

**КОНТРОЛЬ І ДІАГНОСТИКА ПРОЦЕСІВ ТА СИСТЕМ  
В ПРИЛАДОБУДУВАННІ**

DOI: 10.20535/1970.71(1).2026.361791

УДК 621.317:531.7:681.586:620.179

**ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА КОНТРОЛЮ  
ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ МІКРОСТРУКТУР**

Андрейко В. О., Бондаренко М. О.

Черкаський державний технологічний університет, Черкаси, Україна

E-mail: [vetal12007@ukr.net](mailto:vetal12007@ukr.net); [m.bondarenko@chdtu.edu.ua](mailto:m.bondarenko@chdtu.edu.ua)

У статті розглянуто інформаційно-вимірнювальну систему (ІВС) контролю геометричних параметрів функціональних мікроструктур, побудовану на базі атомно-силового мікроскопа з використанням спеціалізованих н'єзоелектричних вимірнювальних сенсорів та уніфікованого програмного модуля оброблення даних. Актуальність роботи зумовлена зростанням вимог до точності, відтворюваності та метрологічної сумісності вимірнювань у мікро- та наноінженерії, де навіть незначні відхилення топографічних параметрів поверхні можуть істотно впливати на функціональні характеристики виробів у мікрооптиці, сенсоріці, фотоніці та біомедичних застосуваннях. Особливу увагу приділено н'єзоелектричним сенсорам як ключовим елементам ІВС, що забезпечують високоточне позиціонування, стабільність сканування та чутливу реєстрацію параметрів мікрорельєфу. Показано, що застосування таких сенсорів у поєднанні з АСМ-платформою дає змогу реалізувати контрольовані переміщення з високою роздільною здатністю, забезпечити повторюваність траєкторії зондування та мінімізувати похибки, пов'язані з механічною нестабільністю системи. У роботі наведено структурну організацію ІВС, що включає зондовий модуль, XYZ-н'єзосканер, електроніку збору й попереднього опрацювання сигналів, блок програмно-аналітичного оброблення, а також процедури калібрування та статистичного оцінювання результатів. Експериментальне випробовування системи виконано у двох незалежних лабораторіях у вигляді двох серій по 32 вимірнювання на калібрувальному тест-зразку TGZ1 за стабілізованих умов температури  $24 \pm 0,3$  °C та відносної вологості  $45 \pm 0,5$  %. Для обох серій отримано однакове середнє значення мікрогеометрії поверхні на рівні 10,48 нм, при цьому суми квадратів відхилень становили 0,0512 і 0,0480, дисперсія міжсерійної відтворюваності – 0,0032, а стандартне відхилення – 0,056. Встановлено, що за рівня довіри 95 %, гранична різниця становить  $R = 0,155$ , тоді як максимальна спостережена різниця між лабораторіями не перевищила 0,08, що підтверджує стабільність, відтворюваність і метрологічну придатність розробленої ІВС для контролю параметрів функціональних мікроструктур.

**Ключові слова:** н'єзоелектричні сенсорі; атомно-силова мікроскопія; топографія поверхні; зондовий модуль; метрологічна валідація.

**Вступ**

Функціональні мікроструктури (тонкоплівкові елементи, мікрофлюїдні канали, МЕМС-сенсорі, мікрооптичні поверхні, інтерконектори та інші мікро- та наноелементи) на сьогодні стали базовими складовими компонентів пристроїв у точному приладобудуванні, мікроелектроніці, фотоніці, біомедичних системах, сенсорній техніці тощо [1]. Їх працездатність і функціональна придатність безпосередньо залежать від точності відтворення геометричних параметрів поверхні та просторової структури [2]. Так, навіть незначні відхилення висоти, періоду, кута нахилу стінок, форми вершин і западин здатні істотно змінювати механічні, оптичні, гідродинамічні, електрофізичні чи трибологічні властивості цих пристроїв [3]. Тому, контроль 3D-топографії функціональних мікроструктур поступово переходить із допоміжної технологічної операції в критично важливу ланку технологічного циклу

«проектування – виготовлення – експлуатація», від якої залежить не лише якість виробу, а й стабільність його функціонування.

У сучасній промисловій метрології основою для такого контролю є міжнародно узгоджені нормативні підходи до оцінювання точності вимірнювань, невизначеності та параметрів поверхні. Зокрема, положення міжнародного стандарту ISO 5725-2:2019 [4] задають методичну рамку для оцінювання повторюваності та відтворюваності результатів, тоді, як стандарт GUM 1995 (JCGM 100:2008) [5] визначає загальні принципи оцінювання невизначеності вимірнювання, а ДСТУ EN ISO 25178:2022 [6] забезпечує уніфікований підхід до опису параметрів тривимірної топографії поверхонь. Проте, для задач контролю функціональних мікроструктур важливим стає не лише використання окремих нормативних положень, а й побудова такої інтегрованої інформацій-

но-вимірювальної системи (IBC), яка забезпечує метрологічно сумісне визначення геометричних параметрів у різних режимах сканування, за різних умов вимірювання та для різних типів об'єктів.

Розвиток таких інструментальних засобів контролю мікро- і нанорельєфу пов'язаний насамперед із широким застосуванням атомно-силової мікроскопії (АСМ), яка (особливо у високороздільних просторових режимах) дозволяє досліджувати складні мікрорельєфи з нанометровою та субнанометровою роздільною здатністю [7 – 9]. Водночас для функціональних мікроструктур уже недостатньо розглядати лише сам вимірювальний прилад як відокремлений засіб спостереження. Реальна точність і відтворюваність результатів визначаються властивостями всього вимірювального ланцюга [10]: «зонд – п'єзосенсор – сканер – електроніка – модуль збирання даних – алгоритми оброблення». Саме тому об'єктом уваги має бути не тільки метрологічна характеристика окремого АСМ-компонента, а IBC контролю геометричних параметрів мікроструктур, як цілісний функціональний комплекс.

Таким чином, актуальним науково-прикладним завданням, вирішенню якого присвячена дана стаття є розроблення IBC контролю геометричних параметрів функціональних мікроструктур, яка б поєднувала засоби високоточного сканування, узгоджене перетворення та збирання даних, алгоритмічне оброблення результатів і метрологічно обґрунтовану інтерпретацію 3D-топографії. Саме така постановка дозволяє перейти від місцевого аналізу окремих елементів вимірювального тракту до системного дослідження повного ланцюга «об'єкт – IBC – алгоритми оброблення», що є необхідною умовою забезпечення достовірного контролю функціональних мікроструктур у сучасному приладобудуванні.

### **Постановка проблеми**

У сучасних оглядових роботах [7 – 22] підкреслюється, що атомно-силова мікроскопія зберігає особливе значення саме як інструмент тривимірного високороздільного вимірювання, придатний для аналізу поверхонь без жорстких вимог до матеріалу об'єкта, а її розвиток пов'язаний не лише з підвищенням просторової роздільної здатності, а й з удосконаленням режимів сканування, позиціонування та керування рухом сканера. Зокрема, у роботах авторів Ендрю Дж. Флемінга, Лімін Чжу, Матильди Джеллі та інших [11 – 13], присвячених високошвидкісній та ультрапрецизійній АСМ, наголошується, що саме точність просторового відтворення поверхні й стабільність траєкторії сканування є критичними для достовірного визначення геометричних параметрів мікроструктур.

