

УДК 621.375

Антонюк В., д-р. техн. наук, професор, Приходько А., здобувач, Петренко С., д-р техн. наук, професор (НТУУ «Київський політехнічний інститут»)

## Контроль точності мікропереміщень, що їх задають мікроманіпуляторами з п'єзоелектричним двигуном

Новітні технології в галузі мікробіології та генної інженерії вимагають наявності спеціального обладнання – мікроманіпуляторів, основна функція яких – створення та керування рухом у мікропросторі. Запропоновано методику та розроблено обладнання для контролю точності мікропереміщень на виході лінійної напрямної мікроманіпулятора.

**Ключові слова:** мікробіологія, мікроманіпулятор, мікропереміщення, лінійна напрямна, п'єзоелектричний двигун.

**Вступ.** Наукові досягнення в біотехнології та генній інженерії розширюють інструментарій та знання, що їх застосовують для максимального використання сільськогосподарських земель та продуктів рослинництва і тваринництва. Вони дозволяють розробляти нові технології створення білків, отримання ферментів – ензимів та амінокислот, що їх використовують для вдосконалення якостей та підвищення плодючості тварин, в тому числі підвищення ефективності їх лікування.

Подальший розвиток таких технологій потребує високоточних приладів та систем, які дозволяють маніпулювати мікрооб'єктами в мікронних та субмікронних діапазонах і проводити мікрооперації на рівні клітини чи мікроба. Таким обладнанням є сучасні мікроманіпулятори або мікроманіпуляційні системи, що працюють на базі електричних двигунів [1].

Особливі характеристики таких двигунів, зокрема висока роздільна здатність, високі старт-стопні характеристики, високий рівень позиціонування за відсутності дрейфу, дозволяють вирішувати поставлені завдання та працювати в мікронних і субмікронних діапазонах.

Наприклад, для виконання операції з клонування чи штучного запліднення такий мікроманіпулятор дозволяє закріпити клітину, підвести до неї спеціальну голку, завдяки можливому програмованому “удару” проколоти мембрану клітини,

витагнути її ядро та ввести в неї нове. При цьому особливі прецизійні характеристики повинні мати і лінійні напрямні, які входять до складу маніпуляторів і є його основними кінематичними ланками [2].

Точність їх переміщень є важливим параметром позиціонування мікро- та нанооб'єктів і визначається точністю лінійних і кутових переміщень. Кутові переміщення, так звані динамічні захили, – параметр, який виникає під час лінійного руху напрямної і може вносити в систему критичні похибки. Причинами виникнення захилів можуть бути люфти, тертя тощо [3].

Традиційно контроль переміщень зосереджений в основному на вимірюванні лінійних переміщень вздовж осі переміщення, при цьому зовсім не береться до уваги вимірювання кутових переміщень, які виникають в процесі лінійного переміщення, що призводить до зниження точності переміщення та позиціонування.

