

DOI: <https://doi.org/10.36910/4293-52779-2025-17-02-01>  
УДК 621.7.077: 681.513.3

Денисюк В. Ю.  
канд. техн. наук, доцент  
ORCID: 0000-0001-9268-5489

Луцький національний  
технічний університет / Україна

## **МОДУЛЬ ТОЧНИХ МІКРОПЕРЕМІЩЕНЬ ДВОКООРДИНАТНОГО СТОЛИКА МІКРОСКОПА НА БАЗІ БІМОРФНИХ П'ЄЗОАКТЮАТОРІВ ТА АЛГОРИТМ ЙОГО КЕРУВАННЯ**

**Анотація:** у статті представлено дослідження та розробку двокоординатного мікропозиціонуючого модуля предметного столика на основі біморфних п'єзоелектричних актюаторів із використанням високоточних ємнісних датчиків переміщень. Запропонована конструкція поєднує модуль грубих переміщень на базі крокових двигунів та модуль точних переміщень, що забезпечує комплексний діапазон переміщення від десятків міліметрів до субмікрометрових значень при збереженні високої жорсткості та компактності системи. Описано структурну схему столика, принцип роботи біморфних п'єзоактюаторів та особливості силового замикання за допомогою пружного кільця з берилієвої бронзи. Представлено кінематичну модель переміщень по осях X та Y, а також механізм компенсації кутових відхилень, які виникають при асиметричному силовому впливі на актюатори. Значну увагу приділено побудові системи зворотного зв'язку на основі трьох ємнісних датчиків AD7746, що забезпечують вимірювання положення столика з нанометровою точністю. Проаналізовано принцип дії триелектродної датчикової системи та визначено робочий діапазон зміни міжелектродного зазору. Розроблено алгоритми формування керуючих сигналів для досягнення плоскопаралельного руху столика, корекції кутового нахилу та усунення нелінійностей п'єзоелектричних приводів. Створена система керування на основі контролера dSPACE DS1104 і високовольтних підсилювачів TREK забезпечує високу швидкість, точність регулювання та стабільність роботи в замкненому контурі. Результати моделювання та експериментальних випробувань підтвердили можливість реалізації точного позиціонування в діапазоні до  $\pm 0,5$  мм із субмікрометровою роздільною здатністю та мінімальними паразитними відхиленнями. Запропонований модуль може бути ефективно застосований у високоточних мехатронних комплексах, оптичних системах, мікробіологічних дослідженнях, медичних діагностичних установках та мікромеханічних технологіях.

**Ключові слова:** мікропозиціонування, біморфний п'єзоактюатор, двокоординатний столик, ємнісний датчик, мехатронний модуль, високоточні мікропереміщення.

## **ВСТУП, ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ**

Сучасний розвиток мікро- і нанотехнологій, а також мікро- та наносистемної техніки зумовлює зростання потреби у високоточних системах позиціонування для роботи з об'єктами мікросвіту. У різних галузях – від біомедицини та мікроелектроніки до приладобудування і нанофабрикації – необхідні пристрої, здатні здійснювати контрольовані мікропереміщення з високою роздільною здатністю та стабільністю. Ефективність функціонування таких систем у значній мірі залежить від точності та швидкодії виконавчих механізмів, а також від якості алгоритмів керування, що забезпечують компенсацію похибок та стійкість роботи [1, 2].

Одним із найбільш перспективних способів забезпечення точного позиціонування є застосування п'єзоелектричних виконавчих пристроїв, зокрема біморфних п'єзоактюаторів (БПА). Вони характеризуються високою жорсткістю, відсутністю люфтів, компактністю та можливістю реалізації мікропереміщень у широкому діапазоні частот. Це дозволяє створювати багатокординатні мікроманіпуляційні модулі з високою точністю позиціонування, що є необхідним для дослідження та маніпуляцій з мікрооб'єктами у полі зору мікроскопа [3].

У науковій та технічній літературі представлено різноманітні конструкції систем точного позиціонування, проте значна частина з них або має високу вартість, або обмежені можливості щодо діапазону переміщень і конструктивної адаптації. Зокрема, використання багат шарових п'єзоперетворювачів у багатьох випадках ускладнює досягнення мікрометрових переміщень при компактних розмірах модуля. У цьому контексті біморфні п'єзоактюатори є оптимальним рішенням завдяки збільшеному ходу вільного кінця та простоті інтеграції в мікромеханічні системи [4, 5].

Особливий інтерес становлять двокоординатні предметні столики мікроскопів, які повинні забезпечувати переміщення мікрооб'єктів по осях X та Y із забезпеченням плоскопаралельності руху. При цьому важливим завданням є компенсація можливого кутового відхилення столика відносно початкового положення, що безпосередньо впливає на точність вимірювань та якість роботи системи технічного зору. У таких системах актуальною є розробка ефективних алгоритмів керування, що базуються на сигналах від цифрових ємнісних датчиків і забезпечують автоматичне корегування положення столика в реальному часі [6, 7].