Паралельно з розвитком самого вимірювального інструмента формується розуміння того, що

АСМ слід розглядати як складну багатокомпонентну систему, а не лише як окремий прилад для візуалізації рельєфу. Так, у сучасному систематичному огляді Йоганнеса Дегенхардта, Мохаммеда Вассіма Бунаїма, Нан Дена, Райнера Тутча та Гаолян Дая [14] конструкції кантилеверів, сканерів і контролерів прямо зазначено, що технічна ефективність АСМ визначається сукупною дією зонда, сканера, контролера та режиму роботи. Отже похибки й обмеження виникають на різних рівнях вимірювального ланцюга. Цю ж тенденцію підтверджують і прикладні роботи Леонардо Грегората, Марко Каутеро, Ке Сю, Хунхао Цянь та інших [15, 16] з побудови вимірювально-керуючих систем для АСМ, де увага приділяється вже не тільки чутливому елементу, а й вбудованому контролеру, системам аналогово-цифрового перетворення, антиаліасинговій фільтрації, цифровому відстеженню частоти та програмному модулю збирання й оброблення даних. Таким чином, у сучасній літературі дедалі виразніше простежується перехід від аналізу окремих вузлів до аналізу повного ланцюга «зонд – сканер – електроніка – система керування – дані».

Помітний розвиток отримав і метрологічний напрям досліджень. Стандарти серії ISO 25178, зокрема ДСТУ EN ISO 25178:2022 [6], задають уніфіковану систему параметрів для опису 3D-топографії поверхні, а сучасні оглядові праці [17 – 19] вже спеціально аналізують, як параметри  $S_a$ ,  $S_q$ ,  $S_z$ ,  $S_{dq}$ ,  $S_{dr}$  та інші визначаються саме в умовах високороздільних АСМ-вимірювань і наскільки вони чутливі до режиму сканування та умов оброблення даних. Водночас для оцінювання точності й узгодженості результатів зберігає значення методологія ISO 5725-2:2019 [4], яка, попри появу новішої редакції, продовжує застосовуватися в роботах з аналізу повторюваності та відтворюваності AFM-вимірювань. Так, у дослідженні 2025 року [20], присвяченому відтворюваності параметрів ареальної топографії, прямо зазначено, що вимірювання  $S_a$ ,  $S_q$  і  $S_z$  аналізувалися відповідно до ISO 5725-2:2019 [4], а сама проблема сумісності результатів між серіями та умовами вимірювання розглядається як центральна для стандартизації контролю топографії. Питання оцінювання невизначеності при цьому залишаються методично прив'язаними до GUM 1995 (JCGM 100:2008) [5], який і надалі слугує базовою рамкою для формалізації невизначеності результату вимірювання.

Ще одним важливим напрямом є розвиток інтелектуальних алгоритмів керування та оброблення АСМ-даних. У новітніх роботах Рубена Міллан-Сольсона, Ліам Коллінз, Етьєна Дага, Вінсента Дюпре та інших [21, 22] показано, що машинне навчання та адаптивні алгоритми використовуються для прискорення сканування, автоматичного вибору ділянок вимірювання, підвищення пропускну здатності оброблення та зменшення помилок

керування. Зокрема, в огляді [21] наголошено, що ML-підходи вже застосовуються для покращення продуктивності АСМ, прискорення аналізу даних і переходу до високопродуктивних процедур вимірювання, а в роботі [22] з інтелектуальним керуванням процесом сканування показано зменшення середньоквадратичних відхилень керування приблизно в чотири рази порівняно з класичним PID-контролем у дослідженій конфігурації.

Проте, у багатьох роботах основна увага зосереджується на можливостях самого АСМ-приладу або окремих режимах сканування, тоді як питання спеціалізованої сенсорної підсистеми залишаються поверхнево висвітленими. Насамперед це стосується ролі п'єзоелектричних вимірювальних сенсорів у забезпеченні стабільного позиціонування, високої добротності сканування, зменшенні дрейфу, шумів та похибок зворотного зв'язку, від яких безпосередньо залежить достовірність визначення геометричних параметрів мікрорельєфу.

У цьому контексті актуальним стає не просто використання АСМ як інструмента високороздільного спостереження, а розроблення ІВС, яка забезпечує метрологічну сумісність вимірювань, статистичну стійкість результатів і придатність системи до міжлабораторної валідації. Саме така постановка науково-практичної задачі логічно продовжує сучасні дослідження, в яких недостатня формалізація повного ланцюга «об'єкт – ІВС – алгоритми оброблення» залишається однією з основних методичних прогалин.

*Метою статті* є розроблення й обґрунтування принципів побудови та функціонування інформаційно-вимірювальної системи контролю геометричних параметрів функціональних мікроструктур, побудованої на базі атомно-силової мікроскопії з використанням спеціалізованих п'єзосенсорів і уніфікованого програмного модуля оброблення даних.

Відповідно до поставленої мети, у статті доцільно розв'язати такі завдання: обґрунтувати принципи побудови ІВС контролю геометричних параметрів мікроструктур; визначити склад і функції її основних вузлів; описати принцип функціонування системи в контактному та напівконтактному режимах; показати роль п'єзоелектричних сенсорів і адаптивного PID-керування у стабілізації процесу сканування; навести узагальнені метрологічні характеристики системи; а також обговорити результати експериментальної перевірки за уніфікованим протоколом.

Отже, запропоновані в роботі підходи та отримувані результати мають бути спрямовані на забезпечення прецизійного дотримання цільових параметрів мікрорельєфу, підвищення достовірності контролю якості та підтримку впровадження надійних технологій у мікросхемотехніці, як перспективному напрямку точного приладобудування.

### **Принципи побудови та функціонування ІВС контролю геометричних параметрів функціональних мікроструктур**

Об'єктом дослідження в статті є інтегрована ІВС контролю геометричних параметрів функціональних мікроструктур, побудована на базі сканувальної атомно-силової мікроскопії з використанням приладу NT-206 та уніфікованого програмного модуля оброблення даних. На відміну від локальних вимірювальних рішень, у яких окремо розглядають зонд, електроніку та програмне забезпечення, запропонований підхід трактує ІВС як єдиний замкнений контур, у якому фізичне зондування, керування, адаптація режиму, цифрова фільтрація, статистична оцінка та накопичення результатів функціонують як взаємопов'язані елементи однієї системи.

Як модельні об'єкти, в складі такої ІВС доцільно використовувати контрольні тест-зразки, що відтворюють критичні фрагменти поверхні функціональних мікроструктур, зокрема мікрооптичних елементів. Саме така постановка дає змогу пов'язати геометричний контроль не з абстрактним профілем, а з реально значущими ділянками поверхні, де нанометрові відхилення визначають оптичну, електрофізичну або трибологічну функціональність виробу. Контрольним еталоном у вимірювальному циклі слугує калібрувальна решітка TGZ1 [23] із номінальним рівнем мікрогеометрії 10–11 нм, що забезпечує трасовану перевірку придатності вимірювального ланцюга перед основним скануванням.

