

Система контролю кутової стабільності лінійного п'єзоелектричного двигуна

Омелян^f А. В., ORCID [0000-0001-5481-6871](https://orcid.org/0000-0001-5481-6871)

Лисенко^s О. М., д.т.н. проф., ORCID [0000-0003-1051-1149](https://orcid.org/0000-0003-1051-1149)

Національний технічний університет України
"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"
Київ, Україна

Петренко^s С. Ф., д.т.н. проф., ORCID [0000-0002-3588-9378](https://orcid.org/0000-0002-3588-9378)

ТОВ «Лілея»
Київ, Україна

Анотація—В роботі розглянуто систему контролю кутової стабільності лінійного п'єзоелектричного двигуна високої роздільної здатності на базі автоколіматора з цифровою обробкою інформації. На основі цієї системи проведено дослідження прямолінійності ходу лінійного п'єзоелектричного двигуна типу LPM5/BSP-1540SL, а саме його кутових переміщень Pitch(θ_y), Yaw(θ_z) та Roll(θ_x). Показана можливість вимірювання кутової стабільності на великій дистанції переміщення з точністю ~ 5 кут.с. На основі отриманих експериментальних результатів встановлено, що найбільшим змінам зазнають кути Pitch та Roll (~ 3 кут.хвилини). Отримані результати вимірювання кутів Pitch, Yaw та Roll дозволяють провести розробку моделі похибок багатівісової мікроманіпуляційної системи з метою врахування їх при проектуванні системи керування.

Ключові слова — лінійний п'єзоелектричний двигун; система контролю; автоколіматор; кутові хвилини; кутові секунди; CCD-матриця

І. ВСТУП

Перспектива використання лінійних п'єзоелектричних двигунів в оптичних та мікроманіпуляційних системах [1, 2] потребує дослідження їх кутової стабільності в процесі руху лінійного двигуна, оскільки, наприклад, при маніпулюванні в мікро- та нанопросторі кутова нестабільність може призводити до значних похибок.

Параметрами прямолінійності ходу лінійного п'єзоелектричного двигуна є кутові переміщення Roll(θ_x), Pitch(θ_y) та Yaw(θ_z) (рис.1). Roll(θ_x) – кут розвороту каретки двигуна при переміщенні її вздовж вісі X навколо координати X. Pitch(θ_y) – кут розвороту каретки двигуна при переміщенні її вздовж вісі Y навколо координати Y, а Yaw(θ_z) – кут розвороту каретки двигуна при переміщенні її вздовж вісі X навколо координати Z.

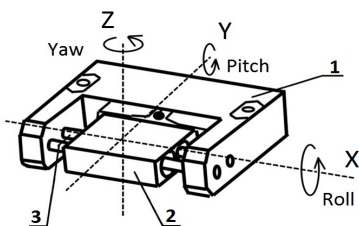


Рис. 1 Схема лінійного двигуна: 1 – основа п'єзоелектричного двигуна з осцилятором; 2 – рухома каретка; 3 – направляюча

Згадані вище кутові переміщення Roll(θ_x), Pitch(θ_y) та Yaw(θ_z) змінюються в просторі по всій довжині лінійної направляючої п'єзоелектричного двигуна і суттєво впливають на додаткові зміщення робочого інструменту мікроманіпуляційної системи.

Контроль цих кутів є досить складною технічною задачею.

Дійсно, робочий інструмент (наприклад, капілярний ін'єктор) може розміщуватися на значній відстані (наприклад, з метою маніпулювання під мікроскопом) від мікроманіпуляційної системи (100-150 мм). При цьому незначні кутові зміщення направляючої лінійного двигуна можуть призвести до значних похибок при лінійному маніпулюванні.