**Мета дослідження** – розробити методику контролю точності переміщення робочого інструменту мікро-

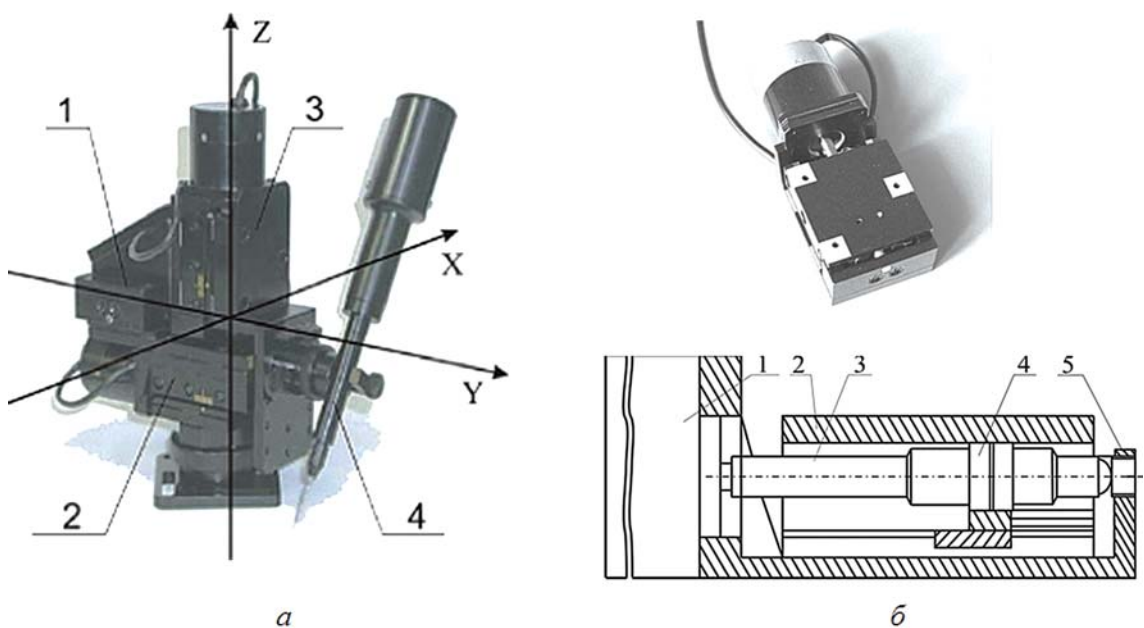


Рис. 1 – Тривісна мікроманіпуляційна система (а) та лінійна напрямна (б)

маніпуляторів та мікроманіпуляційних систем з електричним двигуном.

Як показано на рис. 1, традиційний п'єзоелектричний мікроманіпулятор складається з трьох лінійних напрямних, кожна з якої має датчик зворотного зв'язку (енкодер), п'єзоелектричний двигун 1 та лінійну напрямну 5 (рис. 1, б) [2]. При цьому мікропере-

міщення рухомого столика 2, що формуються на виході лінійної напрямної, задаються обертальним рухом п'єзоелектричного двигуна, який через передавальний механізм гвинт-гайка 3-4 трансформується в лінійний. Оскільки абсолютна точність лінійної трансформації в результаті є неможливою, обов'язково виникають похибки переміщення, що можуть стати фатальними для живої клітини чи мікроорганізму.

Це й обумовило поставлення завдання щодо вимірювання точності мікропереміщень, які задаються мікроманіпуляційними системами з п'єзоелектричним двигуном. Детальний аналіз основної кінематичної ланки, в якій і виникають критичні похибки – лінійної напрямної показав, що основними причинами наявності похибок є люфти та неточності виготовлення складових елементів. Все це призводить до появи таких явищ, як гістерезис, "мертвий" хід та кутові відхилення від прямолінійності ходу Pitch та Yaw (рис. 2) [3].

**Методика експерименту.** Для вимірювання лінійних (гістерезис та "мертвий" хід) та кутових (кутові відхилення Pitch та Yaw) переміщень виконавчих елементів напрямних п'єзоелектричних мікроманіпуляційних систем було розроблено методику вимірювання з використанням мікроскопа, автоколіматора та сучасної цифрової відеотехніки. Вимірювання та обробка інформації проводилась безпосередньо на комп'ютері.

Схеми вимірювання та світлин вимірювальних стендів наведені на рис. 3.

Суть запропонованого методу вимі-

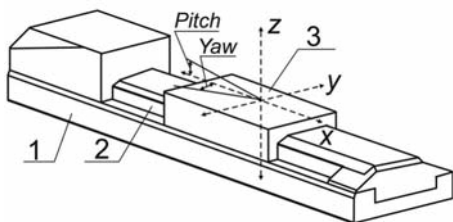
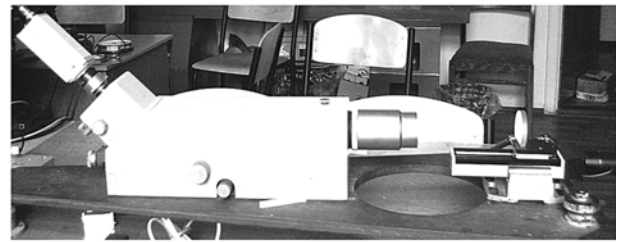
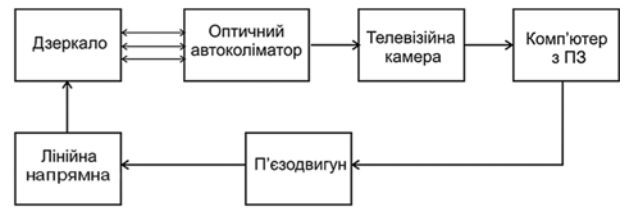