Принцип побудови ІВС ґрунтується на поєднанні вимірювального модуля, мікроконтролерного контуру керування, блоку попереднього оброблення сигналів, модуля збирання даних, програмно-аналітичного ядра, блоку адаптації та бази даних вимірювань (рис. 1).

Позначення сигналів:  $U_s(t)$  – первинний аналоговий сигнал;  $e(t)$  – помилка зворотного зв'язку;  $U_x$ ,  $U_y$ ,  $U_z$  – керуючі сигнали п'єзосканеру;  $Z(x, y, t)$  – цифрові дані карти висот

Така архітектура є доцільною тому, що контроль мікро- і наноггеометрії не може бути якісним за умови розірваного інформаційного ланцюга: кожен етап – від первинного перетворення механічної взаємодії «зонд–зразок» до формування карти висот і параметрів шорсткості повинен бути узгоджений за часовими, амплітудними й алгоритмічними параметрами.

Центральним елементом ІВС є вимірювальна голівка АСМ, інтегрована в модуль XYZ-п'єзосканера. Саме в цій частині системи реалізується фізичний контакт або напівконтакт із поверхнею мікроструктури, формується первинний інформативний сигнал і визначається реальна просторова роздільна здатність контролю.

Принципово важливо підкреслити, що ключовими компонентами вимірювальної голівки є

спеціалізовані датчики на основі керамічних пластинних п'єзоелементів із розділеними електрода-

ми, на поверхні яких сформовано тонкі контактні сенсори-зонди (рис. 2).

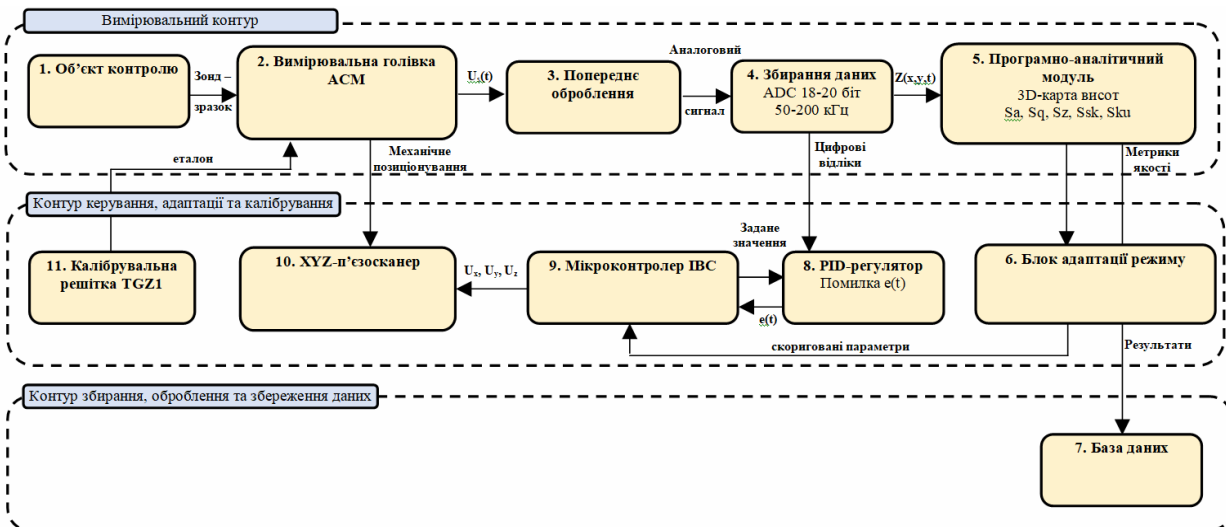


Рис. 1. Структурно-функціональна схема ІВС контролю геометричних параметрів функціональних мікроструктур

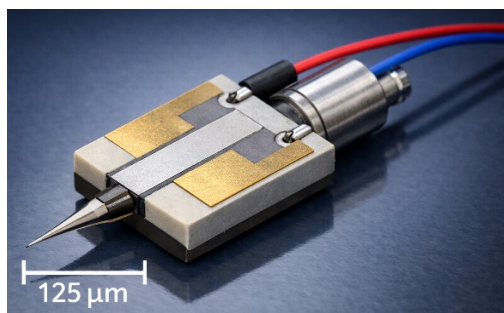


Рис. 2. Зовнішній вигляд 3D-моделі спеціалізованого вимірювального датчика для АСМ на основі керамічного пластинного п'єзоелемента

Такі датчики не лише виконують функцію вимірювального інструмента, а й утворюють активний сенсорний вузол із прямим перетворенням

механічної взаємодії у вихідний електричний сигнал (рис. 3).

На відміну від традиційного вимірювального інструмента на базі кантилеверів із зондами, де деформація вимірюється опосередковано через зовнішній оптичний канал, авторський датчик поєднує п'єзоелектричну чутливу основу, електродну структуру та контактний сенсор в одній конструкції. Розділені електроди дозволяють просторово локалізувати інформативну частину сигналу, підвищити чутливість до мікропереміщень та реалізувати окреме виділення корисної складової, що відповідає зміні сили натиску або амплітуди коливань під час зближення з поверхнею. Завдяки цьому вимірювальна голівка здатна працювати не лише як виконавчий, але й як сенсорний модуль високої селективності.



Рис. 3. Схема прямого перетворення механічної взаємодії у вихідний електричний сигнал при роботі вимірювального інструмента АСМ

Модуль XYZ-п'єзосканера забезпечує прецизійні мікро- та нанопереміщення зонда відносно зразка за трьома координатами. У межах розробленої ІВС цей модуль виконує дві функції одночасно: по-перше, формує траєкторію сканування в площині X-Y; по-друге, забезпечує швидке верти-

кальне коригування положення по осі Z відповідно до сигналу зворотного зв'язку. Саме поєднання керованого ходу по Z до 2 мкм із мінімальним кроком по X, Y на рівні 1-5 нм і роздільністю по Z до 0,03-0,1 нм формує основу для достовірного контролю параметрів поверхні в нанометровому

діапазоні.

Мікроконтролер керування ІВС є вузлом, який перетворює первинний вимірювальний сигнал у систему керуючих впливів. Він приймає оцифровані дані від модуля збирання, порівнює поточний стан взаємодії «зонд–зразок» із заданим режимом і виробляє керуючі команди для п'єзосканера. У практичному сенсі це означає, що мікроконтролер безперервно підтримує робочу точку зондування: не допускає надмірного притискання сенсора до поверхні, обмежує ризик пошкодження зонда та водночас зберігає стабільність відліків при переході між різними ділянками рельєфу.

Контролер зі зворотним зв'язком у складі ІВС функціонує за сигналом сили або амплітуди коливань зонду. Помилка зворотного зв'язку, тобто різниця між заданим і фактичним рівнем взаємодії, мінімізується PID-регулятором. Пропорційна складова швидко реагує на локальні зміни рельєфу, інтегральна компенсує повільні систематичні відхилення, а диференціальна обмежує перерегулювання при проходженні різких градієнтів поверхні. У такому вигляді PID-контур є базовим механізмом забезпечення стабільності траєкторії сканування і повторюваності карти висот.