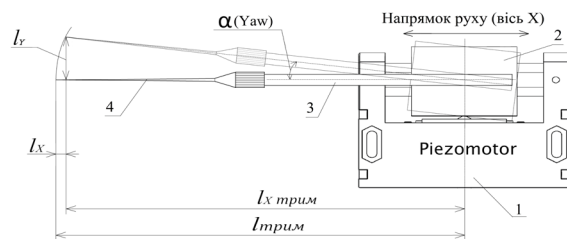


Рис. 2 Схема лінійного двигуна з робочим інструментом: 1 – лінійний п'єзоелектричний двигун; 2 – рухома каретка; 3 – тримач



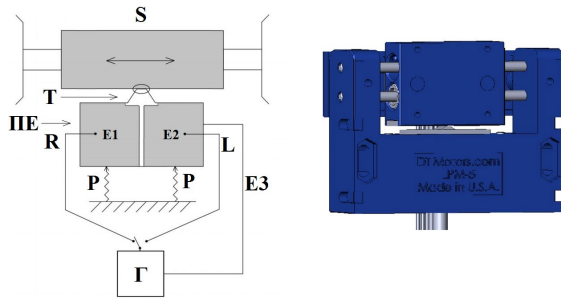


Рис. 3 Схема лінійного п'єзоелектричного двигуна класу LPM-5 з прямокутним резонатором квазірезонансного типу: S – рухома каретка; PE – п'єзоелемент; E1, E2, E3 – електроди п'єзоелемента; T – штовхач; P – пружина; Г – генератор збудження.

Для прикладу нижче на рис.2 показано вплив кута $Yaw(\theta_z)$ на зміщення робочого інструменту мікроманіпуляційної системи при русі вздовж вісі X. Наведена схема включає лінійний п'єзоелектричний двигун 1, який містить рухома каретку 2 із закріпленим на ній кварцовим ін'єктором 4 через тримач 3. При цьому $l_{трим}$ – довжина тримача та інструмента, які закріплені на каретці лінійного п'єзоелектричного двигуна, $l_{Хтрим}$ – довжина проекції тримача на вісь переміщення при кутовому зміщенні каретки лінійного п'єзоелектричного двигуна. Фактично величина $l_{Хтрим}$ відображає реальне переміщення кінця робочого інструмента вздовж вісі лінійних переміщень (вісі X). Кут α – величина кутового зміщення каретки, l_Y – лінійне зміщення робочого кінця інструмента по вісі Y.

Як видно з рис.2 величина $l_{Хтрим}$ дорівнюватиме: $l_{Хтрим} = l_{трим} \times \cos \alpha$

При цьому, зміщення робочого інструменту l_X по вісі X буде дорівнювати: $l_X = l_{трим} - l_{Хтрим}$, а зміщення l_Y по вісі Y: $l_Y = l_{трим} \times \sin \alpha$

Не важко показати, що при зміні кута на одиниці кутових хвилин зміщення кінця робочого інструменту може досягати десятки мікрометрів, що необхідно враховувати при маніпулюванні в мікро- та нанопросторі.

Вирішення даної проблеми може йти по шляху установки більш точних (дуже дорогих) прецизійних направляючих, хоча тут часто виникають масо-габаритні протиріччя, які пов'язані зі збільшенням габаритів системи. Але навіть встановивши такі направляючі не можна однозначно відповісти на питання, як поведе себе система щодо кутів Pitch, Yaw і Roll. Це завдання багатofакторне і визначається рівнем навантаження, ступенем збудження п'єзоелектричної системи, характером і рівнем прижиму п'єзоелемента до направляючої, пружністю самої системи, температурними ефектами і т.д. Тому, достовірна інформація про кутову стабільність може бути отримана тільки на основі натурних експериментальних досліджень.

Вказане вище визначає актуальність цієї роботи та диктує необхідність створення системи контролю

стабільності лінійного п'єзоелектричного двигуна, яка б здійснювала вимірювання його кутових переміщень Roll(θ_x), Pitch(θ_y) та Yaw(θ_z) із використанням автоколімаційного методу та послідуоючої цифрової обробки інформації.

Поставлена мета досягається за рахунок вирішення наступних задач:

- розроблення структури системи контролю кутової стабільності лінійного п'єзоелектричного двигуна;
- створення установки системи, алгоритмів її функціонування та проведення експериментальних досліджень.

Дослідження системи виконуватиметься на лінійному п'єзоелектричному двигуні класу LPM-5 [3, 4, 5] з лінійною направляючою ІКО BSP-1540SL [6]. Схема такого двигуна наведена нижче на рис.3 [7].

