

УДК 681.786: 621.836

В.С. Антонюк, д.т.н., проф.

А.В. Белова

С.Ф. Петренко, д.т.н.

Національний технічний університет України "КПІ"

## ПОЗИЦІОНАННЯ ЛІНІЙНИХ П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНИХ МІКРОМАНІПУЛЯЦІЙНИХ СИСТЕМ

*В статті розглядається питання підвищення точності позиціонування триосьової мікроманіпуляційної системи з п'єзоелектричним двигуном. На позиціонування таких систем впливають лінійні та кутові параметри переміщень лінійних направляючих, які входять до складу мікроманіпуляторів, а саме: характеристика масштабного коефіцієнта, модуляційна характеристика, «мертвий хід», кутові відхилення від прямолінійності Pitch та Yaw. Наведена узагальнена математична модель переміщення мікроманіпулятора та компенсаційна модель похибок позиціонування.*

**Актуальність.** Одним з напрямків сучасної науки є роботи в мікроскопічних діапазонах. До них належать клітинні технології, напівпровідникові технології, мікроелектроніка тощо, розвиток яких неможливий без спеціальної продукції точного приладобудування, а саме приладів, що дозволяють маніпулювати мікрооб'єктами в мікронних та субмікронних діапазонах. Такими приладами на сьогодні є мікроманіпуляційні системи. Останнім часом поширюються мікроманіпуляційні системи на базі п'єзоелектричного двигуна, які дають можливість формування програмованого руху у мікропросторі; аксіального руху під будь-яким кутом; програмованого удару [1]. Перехід на п'єзоелектричні двигуни відкриває нові потенційні можливості для мікроманіпуляційних систем за рахунок розширення їх функціональних можливостей, перш за все за рахунок високої роздільної здатності (мінімального кутового кроку порядку 1 кутової секунди) і розширеного діапазону по швидкості роботи (більше ніж на 5 порядків завдяки жорстким моментним старт-стопним характеристикам). В таких умовах дуже актуальною є задача контролю та підвищення точності позиціонування лінійних мікроманіпуляційних систем з п'єзоелектричним двигуном. При цьому точність позиціонування визначається не тільки параметрами двигуна, а і основними виконавчими елементами таких систем – направляючими, які трансформують параметри двигуна на робочий інструмент, що має контакт з досліджуваним об'єктом.

**Метою роботи** є підвищення точності позиціонування лінійних мікроманіпуляційних систем з п'єзоелектричним двигуном.

**Основний матеріал досліджень.** До складу мікроманіпуляційних систем входять лінійні направляючі з п'єзоелектричним двигуном [2], розміщені таким чином, що така система дозволяє виконувати мікропереміщення по трьох координатах одночасно. В такому випадку під час розрахунку точності позиціонування мікроманіпуляційної системи її необхідно розглядати як триосьову, яка складається з трьох лінійних направляючих, розміщених по трьох координатах.

Для дослідження точності позиціонування мікроманіпуляційних систем визначено основні параметри переміщень лінійних направляючих, які входять до їх складу [3, 4]. Такими параметрами є характеристика масштабного коефіцієнта, модуляційна характеристика, мертвий хід, гістерезис та кутові відхилення від прямолінійності ходу Pitch ( $\theta_y$ ) та Yaw ( $\theta_z$ ). Загальне позиціонування триосьової мікроманіпуляційної системи визначається точністю позиціонування кожної направляючої з врахуванням впливу вказаних параметрів.

Оскільки принцип роботи лінійної направляючої полягає в перетворенні обертального руху вала двигуна в прямолінійне переміщення рухливого столику за допомогою системи “гвинт–гайка”, то під масштабним коефіцієнтом системи розуміється величина лінійного переміщення рухливого столика направляючої, яка відповідає одному відліку кутового датчика зворотного зв'язку, що встановлено на валу п'єзоелектричного двигуна. Так, в [5] визначено, що величина реального переміщення на виході направляючої з врахуванням масштабного коефіцієнта має вигляд:

$$l_{\text{реал}} = f_M(s_{\text{ев}}) \cdot N_{\text{зад}} = \frac{f_m(t) \cdot N_{\text{зад}}}{N}, \quad (1)$$

де  $l$  – величина, яка показує положення гайки на гвинті;  $N$  – кількість відліків датчика зворотного зв'язку на одному оберті;  $N_{\text{зад}}$  – кількість відліків датчика зворотного зв'язку, які визначають величину лінійного переміщення.