Блок попереднього оброблення сигналів виконує критичну для точності функцію: він приймає аналогові сигнали з п'єзосенсорної вимірювальної голівки, підсилює їх, нормалізує, виконує первинну аналогову фільтрацію і готує до подальшого аналого-цифрового перетворення. Саме на цьому етапі відсікаються високочастотні завади, стабілізується рівень корисного сигналу та зменшується вплив шумів вимірювального каналу. Фактично між вимірювальною голівкою та модулем збирання даних цей блок передає вже не «сирій» електричний відгук, а узагальнений сигнал, придатний для подальшого числового аналізу.

Модуль збирання даних забезпечує синхронне оцифрування інформації з каналів зворотного зв'язку та сенсорних каналів вимірювальної голівки. За розрядності 18–20 біт і частоти дискретизації 50–200 кГц саме він формує цифровий часовий ряд, з якого надалі вибудовується висотна карта поверхні. Інформація, що передається далі до програмно-аналітичного модуля, містить не лише значення миттєвих відліків по Z, а й службові дані про поточні параметри сканування, часові мітки, режими фільтрації та оцінки якості сигналу.

Блок адаптації в структурі ІВС виконує функцію інтелектуального коректора режиму вимірювання. Він аналізує поточні метрики добротності вимірювального інструменту, стабільність помилки зворотного зв'язку, визначає рівень шуму та тенденцію до дрейфу. Якщо ці показники виходять за допустимі межі, блок

адаптації генерує для мікроконтролера нові скореговані параметри сканування: швидкість проходження рядка, крок дискретизації, а також встановлює інші параметри попередньої фільтрації або затримки стабілізації. Така взаємодія є принциповою перевагою ІВС, оскільки система не лише реєструє мікрогеометрію, а й активно підлаштовує свій режим до реального стану вимірювального процесу.

Програмно-аналітичний модуль є найвищим рівнем функціонування ІВС. Саме тут відбувається калібрування масштабних коефіцієнтів, автоматизоване усунення трендової складової (загального нахилу та фонові форми поверхні), побудова профілів і 3D-карт висот, обчислення параметрів Sa, Sq, Sz, Ssk, Sku та інших характеристик за ДСТУ EN ISO 25178:2022 [6]. Крім того, у цьому самому модулі реалізуються процедури статистичної оцінки, аналізу повторюваності й відтворюваності, а також контроль відповідності вимогам ISO 5725-2:2019 [4] та GUM 1995 (JCGM 100:2008) [5]. Загалом, програмно-аналітичний модуль перетворює послідовність цифрових відліків на метрологічно осмислений результат, придатний для подальшого технічного рішення.

База даних вимірювань виконує не лише архівну, але й функціональну роль. У ній накопичуються карти висот, службові параметри вимірювання, результати калібрування, статистичні показники серій вимірювань і шаблони протоколів. Передавання даних до бази здійснюється з програмно-аналітичного модуля після завершення кожного вимірювального циклу (зворотно, з бази можуть підвантажуватися еталонні параметри, шаблони налаштувань і сценарії оцінювання). Завдяки цьому ІВС набуває властивостей відтворюваного цифрового середовища, а не звичайного вимірювального стенда.

Якщо розглядати взаємодію між блоками як єдиний інформаційний ланцюг, тоді останній має наступний вигляд. Від вимірювальної голівки до блоку попереднього оброблення передаються аналогові сигнали, пропорційні силі взаємодії або амплітуді коливань зонду. Після аналогової підготовки ці сигнали надходять до модуля збирання даних, де перетворюються на цифрові масиви відліків. Звідси інформація передається одночасно до мікроконтролера керування та до програмно-аналітичного модуля. Мікроконтролер формує керуючі команди на п'єзосканер, а програмно-аналітичний модуль формує карту висот, обчислює параметри шорсткості, оцінює якість сканування і через блок адаптації повертає в контур скореговані параметри режиму.

Принцип дії ІВС у вимірювальному циклі полягає в підтриманні сталої взаємодії між зондом і поверхнею зразка під час послідовного сканування. У контактному режимі система стабілізує силу натиску, а в напівконтактному – амплітуду

механічного відгуку або коливань. У кожній точці траєкторії сканування зміна рельєфу викликає відповідний електромеханічний відгук сенсора, який одразу перетворюється на інформаційний сигнал, обробляється контуром керування і використовується для миттєвої корекції положення по осі Z. У результаті формується висотний відлік, прив'язаний до координат X та Y.

Така організація роботи дозволяє мінімізувати похибки, пов'язані з механічною нестабільністю, нелінійністю п'єзопереміщень, шумами вимірювального каналу і дрейфом. Так, нелінійність переміщень п'єзостолу після програмної лінеаризації не перевищує 0,2 % від загального діапазону переміщень, шум каналу по осі Z утримується на рівні до 0,05 нм, а дрейф по осі Z не перевищує 0,5 нм/хв за умови підтримання стабільності температури в межах  $\pm 0,5$  °C. Це означає, що система спроектована не як сукупність окремих точних вузлів, а як метрологічно збалансована архітектура, у якій внутрішні джерела похибок компенсуються в межах замкненого контуру.

Окремим принципом побудови ІВС є її первинна орієнтація на трасованість і статистичну валідацію. Перед початком серії вимірювань здійснюється перевірка придатності вимірювального ланцюга на калібрувальній решітці TGZ1, далі виконується уніфікований цикл збирання даних: фіксоване поле сканування, стандартизована дискретизація, однакові фільтри, автоматизоване видалення тренду, випадковий порядок проходження ділянок та єдиний шаблон протоколів. У цій логіці калібрування є не зовнішньою сервісною процедурою, а внутрішньо закладеним елементом функціонування ІВС.

Метрологічну основу системи становлять стабільність зворотного зв'язку, повторюваність відліків, просторова роздільна здатність по осі Z і трасоване калібрування за еталонними профілем та висотою. Узагальнені характеристики ІВС підтверджують можливість прецизійного контролю мікрогеометрії: поле сканування по X, Y становить до 50×50 мкм, робочий хід по осі Z – до 2 мкм, основна похибка за висотою профілю визначається як  $\pm(0,3 \text{ нм} + 1\%|z|)$ , повторюваність у точці не перевищує 0,2 нм, а розширена невизначеність основних 3D-параметрів становить 5–10 %. Саме ці значення свідчать, що запропонована авторами п'єзоелектрична сенсорна платформа здатна забезпечити відтворений контроль мікрогеометрії на рівні, достатньому для функціональних мікроструктур.

Якісна відмінність запропонованої ІВС від традиційних рішень полягає в тому, що в ній серія розроблених за участю автора датчиків на основі керамічних пластинних п'єзоелементів із розділеними електродами та сформованими на їх поверхні тонкими контактними сенсорами-зондами виступає не допоміжним, а системоутво-

рювальним елементом (див. рис. 2). У таких датчиках чутливий елемент, вузол локального електричного знімання сигналу і контактний зонд конструктивно поєднані. Це зменшує кількість проміжних перетворень, знижує залежність від юстування зовнішнього оптичного каналу та дає змогу формувати інформативний сигнал безпосередньо в місці механічної взаємодії з поверхнею.

