

УДК 621.375

В.С. Антонюк, д.т.н., проф.

Національний технічний університет України «КПІ»

А.В. Приходько, аспір.

Національний технічний університет України «КПІ»

ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНОГО МІКРОМАНІПУЛЯТОРА В РЕЖИМІ КОМПЕНСАЦІЇ ПОХИБОК

Розглянуто степінь відтворення реальних переміщень за рахунок наявності таких факторів, як масштабний коефіцієнт, модуляційна характеристика, мертвий хід та кутові відхилення Pitch та Yaw від прямолінійності ходу. Основною задачею мікроманіпуляційних систем для клітинних технологій є створення навмисного та повторюваного переміщення мікроінструментів в полі зору мікроскопа, заданих оператором за допомогою комп'ютеризованої системи керування. Підвищено надійність роботи мікроманіпуляційних систем з біологічними організмами та уникнення пошкоджень досліджуваних об'єктів внаслідок врахування наявності вказаних характеристик шляхом отримання компенсаційних коефіцієнтів, які вводяться в комп'ютеризовану систему керування рухом. Завдяки цьому підвищена точність позиціювання п'єзоелектричного мікроманіпулятора в 7 разів.

Постановка проблеми. Наш час можна сміливо назвати епохою нанотехнологій, які включають важливі відкриття в області мікроелектроніки (MEMS технології), напівпровідникові технології, фотолітографія, фотоніка, волоконна оптика, мікровиробництво також такі галузі, як клітинні мікротехнології (біотехнології, генна інженерія, репродуктивна біологія і медицина, нейробиологія, мікрофізіологія тощо). В сучасній молекулярній біології та медицині широке розповсюдження отримують IVF (in-vitro fertilization) – технології, які пов'язані з проникненням у середину клітини, що і дозволяє зробити мікроманіпулятор. Але їх подальший розвиток таких технологій вимагає більш точного обладнання, які дозволяють управляти переміщеннями не тільки в мікро-, але і в нанодіапазонах. Таким обладнанням є мікроманіпуляційні системи [1].

Зауважимо, що мікроманіпулятори для таких технологій, а також для інших галузей, наприклад, електронної, хімічної промисловості тощо, повинні суміщати в собі дуже специфічні і складні характеристики: практична відсутність дрейфу піпетки в експерименті;

субмікронна роздільна здатність поєднана з грубим позиціонуванням; плавна зміна швидкості в широкому діапазоні; можливість формування програмованого руху у мікропросторі; можливість формування аксіального руху під будь-яким кутом; можливість формування програмованого удару для проколювання мембрани клітини. Зокрема, основною задачею мікроманіпуляційних систем для клітинних технологій є створення навмисного та повторюваного переміщення мікроінструментів у полі зору мікроскопа. Тобто така система формування руху в мікропросторі повинна забезпечувати відтворення величин переміщень, заданих оператором за допомогою комп'ютеризованої системи керування [2].

Аналіз останніх джерел та публікацій, в яких започатковано вирішення даної проблеми доказує, що при вивченні практичних питань необхідно врахувати реальні переміщення робочих органів мікроманіпуляційних систем з п'єзоелектричними двигунами, які працюють у мікронних і субмікронних діапазонах. Особливі характеристики таких двигунів, а саме висока роздільна здатність, високі старт-стопні характеристики, високий рівень позиціонування за відсутності дрейфу, дозволяють маніпулювати мікрооб'єктами в мікронних та субмікронних діапазонах і проводити мікрооперації. Таким обладнанням є сучасні мікроманіпулятори або мікроманіпуляційні системи на базі електричних двигунів [3].

Наприклад, для виконання операції з клонування чи штучному заплідненню такий мікроманіпулятор дозволяє закріпити клітину, підвести до неї спеціальну голку, завдяки можливому програмованому «удару» проколоти мембрану клітини, витягнути її ядро та ввести в неї нове. При цьому особливі прецизійні характеристики повинні мати й лінійні направляючі, які належать до складу маніпуляторів і є його основними кінематичними ланками [4].

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 направляючої і може вносити в систему, критичні похибки. Причинами виникнення захилів можуть бути люфти, тертя тощо [5].

