

СУЧАСНІ СЕНСОРНІ ТЕХНОЛОГІЇ ВИСОКОТОЧНИХ ВИМІРЮВАНЬ

¹Вінницький національний технічний університет

Анотація

У тезах розглянуто сучасні сенсорні технології високоточних вимірювань як ключовий напрям розвитку метрології в умовах цифровізації промисловості, медицини та наукових досліджень. Проаналізовано принципи роботи MEMS-сенсорів, оптоволоконних датчиків та квантових сенсорних систем, визначено їхні метрологічні характеристики, переваги та сфери застосування. Особливу увагу приділено точності, стабільності, мініатюризації та інтеграції із системами Інтернету речей (IoT). Наведено порівняльний аналіз основних типів сенсорів для обґрунтування вибору технологій залежно від вимог до вимірювального процесу.

Ключові слова: метрологія, сенсорні технології, високоточні вимірювання, MEMS, оптоволоконні сенсори, квантові сенсори, IoT.

Abstract

The thesis examines modern sensor technologies for high-precision measurements as a key direction in metrology development under the conditions of digitalization in industry, medicine, and scientific research. The operating principles of MEMS sensors, fiber-optic sensors, and quantum sensing systems are analyzed, along with their metrological characteristics, advantages, and application areas. Particular attention is paid to accuracy, stability, miniaturization, and integration with the Internet of Things (IoT). A comparative analysis of major sensor types is provided to justify technology selection depending on measurement requirements.

Keywords: metrology, sensor technologies, high-precision measurements, MEMS, fiber-optic sensors, quantum sensors, IoT.

Вступ

Сучасна метрологія є фундаментальною основою розвитку промислової автоматизації, медичних технологій, авіаційно-космічної техніки та систем контролю якості. У ХХІ столітті ключовим чинником розвитку вимірювальних систем стало впровадження високоточних сенсорних технологій, здатних забезпечувати надзвичайно низькі похибки, високу швидкість та інтеграцію з цифровими платформами [1].

Розвиток концепції Industry 4.0, інтернету речей та інтелектуальних систем управління потребує використання сенсорів нового покоління, які не лише виконують вимірювання, але й забезпечують автономний аналіз, передачу та обробку даних у реальному часі [2]. Особливого значення набувають MEMS-сенсори (Micro-Electro-Mechanical Systems), оптоволоконні датчики та квантові сенсори, які демонструють принципово новий рівень точності порівняно з традиційними електромеханічними засобами. Метою даної роботи є аналіз сучасних сенсорних технологій високоточних вимірювань, їх метрологічних переваг та перспектив застосування.

Результати дослідження

Одним із найбільш поширених напрямів є MEMS-сенсори, які поєднують механічні та електронні компоненти на мікрорівні. Завдяки малим розмірам, низькому енергоспоживанню та високій чутливості вони широко застосовуються в акселерометрах, гіроскопах, барометрах та біомедичних пристроях. За даними досліджень, сучасні MEMS-датчики характеризуються високою точністю, компактністю та енергоефективністю [1].

Іншим важливим напрямом є оптоволоконні сенсори, зокрема Fiber Bragg Grating (FBG), які використовують зміну довжини хвилі світла для вимірювання температури, деформацій або тиску. Їх основними перевагами є електромагнітна стійкість, висока точність та можливість роботи у складних середовищах (атомна енергетика, авіація, нафтогазова промисловість) [2]. Точність таких систем може досягати рівня мікродеформацій, що робить їх критично важливими для структурного моніторингу.

Найбільш інноваційним напрямом є квантові сенсори, які використовують властивості атомів, фотонів або квантових станів для надточних вимірювань часу, магнітних полів чи гравітаційних змін. Наприклад, атомні годинники нового покоління забезпечують надзвичайно високий рівень точності, критичний для систем навігації, телекомунікацій та фундаментальної науки [3].

Суттєвою сучасною тенденцією є інтеграція сенсорів із системами штучного інтелекту та IoT-платформами, що сприяє розвитку концепції “розумного вимірювання”, у межах якої вимірювальні системи здатні не лише збирати дані, але й виконувати їх аналіз, прогнозування та адаптивне налаштування.

Табл. 1. Порівняльний аналіз сучасних сенсорних технологій

Критерій	MEMS-сенсори	Оптоволоконні сенсори	Квантові сенсори
Розмір	Дуже малий	Середній	Складний
Точність	Висока	Дуже висока	Надвисока
Стійкість до перешкод	Середня	Висока	Дуже висока
Енергоспоживання	Низьке	Середнє	Високе
Типові сфери	Смартфони, авто, медицина	Авіація, енергетика	GPS, наука

Таким чином, кожен тип сенсорних технологій має власні переваги залежно від сфери застосування. MEMS домінують у масових портативних системах, оптоволоконні датчики – у критично важливих промислових середовищах, а квантові сенсори формують майбутнє надточної метрології.

Висновки

Проведений аналіз показав, що сучасні сенсорні технології є стратегічним напрямом розвитку метрології та високоточних вимірювань. MEMS-системи забезпечують баланс між точністю, компактністю та доступністю [1], оптоволоконні сенсори гарантують високу стабільність у складних умовах [2], а квантові технології відкривають принципово нові можливості надточного контролю [3]. Інтеграція сенсорів із цифровими системами, штучним інтелектом та IoT створює основу для розвитку інтелектуальної метрології нового покоління. Отже, розвиток сенсорних технологій не лише підвищує точність вимірювань, але й визначає конкурентоспроможність сучасної науки, промисловості та технологічних систем.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Fraden J. Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications. 5th ed. Cham : Springer, 2016. 758 p.
2. Eid M. M. A. Optical fiber sensors: review of technology and applications // *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*. 2022. Vol. 25, No. 2. P. 1038–1046. DOI: 10.11591/ijeecs.v25.i2.pp1038-1046.
3. Degen C. L., Reinhard F., Cappellaro P. Quantum Sensing // *Reviews of Modern Physics*. 2017. Vol. 89, No. 3. P. 035002. DOI: 10.1103/RevModPhys.89.035002.

Науковий керівник: **Дудатьєв Ігор Андрійович** – доцент кафедри ІРТС, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: dudatiev.igor@gmail.com

Сірак Владислав Олегович – студент групи 1KI-25мс, факультет інформаційних технологій та комп’ютерної інженерії, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: vladsirak9@gmail.com

Supervisor: **Dudatyev Igor A.** – Lecturer at the Department of Information and Radio-Technical Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: dudatiev.igor@gmail.com

Sirak Vladislav O. – student of group 1KI-25ms, Faculty of Information Technologies and Computer Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: vladsirak9@gmail.com