

УДК 621.9.08-52

DOI 10.36910/6775-2313-5352-2021-19-7

Денисюк В.Ю., к.т.н.

Луцький національний технічний університет

## СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ПРЕЦИЗІЙНОГО ПЕРЕМІЩЕННЯ СКАНЕРА СКАНУЮЧОГО ЗОНДОВОГО МІКРОСКОПА

*В статті представлені результати досліджень п'єзоелектричного сканера для прецизійних механічних переміщень в скануючому зондовому мікроскопі з ємнісними датчиками переміщення і методи обробки зображень. Обґрунтовано вибір ємнісного датчика із змінним зазором між обкладками, завдяки високій точності і чутливості, простої і дешевої конструкції, а також мінімальними нелінійними спотвореннями, що вносяться в роботу СЗМ. Оцінка параметрів управління, отримана за допомогою математичної моделі СЗМ, дозволила спроектувати ПІД-регулятор, що забезпечує прецизійне механічне переміщення з заданою точністю. Розроблена методика вимірювань і обробки інформації здатна відстежити ефекти кріпу, гістерезису та інших нелінійностей п'єзокераміки. Вона не залежить від впливу температурних шумів, ефектів зміни параметрів сканера в часі.*

**Ключові слова:** п'єзоелектричний сканер, скануючий зондовий мікроскоп, зонд, ємнісний датчик, точність, керування, сигнал, ПІД-регулятор.

**Постановка проблеми.** Одним з найважливіших компонентів скануючого зондового мікроскопа (СЗМ) є сканер, який забезпечує прецизійні переміщення дослідного зразка. У методі постійної висоти сканер підтримує постійний зазор між зондом і поверхнею зразка. З точки зору задач автоматичного регулювання сканер є виконавчим пристроєм. Від характеристик сканера багато в чому залежить точність вимірювань.

На сьогоднішній день сканери для СЗМ найчастіше виготовляються з п'єзокерамічних виконавчих пристроїв. П'єзокераміка володіє такими параметрами, як кріп і гістерезис. Ці властивості спотворюють реакцію на вхідний сигнал і ускладнюють процес вимірювань. Щоб уникнути цих факторів, є два варіанти вирішення проблеми:

1. Поліпшення параметрів сканера (це різко збільшує його вартість).
2. Створення системи керування переміщення сканера на датчиках інших типів.

Використовуючи другий метод, можливо отримати більш дешеву конструкцію СЗМ і поліпшити параметри вимірювань.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В методи побудови систем керування переміщенням в СЗМ різних типів (атомно-силових мікроскопах (АСМ), скануючих тунельних мікроскопах (СТМ), магнітно-силових мікроскопах (МСМ), електростатичних силових мікроскопах (ЕСМ) та інших) внесли вклад такі вчені: Биков В.А., Биков А.В., Миронов В.Л., Голубок А.О., Горбенко О.М., Фельдшін М.О., Сапожников І.Д., G. Binning, G. Roger та інші.

Однак, незважаючи на велику кількість публікацій з дослідження методів побудови системи автоматичного регулювання в СЗМ і вирішення некоректних задач, як і раніше актуальним є питання про враховування нелінійностей характеристик датчиків, способів корекції цих нелінійностей, додаткової інформації про вибір параметра регуляризації в методі регуляризації Тихонова і про оцінку похибки відновлення двовимірного сигналу, одержуваного в СЗМ [2].

Загальним принципом роботи СЗМ є контроль взаємодії дуже гострої голки з досліджуваною поверхнею. СЗМ класифікуються за фізичним змістом інформаційного сигналу про відстані між зондом і поверхнею досліджуваного об'єкта. Основним принципом СЗМ є сканування. Це означає, що в один момент часу зонд взаємодіє з однією точкою досліджуваної поверхні. Інформація про всю досліджувану поверхню отримується внаслідок розбиття поверхні на рядки і стовпці [3].

У процесі сканування зонд може перебувати над ділянками поверхні, що мають різні фізичні властивості, в результаті чого величина і характер взаємодії зонд-зразок будуть змінюватися. Крім того, якщо на поверхні зразка є нерівності, то при скануванні змінюватиметься і відстань  $\Delta Z$  між зондом і поверхнею, відповідно змінюватиметься величина локальної взаємодії [4, 6].