У зв'язку з цим виникає потреба у створенні високоточних, надійних і відносно недорогих модулів мікропереміщень з використанням біморфних п'єзоактюаторів та інтелектуальних алгоритмів керування. Такі системи повинні поєднувати енергоефективність, конструктивну простоту, широкий діапазон робочих переміщень та здатність до високоточної компенсації кутових відхилень за рахунок використання цифрових ємнісних сенсорів.

## **ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ**

З розвитком мікро- і нанотехнологій та розширенням сфер застосування мікросистем техніки зростає потреба у високоточних пристроях для

позиціонування об'єктів у мікромасштабі. У системах дослідження та маніпулювання мікрооб'єктами, які виконують операції у полі зору мікроскопа, важливу роль відіграють багатокоординатні предметні столики. Вони повинні забезпечувати переміщення з мікрометровою точністю, стабільністю та відтворюваністю положення.

Існуючі конструкції приводів на основі багат шарових п'єзокерамічних елементів обмежені малим ходом переміщення при компактних габаритах, що ускладнює досягнення необхідної точності та діапазону переміщень. Крім того, у двокоординатних предметних столиках виникають кутові відхилення робочої платформи відносно початкової площини, що призводить до порушення плоскопаралельності руху. Це значно знижує точність позиціонування, впливає на якість зображення системи технічного зору та ускладнює виконання операцій над мікрооб'єктами [8, 9].

Для забезпечення стабільної роботи столика необхідно мати ефективну систему керування, здатну виявляти та компенсувати кутові відхилення за рахунок використання чутливих датчиків переміщення. При цьому актуальним є застосування біморфних п'єзоактюаторів, які забезпечують більший хід вільного кінця при компактній конструкції та дозволяють досягати мікропереміщень у широкому діапазоні [10, 11].

Таким чином, проблемою, що потребує вирішення, є розроблення конструкції модуля точних мікропереміщень двокоординатного столика на базі біморфних п'єзоактюаторів та створення алгоритму керування, який забезпечить компенсацію кутових відхилень і плоскопаралельний рух столика з високою точністю позиціонування.

### **АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ**

Питання створення високоточних систем мікропозиціонування активно досліджуються у сучасній науково-технічній літературі. Значна кількість робіт присвячена розробленню багатокоординатних мікроманіпуляторів і предметних столиків мікроскопів, призначених для позиціонування мікрооб'єктів у біомедичних, технічних та нанотехнологічних застосуваннях. У цих системах забезпечення високої точності та стабільності переміщень є одним із ключових завдань [12, 13].

У працях багатьох авторів запропоновано конструкції приводів та модулів позиціонування на базі п'єзоелектричних елементів, які завдяки високій жорсткості, відсутності люфтів та малій інерційності є найбільш перспективними виконавчими механізмами для мікро- та нанопереміщень. Пристрої з паралельною кінематикою на біморфних п'єзоактюаторах дозволяють отримати достатній діапазон переміщень при компактності конструкції та високій швидкодії, що робить їх придатними для роботи у складі оптичних систем і маніпуляторів малої маси. Дослідження свідчать про ефективність таких приводів у задачах позиціонування біологічних об'єктів, мікрочипів, елементів електроніки та мікромеханічних структур [3-8].

Значна увага у сучасних публікаціях приділяється також питанням вимірювання переміщень та реалізації точного зворотного зв'язку. Перспективними сенсорами є ємнісні датчики високої роздільної здатності, які

забезпечують вимірювання мікро- та нанопереміщень із мінімальною похибкою. Розроблені цифрові ємнісні перетворювачі на основі  $\Sigma$ - $\Delta$ -архітектури, зокрема AD7746, демонструють високу лінійність та чутливість, що дозволяє використовувати їх у системах прецизійного позиціонування. Публікації вказують на необхідність інтеграції датчиків такого типу у замкнені системи керування для компенсації похибок і коливань рухомих елементів [8, 9].

Дослідження в області мехатронних модулів також охоплюють питання побудови алгоритмів керування, здатних забезпечувати плоскопаралельність руху та корекцію кутових відхилень робочої платформи. Відомо, що саме кутове зміщення є однією з головних причин зниження точності позиціонування у двокоординатних столиках з п'єзоактюаторами, а тому актуальні роботи спрямовані на створення ефективних схем керування з багатоканальними вимірювальними датчиками та адаптивними алгоритмами [3, 6, 8, 14].

Проведений аналіз свідчить, що попри значний прогрес у галузі розробки п'єзоприводів і систем мікропозиціонування, проблема забезпечення високої точності, компенсації кутових відхилень та збільшення діапазону мікропереміщень у двокоординатних столиках залишається актуальною. Це зумовлює необхідність створення нових конструкцій мікропозиціонуючих модулів на основі біморфних п'єзоактюаторів та удосконалення алгоритмів керування, що й обумовлює напрями даного дослідження.

