців серія
ДК № 5944 від 15.01.2018 р.
© ННЦ «Інститут метрології»
Харків, 2026