Модуляційна характеристика направляючої являє собою відхилення величини реального переміщення рухливого столика направляючої від програмо заданого при його русі вздовж осі X, які виникають за рахунок кутової прецесії у просторі осі гвинта. Модуляційна характеристика має синусоїдальний характер з періодом, що дорівнює кроку різі прецизійного “гвинта–гайки” [5]:

$$f_{\text{мод}}(l) = A \cdot \sin\left(\frac{2\pi \cdot l}{S_{\text{ес}}} + \Delta\varphi\right), \quad (2)$$

де  $\Delta\varphi$  – початкова фаза модуляційної характеристики;  $A$  – амплітуда модуляційної характеристики.

Мертвий хід проявляється при реверсі (зміна напрямку руху направляючої) системи і, як показали експериментальні дослідження, є залежністю від величини переміщення [3]. При цьому мертвий хід необхідно враховувати як складову з протилежним знаком [5]:

$$f_{\text{м.х.}}(l) = \frac{1}{2}(1 - \text{sgn}(\Delta l)) \cdot f_{\text{м.х.}}(l), \quad (3)$$

де  $\Delta l$  – інтервал переміщення;  $f_{\text{м.х.}}(l)$  – змінна компонента функції мертвого ходу;  $\text{sgn}(\Delta l) = \frac{|\Delta l|}{\Delta l}$  – знакова функція.

Кутові переміщення Pitch та Yaw є параметрами прямолінійності ходу лінійної направляючої [6]. Вони змінюються в просторі по всій довжині гвинта і визначають кут зміщення рухливого столика лінійної направляючої в просторі [4]. Таким чином, при виконанні лінійною направляючою з п'єзоелектричним двигуном лінійного переміщення вздовж осі X її реальне переміщення запишеться у вигляді системи рівнянь [5]:

$$\begin{cases} l_{\text{Хреал}} = l_{\text{трим}} \cdot \cos\left(\arctg\sqrt{\text{tg}^2(\text{Pitch}(l)) + \text{tg}^2(\text{Yaw}(l))}\right) + l_{\text{лін}} \\ l_y = l_{\text{трим}} \cdot \sin(\text{Yaw}(l)) \\ l_z = l_{\text{трим}} \cdot \sin(\text{Pitch}(l)) \end{cases}, \quad (4)$$

в якій перше рівняння описує переміщення робочого інструменту вздовж осі руху X, друге та третє рівняння характеризують лінійні зміщення по осям Y та Z відповідно. При цьому кутові відхилення Pitch та Yaw змінюються на всьому діапазоні переміщення лінійної направляючої і є функціями лінійного переміщення.

В системі (4):  $l_{\text{Хреал}}$  – величина реального переміщення вершини інструмента вздовж осі X;  $\text{Pitch}(l)$  та  $\text{Yaw}(l)$  – кути відхилень від прямолінійності рухливого столика направляючої, які є функціями положення гайки на гвинті;  $l_{\text{лін}}$  – лінійне переміщення вздовж вісі X;  $l_y$  – лінійне зміщення вершини робочого інструмента вздовж осі Y,  $l_z$  – лінійне зміщення вершини робочого інструменту вздовж вісі Z.

Для визначення реального переміщення лінійних направляючих мікроманіпуляційних систем з п'єзоелектричним двигуном необхідно

провести послідовне врахування впливу кожного з параметрів. Відповідно до [5]:

$$\begin{cases} l_{x\text{реал}} = l_{\text{трим}} \cdot \cos(\arctg \sqrt{\text{tg}^2(\text{Pitch}(l_{\text{реал.лін}})) + \text{tg}^2(\text{Yaw}(l_{\text{реал.лін}}))}) + l_{\text{реал.лін}} \\ l_y = l_{\text{трим}} \cdot \sin(\text{Yaw}(l_{\text{реал.лін}})) \\ l_z = l_{\text{трим}} \cdot \sin(\text{Pitch}(l_{\text{реал.лін}})) \end{cases}, \quad (5)$$