II. СИСТЕМА КОНТРОЛЮ КУТОВОЇ СТАБІЛЬНОСТІ ДВИГУНА

З метою контролю кутів Yaw(θ_z), Pitch(θ_y) та Roll(θ_x) лінійного п'єзоелектричного двигуна розроблено спеціальну систему контролю, яка дозволяє вимірювати кутові відхилення каретки п'єзоелектричного двигуна в залежності від її положення. Система основана на використанні відомого автоколімаційного методу [8, 9], який забезпечує вимірювання кутової розбіжності між власною оптичною віссю автоколіматора та нормаллю до площини дзеркально-відбиваючої поверхні. Структурна схема розробленої системи наведена на рис. 4.

Для вимірювання кутового відхилення каретки двигуна запропоновано використання автоколіматора АК-0,5У з оптичною роздільною здатністю 0,5 кут. с. Шкала автоколіматора проградуєвана з кроком 0,5 кутових хвилин (30 кут. с), а його інформативний оптичний репер виконано у вигляді зеленого перехрестя. Ця особливість в подальшому використана для визначення його положення на зображенні, отриманого за допомогою CCD-матриці OV5647. Зображення, яке отримувалося з матриці, має роздільну здатність 1024x768 пікселів. На зображенні з матриці відстань між сусідніми мітками (кроком шкали автоколіматора) становить ~35 пікселів, тобто, електронна роздільна здатність матриці близька до ~1кут. с.

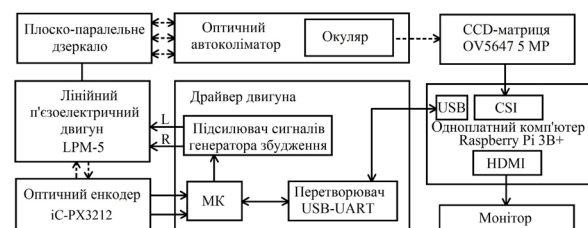


Рис. 4 Структурна схема системи контролю

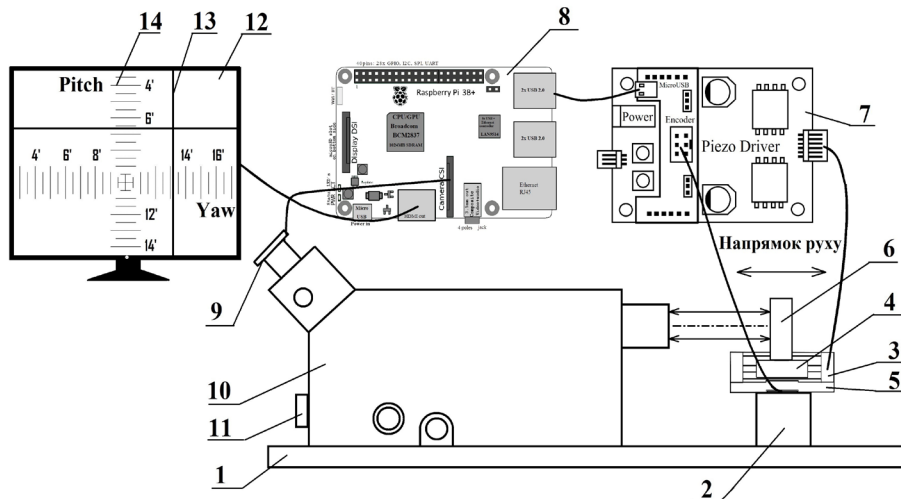


Рис. 5 Схема експериментальної установки системи: 1 – станина; 2 – стійка для юстування двигуна; 3 – лінійний п’єзоелектричний двигун; 4 – рухома каретка; 5 – датчик зворотного зв’язку (енкодер); 6 – плоско-паралельне дзеркало; 7 – драйвер п’єзоелектричного двигуна; 8 – одноплатний комп’ютер; 9 – CCD-матриця; 10 – автоколіматор; 11 – освітлювальна система; 12 – монітор; 13 – інформативний репер; 14 – шкала автоколіматора

Для керування швидкістю двигуна та контролю його положення використано оптичний енкодер іС-PX3212 [10] з роздільною здатністю 2,6мкм. В системі контролю використано також одноплатний комп’ютер RaspberryPi 3B+ [11], що дозволяє виконувати контроль двигуном через протокол передачі даних USB, отримувати зображення через протокол передачі MIPI-CSI, обробляти зображення з матриці, а також виводити його на монітор через протокол HDMI.