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 у процесі лінійного переміщення і цим самим призводять до зниження точності переміщення та позиціонування.

Постановка завдання. З огляду на зазначене вище, виникає задача дослідження роботи п'єзоелектричного мікроманіпулятора в режимі компенсації похибок.

Одним із ефективних шляхів вирішення цього завдання є створення методичного і технічного забезпечення вимірювання кутових переміщень робочих органів лінійних прецизійних направляючих з п'єзоелектричним двигуном.

Викладення основного матеріалу дослідження. (Методика розрахунку). Як показали дослідження мікроманіпулятора на базі п'єзоелектричного двигуна проведені в роботах [6] та [7], степінь відтворення реальних переміщень робочих органів суттєво знижується за рахунок наявності масштабного коефіцієнта, модуляційної характеристики, мертвого ходу та кутових відхилень від прямолінійності ходу Pitch та Yaw.

Кожна з перерахованих характеристик вносить свій вплив на переміщення робочого інструменту на виході мікроманіпуляційної системи, таким чином, результуюче переміщення $l_{\text{реал}}$ по одній осі переміщення буде функцією характеристики масштабного коефіцієнта $f_M(l)$, модуляційної характеристики $f_{\text{мод}}(l)$ та мертвого ходу $f_{\text{м.х.}}(l)$:

$$l_{\text{реал}} = f_M \circledast f_{\text{мод}} \circledast f_{\text{м.х.}} \quad (1)$$

При врахуванні кутових відхилень від прямолінійності Pitch та Yaw при переміщенні рухливого столику направляючої вздовж осі переміщення необхідно враховувати довжину робочого інструменту та його тримача $l_{\text{трим}}$, оскільки точні переміщення необхідно отримати саме на кінці інструменту:

$$l_{\text{доддв}} = l_{\text{оддв}} \cdot f_{\text{Pitch+Yaw}} \circledast f_M \circledast f_{\text{ііі}} \circledast f_{\text{і.о.}} \quad (2)$$

Враховуючі всі параметри лінійного переміщення [7], реальне переміщення на виході маніпулятора має вигляд:

$$l_{\text{доддв.вч}} = \frac{f_M \circledast N_{\text{сдд}}}{N} + f_{\text{ііі}} \circledast \frac{1}{2} \circledast (-\text{sgn} \Delta l) \circledast f_{\text{і.о.}} \quad (3)$$

де $l_{\text{доддв.вч}}$ – величина реального переміщення кінця робочого інструменту з урахуванням масштабного коефіцієнта, модуляційної характеристики та мертвого ходу; $N_{\text{сдд}}$ – кількість міток-відліків кутового датчика зворотного зв'язку, що показують величину переміщення; N – кількість міток-відліків кутового датчика зворотного зв'язку на одному оберті; $\text{sgn} \Delta l = \frac{|\Delta l|}{\Delta l}$ – знакова функція;

l – величина, яка показує положення прецизійної гайки на

прецизійному гвинті, при цьому величина l визначається кількістю заданих міток-відліків кутового датчика зворотного зв'язку $N_{\zeta\delta\ddot{a}}$.

При врахуванні кутових відхилень від прямолінійності Pitch та Yaw, остаточна математична модель переміщень, що задаються лінійною направляючою запишеться у вигляді:

$$\begin{cases} l_{\delta\delta\ddot{a}\ddot{e}} = l_{\delta\delta\dot{e}i} \cdot \cos\left(\arctg\left[\operatorname{tg}^2\left(\text{Pitch}_{\delta\delta\ddot{a}\ddot{e},\zeta\text{Y}}\right) + \operatorname{tg}^2\left(\text{Yaw}_{\delta\delta\ddot{a}\ddot{e},\zeta\text{Y}}\right)\right]\right) + l_{\delta\delta\ddot{a}\ddot{e},\zeta\text{Y}} \\ l_y = l_{\delta\delta\dot{e}i} \cdot \sin\left(\text{Yaw}_{\delta\delta\ddot{a}\ddot{e},\zeta\text{Y}}\right) \\ l_z = l_{\delta\delta\dot{e}i} \cdot \sin\left(\text{Pitch}_{\delta\delta\ddot{a}\ddot{e},\zeta\text{Y}}\right) \end{cases}, \quad (4)$$

де $l_{\delta\delta\ddot{a}\ddot{e}}$ – величина реального лінійного переміщення кінця робочого інструменту вздовж осі X; l_y – величина зміщення кінця робочого інструменту по осі Y, що викликано наявністю в системі кутових відхилень Pitch рухливого столика направляючої; l_z – величина зміщення кінця робочого інструменту по осі Z, що викликано наявністю в системі кутових відхилень Yaw рухливого столика направляючої.