де

$$l_{\text{реал.лін}} = \frac{f_m(l) \cdot N_{\text{зад}}}{N} + A \cdot \sin\left(\frac{2\pi \cdot N_{\text{зад}}}{N} + \Delta\varphi\right) + \frac{1}{2}(1 - \text{sgn}(\Delta l)) \cdot f_{\text{м.х.}}(l).$$

Так, перше рівняння системи (5) описує реальне лінійне переміщення направляючої вздовж осі переміщення, в даному випадку осі X. Друге і третє рівняння системи відповідають за зміщення вершини інструмента по осях Y та Z відповідно, які відбуваються через наявність у системі відхилень від прямолінійності Pitch та Yaw.

Для розрахунку реального переміщення триосової мікроманіпуляційної системи необхідно врахувати особливості її конструкції та вказані параметри позиціювання кожної направляючої, яка входить до складу системи. Наприклад при здійсненні маніпулятором лінійних переміщень по трьох осях відхилення кожного лінійного переміщення будуть впливати на точність переміщення по інших осях (рис. 1).

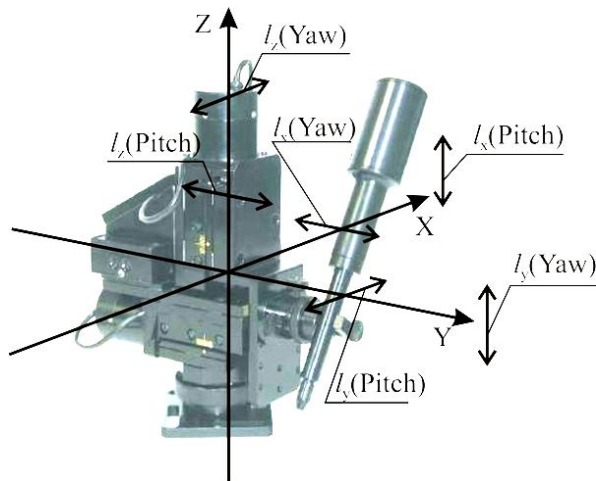


Рис. 1. Вплив кутових переміщень направляючих на лінійні переміщення за іншими осями

Як видно з рис. 1, при переміщенні вздовж осі X кутові зміщення Pitch призведуть до додаткових лінійних зміщень по осі Z, а кутові зміщення Yaw – до додаткових лінійних зміщень по осі Y. Відповідно при лінійних переміщеннях вздовж осей Y та Z їх кутові відхилення Pitch та Yaw зроблять свій небажаний внесок у величину лінійного переміщення по осі X. При цьому неврахування цих зміщень призводить до того, що реальні переміщення кінця робочого інструмента по кожній осі не відповідають заданим. В результаті такого явища виникають небезпечні для біологічних об'єктів ситуації. Тому, розглядаючи триосову систему, необхідно проводити комплексне врахування кутових відхилень від прямолінійності направляючих за кожною з осей на лінійні переміщення за іншими осями.

Оскільки мікроманіпуляційна система, що розглядається, складається з трьох ідентичних лінійних направляючих з п'єзоелектричним двигуном, для складання узагальноної моделі переміщення використовується система (5):

$$\begin{cases} I_{реал}^X = I^X + I_y^X(Pitch) + I_z^X(Yaw) \\ I_{реал}^Y = I^Y + I_z^Y(Pitch) + I_x^Y(Yaw) \\ I_{реал}^Z = I^Z + I_x^Z(Pitch) + I_y^Z(Yaw) \end{cases} \quad (6)$$

де  $I_{реал}^X$ ,  $I_{реал}^Y$ ,  $I_{реал}^Z$  – величини реальних переміщень по кожній з осей мікроманіпулятора;

$I^X$ ,  $I^Y$ ,  $I^Z$  – величини, які характеризують лінійні переміщення по кожній з осей;

складові  $I_y^X(Pitch)$ ,  $I_z^X(Yaw)$  відповідають за зміщення робочого інструмента по координаті X через вплив кутових відхилень Pitch ( $\theta_y$ ) та Yaw ( $\theta_z$ ) при переміщенні по координатах Y та Z відповідно;