#### **ФОРМУЛЮВАННЯ ЦІЛЕЙ СТАТТІ**

Метою статті є розроблення та дослідження двокоординатного мікропозиціонуючого модуля на основі біморфних п'єзоелектричних приводів із використанням ємнісного датчика переміщення для забезпечення високої точності позиціонування та плоскопаралельності руху робочої платформи.

#### **ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ ДОСЛІДЖЕННЯ**

Сучасні наукові дослідження дедалі частіше спрямовані на вивчення та маніпулювання об'єктами мікросвіту, що потребує створення високоточних і надійних технічних засобів. Робота з мікророзмірами вимагає застосування комплексних мікроманіпуляційних систем, до складу яких входять мікроскопи з інтегрованими системами технічного зору, прецизійні мікроманіпулятори та автоматизовані багатокоординатні предметні столики з можливістю роботи у замкненому циклі керування.

Особливу актуальність мають мікропозиціонуючі системи, у яких поєднані модулі грубого та точного переміщення. Модуль грубих переміщень забезпечує швидке встановлення зразка в задану ділянку поля зору, тоді як модуль точних мікропереміщень відповідає за прецизійне позиціонування у межах мікрометрового діапазону. Саме п'єзоелектричні приводи, зокрема біморфні актюатори, дають найкраще поєднання необхідних параметрів – високої жорсткості, точності, швидкодії, компактності конструкції та доступної собівартості. Завдяки цим перевагам вони є одними з найефективніших виконавчих елементів у мікромеханічних маніпуляційних комплексах.

На рисунку 1 наведено експериментальний комплекс для дослідження мікрооб'єктів. Він включає основу 1, оптичний мікроскоп 2 з відеокамерою 3, що забезпечує передачу зображення на монітор, мікроманіпулятор 4 для виконання мікромеханічних операцій, автоматизований багатокординатний предметний столик 5, органи ручного керування у вигляді джойстиків 6, монітор відображення 7 та систему керування 8, яка координує роботу всіх модулів. Така система дозволяє здійснювати високоточне позиціонування мікрооб'єктів, їх аналіз та маніпулювання у режимі реального часу.

Для реалізації грубих переміщень за координатами X, Y та Z у широкому діапазоні до 50 мм доцільно застосовувати трьохкоординатний модуль, побудований на основі крокових двигунів. Такий модуль забезпечує переміщення з необхідною швидкістю та достатньою точністю для попереднього позиціонування об'єкта в полі зору мікроскопа. На платформі цього модуля додатково встановлюється прецизійний модуль точних переміщень предметного столика, який функціонує на базі біморфних п'єзоактуаторів (БПА). Об'єднання двох модулів – грубого та точного, дає змогу отримати як великий діапазон переміщень, так і високу точність у локальній області. При цьому вартість такої комбінованої системи істотно нижча, ніж у високоточних систем з одним модулем, які виконують одночасно функції грубого та точного позиціонування та оснащені абсолютними енкодерами як датчиками переміщення.

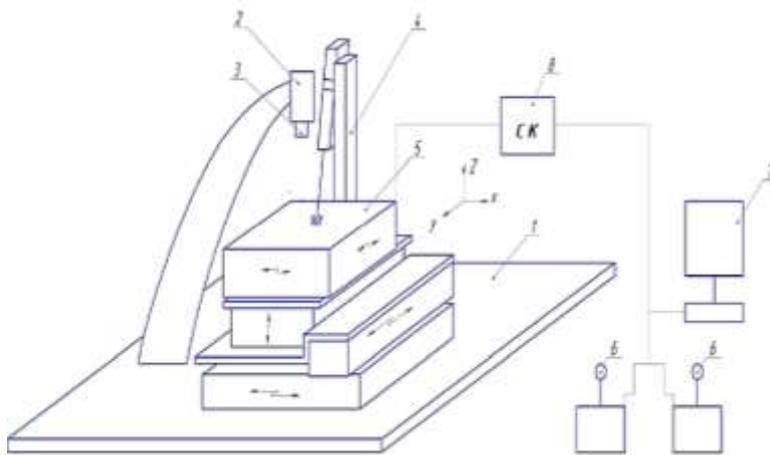


Рисунок 1 – Схема комплексу для дослідження мікрооб'єктів

Здійснення переміщення предметного столика в межах до 0,5 мм із точністю близько 0,5 мкм за допомогою багатосарових п'єзокерамічних перетворювачів є складним завданням, оскільки їхній максимальний хід при прийнятних габаритах у 10-100 разів менший за необхідний. Це обмеження значно ускладнює побудову високоточних мікропозиціонуючих систем на їх основі. Тому використання біморфних п'єзоактуаторів є більш перспективним рішенням, оскільки вони здатні забезпечувати значно більші переміщення кінця елемента при збереженні компактності конструкції.