Так перше рівняння системи (4) описує реальне лінійне переміщення направляючої вздовж осі переміщення, в даному випадку осі X. Друге і третє рівняння системи відповідають за зміщення кінця робочого інструменту по осях Y та Z відповідно, які відбуваються через наявність в системі відхилень від прямолінійності Pitch та Yaw.

Оскільки мова йде про мікрomanipуляційні системи з п'єзоелектричним двигуном, які є триосьовими системами [8], керування робочим інструментом в мікропросторі, який складається з трьох лінійних направляючих, розміщених по трьох координатах. При здійсненні маніпулятором лінійних переміщень по трьох осях, відхилення кожного лінійного переміщення будуть впливати на точність переміщення по інших осях (рис. 1). І в результаті виникають небезпечні для біологічних об'єктів ситуації.

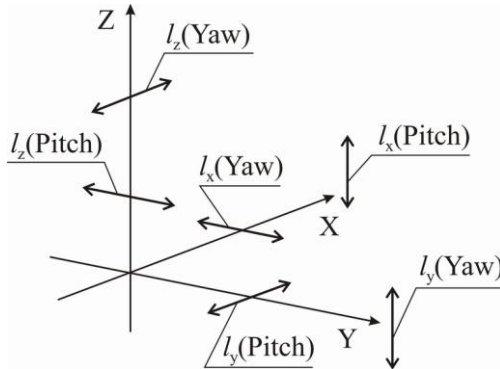


Рис. 1. Вплив кутових переміщень направляючих на лінійні переміщення за іншими осями

Оскільки дана мікроманіпуляційна система складається з трьох ідентичних лінійних направляючих, то загальний вигляд математичної моделі переміщень, які задаються триосьовою системою позиціонування типу маніпулятор, згідно з (4), матиме вигляд [9]:

$$\begin{cases} l_{\delta\delta\delta\delta}^{\bar{O}} = l^x + l_y^x \left[\text{Pitch} \right] + l_z^x \left[\text{Yaw} \right] \\ l_{\delta\delta\delta\delta}^Y = l^y + l_z^y \left[\text{Pitch} \right] + l_x^y \left[\text{Yaw} \right] \\ l_{\delta\delta\delta\delta}^Z = l^z + l_x^z \left[\text{Pitch} \right] + l_y^z \left[\text{Yaw} \right] \end{cases}, \quad (5)$$

де $l_{\delta\delta\delta\delta}^{\bar{O}}$, $l_{\delta\delta\delta\delta}^Y$, $l_{\delta\delta\delta\delta}^Z$ – величини реальних переміщень по кожній з осей мікроманіпулятора; l^x , l^y , l^z – величини, які характеризують лінійні переміщення по кожній з осей; складові $l_y^x \left[\text{Pitch} \right]$, $l_z^x \left[\text{Yaw} \right]$ відповідають за зміщення робочого інструменту по координаті X через вплив кутових відхилень Pitch (y) та Yaw (z) при переміщенні по координатах Y та Z відповідно; складові $l_z^y \left[\text{Pitch} \right]$, $l_x^y \left[\text{Yaw} \right]$ відповідають за зміщення робочого інструменту по координаті Y через вплив кутових відхилень Pitch та Yaw при переміщенні по координатах Z та X відповідно; складові $l_x^z \left[\text{Pitch} \right]$, $l_y^z \left[\text{Yaw} \right]$ відповідають за зміщення робочого інструменту по координаті Z через вплив кутових відхилень Pitch та Yaw при переміщенні по координатах X та Y відповідно.