складові  $I_z^Y(Pitch)$ ,  $I_x^Y(Yaw)$  відповідають за зміщення робочого інструмента по координаті Y через вплив кутових відхилень Pitch ( $\theta_y$ ) та Yaw ( $\theta_z$ ) при переміщенні по координатах Z та X відповідно;

складові  $I_x^Z(Pitch)$ ,  $I_y^Z(Yaw)$  відповідають за зміщення робочого інструмента по координаті Z через вплив кутових відхилень Pitch ( $\theta_y$ ) та Yaw ( $\theta_z$ ) при переміщенні по координатах X та Y відповідно.

Для врахування лінійних переміщень вздовж однієї з осей переміщень за рахунок зміщень по інших осях переміщень розглянемо приклад переміщення направляючої вздовж осі X. На рис. 2 та 3 наведено проекції лінійного переміщення кінця інструмента вздовж осі

X на площини XOY та XOZ відповідно.

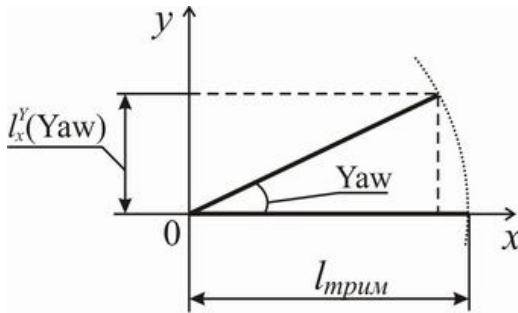


Рис. 2. Проекція лінійного переміщення кінця інструмента на площину XOY

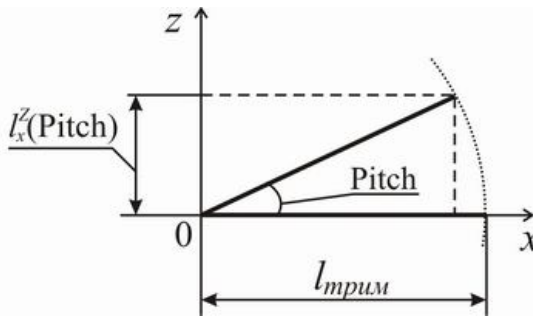


Рис. 3. Проекція лінійного переміщення кінця інструмента на площину XOZ

Як видно з рисунків, лінійні зміщення по осях Y та Z, що спричинені кутковими зміщеннями Pitch та Yaw, які виникають при переміщенні направляючої вздовж осі X  $l_x^y(Yaw)$  та  $l_x^z(Pitch)$  визначаються виразами:

$$l_x^y(Yaw) = l_{трим} \cdot \sin(Yaw(l^x)) \quad (7)$$

$$l_x^z(Pitch) = l_{трим} \cdot \sin(Pitch(l^x)), \quad (8)$$

де  $Yaw(l^x)$  – кутові відхилення Yaw рухливого столика направляючої при переміщенні вздовж осі X, що є функцією лінійного переміщення вздовж осі X;  $Pitch(l^x)$  – кутові відхилення Pitch рухливого столика

направляючої при переміщенні вздовж осі X, що є функцією лінійного переміщення вздовж осі X. Лінійні зміщення  $I_y^Z(Pitch)$ ,  $I_y^X(Pitch)$ ,  $I_z^X(Yaw)$  та  $I_z^Y(Pitch)$  визначаються аналогічним чином.

З урахуванням вищесказаного величина реального переміщення для осі X  $I_{реал}^X$  матиме вигляд:

$$I_{реал}^X = l_{трим} \cdot \cos(\alpha_{сум}^x) + I_{реал.лін}^x + l_{трим} \cdot \sin(Pitch(I_{реал.лін}^y)) + l_{трим} \cdot \sin(Yaw(I_{реал.лін}^z)) \quad (9)$$

де  $\alpha_{сум}^x$  – сумарний кут відхилення рухливого столика направляючої від прямолінійності при переміщенні вздовж осі X. При цьому:

$$\alpha_{сум}^x = \arctg \sqrt{\text{tg}^2(Pitch(I_{реал.лін}^x)) + \text{tg}^2(Yaw(I_{реал.лін}^x))} \quad (10)$$