Інформаційний сигнал може використовуватися безпосередньо для отримання інформації про досліджувану поверхню. Найчастіше інформаційні сигнали, такі як тунельний струм або

сили міжатомної взаємодії, мають значну величину тільки при малих відстанях між зондом і досліджуваною поверхнею. Це накладає обмеження на діапазон перепаду вимірюваної величини досліджуваної поверхні, наприклад, висоти профілю. Для розширення цього обмеження використовуються методи підтримки постійного інформаційного сигналу за рахунок переміщення зонда відносно досліджуваного зразка і підтримки величини зазору (висоти) постійною. Це призводить до використання систем автоматичного регулювання [6].

**Мета роботи.** Підвищення точності вимірювань в СЗМ за рахунок вдосконалення датчиків переміщення, введення цифрової системи регулювання переміщенням сканера і математичної обробки отриманих даних.

**Викладення основного матеріалу.** Для дослідження морфології і локальних властивостей поверхні твердого тіла, діагностики дефектів, кількісної та якісної оцінки характеристик металевих і неметалевих матеріалів, а також біологічних об'єктів на мікро- і нано- рівні широко використовуються різні методи СЗМ. Областями їх застосування є: матеріалознавство (аналіз властивостей матеріалів, діагностика дефектів матеріалів), фізика (вивчення характеристик твердого тіла, а також рідин), біологія і медицина (вивчення параметрів клітин різного виду).

На рис. 1. представлено основні компоненти СЗМ: 1 – зонд; 2 – зразок; 3 – п'єзoeлектричні двигуни  $x$ ,  $y$ ,  $z$  для прецизійного переміщення зонда над поверхнею досліджуваного зразка; 4 – генератор розгортки, що подає напруги на п'єзодрайвери  $x$  і  $y$ , що забезпечують сканування зонда в горизонтальній площині; 5 – електронний сенсор, детектуючий величину локальної взаємодії між зондом і зразком; 6 – компаратор, що порівнює поточний сигнал в ланцюзі сенсора  $V(t)$  з початково заданим  $V_s$ , і, при його відхиленні виробляє коригуючий сигнал  $V_{fb}$ ; 7 – електронний ланцюг зворотного зв'язку, що управляє положенням зонда по осі  $Z$ ; 8 – комп'ютер, що управляє процесом сканування і отриманням зображення 9.

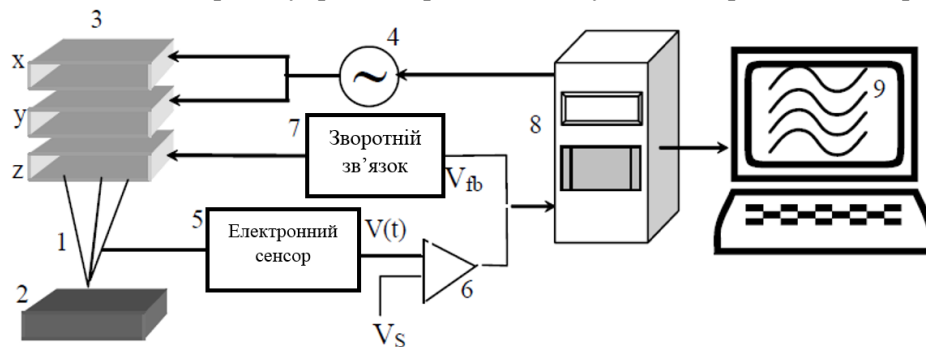


Рис. 1. Загальна схема скануючого зондового мікроскопа:

1 – зонд; 2 – зразок; 3 – п'єзoeлектричні двигуни  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ; 4 – генератор напруги розгортки на  $x$ ,  $y$  п'єзокераміки; 5 – електронний сенсор; 6 – компаратор; 7 – електронний ланцюг зворотного зв'язку; 8 – комп'ютер; 9 – зображення  $z(x, y)$

У конструкції СЗМ присутні механічні, електронні, обчислювальні і програмні модулі, які визначають точність його роботи. Дослідження і вдосконалення цих модулів дозволить поліпшити параметри роботи мікроскопа в цілому і на основі цих даних створювати нові класи вимірювальних приладів.

Найважливішим компонентом СЗМ є сканер, який забезпечує прецизійні переміщення зразка. Від характеристик сканера багато в чому залежить точність вимірювань. Сканер має найбільшу кількість нелінійностей, тобто вносить велику кількість спотворень в досліджуваний профіль поверхні і зменшує достовірність одержуваної інформації.

Завдання слідкуючої системи полягає в підтримці контрольованого параметра об'єкта керування на заданому рівні з заданою точністю. На рис. 2 приведена загальна схема слідкуючої системи.

