

Міністерство освіти і науки України
Український державний університет залізничного транспорту



ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ

VI МІЖНАРОДНА НАУКОВО-ТЕХНІЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ

ПРОГРАМА КОНФЕРЕНЦІЇ



ITT2025

УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЗАЛІЗНИЧНОГО
ТРАНСПОРТУ

**Тези доповідей 6-ої міжнародної
науково-технічної конференції**

«ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ»

Харків 2025

6-а міжнародна науково-технічна конференція «Інтелектуальні транспортні технології», Харків, 24–26 листопада 2025 р.: Тези доповідей. – Харків: УкрДУЗТ, 2025. – 300 с.

Збірник містить тези доповідей науковців вищих навчальних закладів України та інших країн, підприємств транспортної та машинобудівної галузей за чотирьма напрямками: розвиток інтелектуальних технологій при управлінні транспортними системами; транспортні системи та логістика; інтелектуальне проектування та сервіс на транспорті; функціональні матеріали та технології при виготовленні та відновленні деталей транспортного призначення.

© Український державний університет
залізничного транспорту, 2025

де t – час; K – постійна, яка враховує зв'язок між навантаженням індентора та його переміщенням.

З отриманого слідує, що тривалість проміжку часу до досягнення поверхневим шаром стану точки біфуркації визначається співвідношенням її початкової дефектності та швидкістю збільшення дефектності структури в процесі експлуатації. Ранжування матеріалів виробів за їх довговічністю може бути проведено на основі порівняння дисперсій сили контактної взаємодії їхнього поверхневого шару з індентором при склерометрії.

УДК 620.1:004.738.5

ЦИФРОВА ТРАНСФОРМАЦІЯ МЕТРОЛОГІЧНИХ ЛАБОРАТОРІЙ: ВБУДОВАНІ ІНФОРМАЦІЙНОВИМІРЮВАЛЬНІ СИСТЕМИ ДЛЯ ХАРАКТЕРИЗАЦІЇ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

DIGITAL TRANSFORMATION OF METROLOGY LABORATORIES: EMBEDDED INFORMATION MEASURING SYSTEMS FOR FUNCTIONAL MATERIALS CHARACTERIZATION

*д.т.н., професор Л.А. Тимофєєва¹, Dr. hab. inż., prof. uczelni Z. Krzysiak²,
к.т.н., доцент М.Г. Равлюк¹, О.В. Сергєєв¹*

¹Український державний університет залізничного транспорту (м. Харків)

²University of Life Sciences in Lublin (Poland)

*D.Sc. (Tech.), Professor L.A. Tymofieieva¹, Dr. hab. inż., prof. uczelni Z. Krzysiak²,
Cand. of Eng. Sci. M.G. Ravliuk¹, O.V. Serhieiev¹*

¹Ukrainian State University of Railway Transport (Kharkiv)

²University of Life Sciences in Lublin (Poland)

Традиційні метрологічні лабораторії, побудовані на архітектурі централізованого комплексу вимірювальних приладів, поступово вступають у епоху розподіленої цифрової інфраструктури [3] [4]. Для характеристики сучасних функціональних матеріалів необхідна нова парадигма: інтегровані смарт-сенсори з вбудованою передоброблю даних, хмарною обробкою результатів та автоматичною оцінкою невизначеності [1]. Це найбільше актуально для лабораторій, які працюють з гідрофобними, терморегульованими та електро-активними покриттями, де традиційні методи не забезпечують достатньої швидкості та надійності контролю [4].

Модель інформаційно-вимірювальної системи лабораторії

Інформаційно-вимірювальна система (ІВС) сучасної лабораторії — це розподілена архітектура, в якій окремі фізичні датчики (temperature sensors, humidity sensors, conductivity probes, spectrophotometers) підключаються до периферійних обчислювальних вузлів (edge nodes) [3][4], а ті, у свою чергу,

передають оброблені дані на облікові сервери (cloud platforms). Ключовою особливістю є те, що первинна калібровка та компенсація систематичних похибок здійснюються не в централізованій лабораторії, а безпосередньо у вузлі датчика [3][4]. Така архітектура дозволяє досягти гранично низької затримки (latency) при обробці критичних вимірювань, наприклад, у режимі реального часу (real-time) під час спорту нанесення функціональних покриттів [5]. Типові вимірювальні системи містять мінімум три рівні: датчик → edge gateway → cloud storage, де кожен рівень контролює якість даних та зберігає метадані про невизначеність.