На рисунку 2 подано принципову схему роботи модуля точних переміщень двокоординатного столика, оснащеного чотирма п'єзоактюаторами. Біморфні актюатори 1, 2 та 3, 4 закріплені консольно на основі 5 таким чином, щоб їхні вільні кінці через спеціальні виступи взаємодіяли з робочою платформою столика 6. Для забезпечення стабільного контакту і рівномірного притискання платформи застосовано пружний елемент 7 у вигляді тонкого кільця, виготовленого з берилієвої бронзи. Така конструкція дає можливість рівномірно розподіляти зусилля між приводами та забезпечувати симетричність переміщень платформи.

Завдяки використанню чотирьох БПА забезпечується можливість незалежного керування переміщеннями вздовж двох координат, а також компенсації можливих кутових відхилень платформи, що суттєво підвищує точність роботи системи та її динамічну стабільність.

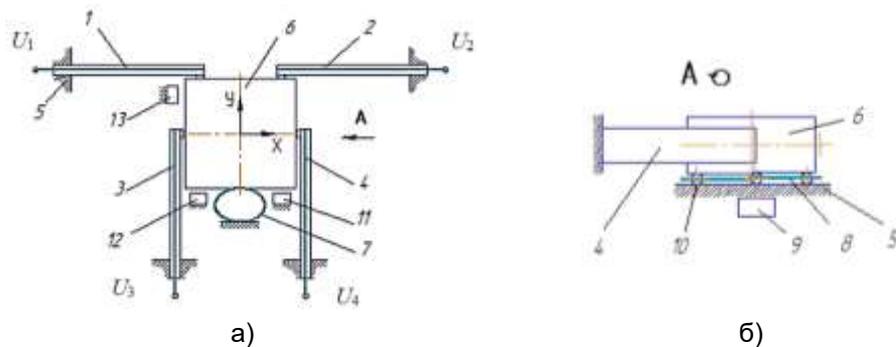


Рисунок 2 – Схема двокоординатного столика  
а – вигляд зверху, б – по стрілці А

Робоча платформа столика 6 опирається на кулькові опори 10, які розміщені на площині основи 5. Кульки утримуються у фіксованому положенні за допомогою плоского сепаратора 8, що запобігає їх неконтрольованому переміщенню та забезпечує плавне ковзання платформи під час зміни її положення. Для створення стабільного притискного зусилля між платформою 6 та основою 5 застосовується постійний магніт 9, завдяки якому забезпечується надійний контакт незалежно від умов роботи системи.

На основі також встановлені три датчики переміщення: два датчики 11 і 12, що вимірюють зміщення столика вздовж осі Y, та один датчик 13, відповідальний за визначення координати столика вздовж осі X. Сумарна інформація від усіх трьох датчиків дозволяє не лише точно визначати поточні координати платформи, а й оцінювати її кутове відхилення у площині XY, що є критично важливим для забезпечення плоскопаралельності руху.

Під час подачі рівних електричних напруг  $U_1 = U_2$  на біморфні п'єзоактюатори 1 і 2 відбувається їх синхронне згинання, унаслідок чого вільні кінці актюаторів переміщують столик 6 униз уздовж осі Y, стискаючи пружний елемент 7. Якщо знаки поданих напруг змінити на протилежні, актюатори згинаються у зворотний бік, розтискаючи пружину 7, що спричиняє підняття платформи догори. У разі несиметричної дії актюаторів 1 і 2, коли  $U_1 \neq U_2$ ,

разом із лінійним переміщенням виникає і кутова складова, що змінює орієнтацію платформи у площині XY. Це проявляється у неоднакових показках датчиків 11 і 12, після чого система керування корегує значення  $U_1$  та  $U_2$ , забезпечуючи симетричність деформацій і стабільний лінійний рух.

Переміщення столика вздовж осі X забезпечується дією актуаторів 3 і 4. При подачі рівних напруг  $U_3 = U_4$  їхні вільні кінці зміщуються одночасно в одному напрямку, переміщуючи платформу 6 вправо або вліво залежно від полярності поданого сигналу. Для цього напрямку переміщень силова взаємодія є менш стабільною, оскільки відсутнє пружне замикання, аналогічне тому, що реалізоване для осі Y, що ускладнює керування та потребує розроблення більш складних алгоритмів компенсації.

З метою забезпечення надійності та точності позиціонування столика в обох координатних осях необхідно створити спеціалізовані алгоритми керування. Для осі Y завдання відносно просте, оскільки силове замикання через пружину 7 стабілізує поведінку системи. Для осі X необхідна додаткова компенсація паразитних переміщень, нелінійності та кутових відхилень, що потребує застосування алгоритмів із зворотним зв'язком від датчиків переміщення.