де  $I_{реал.лін}^x$  – лінійне переміщення рухливого столика направляючої вздовж осі переміщення X з урахуванням параметрів лінійного позиціонування – масштабного коефіцієнта, модуляційної характеристики та мертвого ходу:

$$I_{реал.лін}^x = \frac{f_m^x(I^x) \cdot N_{зад}^x}{N} + A^x \cdot \sin\left(\frac{2\pi \cdot N_{зад}^x}{N} + \Delta\varphi^x\right) + \frac{1}{2}(1 - \text{sgn}(\Delta I^x)) \cdot f_{м.х.}^x(I^x) \quad (11)$$

$I_{реал.лін}^y$ ,  $I_{реал.лін}^z$  – лінійне переміщення рухливого столику направляючої вздовж осей переміщення Y та Z відповідно з урахуванням параметрів лінійного позиціонування, які записуються аналогічно (11).

Таким чином, на основі (6)–(11) загальна модель перемішень, які задаються триосьовою мікроманіпуляційною системою з п'єзоелектричним двигуном матиме вигляд:

$$\begin{cases} I_{реал}^X = I_{трим} \cdot \cos(\alpha_{сум}^x) + I_{реал.лін}^x + I_{трим} \cdot \sin(Pitch(l_{реал.лін}^y)) + \\ \quad + I_{трим} \cdot \sin(Yaw(l_{реал.лін}^z)) \\ I_{реал}^Y = I_{трим} \cdot \cos(\alpha_{сум}^y) + I_{реал.лін}^y + I_{трим} \cdot \sin(Pitch(l_{реал.лін}^z)) + \\ \quad + I_{трим} \cdot \sin(Yaw(l_{реал.лін}^x)) \\ I_{реал}^Z = I_{трим} \cdot \cos(\alpha_{сум}^z) + I_{реал.лін}^z + I_{трим} \cdot \sin(Pitch(l_{реал.лін}^x)) + \\ \quad + I_{трим} \cdot \sin(Yaw(l_{реал.лін}^y)) \end{cases}, \quad (12)$$

де сумарний кут та реальне лінійне переміщення для кожної осі визначається таким чином:

$$\alpha_{сум} = \arctg \sqrt{\text{tg}^2(Pitch(l_{реал.лін}^y)) + \text{tg}^2(Yaw(l_{реал.лін}^z))},$$

$$l_{реал.лін} = \frac{f_m(l) \cdot N_{зад}}{N} + A \cdot \sin\left(\frac{2\pi \cdot N_{зад}}{N} + \Delta\varphi\right) + \frac{1}{2}(1 - \text{sgn}(\Delta l)) \cdot f_{м.х.}(l).$$

На основі отриманої моделі переміщень (12), що задаються триосьовою мікроманіпуляційною системою можна отримати компенсаційну систему поправочних коефіцієнтів, які необхідно ввести в комп'ютеризовану систему керування руху з метою компенсації похибок переміщень та отримання необхідної та заданої величини переміщення. Такі коефіцієнти можна визначити на основі рівняння:

$$\Delta = l_{реал} - l_{зад}, \quad (13)$$

де  $l_{реал}$  – реальне переміщення вершини робочого інструмента, яке отримали на виході мікроманіпуляційної системи при програмуванні переміщення  $l_{зад}$ .

Система поправочних коефіцієнтів має вигляд:

$$\begin{cases} \Delta^X = I_{реал}^X - I_{зад}^X \\ \Delta^Y = I_{реал}^Y - I_{зад}^Y \\ \Delta^Z = I_{реал}^Z - I_{зад}^Z \end{cases}. \quad (14)$$

Таким чином, за допомогою (12) можна визначити реальні значення переміщень вершини робочого інструмента, який закріплено на рухливому столику лінійної направляючої, а за допомогою компенсаційної моделі (14) – поправочні коефіцієнти, які необхідно вносити в систему керування, для отримання запрограмованих



лінійних переміщень. При цьому коефіцієнти  $\Delta^X$ ,  $\Delta^Y$ ,  $\Delta^Z$  є функціями положення прецизійної гайки на прецизійному гвинті.