Порівняно з традиційними зондами закордонного виробництва (наприклад серії MikroMasch HQ:CSC38), авторські вимірювальні інструменти мають низку принципівих переваг. Так, комерційний зонд CSC38 є пасивним кремнієвим кантилеверним елементом із трьома м'якими контактними консолями, з типовими жорсткостями 0,03; 0,05 та 0,09 Н/м і резонансними частотами 10; 14 та 20 кГц. Такий зонд вимагає зовнішнього оптичного відліку відхилення та стабільної відбивної здатності консолі. Авторський п'єзокерамічний датчик, навпаки, забезпечує прямий електричний вихід, меншу чутливість до оптичних перешкод, кращу інтегрованість із контуром адаптації і потенційно вищу інформативність при контролі поверхонь зі складним рельєфом або поверхонь із низькою відбивною здатністю.

Проте, основні переваги авторських датчиків особливо виразно проявляються в умовах контролю функціональних мікроструктур зі складним локальним профілем. За таких умов, пряме п'єзоелектричне перетворення датчика дає змогу скоротити ланцюг формування сигналу. З іншого боку, розділені електроди відкривають можливість диференціального виділення корисної складової та покращують селективність до мікроскопічних змін сили взаємодії, а сформований на поверхні пластинного елемента тонкий контактний сенсор-зонд конструктивно краще узгоджується з інтегрованою вимірювальною голівкою, ніж змінний пасивний кантилевер. Також, система стає менш залежною від складних процедур оптичної юстировки, що безпосередньо знижує часові витрати на підготовку вимірювання і ризик додаткових похибок.

На порівняльних графіках залежності вихідного потенціалу від сили натиску в одній системі координат (рис. 4) показано, що для авторського п'єзокерамічного датчика робоча характеристика є крутішою та ближчою до лінійної в основному діапазоні малих навантажень.

Для традиційного каналу з пасивним кантилевером типу CSC38 доцільно подати менш круту еквівалентну характеристику, що відображає наявність додаткового оптичного етапу реєстрації та більшу залежність корисного сигналу від налаштування каналу відліку.

Врахувавши усе вищезазначене, та з огляду на техніко-експлуатаційні характеристики запропонованої ІВС, доцільно зробити висновок, що така ІВС є більш адаптованою до автоматизованого серійного контролю, аніж традиційні рішення,

що орієнтуються переважно на універсальні комерційні вимірювальні системи. В той же час, поєднання адаптивного керування, цифрової бази протоколів, уніфікованого програмного поля та сенсорної платформи на базі п'єзокерамічних датчиків дозволяє швидше відтворювати налашту-

вання між циклами вимірювань, зменшувати операторський вплив, підвищувати метрологічну сумісність між лабораторіями та легше масштабувати контроль на нові типи функціональних мікроструктур.

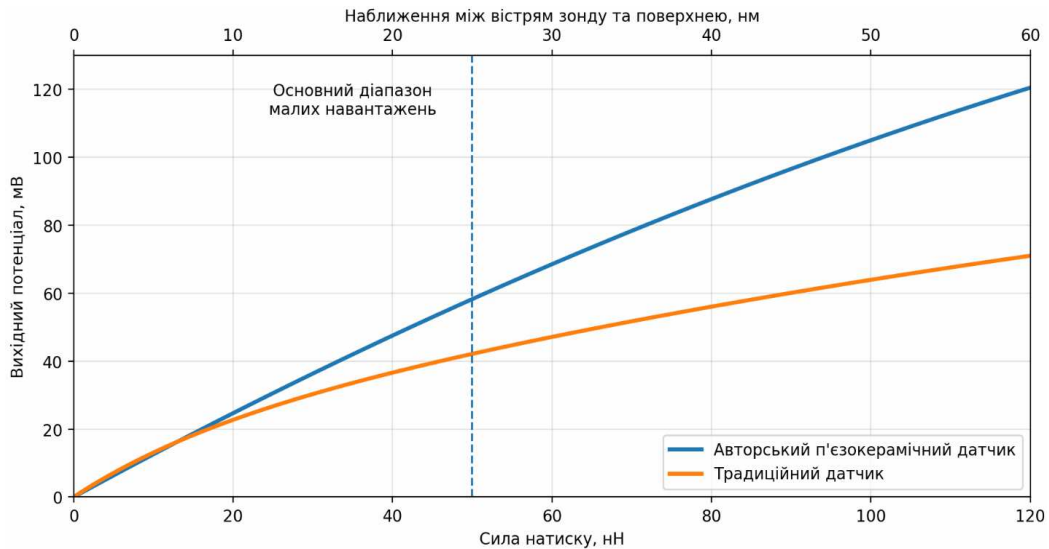


Рис. 4. Порівняльні графіки залежності вихідного потенціалу від сили натиску (наближення між вістрям зонду та досліджуваною поверхнею). Графіки подано як ілюстрацію принципу функціонування вимірювальних зондів, а не як заміну повноцінної експериментальної калібрувальної кривої

Отже, авторами запропоновано основні принципи побудови та функціонування ІВС контролю геометричних параметрів функціональних мікроструктур, яка якісно відрізняється від традиційних систем контролю тим, що поєднує в єдиному замкненому контурі активну п'єзоелектричну вимірювальну систему, адаптивне мікроконтролерне керування, програмно-аналітичний модуль калібрування і статистичної валідації, а також цифрову базу даних результатів. Така ІВС містить низку інноваційних рішень, а саме: використання серії датчиків на основі керамічних пластинних п'єзоелементів із розділеними електродами та тонкими контактними сенсорами-зондами, автокорекцію параметрів сканування за показниками добротності, інтегровані процедури трасованого калібрування та уніфікований цикл статистично валідованого вимірювання, що дозволяє підвищити чутливість, зменшити похибки, покращити відтворюваність результатів і забезпечити прецизійний контроль мікрогеометрії функціональних мікроструктур у лабораторних і прикладних технологічних умовах.

#### Обговорення отриманих результатів

Експериментальне випробування розробленої ІВС контролю геометричних параметрів функціональних мікроструктур було організовано у дволабораторній постановці, що є принципово важливим для оцінювання не лише повторюваності, а й відтворюваності такої ІВС. Випробування

виконувалися у двох незалежних лабораторіях при дослідженні зразків двох серій С1 і С2 по 32 вимірювання в кожній серії, із застосуванням розробленої ІВС на базі АСМ NT-206, за однакових гармонізованих параметрів сканування, рандомізованого порядку проходження ділянок зразка та стабілізованих умов довкілля (температури  $24 \pm 0,3$  °С та відносної вологості  $45 \pm 0,5$  %). Така постановка експерименту дала змогу мінімізувати вплив сторонніх чинників і зосередити аналіз на метрологічних властивостях розробленої ІВС.

Отримані внаслідок досліджень числові результати свідчать про високий рівень узгодженості між серіями та лабораторіями. Так, для обох серій вимірювань було зафіксовано однакове середнє значення параметра мікрогеометрії поверхні на рівні 10,48 нм. При цьому сумарні квадратичні відхилення становили 0,0512 і 0,0480, міжсерійна дисперсія дорівнювала 0,0032, а стандартне відхилення становило 0,056. В той же час, за довірчої ймовірності 95 % гранична різниця між результатами становила  $R = 0,155$ , тоді як максимальна фактично зафіксована міжлабораторна різниця дорівнювала лише 0,08. Уже сам цей факт є вагомим експериментальним підтвердженням того, що розроблена ІВС забезпечує стабільне відтворення результатів і є метрологічно придатною для контролю геометричних параметрів функціональних мікроструктур.