На рисунку 3, (а) представлено залежність переміщення столика від напруги  $U_4$ , а на рисунку 3, (б) – від напруги  $U_3$ . Обидві криві отримані шляхом розрахунків згідно з аналітичним виразом (1):

$$\xi_x = \frac{A}{2}(U_3 + U_4), \quad (1)$$

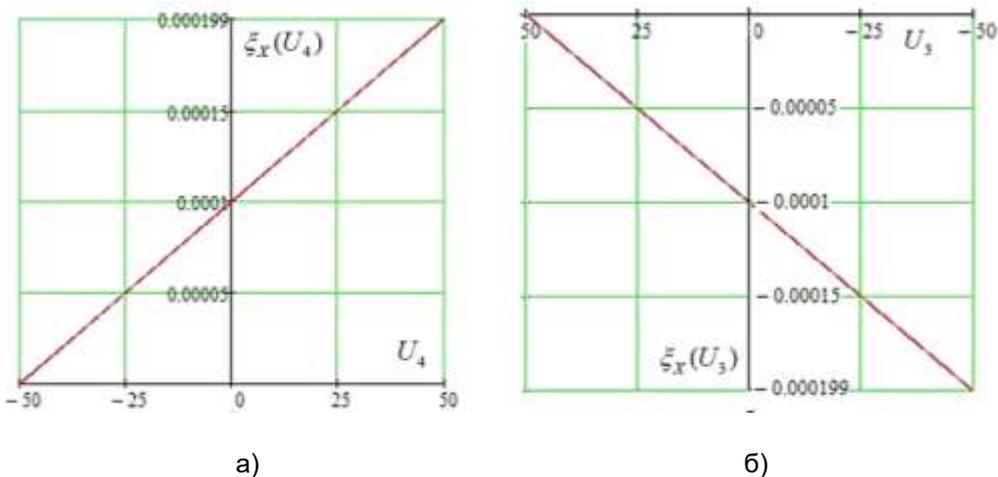


Рисунок 3 – Залежність переміщення столика (м) від напруги U (В)  
 а – від напруги  $U_4$  при фіксуванні значення  $U_3 = U_{\max}$ ; б – від напруги  $U_3$  при фіксуванні значення  $U_4 = -U_{\max}$

Отримані залежності (рис. 3) дають можливість сформулювати раціональний алгоритм формування керувальних сигналів, що подаються на біморфні п'єзоактуатори, для забезпечення переміщення столика в обох координатних

напрямок. Аналіз цих характеристик дозволяє визначити оптимальні режими подачі напруги на актюатори, враховуючи їх нелінійність, гістерезис та чутливість до зміни полярності, що є критично важливим для досягнення високої точності позиціонування.

На рисунку 4 наведено структурну схему системи керування двокоординатним столиком. Система містить як цифрові, так і аналогові компоненти, що забезпечують узгоджену роботу виконавчих та вимірювальних модулів. До складу цифрової частини входять контролери, модуль обробки сигналів, інтерфейс оператора та блоки аналого-цифрового (АЦП) і цифро-аналогового (ЦАП) перетворення. Аналогова частина містить підсилювачі, блоки формування напруги та безпосередньо виконавчі елементи – біморфні п'єзоактюатори. Допоміжні модулі включають системи живлення, фільтрації сигналів та захисні елементи.

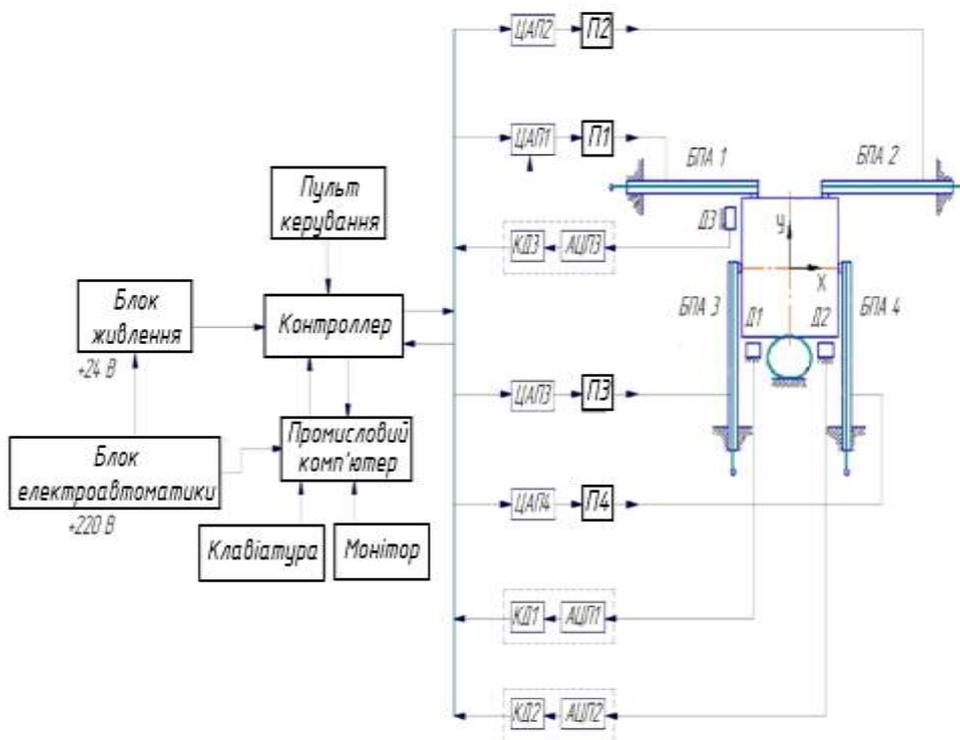


Рисунок 4 – Схема керування модуля точних переміщень столика  
 Д1-Д3 – ємнісні датчики переміщення; КД1-КД3 – контролери датчиків;  
 ЦАП1-ЦАП4 – цифро-аналогові перетворювачі; АЦП1-АЦП3 – аналого-цифрові перетворювачі; У1-У4 – підсилювач