Дослідження проводились для лінійних прецизійних направляючих з п'єзоелектричним двигуном, які входять до складу мікроманіпуляторів PSF-3, PSF-4 ("Лілея"), NM 3D (DTI, Inc.), PPM 5000 (WPI, Inc.). Такими направляючими є направляючі типу Sb-01 з діапазонами переміщення 10, 25 та 100 мм.

Для оцінки впливу кутових відхилень Pitch та Yaw розглянено вплив цих відхилень на лінійні переміщення вздовж кожної осі. Наприклад на рис. 4 показані графіки залежностей відхилень реальних переміщень кінця робочого інструмента від програмно заданих при русі вздовж осі X, які виникають за рахунок наявності кутових відхилень Pitch по координаті Y та відхилень Yaw по координаті Z.

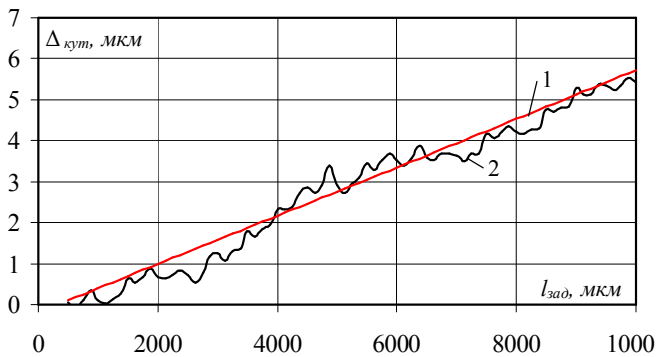


Рис. 4. Залежність відхилень реальних переміщень кінця робочого інструмента по координаті X від програмно заданих за рахунок наявності кутових відхилень по інших координатах:

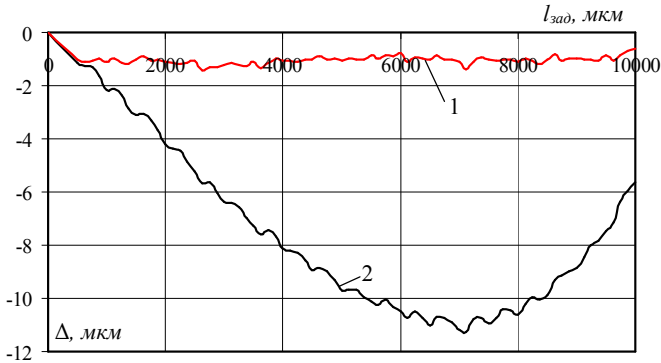
1 – теоретична; 2 – експериментальна

Як видно з рис. 4, кутові відхилення від прямолінійності по кожній координаті вносять свій вплив у лінійні переміщення по інших координатах. При цьому лінійні відхилення за рахунок таких кутових відхилень можуть досягати 6 мкм.

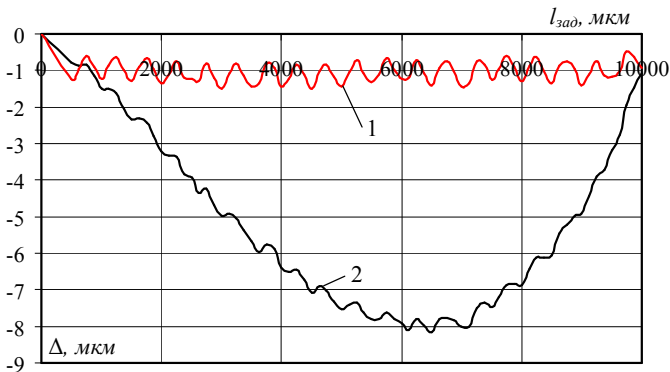
В результаті проведених досліджень отримані характеристики залежностей величин відхилень реальних переміщень кінця робочого інструмента мікроманіпуляційної системи з п'єзоелектричним двигуном від програмно заданих, а також залежності відхилень реальних переміщень при врахуванні компенсаційних коефіцієнтів. Так, на рис. 5 зображені такі залежності для переміщень робочого інструмента по трьох

координатах з урахуванням лінійних параметрів позиціонування та кутових відхилень Pitch ( $\theta_y$ ) та Yaw ( $\theta_z$ ) по кожній осі переміщення.