Схема створеної на основі запропонованої структури експериментальної установки системи наведена на рис.5.

Вимірювання кутових переміщень каретки п’єзоелектричного двигуна 3, тобто вимірювання прямолінійності ходу за допомогою автоколіматора 10 проводилось наступним чином. Плоско-паралельне дзеркало 6 закріплювалось на каретці 4 двигуна 3, який через стійку для юстування 2 кріпився до станини 1, де також розміщувався автоколіматор 10 з освітлювальною системою 11. Автоколімаційна зорова труба встановлювалась перпендикулярно віддзеркалюючій площині дзеркала. При юстуванні системи в полі зору формувалася шкала з кутовими поділками та інформативний репер 13 автоколіматора 10 у вигляді перехрестя. До зорової труби автоколіматора монтувалась CCD-матриця 9, яка перетворювала зображення, отримане за допомогою автоколіматора 10 і передавала його в одноплатний комп’ютер 8 для виведення зображення на монітор 12, а також для послідовних обробки та аналізу. Драйвер 7 п’єзоелектричного двигуна, виконуючи команди комп’ютера 8, здійснював контроль напрямку руху, положення та швидкості двигуна 4, які відслідковувалися за допомогою датчика зворотного зв’язку – енкодера 5, встановленого на двигуні. Для вимірювання кута Roll дзеркало 6 та двигун 4 було розвернуто на 90^0 відносно зорової труби автоколіматора 10.

Перед початком проведення експерименту каретка 4 двигуна 3 встановлювалась в центральне “0” положення, а перехрестя реперу 13 було суміщено зі шкалою автоколіматора 10 за допомогою гвинтів юстування.

III. АЛГОРИТМ ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ

Алгоритм проведення експерименту складався з 3 основних етапів Stage (рис.6):

- 1) -Stage I: виконувалася реєстрація зображення репера автоколіматора через кожні 260 мкм (100 імпульсів енкодера) вліво на відстань 12мм (47 циклів), починаючи від центрального положення (“0”);
- 2) -Stage II: виконувалася реєстрація зображення репера автоколіматора через кожні 260 мкм (100 імпульсів енкодера) вправо на відстань 24мм (94 цикли);
- 3) -Stage III: виконувалася реєстрація зображення репера автоколіматора через кожні 260 мкм (100 імпульсів енкодера) вліво на відстань 12мм (47 циклів).

Швидкість двигуна вибрано рівною 0,1мм/с з метою зменшення ймовірності впливу ударно-вібраційних шумів на результати вимірювання [7].

Визначення координат горизонтальної лінії репера виконувалось шляхом пошуку максимального градієнту яскравості пікселів в двох стовпчиках зображення – вертикальних лініях, які знаходилися поблизу лівого (номер 190) та правого (номер 880) країв зображення. Обрані лінії не перетинали шкалу автоколіматора, оскільки це могло б ускладнити пошук.

Вздовж цих ліній по черзі, починаючи з 5-го пікселя і закінчуючи 763-м, за допомогою оператора Sobel-Feldman [12] розмірністю 3×3 , виконувалася пошук

значення градієнту для кожного пікселя. Використання даного оператора обумовлено простотою його реалізації, швидкодією та достатньою точністю отриманого результату. Для кожної лінії визначалися координати пікселя, який містив максимальне значення градієнту. Для визначення результуючої координати положення горизонтального реперу розраховувалося середнє значення для двох прямих, що дозволило зменшити вплив можливого не паралельного встановлення CCD-матриці по відношенню до реперу та шкали автоколіматора. При цьому оцінювана інструментальна похибка склала 5 кут. с., що повністю задовольняло умовам експерименту.

Пошук вертикального реперу проводився аналогічним чином за однією лише відмінністю, що пошук максимального градієнту яскравості здійснювався по горизонтальним лініям (номери 230 та 500), починаючи з 5-го пікселя і закінчуючи 1020-м пікселем.

IV. РЕЗУЛЬТАТИ ПРОВЕДЕНОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ

На основі проведених вимірювань та обробки інформації отримано графіки зміни кута відхилення

Pitch (Рис.8), Yaw (Рис.9) та Roll (Рис.10) в залежності від положення каретки двигуна.