Вхідним сигналом для блоку обробки сигналів слідкуючої системи є сигнал помилки. Цей сигнал характеризує відхилення контрольованого параметра об'єкта керування від встановленого значення цього параметра. Оброблений сигнал надходить на виконавчий пристрій, який змінює контрольований параметр об'єкта керування [4].

Для блоку обробки сигналів слідкуючої системи ставиться завдання перетворення вхідного сигналу так, щоб оптимізувати динамічні характеристики зміни контрольованого параметра об'єкта керування. Для вирішення цих завдань застосовуються алгоритми

пропорційної (П), пропорційно-інтегральної (ПІ), пропорційно-диференціальної (ПД) і пропорційно-інтегрально-диференціальної (ПІД) регуляції. Так само застосовуються алгоритми придушення шумів, частотної фільтрації тощо [1, 6]. Часто в СЗМ інформаційний сигнал являє собою періодичний сигнал високої частоти, що змінюється в часі. В такому випадку, щоб отримати точну інформацію про зміни цього сигналу, використовується алгоритм синхронного детектування [7].

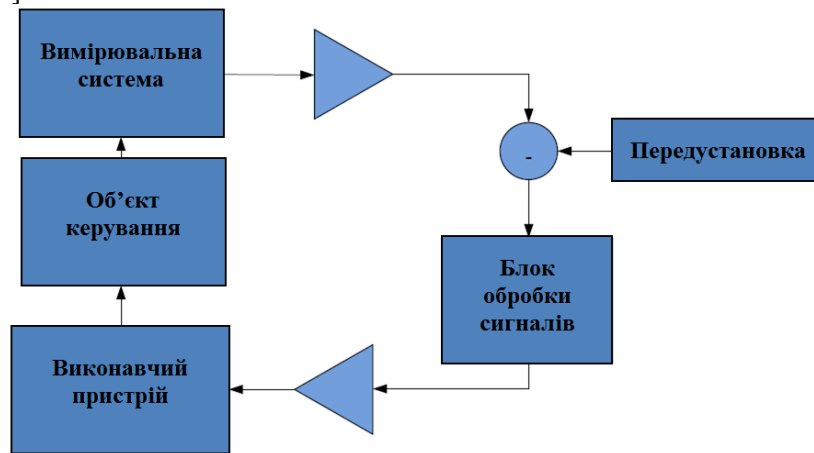


Рис. 2. Загальна схема слідкуючої системи

Ефективність застосування СЗМ залежить, в першу чергу, від параметрів приладу, а саме: від характеристик датчиків переміщень і від точності параметрів системи керування переміщенням. Тому одним з важливих напрямків є вирішення проблеми спотворення реакції на вхідний сигнал шляхом створення і вдосконалення системи керування переміщення на основі нових датчиків з використанням методів обробки сигналів в системі регулювання.

Датчики переміщення поділяються за принципом дії і можуть бути [5, 6]: ємнісними, індуктивними, вихрострумowymi, оптичними, потенціометричними, магніторезистивними, магнітострикційними, ультразвуковими, на основі ефекту Холла.

З усіх розглянутих датчиків переміщення і методик для вирішення поставленого завдання найбільш підходять ємнісні датчики і оптичні. Так як обидва цих датчика підходять за характеристиками точності, варто вибрати найбільш дешевий і технологічно простий. Таким є ємнісний датчик лінійного переміщення із змінним зазором між обкладками, завдяки високій точності і чутливості, простої і дешевої конструкції і мінімальними спотвореннями, що вносяться в роботу СЗМ.

В основі роботи датчиків даного типу лежить функціональна залежність ємності конденсатора від його геометричної конфігурації. У базовому виконанні мається на увазі зміна відстані між пластинами шляхом зовнішнього фізичного впливу (рис. 3).

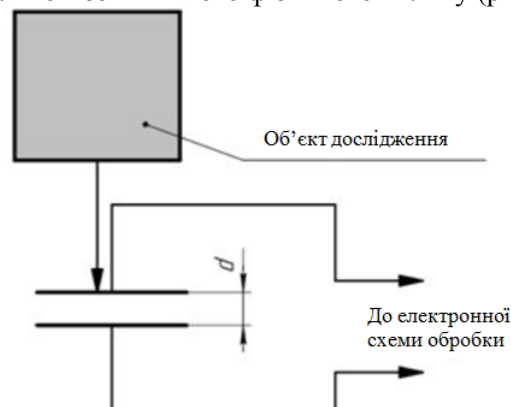


Рис. 3. Ємнісний датчик лінійного переміщення зі змінною величиною зазору

Так як ємність конденсатора змінюється пропорційно зворотному значенню величини зазору між пластинами, за умови визначеності площі обкладок конденсатора і діелектричної проникності діелектрика між ними, визначення ємності дозволяє судити про відстань між пластинами. Зміну ємності можна виміряти низкою способів (наприклад, вимірюючи його імпеданс). Вимірювання ємності конденсатора проводиться в складі електричного

вимірювального ланцюга [5].