Рис. 2 – Схема прецизійної лінійної напрямної: 1 – корпус; 2 – напрямний вал, 3 – рухомий столик



а



б

Рис. 3 – Структурні схеми та вимірювальні установки для вимірювання переміщень виконавчих елементів напрямних з п'єзоелектричним двигуном: а – лінійних параметрів позиціонування, б – кутових відхилень від прямолінійного ходу

рювання полягає в тому, що зображення з мікроскопа під час вимірювання лінійних параметрів позиціонування та автоколіматора і вимірювання кутових відхилень від прямолінійності ходу зчитуються цифровою відеокамерою, передаються в комп'ютер і виводяться на монітор. Все це суттєво спрощує роботу з мікроскопом і автоколіматором та виключає виникнення суб'єктивних похибок. А головною перевагою такого методу вимірювання є те, що він дозволяє проводити вимірювання безпосередньо в процесі руху і записувати дані у вигляді відеофайла у форматі „avi” або зображень – „bmp” чи „jpeg”.

Аналіз отриманих даних дозволяє не лише отримати дані про лінійні розміри об'єкта, а також спостерігати за його переміщенням, водночас контролюючи точність цього переміщення.

Для вимірювання лінійних параметрів позиціонування на рухомому столику лінійної напрямної закріплювали спеціальну скляну голку та задавали програмований рух рухомого столику в прямому та зворотному

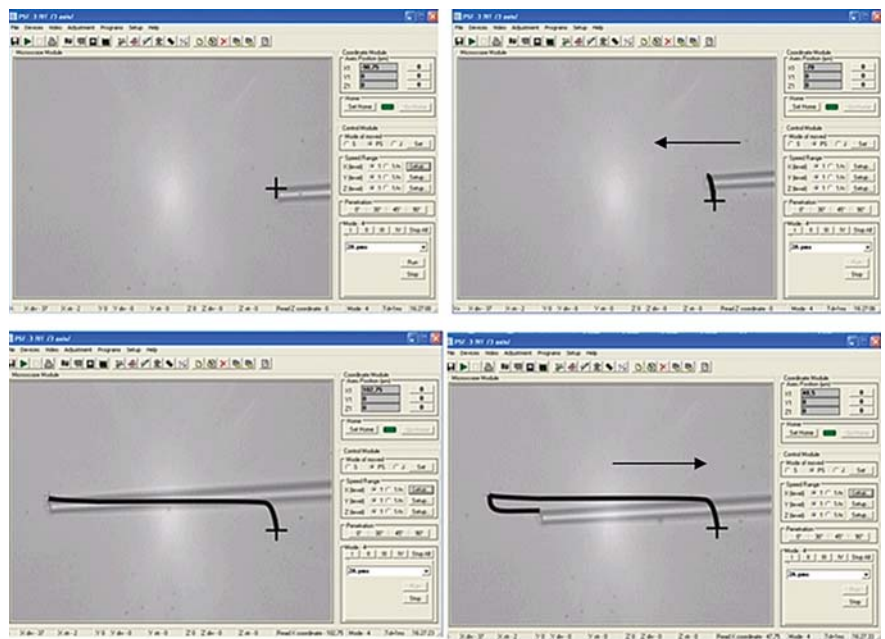


Рис. 4 – Вимірювання гістерезису напрямних з п'єзоелектричним двигуном

напрямку. Про наявність “мертвого” ходу свідчить неповернення голки в своє попереднє положення. Для вимірювання гістерезису фіксували проміжні точки положення голки (рис. 4).