Із отриманих результатів випливає, що найбільші зміни кута від крайніх положень каретки мають Roll і Pitch (~3 кут.хвилини), а флуктуації кута на дистанції ~1мм можуть досягати ~1 кут. хвилини. Для кута Yaw ці показники складають ~1 кут.хвилини та ~0,5 кут.хвилини відповідно.

Менші зміни для кута Yaw пояснюються додатковим піджимом каретки перпендикулярно напрямку руху з боку п'єзоелемента ПЕ за допомогою пружин Р (рис.3).

Із наведеного вище також витікає, що зміщення робочого інструменту l_Y для кута Yaw на дистанції 1 мм (при маніпулюванні в полі зору мікроскопа) може досягати ~20мкм, що необхідно враховувати при керуванні.

Врахування всіх кутів дозволяє отримати більш вагому модель похибок мікроманіпулятора при виконанні керування в мікро- та нанопросторі.

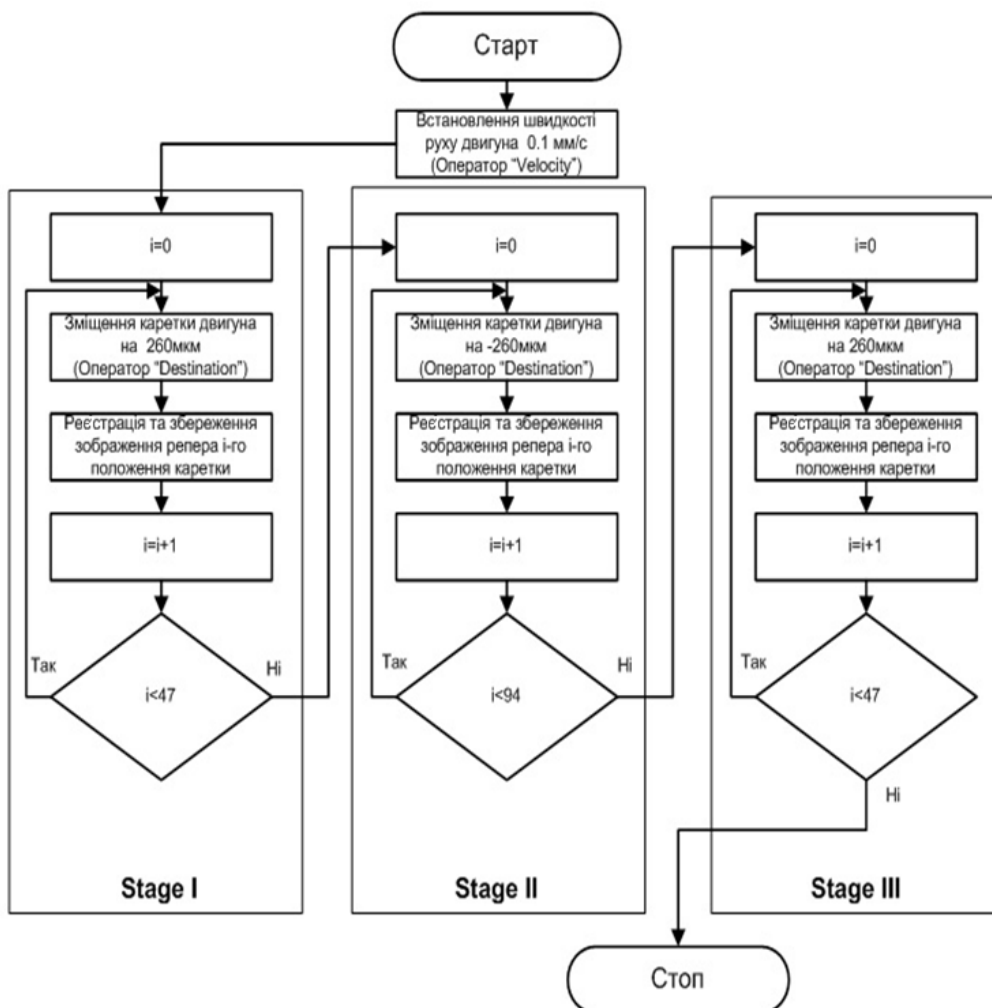


Рис. 6 Алгоритм проведення експерименту

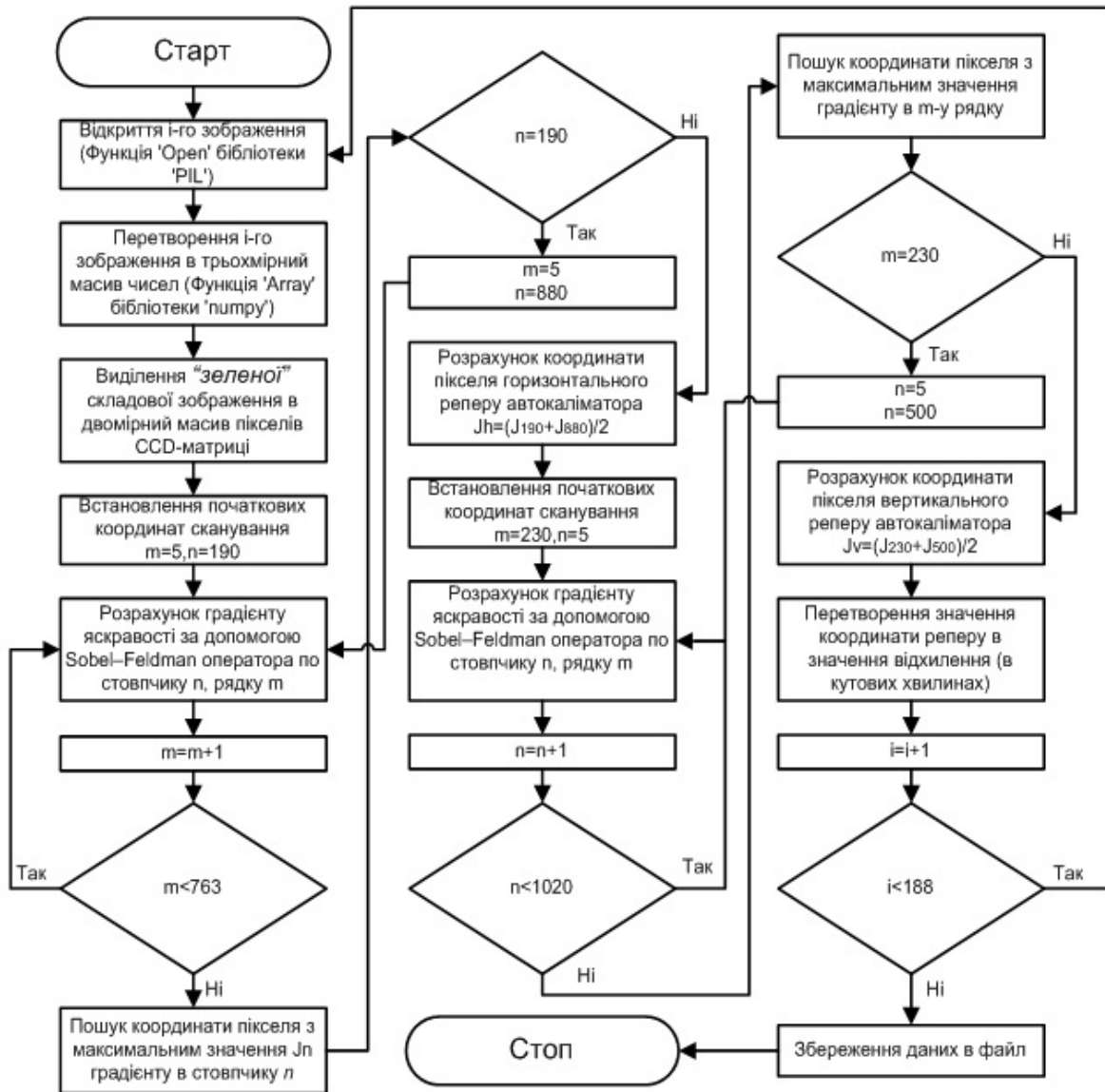


Рис. 7 Алгоритм встановлення координат реперу по зображенню з автокалібратора

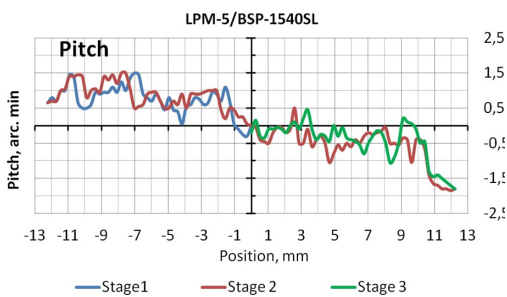


Рис. 8 Залежність кута Pitch від положення каретки

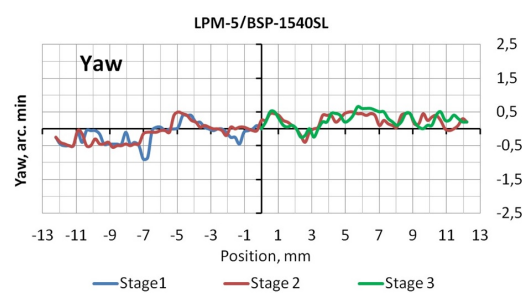


Рис. 9 Залежності кута Yaw від положення каретки

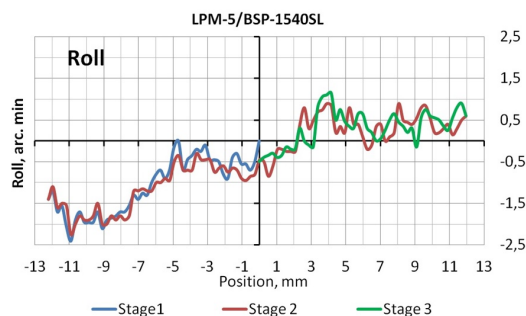