Важливим елементом схеми є ємнісні датчики зворотного зв'язку, що забезпечують безперервний контроль положення платформи та передавання інформації в контролер для корекції керувальних сигналів. Завдяки цьому реалізується замкнене керування, яке дозволяє компенсувати кутові відхилення, паразитні переміщення та інші похибки, що виникають у процесі роботи.

Запропонована структура керування забезпечує високу стабільність, точність та повторюваність мікропереміщень, що робить систему придатною для застосувань у мікромеханічних, біомедичних та оптичних комплексах.

Допоміжні модулі системи включають блок електроавтоматики та блок живлення. Блок електроавтоматики забезпечує стабільне електроживлення промислового комп'ютера та всієї силової частини системи керування, що є необхідною умовою для коректного функціонування високоточного обладнання.

Керуючі сигнали від промислового комп'ютера передаються на контролер через перехідник USB-COM, після чого розподіляються між цифро-аналоговими перетворювачами (ЦАП1-ЦАП4). Сформовані аналогові сигнали, підсилені підсилювачами П1-П4, подаються безпосередньо на біморфні п'єзоактуатори (БПА1-БПА4), що забезпечують просторове переміщення предметного столика.

Система зворотного зв'язку побудована на основі ємнісних датчиків переміщень (Д1-Д3). Отримані з датчиків аналогові сигнали подаються на аналого-цифрові перетворювачі (АЦП1-АЦП3), де перетворюються у цифровий формат. Подальша обробка вимірених координат здійснюється контролерами датчиків (КД1-КД3), після чого інформація надходить у центральний блок керування. На підставі отриманих даних система автоматично коригує положення столика, компенсуючи його можливі кутові відхилення та повертаючи його у площину, перпендикулярну початковому положенню. Така корекція є критично важливою для забезпечення плоскопаралельного руху за координатами X та Y з високою точністю.

Панель керування, інтегрована з основним контролером, дозволяє оператору активувати або зупинити систему, а також задавати програми переміщення та режими роботи столика.

Як датчики переміщення обрано високоточні ємнісні датчики AD7746 виробництва Analog Devices. У їхній структурі реалізовано вбудований контролер з  $\Sigma$ - $\Delta$  перетворювачем ємності у цифровий код (CDC), що забезпечує пряму роботу з вимірювальними конденсаторами без додаткової аналогової обв'язки. Архітектура AD7746 гарантує високу роздільну здатність (24 біти без пропуску кодів, ефективна – до 21 біта), лінійність  $\pm 0,01\%$  та низькі похибки вимірювання, що робить їх оптимальними для високоточних мікропозиціювальних систем.

В якості контролера керування обрано модуль DS1104 R&D фірми dSPACE, оснащений 16-бітними АЦП і ЦАП, що забезпечують швидку обробку сигналів у реальному часі. Як силові елементи використані високовольтні підсилювачі 601C фірми TREK, здатні забезпечувати стабілізовану вихідну напругу в діапазоні  $0 \dots \pm 300$  В при вихідному струмі до  $\pm 10$  мА (постійний) або до  $\pm 20$  мА у піковому режимі. Сукупність обраних датчиків, перетворювачів, контролера та підсилювачів забезпечує повноцінне прецизійне керування двокоординатним п'єзоелектричним столиком.

Принцип роботи ємнісних датчиків положення ґрунтується на залежності ємності конденсатора від відстані між його обкладинками. Щоб уникнути необхідності підведення дротових з'єднань до рухомих частин столика, у

конструкції застосовано трьохелектродні датчики на базі послідовного з'єднання конденсаторів. Такий датчик (рис. 5) складається з двох квадратних електродів розміром 10×10 мм, розміщених на нерухомій основі та підключених до системи керування, а також третього, вдвічі більшого за площею (20×10 мм), електрода, закріпленого на рухомій платформі столика. Останній електрод не має електричного з'єднання і взаємодіє з нерухомими електродами виключно за рахунок ємнісного зв'язку, що забезпечує безконтактне та надійне вимірювання переміщень.