На основі отриманої моделі переміщень (5), що задаються триосьовою мікроманіпуляційною системою, можна отримати систему поправочних коефіцієнтів, які необхідно ввести в комп'ютеризовану систему керування руху з метою компенсації похибок переміщень і отримання необхідної та заданої величини переміщення. Такі коефіцієнти можна визначити на основі рівняння:

$$\Delta = l_{\delta\delta\delta\delta} - l_{\zeta\zeta\zeta\zeta}, \quad (6)$$

де $l_{\delta\delta\delta\delta}$ – реальне переміщення кінця робочого інструменту, яке отримали на виході мікроманіпуляційної системи при програмуванні переміщення $l_{\zeta\zeta\zeta\zeta}$.

Результати досліджень. Відповідність математичної моделі мікроманіпуляційної системи підтверджено такими дослідженнями. В першому випадку розглядали переміщення лінійної направляючої типу Sb-01 з діапазоном переміщення 10 мм вздовж однієї осі, осі X. При цьому переміщення по інших осях не відбувалось. В такому випадку, на величину реального переміщення вздовж осі X не впливають кутові відхилення по осях Y та Z і вона залежить тільки від параметрів однієї направляючої.

В результаті, відповідно до (3), отримані залежності ідеального і реального, експериментального та отриманого за допомогою математичної моделі лінійного переміщення кінця робочого інструменту, який закріплено на рухливому столику направляючої мікроманіпуляційної системи вздовж осі переміщення на всьому робочому діапазоні. Дані залежності наведено на рисунку 2. При цьому ідеальним вважається переміщення за відсутності впливу лінійних та кутових параметрів мікропереміщень. Тобто випадок, в якому переміщення кінця робочого інструменту дорівнюють програмно заданим.

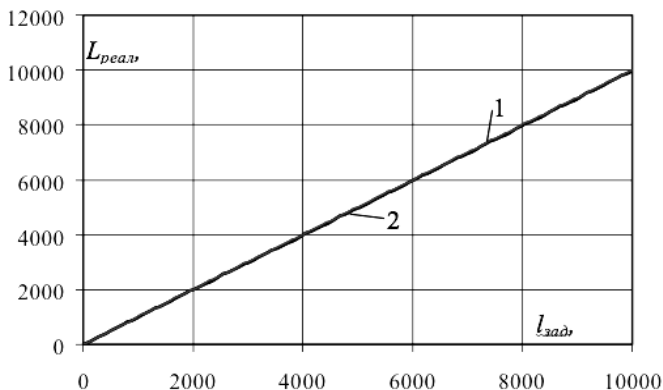


Рис. 2. Залежність відтвореного напрямляючого переміщення від програмно заданого: 1 – ідеальне; 2 – реальне

Як видно з рисунка 2, криві 1 та 2 майже збігаються, оскільки неточності в переміщенні мають величини порядку одиниць-десятиків мікрметрів. Для визначення величини відхилення реальних переміщень від заданих використовується рівняння (6). Таким чином, для описаного вище випадку залежність різницевих значень реальних переміщень від програмно заданих для випадку вимірних даних та отриманих в результаті математичного моделювання, представлені на рисунку 3.

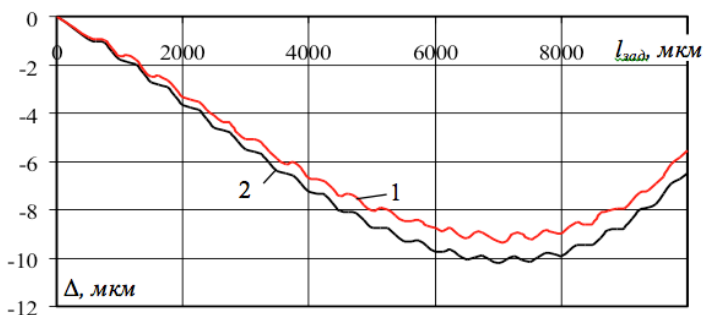


Рис. 3. Залежність відхилень реальних переміщень напрямляючої від програмно заданих: 1 – теоретична; 2 – експериментальна

Криві 1 та 2, зображені на рисунку 3, мають високу збіжність, що говорить про відповідність отриманої математичної моделі даним, отриманих в результаті проведених вимірювань. Максимальна похибка їх незбіжності складає 1,4 мкм.