В результаті проведеного вимірювання встановлено, що в лінійних напрямних, які входять до складу мікрomanipуляторів, “мертвий” хід становить від 1 до 3 мкм для різних напрямних та їх положень на робочому діапазоні. При цьому виявлено, що найменший “мертвий” хід для кожної напрямної спостерігається за її середнього положення. На краях його величина дещо збільшується. В результаті досліджень гістерезису різних напрямних з п’єзоелектричним двигуном виявлено, що він має схожі параметри, але вигляд петлі трохи відрізняється. При цьому виявлено три основні типи гістерезису, які зображені на рис. 5.

Як видно з рисунка, ширина петель гістерезису для всіх напрямних майже однакова і дорівнює 1-2 мкм, а кут гістерезису – різний. При цьому петля гістерезису може мати прямокутну форму (рис. 5, а). Це найбільш небажана форма напрямної, тому що в такому разі кут дорівнює майже 90°, а це означає, що відбувається різке перпендикулярне зміщення інструменту в результаті дії реверсу. Реалізація такої ситуації під час мікрооперації з живою клітиною може призвести до значних її пошкоджень. Якщо кут гістерезису близький до нуля (рис. 5, в), то напрямна майже не має перпендикулярного зміщення інструменту, і ним можна знехтувати під час роботи з клітиною, адже це не викличе пошкоджень біологічного об’єкта.

Для вимірювання кутових відхилень від прямолінійності руху Pitch та Yaw на рухомому столику напрямної

закріплювали плоскопаралельне дзеркало і розташували його на нормалі автоколіматора. Потім задавали рухомому столику рух на всьому робочому діапазоні, а за відхиленнями репера автоколіматора від свого початкового положення визначали наявність кутових відхилень (рис. 6).

Отримані результати представлені у вигляді залежностей кутових відхилень рухомого столика від величини лінійного переміщення вздовж осі руху (рис. 7).

На рис. 7 зображені типові випадки впливу кутових відхилень Pitch та Yaw на прямолінійність ходу рухомого столика лінійної напрямної. Як видно з рисунків, в процесі переміщення вздовж осі руху він розвертається навколо двох інших осей (максимуми і мінімуми на графіках), а також має місце його поступовий захил вверх-вниз та вліво-вправо. При цьому спостерігається деякий гістерезис зворотного напрямку ходу відносно прямого.

Величини таких кутових переміщень на рухомому столику напрямної можуть досягати 60 кутових секунд. Зробивши відповідний перерахунок з кутових величин в лінійні значення, отримуємо лінійні зміщення від прямолінійності ходу рухомого столика порядку десятків нанометрів. Але, якщо врахувати той факт, що робочий інструмент, який знаходиться на тримачі, виходить досить далеко за межі системи напрямної (порядку 100 мм), то переміщення на його кінці будуть мати суттєві значення (порядку одиниць і навіть десятків мікрометрів). Для тримача довжиною 100 мм такі зміщення можуть скласти 29 мкм. Це небезпечна ситуація, оскільки під час проведення мікрооперацій можна пошкодити біологічний об’єкт, наприклад, живу клітину, розміри якої часто не перебільшують одиниць мікрометрів. Тому постає завдання враховувати такі відхилення під час роботи з напрямними такого типу в мікрomanipуляційних системах.