Завдання відновлення двовимірного сигналу, спотвореного апаратною функцією, полягає, з точки зору метрології, в добуванні кількісної інформації про справжній сигнал з вимірюного спектра. Воно називається зворотнім завданням, або завданням редукції до ідеального приладу [2], і є одним з варіантів редукційної проблеми Релея. Це завдання, у якому малим похибкам вимірювання спектра і похибкам в апаратній функції можуть відповідати як завгодно великі похибки у відновленому сигналі. Тому для його чисельного розв'язку потрібне застосування стійких методів. Методику відновлення двовимірних сигналів СЗМ здійснено за допомогою математичної обробки виміряних сигналів шляхом розв'язання інтегрального рівняння методом регуляризації Тихонова.

Для вирішення цих питань, що сприяють підвищенню точності вимірювань в СЗМ, запропоновані наступні способи – спосіб побудови системи керування переміщенням в СЗМ на основі ємнісних датчиків і спосіб калібрування ємнісних датчиків, що застосовуються в СЗМ. Для вирішення обернених задач в СЗМ запропоновано алгоритм відновлення двовимірних сигналів, який є досить точним і використовує лише лінійні операції.

Систему автоматичного регулювання можна розбити на наступні компоненти [6]:

1. Датчик пересування сканера.
2. Вимірювальна схема.
3. ПД-регулятор.

Загальна схема системи автоматичного регулювання представлена на рис. 4.

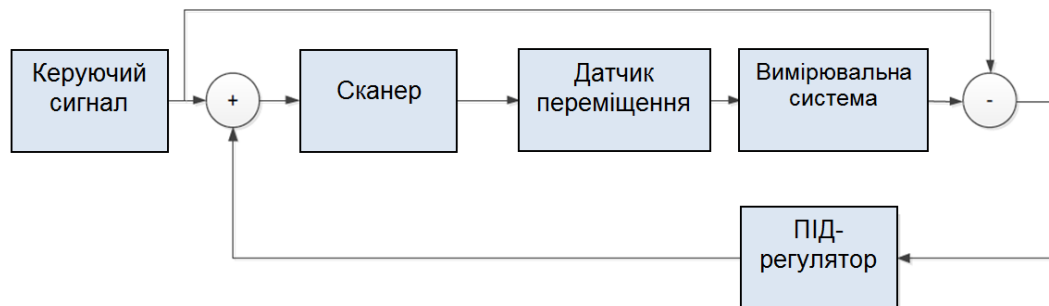


Рис. 4. Загальна схема системи автоматичного регулювання переміщення сканера СЗМ

Велике значення в поліпшенні параметрів приладу має вдосконалення методів математичної обробки інформації, одержуваної в результаті вимірювань в СЗМ.

Важливим завданням обробки інформації в СЗМ є підвищення дозволу математичними методами. Якщо дозвіл приладу СЗМ є недостатнім, то і його застосування в ряді областей аналізу буде неякісним. Проте, якщо вимірювання в СЗМ доповнити математичною обробкою, то можна підвищити дозвіл приладу, тобто, з позицій метрології, підвищити точність вимірювань і тим самим поліпшити якість діагностики матеріалів або речовини.

Відновлення безперервного двовимірного сигналу за вимірюваним сигналом і відомої апаратної функції приладу сучасними математичними методами є перспективним напрямком розвитку СЗМ. Відмінність вимірюного сигналу від істинного проявляється в більшому згладжуванні його в порівнянні з істинним сигналом і в його зашумленості (слабкі інформаційні параметри «тонуть» в шумі).