Отримані за допомогою компенсаційної моделі (6) коефіцієнти є поправочними, які необхідно враховувати при програмуванні руху лінійної направляючої, для того, щоб в реальних переміщеннях кінця робочого інструменту врахувати параметри лінійного і кутового переміщення. На рисунку 4 наведено залежності відхилень реальних переміщень від ідеальних при врахуванні компенсаційних коефіцієнтів (крива 1) та без врахування (крива 2).

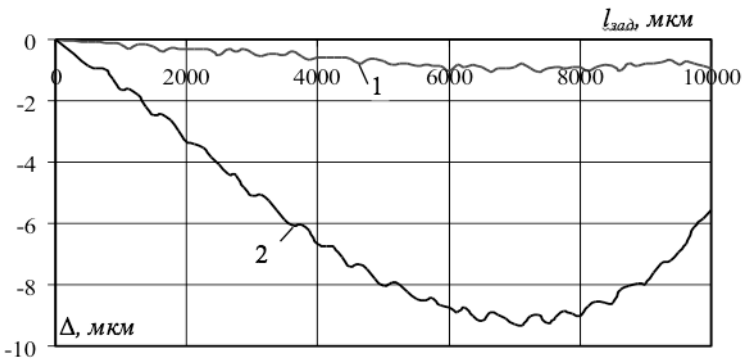


Рис. 4. Залежність відхилень реальних переміщень направляючої від програмно заданих: 1 – з врахуванням компенсаційних коефіцієнтів; 2 – без врахування компенсаційних коефіцієнтів

Як видно з рисунка 4, відхилення реальних переміщень від програмно заданих може досягати 10 мкм, що різко знижує точність позиціонування мікроманіпуляційних систем.

Аналогічно проводили дослідження переміщень на виході триосової мікроманіпуляційної системи, яка складається з трьох направляючих типу Sb-01 з діапазоном переміщення 10 мм.

Для оцінки впливу кутових відхилень Pitch та Yaw від прямолінійності ходу розглянемо вплив цих відхилень на лінійні переміщення вздовж кожної осі. Так на рисунку 5, а показані графіки залежностей відхилень реальних переміщень кінця робочого інструменту від програмно заданих при русі вздовж осі X, які виникають за рахунок наявності кутових відхилень Pitch та Yaw. Відповідно на рисунку 5, б зображено вплив кутових відхилень на лінійні переміщення вздовж осі Y, а на рисунку 5, в – кутових відхилень на лінійні переміщення вздовж осі Z.

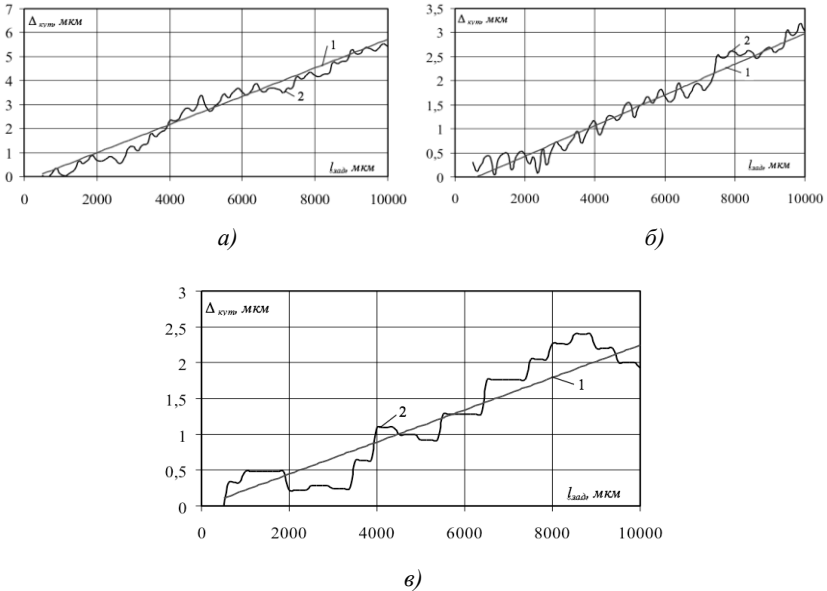
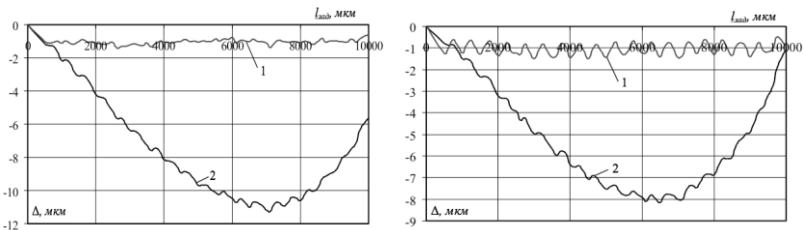