Фахова інтерпретація цих результатів полягає насамперед у тому, що повний збіг середніх зна-

чень, одержаних у двох незалежних лабораторіях, вказує на відсутність вираженого систематичного зміщення. Крім того, максимальна міжлабораторна різниця 0,08 є майже вдвічі меншою за гранично допустиме значення  $R = 0,155$ , тобто фактичний розкид результатів не виходить за межі статистично прийнятної згоди. Це означає, що при перенесенні вимірювальної процедури між лабораторіями розроблена ІВС зберігає однакову метрологічну поведінку, а отже може розглядатися як інструмент не лише лабораторного, а й міжлабораторно контролю мікрогеометрії.

Не менш важливим є те, що перевірка нормальності залишків і аналіз послідовностей вимірювань не виявили ані трендів за порядком проходження вимірювань, ані систематичних зсувів. Це дає підстави вважати, що зондовий канал ІВС працював стабільно впродовж усього циклу випробувань, а алгоритми цифрового опрацювання, включаючи стандартизований препроцесінг, усунення трендової складової та побудову профілів, не вносили додаткових похибок, пов'язаних із обробленням даних. У сукупності з тим, що ядро ІВС побудовано як замкнений контур із PID-регулюванням і адаптацією швидкості рядка, кроку дискретизації та параметрів фільтрації за поточними метриками добротності, ці результати свідчать про правильність обраної структурно-функціональної організації системи.

З огляду на те, що розроблювана ІВС орієнтована на використання спеціалізованих датчиків на основі керамічних пластинних п'єзоелементів із розділеними електродами та сформованими тонкими контактними сенсорами-зондами, можна ствер-

джувати, що саме висока чутливість, швидкодія та стабільність таких елементів у поєднанні з адаптивним PID-контуром забезпечили повторюваність траєкторії зондування і зменшили вплив механічної нестабільності, шумів та дрейфу. На користь такого висновку свідчать і узагальнені метрологічні характеристики ІВС: роздільна здатність по осі Z порядку 0,03–0,1 нм, шум вимірювального каналу не більше 0,05 нм, дрейф по осі Z не більше 0,5 нм/хв, відтворюваність між циклами вимірювань не більше 0,5 нм та розширена невизначеність основних 3D-параметрів у межах 5–10 %.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що розроблена ІВС може бути використана не лише для контролю шорсткості окремих поверхонь, а й для вимірювання критичних топографічних параметрів функціональних мікроструктур різного призначення. Насамперед ідеться про мікрооптичні елементи, фотонні структури, сенсорні поверхні, мікрофлюїдні елементи та біомедичні мікроструктури, для яких навіть незначні відхилення висоти, профілю або просторового рельєфу безпосередньо впливають на функціональні властивості виробу. Саме тому встановлені у роботі числові критерії відтворюваності мають значення не лише як результат окремого експерименту, а й як основа для формування регламентів валідації й регулярного контролю якості у приладобудуванні та мікросистемній техніці.

Для підтвердження ефективності розробленої ІВС, створено порівняльні графіки метрологічних та техніко-експлуатаційних характеристик розробленої ІВС і базової ІВС (рис. 5).

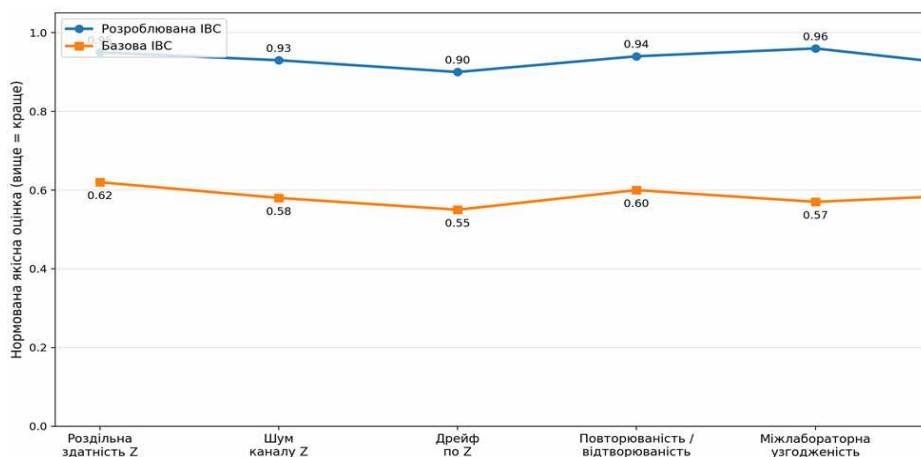


Рис. 5. Порівняння основних метрологічних характеристик розробленої ІВС та базової ІВС при контролі геометричних параметрів функціональних мікроструктур

На рис. 5 зіставлені показники, що безпосередньо характеризують метрологічну якість вимірювань: стандартне відхилення, гранична різниця  $R$ , максимальна міжлабораторна різниця, шум каналу по осі Z, дрейф по осі Z та розширена невизначеність.

На рис. 6 проведено порівняння техніко-експлуатаційних характеристик розробленої та

базової ІВС: смуги пропускання контуру зворотного зв'язку, частоти дискретизації, просторової роздільної здатності по осі Z, а також наявність адаптивного підлаштування режимів сканування й уніфікованого програмно-аналітичного модуля. Порівняно з базовою ІВС із стандартними контактними зондами CSC-38 без розвинутого адаптивного регу-

лювання, на представлених графіках (рис. 6) перевага розробленої ІВС за стабільністю, повторюваністю та придатністю до серійного автоматизованого контролю проявляється найкращим чином.

стю та придатністю до серійного автоматизованого контролю проявляється найкращим чином.

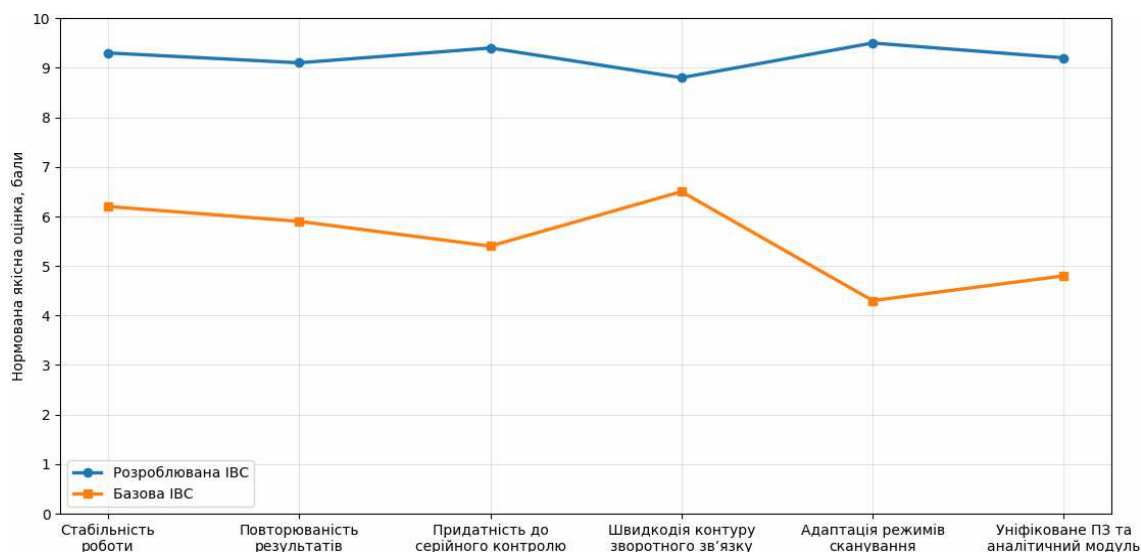


Рис. 6. Порівняння основних техніко-експлуатаційних характеристик розробленої ІВС та базової ІВС