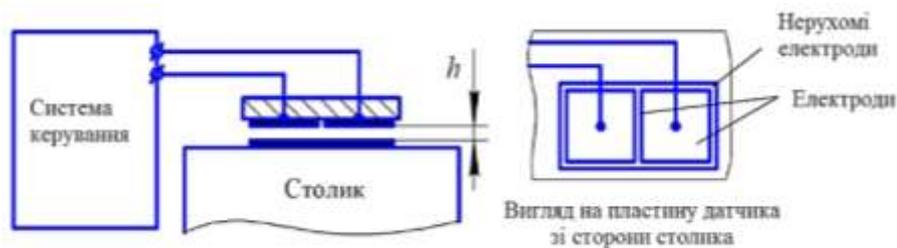


Рисунок 5 – Схема ємнісного датчика переміщень з трьома електродами

На рисунку 6 наведено графік залежності величини  $h$  від ємності  $C$ . Із представленої кривої видно, що робочий діапазон відстаней між обкладинками конденсатора повинен знаходитись у межах від 0,106 мм до 0,606 мм. Це означає, що для вказаних геометричних розмірів електродів мінімальний технологічно допустимий зазор між ними має становити не менше 0,1 мм, що гарантує як коректність вимірювань, так і механічну надійність конструкції.

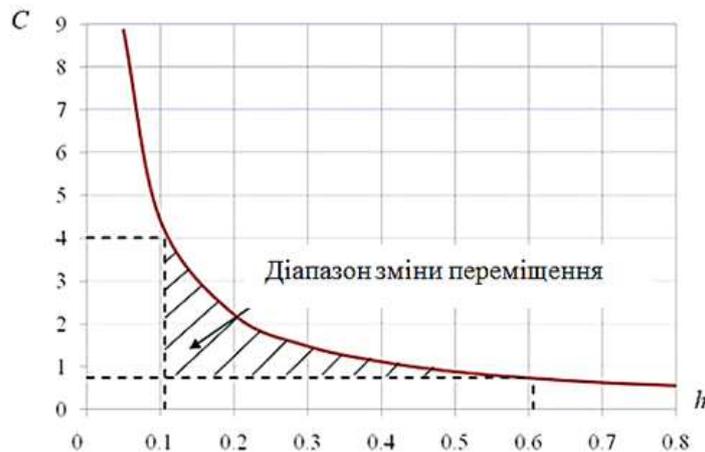


Рисунок 6 – Залежність відстані між обкладинками (мм) від ємності датчика (пФ)

#### ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

Точність роботи ємнісного датчика визначається низкою параметрів, серед яких одним із ключових є точність перетворення аналогового сигналу у цифровий. У системі використовується контролер AD7746, оснащений

високоточною 24-розрядною схемою аналого-цифрового перетворення. Відповідно, дискретизаційна похибка перетворення становить  $1/224$ .

У зоні мінімального зазору між електродами (0,1 мм) похибка визначення переміщення дорівнює:  $0,1 \text{ мм} \times 1/224 \approx 5,96 \times 10^{-9} \text{ мм}$ .

Отримане значення похибки знаходиться на рівні одиниць нанометрів, що повністю відповідає вимогам до високоточного позиціонування та забезпечує можливість використання датчика в системах мікрометричного та субмікрометричного керування.

Крім того, зазначена точність свідчить про те, що AD7746 забезпечує достатній запас роздільної здатності навіть за умов можливих паразитних впливів – температурних дрейфів, флуктуацій напруги живлення та механічних мікрівбрацій. Це робить систему вимірювання стабільною та придатною для використання у високоточних мехатронних модулях сканування та прецизійного позиціонування.

## ВИСНОВКИ

У роботі представлено комплексне дослідження двокоординатного мікропозиціонуючого модуля предметного столика, побудованого на основі біморфних п'єзоактюаторів. Запропонована конструкція забезпечує збільшений діапазон мікропереміщень у порівнянні з багат шаровими п'єзоперетворювачами, зберігаючи компактність та високу жорсткість системи. Розроблена схема інтеграції трьох ємнісних датчиків дозволяє точно визначати координати платформи та кутові відхилення, що забезпечує ефективну роботу замкненого контуру керування.

Проведене моделювання показало можливість забезпечення плоскопаралельності руху та компенсації паразитних переміщень шляхом адаптивного регулювання напруги на п'єзоактюаторах. Розроблена система керування на базі контролера dSPACE DS1104 та підсилювачів TREK гарантує високу швидкодію й точність позиціонування.

Отримані результати підтверджують роботоздатність запропонованої конструкції та алгоритмів і свідчать про можливість застосування модуля у мікроемеханічних, біомедичних та оптичних комплексах, де необхідні надійні та високоточні мікропереміщення.