**Висновки.** В результаті аналізу сучасних датчиків переміщень був вибраний ємнісний датчик переміщень із змінним зазором між обкладками. Методом вимірювання інформаційного сигналу цього датчика є метод вимірювання часу розряду/заряду конденсатора. На основі обраного методу були проаналізовані можливі похибки і створені обмеження на геометричні параметри ємнісного датчика для забезпечення точності в поставленому завданні. Виходячи з параметрів точності і швидкодії, обрана методика вимірювання малих переміщень сканера СЗМ підходить для застосування в задачах постобробки зображення і включення в ланцюг зворотного зв'язку системи регулювання переміщення сканера.

Розроблена методика вимірювань і обробки інформації здатна відстежити ефекти кріпу, гістерезису та інших нелінійностей п'єзокераміки. Вона не залежить від впливу температурних шумів, ефектів зміни параметрів сканера в часі. При цьому похибки вимірювання лінійних розмірів об'єктів в СЗМ-зображеннях знижені до 1,2 нм за рахунок усунення нелінійностей сканера.

### Інформаційні джерела

1. Айфичер Э., Джервис Б., Барри У., Эммануил С. Цифровая обработка сигналов: практический подход. 2-е изд. – М.: Вильямс, 2004. – 989 с.
2. Bhushan B. Scanning probe microscopy in nanoscience and nanotechnology. Heidelberg: Springer, 2010. – 710 p.
3. Быков В.А., Лазарев М.И., Саунин С.А. Сканирующая зондовая микроскопия для науки и промышленности // Электроника: наука, технология, бизнес. 1997. №5. С. 7–14.
4. Денисюк В.Ю., Симонюк В.П., Лапченко Ю.С., Шибковський І.А. Метрологічне забезпечення вимірювання механічних та трибологічних властивостей матеріалів на субмікронному і нанометровому діапазонах лінійних розмірів / “Перспективні технології та прилади”. Збірник статей. Випуск 17. м. Луцьк, грудень 2020 р. – Луцьк: Луцький НТУ, 2020. – С. 33–41.
5. Джексон Р.Г. Новейшие датчики. – М.: Техносфера, 2007. – 384 с.
6. Манойлов В.В., Михайлов М.М. Обзор методов измерения малых перемещений в приложении системы автоматического регулирования сканеров СЗМ // Научное приборостроение. 2013. Т. 23, № 2. С. 38–46.
7. Миронов В.Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии. – Нижний Новгород: Российская академия наук. Институт физики микроструктур, 2004. – 114 с.

Денисюк В.Ю., к.т.н.

Луцкий национальный технический университет

### СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ПРЕЦИЗИОННОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ СКАНЕРА СКАНИРУЮЩЕГО ЗОНДОВОГО МИКРОСКОПА

*В статье представлены результаты исследований пьезоэлектрического сканера для прецизионных механических перемещений в сканирующем зондовом микроскопе с емкостными датчиками перемещения и методами обработки изображений. Обоснован выбор емкостного датчика с переменным зазором между обложками благодаря высокой точности и чувствительности, простой и дешевой конструкции, а также минимальными нелинейными искажениями, вносимыми в работу СЗМ. Оценка параметров управления, полученная с помощью математической модели СЗМ, позволила спроектировать ПИД-регулятор, обеспечивающий прецизионное перемещение с заданной точностью. Разработанная методика измерений и обработки информации способна отследить эффекты крипа, гистерезиса и других нелинейностей пьезокерамики. Она не зависит от воздействия температурных шумов, эффектов изменения параметров сканера во времени.*

**Ключевые слова:** пьезоэлектрический сканер, сканирующий зондовый микроскоп, зонд, емкостный датчик, точность, управление, сигнал, ПИД-регулятор.

**V. Denysiuk**

Lutsk National Technical University

### SYSTEM OF AUTOMATIC ADJUSTMENT OF PRECISIONAL MOVEMENT OF THE SCANNER OF THE SCANNING PROBE MICROSCOPE

*The article presents the results of studies of a piezoelectric scanner for precision mechanical movements in a scanning probe microscope with capacitive displacement sensors and image processing methods. The choice of a capacitive sensor with a variable gap between the covers, due to high accuracy and sensitivity, simple and cheap design, as well as minimal nonlinear distortions introduced into the SPM. Estimation of control parameters, obtained using a mathematical model of SPM, allowed to design a PID controller that provides precise mechanical movement with a given accuracy. The developed method of measurement and information processing is able to track the effects of dill, hysteresis and other nonlinearities of piezoceramics. It does not depend on the influence of temperature noise, the effects of changing the parameters of the scanner over time.*

**Keywords:** piezoelectric scanner, scanning probe microscope, probe, capacitive sensor, accuracy, control, signal, PID controller.