Підсумовуючи наведене, можна стверджувати, що результати дволабораторних випробувань переконливо підтвердили стабільність, відтворюваність і метрологічну сумісність розробленої ІВС. Відсутність систематичного зміщення, низький рівень розкиду, відповідність фактичних міжлабораторних розбіжностей статистично допустимим межах, а також стійка робота адаптивного замкненого контуру дають підстави розглядати запропоновану ІВС як придатну до масштабування на інші сценарії вимірювання, де потрібні висока роздільна здатність, малий дрейф, стабільний зворотний зв'язок і програмно підтримувана метрологічна валідація.

### Висновки

Обґрунтована актуальність розроблення ІВС контролю геометричних параметрів функціональних мікроструктур, що зумовлено зростанням вимог до точності, відтворюваності та метрологічної сумісності вимірювань у мікро- і наноінженерії, де навіть незначні відхилення параметрів поверхні можуть істотно впливати на функціональні характеристики виробів.

Показано, що побудова ІВС на базі АСМ NT-206 із використанням спеціалізованих п'єзоелектричних сенсорів, XYZ-п'єзосканера, PID-контур зворотного зв'язку, модуля збирання та попереднього оброблення даних, а також уніфікованого програмно-аналітичного модуля забезпечує високоточне позиціонування, стабільність сканування, чутливу реєстрацію параметрів мікрорельєфу та зменшення похибок, пов'язаних із механічною нестабільністю, шумами й дрейфом.

Встановлено, що визначальними метрологічними властивостями розробленої ІВС є висока роздільна здатність по осі Z, мала похибка за висотою профілю, низький рівень шумів, малий дрейф

і достатня швидкість контуру зворотного зв'язку, що уможливило формування коректних карт висот і достовірне визначення параметрів 3D-топографії поверхні функціональних мікроструктур.

За результатами експериментальної перевірки у двох незалежних лабораторіях у вигляді двох серій по 32 вимірювання на тест-зразку TGZ1 підтверджено міжлабораторну узгодженість результатів: середнє значення мікрогеометрії в обох серіях становило 10,48 нм, сумарні квадратичні відхилення 0,0512 і 0,0480, міжсерійна дисперсія – 0,0032, стандартне відхилення – 0,056, гранична різниця при довірчій імовірності 95% -  $R = 0,155$ , а максимальна міжлабораторна різниця не перевищила 0,08. Це підтверджує стабільність, відтворюваність і метрологічну придатність розробленої ІВС для контролю геометричних параметрів функціональних мікроструктур.

Показано, що запропоновані принципи побудови та функціонування ІВС можуть бути використані як основа для подальшої метрологічної валідації вимірювальних систем, організації регулярного міжлабораторного контролю, а також масштабування на інші параметри топографії та сценарії контролю мікрооптичних, сенсорних, фотонних і біомедичних функціональних мікроструктур.

### Література

- [1] R. Hajare, V. Reddy, & R. Srikanth, "MEMS based sensors: A comprehensive review of commonly used fabrication techniques", *Materials Today: Proceedings*, 49: 720–730, 2022. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.05.223.
- [2] S. Lingadahalli Kotreshappa, C. G. Nayak, & S. Krishnan Venkata, "A review on the role of microflow parameter measurements for microfluidics applications", *Systems*, 11 (3): Article 113, 2023.