Як видно з рис. 5, величини відхилень реальних переміщень від програмно заданих для різних координат переміщення можуть перебільшувати 10 мкм.



а) по координаті X



б) по координаті Y

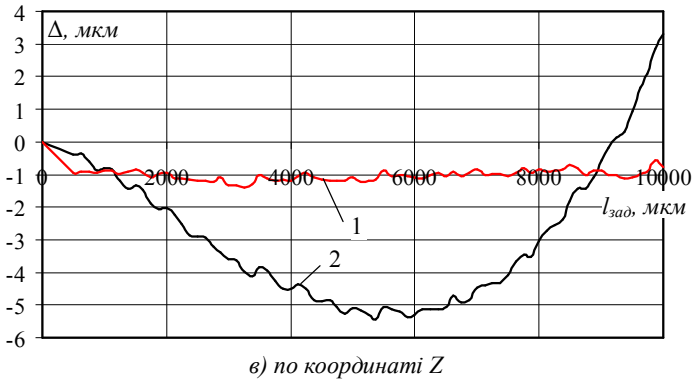


Рис. 5. Залежність відхилень реальних переміщень вершини інструмента від заданих: 1 – з врахуванням компенсаційних коефіцієнтів; 2 – без врахування компенсаційних коефіцієнтів

Враховуючи, що такі системи використовуються для мікрооперацій з живими біологічними об'єктами, зокрема клітини, величини яких набагато менше 10 мкм, наявність таких відхилень негативно впливає на якість досліджень та може призвести до розриву і загибелі досліджуваних об'єктів. Використання компенсаційних коефіцієнтів дає змогу зменшити величину таких відхилень до рівня 1,5 мкм.

**Висновки.** На основі теоретичних та експериментальних досліджень отримана математична модель реальних переміщень вершини робочого інструмента по трьох координатах, що задаються мікроманіпуляційною системою. Модель враховує вплив лінійних та кутових параметрів позиціонування лінійних направляючих, що входять до складу таких систем. При цьому враховується вплив масштабного коефіцієнта, модуляційної характеристики, мертвого ходу, кутових відхилень Pitch та Yaw. На основі математичної моделі реальних переміщень створена компенсаційна модель похибок позиціонування, які необхідно враховувати при програмуванні руху з метою отримання заданих переміщень, що дає змогу знизити похибку позиціонування мікроманіпуляційних систем при переміщенні на всьому діапазоні з 10 мкм до 1,5 мкм.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. Пьезомоторизованный микроманипулятор для клеточных технологий PSF-3, <http://piezomotor.com.ua/product/30>
2. Патент України № 71044, G02B21/32. Петренко С.Ф.

- Мікроманіпулятор. Опубліковано 15.11.2004 Бюл. № 11.
3. *Бєлова А.В.* Контроль точності лінійних переміщень лінійних прецизійних направляючих // Вісник ЖДТУ / Машинобудування. – 2007. – № 4 (43). – С. 3–9.
  4. *Бєлова А.В.* Вимірювання кутових переміщень лінійних прецизійних направляючих // Вісник Національного технічного університету України «КПІ»: Приладобудування. – 2007. – Вип. 37. – С. 90–95.
  5. *Антонюк В.С., Бєлова А.В., Петренко С.Ф.* Підвищення точності позиціонування лінійних направляючих мікроманіпуляційних систем з п'єзоелектричним двигуном // Високі технології в машинобудуванні: Збірник наукових праць НТУ „ХПІ”. – Харків, 2008. – Вип. 2 (17). – С. 12–20.
  6. Defintion of Axes and Angles. Physik Instrumente (PI), Germany 2004. – S. 7,5–7,11.

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

Наукові інтереси:  
– процеси різання.

БЄЛОВА А.В. – м. Київ.

Наукові інтереси:  
– п'єзоелектричні системи.

ПЕТРЕНКО С.Ф. – доктор технічних наук, м. Київ.

Наукові інтереси:  
– процеси різання.

Подано 17.09.2009