Смарт-сенсори в характеристизації функціональних матеріалів

На відміну від звичайних датчиків, смарт-сенсори містять вбудовані мікропроцесори, що виконують локальну компенсацію, фільтрацію та навіть попередній аналіз даних. Наприклад, при вимірюванні контактного кута функціональних покриттів смарт-сенсор може самостійно виявити дрейф, зберегти калібрувальні коефіцієнти у внутрішній пам'яті та автоматично скоригувати результати. Ключовим прогресом є концепція self-diagnostics: датчик може виявити власний відмову, невідповідність характеристик або неправильне вирівнювання та передати це як окремий сигнал. Модель інформаційно-вимірювальної системи лабораторії Смарт-сенсори в характеристизації функціональних матеріалів невизначеності. У системах з подвійними зондами (dual probes) датчик автоматично перемикається на резервний елемент при збою, забезпечуючи безперервність вимірювань. Для вимірювання властивостей полімерних функціональних матеріалів (модуль пружності, коефіцієнт дисипації) вже розроблені смарт-сенсори на основі MEMS та CMOS елементів на одному кристалі, що дозволяє досягти малих розмірів ($5\text{ мм} \times 5\text{ мм}$) та низької вартості виготовлення при масовому виробництві[7].

Цифрові калібрувальні сертифікати та метрологічна простежуваність

Суттєвою інновацією є запровадження цифрових калібрувальних сертифікатів (Digital Calibration Certificate), які замість паперових документів передаються у форматі XML або закодованих цифрових ідентифікаторів. Такий сертифікат містить не лише значення калібрування та дату, але й всю історію змін, криптографічний підпис та посилання на еталонні матеріали, використані під час калібрування. Метрологічна простежуваність забезпечується через безперервний ланцюг: робочий датчик → еталонний матеріал лабораторії → національний еталон → одиниця СІ. Для функціональних матеріалів це означає, що вимірювання контактного кута через смарт-сенсор може бути з метрологічною впевненістю пов'язане з дефініцією градуса ($^{\circ}$) через систему еталонних зразків[2].

Автоматизація оцінки невизначеності у хмарних сервісах

Однією з найбільших переваг хмарної архітектури є централізована оцінка невизначеності за принципами GUM. Вся необхідна інформація — калібрувальні дані, технічні специфікації приладів, умови навколишнього середовища, результати повторних вимірювань — зберігаються у структурованому форматі на сервері. Хмарний сервіс може автоматично обчислити: (1) Type A

невизначеність через статистичну обробку повторних вимірювань [1]; (2) Type B неvizначеність через дані про еталони та апаратуру; (3) комбіновану стандартну неvizначеність; (4) розширену неvizначеність з коефіцієнтом охоплення $k=2$. Результат вже готовий у виді звіту, що значно прискорює документацію та усуває людські помилки.

Практична реалізація у лабораторіях з функціональних матеріалів

Лабораторіям, які вивчають терморегульовані полімери, гідрофобні наносистеми та електроактивні покриття, системи IoT дозволяють реалізувати сценарії, неможливі з традиційною апаратурою [7]. Наприклад, можна налаштувати безперервний моніторинг змін контактного кута під час релаксації покриття при кімнатній температурі з реєстрацією даних кожні 10 секунд протягом 72 годин, без присутності оператора. При цьому хмарна система автоматично: виявляє і фільтрує шум; інтегрує дані з датчика температури для коригування результатів; обчислює тренд зміни кута; оцінює неvizначеність як функцію часу; тригерує сигнал тривоги, якщо параметр виходить за допустимі межі.

Виклики та перспективи

Основні виклики впровадження цифрових систем у метрологічні лабораторії пов'язані з безпекою даних (encryption, authentication) [8], стандартизацією форматів (semantic interoperability) та необхідністю навчання персоналу. Однак переваги явно перевищують ці перепони: скорочення часу підготовки результатів у 3–5 разів, підвищення достовірності на 15–20% за рахунок автоматизації, та створення нових можливостей для високошвидкісного моніторингу властивостей функціональних матеріалів. Європейська ініціатива "Metrology Cloud [6]" та національні проекти цифрової трансформації якісної інфраструктури будуть каталізаторами переходу від традиційних лабораторій до розумних, автономних систем, що можуть самостійно контролювати якість функціональних матеріалів на протязі їх виробництва та експлуатації.

- [1]. JCGM 100:2008. Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM).
- [2]. ISO/IEC 17025:2017. General requirements for the competence of testing and calibration laboratories.
- [3]. Eichstädt S. et al. Toward Smart Traceability for Digital Sensors and the Internet of Things. *Sensors*, 2021, vol. 21(3), art. 1040.
- [4]. Smart Manufacturing and Digitalization of Metrology: A Systematic Literature Review. *Sustainability*, 2022, vol. 14(15), art. 9345.
- [5]. Lab::Measurement framework for laboratory equipment control and measurement automatization. arXiv:1810.07088, 2018.
- [6]. Eichstädt S. Digital Quality Infrastructure for Europe: The European Metrology Cloud. *PTB Mitteilungen*, 2017, vol. 127(4), pp. 87-92.
- [7]. TechBriefs. Smart Sensor Technology for the IoT. *IEEE Spectrum*, 2018, vol. 55(10), pp. 32-38.
- [8]. Bezsmertna O. et al. SmartCom: Security and Interoperability in Digital Metrology. EURAMET Research Project, 2020-2023.