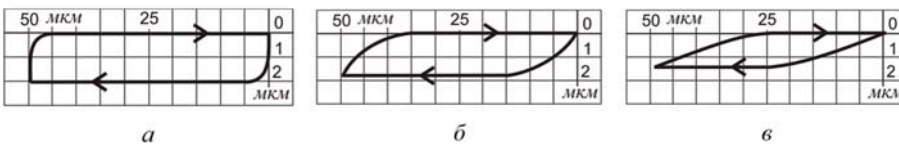


Рис. 5 – Петлі гістерезису для різних напрямних

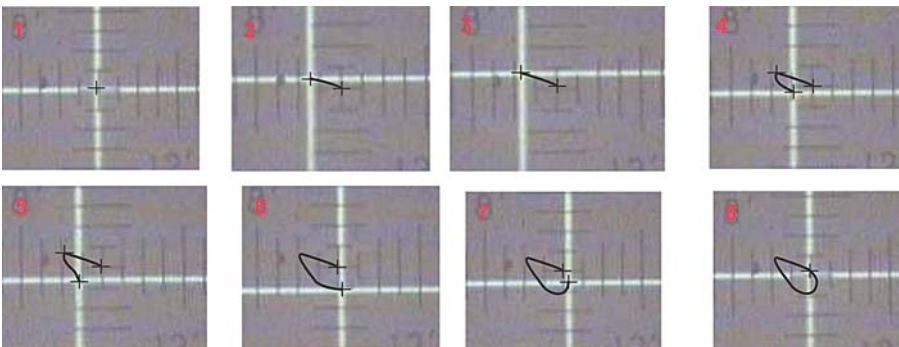


Рис. 6 – Приклад вимірювання кутових відхилень Pitch та Yaw

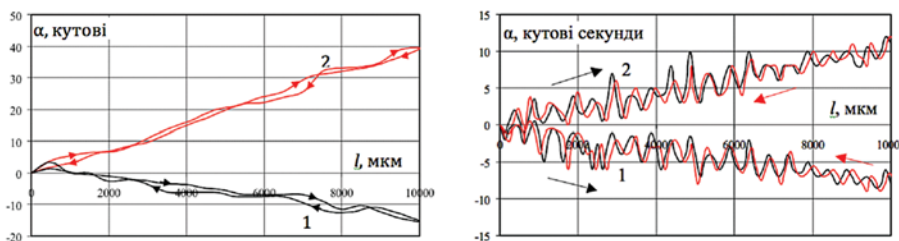


Рис. 7 – Залежність кутових відхилень від величини лінійного переміщення напрямної в прямому та зворотному напрямках ходу: 1 – Pitch; 2 – Yaw

Висновки. За результатами експериментальних досліджень встановлено, що значення “мертвого” ходу може досягати 3 мкм, його неврахування може призвести до похибки переміщення мікрomanipуляційних систем, в яких присутнє явище реверсу, і ця похибка може становити 3 мкм. Встановлено, що гістерезис може досягати 3 мкм. Також виявлено, що під час руху виконавчих елементів напрямних відбувається повертання рухомого столика лінійної напрямної навколо осей Y та Z, тобто кутові відхилення Pitch та Yaw від прямолінійності ходу. При цьому має місце поступовий захил рухомого столика вверх-вниз або вліво-вправо, неврахування яких може внести в мікрomanipуляційну систему похибку переміщення, яка в залежності від довжини робочого інструменту та тримача може досягати одиниць і навіть десятків мікрометрів.

### Список літератури

1. Максимовский Л. Ф., Микичур Л. И. Методы микроманипуляции и ультрамикрoанализа в биологии и медицине. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1989. – 239 с.
2. Патент України № 71044, G02B21/32. Петренко С. Ф. Мікрoманіпулятор. Опубл. 15.11.2004; бюл. № 11.
3. Definition of Axes and Angles. Physik Instrumente (PI), Germany, 2004. – S.7.5-7.11.

**Аннотация.** Новейшие технологии в области микробиологии и генной инженерии требуют наличия специального оборудования – микроманипуляторов,

основная функция которых – создание и управление движением в микропространстве. Предложены методики и разработаны установки для контроля точности микроперемещений на выходе линейной направляющей микроманипулятора.

**Summary.** The latest technology in the field of micro-biology and genetic engineering require special equipment - micromanipulator whose primary function is to create and manage traffic in microspace. Method and settings for accuracy control of micromovement at micromanipulator linear guide output are developed and offered.

Стаття надійшла до редакції 1 жовтня 2012 р.

\* Продовження статті. Початок див. у № 11, 2012 р.