- DOI: 10.3390/systems11030113.
- [3] S. Gao, Y. Ota, F. Tian, T. Liu, & S. Iwamoto, "Optimizing the optical and magneto-optical response of all-dielectric metasurfaces with tilted side walls", *Optics Express*, 31 (9): 13672–13682, 2023. DOI: 10.1364/OE.480415
- [4] ISO 5725-2:2019. Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results - Part 2: Basic method for the determination of repeatability and reproducibility of a standard measurement method. [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/69419.html>.
- [5] JCGM 100:2008. Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement. DOI: 10.59161/jcgm100-2008e.
- [6] DSTU EN ISO 25178-2:2022. Geometrical product specifications (GPS). Surface texture: Areal. Part 2. Terms, definitions and surface texture parameters. [Online]. Available: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=118352](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=118352).
- [7] X. Chen, B. Li, Z. Liao, J. Li, X. Li, J. Yin, & W. Guo, "Principles and applications of liquid-environment atomic force microscopy", *Advanced Materials Interfaces*, 9 (35): 2201864, 2022. DOI: 10.1002/admi.202201864
- [8] C. Yang, C.-Q. Dang, W.-L. Zhu, & B.-F. Ju, "High-speed atomic force microscopy in ultra-precision surface machining and measurement: Challenges, solutions and opportunities", *Surface Science and Technology*, 1: Article 7, 2023. DOI: 10.1007/s44251-023-00006-5
- [9] N. Severin, A. R. Dzhanoev, H. Lin, A. Rauf, S. Kirstein, C.-A. Palma, I. M. Sokolov, & J. P. Rabe, "Atomic resolution with high-eigenmode tapping mode atomic force microscopy", *Physical Review Research*, 4 (2): 023149, 2022. DOI: 10.1103/PhysRevResearch.4.023149.
- [10] L. Gregorian, M. Cautero, S. Carrato, D. Giuressi, M. Panighel, G. Cautero, & F. Esch, "Design of an FPGA-based controller for fast scanning probe microscopy", *Sensors*, 24 (18): Article 6108, 2024. DOI: 10.3390/s24186108
- [11] L. Li, A. J. Fleming, Y. K. Yong, S. S. Aphale, & L. Zhu, "High performance raster scanning of atomic force microscopy using model-free repetitive control", *Mechanical Systems and Signal Processing*, 173: Article 109027, 2022. DOI: 10.1016/j.ymssp.2022.109027
- [12] M. Gelli, B. Tiribilli, F. A. Salam, M. Vassalli, & M. Basso, "Adaptive drive as a control strategy for fast scanning in dynamic mode atomic force microscopy", *Sensors* 25 (3): Article 860, 2025. DOI: 10.3390/s25030860
- [13] X. Wang, Q. Yu, Y. Meng, J. Wang, H. Huang, & L. Zhu, "Cross-scale high-bandwidth atomic force microscopy with a stick-slip nanopositioner", *Nature Communications* 16: Article 10559, 2025. DOI: 10.1038/s41467-025-65579-1
- [14] J. Degenhardt, M. W. Bounaim, N. Deng, R. Tutsch, & G. Dai, "A new kind of atomic force microscopy scan control enabled by artificial intelligence: Concept for achieving tip and sample safety through asymmetric control", *Nanomanufacturing and Metrology*, 7: 11, 2024. DOI: 10.1007/s41871-024-00229-6
- [15] L. Gregorat, M. Cautero, S. Carrato, D. Giuressi, M. Panighel, G. Cautero, & F. Esch, "Design of an FPGA-based controller for fast scanning probe microscopy", *Sensors*, 24(18): Article 6108, 2024. DOI: 10.3390/s24186108
- [16] K. Xu, & H. Qian, "Design of atomic force microscope photoelectric sensing circuit based on Kalman filter", *Microscopy Research and Technique*, 88(10): 2647–2663, 2025. DOI: 10.1002/jemt.24883.
- [17] В. Квасніков, М. Катаєва, & Т. Шкварницька, "Розробка методу калібрування скануючого зондового мікроскопу", *Measuring and Computing Devices in Technological Processes*, №2, с. 74–80, 2021. DOI: 10.31891/2219-9365-2021-68-2-9.
- [18] V. Alar, A. Razumić, B. Runje, I. Sikirica, M. Kolar, & B. Štrbac, "Application of areal topography parameters in surface characterization", *Applied Sciences*, 15(12): 6573, 2025. DOI: 10.3390/app15126573
- [19] P. Pawlus, R. Reizer, M. Wieczorowski, & G. M. Krolczyk, "Sensitivities of surface texture parameters to measurement errors: A review", *Measurement*, 227: 114323, 2024. DOI: 10.1016/j.measurement.2024.114323
- [20] A. Razumić, B. Runje, Z. Keran, Z. Trzun, & D. Pugar, "Reproducibility of areal topography parameters obtained by atomic force microscope", *Tehnički glasnik*, 19 (si1): 1–6, 2025. DOI: 10.31803/tg-20250324183037
- [21] R. Millan-Solsona, M. Checa, S. R. Brown, A. N. Bible, B. Srijanto, L. Wiggins, S. S. Madugula, A. L. B. Pyne, J. L. Morrell-Falvey, S. Retterer, R. K. Vasudevan, & L. Collins, "Synthetic data-driven deep learning for label-free autonomous atomic force microscopy", *Nature Communications* Advance online publication, 2026. DOI: 10.1038/s41467-026-70421-3
- [22] O. Thomas-Chemin, S. Janel, Z. Boumehdi, C. Séverac, E. Trevisiol, E. Dague, & V. Duprès, "Advancing high-throughput cellular atomic force microscopy with automation and artificial intelligence", *ACS Nano*, 19 (5): 5045–5062, 2025. DOI: 10.1021/acsnano.4c07729.
- [23] В. Андрейко, І. Жайворонок, С. Мацепа, О. Волошко, & Д. Жуйков, "Оцінювання відтворності результатів випробувань інформаційно-виміральної системи для вимірювання геометричних параметрів функціональних мікроструктур", *Вісник КПІ. Серія приладобудування*, Вип. 70(2), с. 62–70, 2025. DOI: 10.20535/1970.70(2).2025.348012.

UDC 621.317:531.7:681.586:620.179

**V. O. Andreiko, M. O. Bondarenko***Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine***INFORMATION-MEASURING SYSTEM FOR MONITORING THE GEOMETRIC PARAMETERS OF FUNCTIONAL MICROSTRUCTURES**

This paper considers an information and measurement system for controlling the geometric parameters of functional microstructures, developed on the basis of the NT-206 atomic force microscope and employing specialized piezoelectric measuring sensors together with a unified data-processing software module. The problem addressed in this study arises from the fact that, in modern micro- and nanoengineering, micro-optics, photonics, sensorics, and biomedical applications, even minor deviations in surface microrelief parameters may significantly affect the functional performance of products, whereas conventional control approaches do not always provide the required level of accuracy, reproducibility, metrological compatibility, and interlaboratory consistency of results. The aim of the study is to develop and substantiate the principles for the design and operation of an integrated information and measurement system that combines high-precision probing, adaptive control of the scanning process, unified digital data processing, and a metrologically sound interpretation of the results obtained in the control of the geometric parameters of functional microstructures.

The scientific novelty of the work lies in the development of a structural and functional organization of the information and measurement system in which specialized sensors based on ceramic plate-type piezoelectric elements with separated electrodes and thin contact probe-sensors formed on their surface are integrated into a single closed-loop architecture comprising an XYZ piezoscanner, a PID feedback loop, a scanning-parameter adaptation unit, a data acquisition module, a software-analytical core, and a digital results database. In contrast to conventional solutions based on passive cantilever probes, this approach ensures the direct conversion of the mechanical “probe-sample” interaction into an output electrical signal, improves sensitivity to microdisplacements, reduces dependence on an external optical readout channel, and enhances the integration of the measuring instrument with the adaptive control system. It is shown that the proposed information and measurement system provides high-precision positioning, stable scanning trajectory control, sensitive registration of microrelief parameters, and minimization of errors associated with mechanical instability, piezoactuator nonlinearity, measurement-channel noise, and drift.

The paper presents the operating principles of the system in both contact and semi-contact modes, describes the composition and purpose of its main units, and summarizes its metrological characteristics, including a scanning area of up to  $50 \times 50 \mu\text{m}$ , a Z-axis travel range of up to  $2 \mu\text{m}$ , a Z-axis resolution on the order of  $0.03\text{--}0.1 \text{ nm}$ , Z-channel noise not exceeding  $0.05 \text{ nm}$ , Z-axis drift not exceeding  $0.5 \text{ nm/min}$ , and an expanded uncertainty of the main 3D parameters within  $5\text{--}10\%$ . The experimental investigation of the system was carried out in two independent laboratories in the form of two series of 32 measurements each on the TGZ1 calibration test specimen under stabilized conditions of  $24 \pm 0.3 \text{ }^\circ\text{C}$  and  $45 \pm 0.5\%$  relative humidity. For both series, the same mean value of surface microgeometry,  $10.48 \text{ nm}$ , was obtained; the sums of squared deviations were  $0.0512$  and  $0.0480$ ; the inter-series variance was  $0.0032$ ; and the standard deviation was  $0.056$ . It was established that, at a 95% confidence level, the critical difference was  $R = 0.155$ , whereas the maximum observed difference between the laboratories did not exceed  $0.08$ , thus confirming the absence of significant systematic bias, the high interlaboratory consistency of the results, and the metrological suitability of the proposed system for controlling the geometric parameters of functional microstructures.

In general, it is concluded that the proposed information and measurement system is better suited to automated serial inspection than traditional universal commercial solutions, and that its architecture may serve as a basis for further metrological validation, regular interlaboratory control, and scaling to other topography parameters and inspection scenarios for micro-optical, sensor, photonic, and biomedical structures.

**Keywords:** piezoelectric sensors; atomic force microscopy; surface topography; probe module; metrological validation

*Надійшла до редакції  
17 березня 2026 року*

*Рецензовано  
19 квітня 2026 року*



© 2026 Copyright for this paper by its authors.  
Use permitted under Creative Commons License Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).