Рис. 5. Залежність відхилень реальних переміщень кінця робочого інструменту від програмно заданих за рахунок наявності кутових відхилень по інших координатах: 1 – теоретична; 2 – експериментальна; а) по координаті X; б) по координаті Y; в) по координаті Z

Як видно з наведених залежностей, кутів відхилень від прямолінійності по кожній координаті вносять свій вплив у лінійні переміщення по інших координатах. При цьому лінійні відхилення за рахунок таких кутів можуть досягати 6 мкм.

Враховання компенсаційних коефіцієнтів дозволяє суттєво зменшити неточності позиціонування. Так на рисунку 6 зображені залежності для переміщень робочого інструменту по трьох координатах з урахуванням лінійних параметрів переміщень та кутів відхилень Pitch та Yaw по кожній осі переміщення.



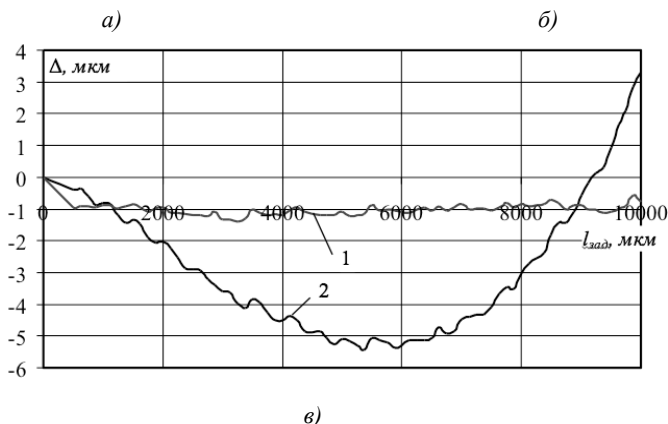


Рис. 6. Залежність відхилень реальних переміщень кінця робочого інструменту від програмно заданих: 1 – з врахуванням компенсаційних коефіцієнтів; 2 – без врахування компенсаційних коефіцієнтів: а) по координаті X; б) по координаті Y; в) по координаті Z

Як видно з рисунка 6, величини відхилень реальних переміщень від програмно заданих для різних координат переміщення можуть перебільшувати 10 мкм. Враховуючи, що такі системи використовуються для мікрооперацій з живими біологічними об'єктами, зокрема клітинами, величини яких багато менше 10 мкм, наявність таких відхилень негативно впливає на якість досліджень та може призвести до розриву і гибелі досліджуваних об'єктів. Використовуючи компенсаційні коефіцієнти, які отримані в результаті математичного моделювання, вдалось зменшити величину відхилень робочих органів мікроманіпуляційних систем до рівня 1,5 мкм.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Таким чином, в результаті проведених досліджень встановлено, що відхилення реальних переміщень робочого інструменту на виході направляючих від програмно заданих може досягати 10 мкм. Встановлено, що кутові відхилення від прямолінійності ходу направляючих в мікроманіпуляційній системі вносять значний вплив у лінійні переміщення по інших координатах. При цьому лінійні відхилення за рахунок таких кутових відхилень можуть досягати 6 мкм. Тому відхилення реальних переміщень від програмно заданих для різних координат переміщення можуть значно перевищувати величину 10

мкм. Використання компенсційних коефіцієнтів дозволило підвищити точність позиціонування направляючих мікроманіпуляційних систем з п'єзоелектричним двигуном майже в 7 разів.