## ЛІТЕРАТУРА

- [1] Зайцев Р. В., Кіріченко М. В., Зайцева Л. В. Методи дослідження структури тонких плівок: підручник. Харків: ФОРМ Бровін О. В., 2021. 320 с.
- [2] Теслюк В., Зелінський А., Каркульовський В. Розширене проєктування мікросистемних пристроїв: навч. посіб. URL: <https://surl.li/jxzlal> (дата звернення 23.11.2025).
- [3] Васильківський І. С., Фединець В. О., Юсик Я. П. Виконавчі пристрої систем автоматизації. URL: <https://surl.li/tgqjor> (дата звернення 24.11.2025).
- [4] Хорольський В. П., Коренець Ю. М. Мехатроніка (мехатроніка та інтелектуальна автоматика): навч. посіб. Кривий Ріг: ДонНУЕТ, 2023. 342с.
- [5] Тимчик Г. С., Скицюк В. І., Клочко Т. Р. Конструювання мехатронних модулів. Точність мехатронних модулів: навч. посіб. Київ: КПІ ім. Ігоря

- Сікорського, 2024. 79 с.
- [6] Теряєв В. І., Король С. В. Системи програмного та слідкуючого керування рухом: підручник. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 150 с.
- [7] Денисюк В. Ю., Кравчук О. О. Система керування точністю мікропереміщень предметного столика мікроскопа. Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології – 2025: матер. XI Міжнар. наук.-практ. конф. (м. Київ, 07 трав. 2025 р.). Київ: «Політехніка», 2025. С. 16-17.
- [8] Омелян А. В. Методи та система підвищеної ефективності керування п'єзоелектричним мікроманіпулятором: дис. ... д-ра філософії: 172. Київ, 2022. 160 с.
- [9] 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»: зб. статей. Луцьк: ЛНТУ, 2020. Вип. 17. С. 33-41.
- [10] Mohammad H. Abedin-Nasab. Handbook of robotic and imageguided surgery. URL: <https://surl.li/fzmxim> (дата звернення 25.11.2025).
- [11] Денисюк В. Ю., Симонюк В. П., Лапченко Ю. С. Дослідження точності мікропереміщень предметного столика мікроскопа з біморфними п'єзоактюаторами. Технічна творчість: зб. наук. праць. Хмельницький: ХНУ, 2021. № 4. С. 10-11.
- [12] Однодворець Л. В., Пазуха І. М., Лукавенко І. М. Оптиелектронні і лазерні системи в електроніці та медицині: навч. посіб. Суми: Сумський державний університет, 2022. 127 с.
- [13] Денисюк В. Ю., Симонюк В. П., Лапченко Ю. С., Тимощук А. А., Черняк С. О. Аналіз систем мікропереміщень для маніпулювання мініатюрними об'єктами. «Теоретичні і експериментальні дослідження в сучасних технологіях матеріалознавства та машинобудування»: зб. матер. VIII Міжнар. наук.-техн. конф. (м. Луцьк, 25-28 трав. 2021 р.) Луцьк: ЛНТУ, 2021. С. 25-27.
- [14] Andrew J. Kurdila. Dynamics and control of robotic systems. URL: <https://surl.li/vkiiii> (дата звернення 25.11.2025).

**MODULE OF PRECISE MICROMOVEMENT OF A TWO-COORDINATE MICROSCOPE STAGE BASED ON BIMORPHIC PIEZOACTUATORS AND ITS CONTROL ALGORITHM**

**Denysiuk, V. PhD, Associate Professor  
Lutsk National Technical University / Ukraine**

**Abstract.** The article presents the research and development of a two-coordinate micropositioning module of the object stage based on bimorph piezoelectric actuators using high-precision capacitive displacement sensors. The proposed design combines a coarse displacement module based on stepper motors and a precise displacement module, which provides a comprehensive

range of displacements from tens of millimeters to submicrometer values while maintaining high rigidity and compactness of the system. The structural diagram of the stage, the principle of operation of bimorph piezoelectric actuators and the features of force locking using an elastic ring made of beryllium bronze are described. The kinematic model of displacements along the X and Y axes is presented, as well as the mechanism for compensating for angular deviations that arise when an asymmetric force acts on the actuators. Considerable attention is paid to the construction of a feedback system based on three AD7746 capacitive sensors, which provide measurement of the stage position with nanometer accuracy. The principle of operation of the three-electrode sensor system was analyzed and the operating range of the interelectrode gap change was determined. Algorithms for generating control signals were developed to achieve plane-parallel table movement, angular tilt correction, and elimination of nonlinearities of piezoelectric drives. A control system based on the dSPACE DS1104 controller and TREK high-voltage amplifiers provides high speed, control accuracy, and stability of operation in a closed loop. The results of modeling and experimental tests confirmed the possibility of implementing precise positioning in the range of up to  $\pm 0.5$  mm with submicrometer resolution and minimal parasitic deviations. The proposed module can be effectively used in high-precision mechatronic complexes, optical systems, microbiological research, medical diagnostic installations, and micromechanical technologies.

**Keywords:** micropositioning, bimorph piezoactuator, two-coordinate stage, capacitive sensor, mechatronic module, high-precision microdisplacements.

---

Дата першого надходження  
статті до видання

11.09.2025 р.

Дата прийняття статті до друку  
статті після рецензування

01.10.2025 р.

Дата  
оприлюднення

23.12.2025 р.