Список використаної літератури:

1. Automated Piezoelectric Nanopositioning Systems, IEEE Circuits & Devices Magazine, November/December, 2006.
2. Long Travel Ranges And Accurate Angular Movement Create New Opportunities In Biomedical Manipulation Systems / V.Zhelyaskov, M.Broderick, A.Raphalovitz, B.Davies. – Ieee Circuits & Devices Magazine, 2006, Nov/Dec, 75–78.
3. Nanorobot-6AX – Bench Top Robotic Nanopositioning System DTI-Nanotech, August, 2006.
4. Мікроманіпулятор : патент України № 71044, G02B21/32. *Петренко С.Ф.* ; опубл. 15.11.2004, Бюл. № 11.
5. Defintion of Axes and Angles. Physik Instrumente (PI), Germany, 2004. – S. 7.5–7.11.
6. *Петренко С.Ф.* Контроль параметров позиционирования линейных прецизионных направляющих / *С.Ф. Петренко, А.В. Белова* // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2008. – № 1. – С. 117–121.
7. *Антонюк В.С.* Позиціонування лінійних п'єзоелектричних мікроманіпуляційних систем / *В.С. Антонюк, А.В. Белова, С.Ф. Петренко* // Процеси механічної обробки в машинобудуванні : зб. наук. пр. – Житомир, 2009. – Вип. 7. – С. 13–25.
8. Пьезомоторизованный микроманипулятор для клеточных технологий PSF-3 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://piezomotor.com.ua/product/30>.
9. *Антонюк В.С.* Підвищення точності позиціонування лінійних направляючих мікроманіпуляційних систем з п'єзоелектричним двигуном / *В.С. Антонюк, А.В. Белова, С.Ф. Петренко* // Високі технології в машинобудуванні : зб. наук. пр. – Харків : НТУ “ХПІ”, 2008. – Вип. 2 (17). – С. 12–20.

АНТОНЮК Віктор Степанович – доктор технічних наук, професор Національного технічного університету України “КПІ”.

Наукові інтереси:

– нанотехнології.

E-mail: vp@kpi.ua

ПРИХОДЬКО Альона Вікторівна – аспірант Національного технічного університету України “КПІ”.

Наукові інтереси:

– нанотехнології,

– метрологія.

E-mail: lysakalena@ukr.net

Стаття надійшла до редакції 03.04.2012

Антонюк В.С., Приходько А.В. Дослідження роботи п'єзоелектричного мікрomanipулятора в режимі компенсації похибок

Антонюк В.С., Приходько А.В. Исследования работы пьезоэлектрического микроманипулятора в режиме компенсационных ошибок

Antonyuk V.S., Pryhodko A.V. Research of piezoelectric micromanipulator work in mode of errors indemnification

УДК 621.375

Исследования работы пьезоэлектрического микроманипулятора в режиме компенсационных ошибок / В.С. Антонюк, А.В. Приходько

Рассмотрена степень воспроизведение реальных перемещений за счет наличия таких факторов, как масштабный коэффициент, модуляционная характеристика, мертвый ход и угловые отклонения Pitch и Yaw от прямолинейности хода. Основной задачей микроманипуляционных систем для клеточных технологий является создание преднамеренного и повторяющегося перемещения микроинструментов в поле зрения микроскопа, заданных оператором с помощью компьютеризированной системы управления. Для повышения надежности работы микроманипуляционных систем с биологическими организмами и избегания повреждений исследуемых объектов нужно учитывать наличие указанных характеристик путем получения компенсационных коэффициентов, которые вводятся в компьютеризированную систему управления движением. Вследствие этого повышена точность позиционирования пьезоэлектрического микроманипулятора в 7 раз.

УДК 621.375

Research of piezoelectric micromanipulator work in mode of errors indemnification / V.S. Antonyuk, A.V. Pryhodko

The main task of micromanipulation systems for cellular technology is creating deliberate and repetitive movement mikroinstruments in sight microscope given by the operator using a computerized control system. Degree of playing real movements significantly reduced by the presence of factors such as the scale factor, modulation characteristics, backlash and angular deviation Pitch and Yaw from straightness go. To improve reliability of micromanipulation systems with biological organisms and to avoid damage to the objects you want to consider the presence of these characteristics by obtaining compensation coefficients are entered in a

computerized system for traffic control. This could improve the positioning accuracy by 7 times, and reduce the amount of error of 10 microns to 1.5 microns.