Рис. 10 Залежності кута Roll від положення каретки

ВИСНОВКИ

В роботі розроблено та досліджено систему контролю кутової стабільності лінійного п'єзоелектричного двигуна, яка забезпечує вимірювання його кутових переміщень Roll(θ_x), Pitch(θ_y) та Yaw(θ_z) із використанням автоколімаційного методу та подальшої цифрової обробки інформації з точністю ~ 5 кут. с, що дає змогу її використовувати не лише для контролю кутових переміщень лінійних п'єзоелектричних двигунів, а й інших прецизійних систем подібного класу. Розроблені алгоритмічні та програмні рішення обробки зображень в створеній системі забезпечують вимірювання кутової нестабільності п'єзоелектричного двигуна в режимі реального часу, що дало змогу суттєво скоротити час проведення експерименту. На основі отриманих експериментальних результатів змінювання кутів Pitch, Yaw та Roll встановлено, що найбільшим змін зазнають кути Pitch та Roll (~ 3 кут.хвилини). Це обумовлено конструктивними особливостями досліджуваного п'єзоелектричного двигуна.

Отримані результати вимірювання кутів Pitch, Yaw та Roll дозволяють провести розробку моделі похибок багатовісрової мікроманіпуляційної системи з метою врахування їх при проектуванні системи керування, що може бути покладено в основу подальших досліджень в цьому напрямку.

Надійшла до редакції 07 грудня 2019 р.

УДК 621.2

Система контроля угловой стабильности линейного пьезоэлектрического двигателя

Омелян^f А. В., ORCID [0000-0001-5481-6871](https://orcid.org/0000-0001-5481-6871)

Лысенко^s А. Н., д.т.н. проф., ORCID [0000-0003-1051-1149](https://orcid.org/0000-0003-1051-1149)

Национальный технический университет Украины

"Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского"

Киев, Украина

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- [1] V. Koledov, V. Shavrov, S. Gradowski and etc., " Practical System for Nanomanipulation," in *International Conference on Manipulation, Manufacturing and Measurement on the Nanoscale (3M-Nano)*, Taipei, 2014. DOI: [10.1109/3M-NANO.2014.7057347](https://doi.org/10.1109/3M-NANO.2014.7057347)
- [2] S. F. Petrenko, P'ezoe`lektricheskij dvigatel` v priborostroenii, Kornijchuk, 2002.
- [3] V. Zhelyaskov, "Piezoelectric Quasi-Resonance Linear Motors Based on Acoustic Standing Wave With Combined Resonator". USA Patent 8,710,719 B2, 2014.
- [4] "Digital International Technology," USA: Digital International Technology, 2020. [Online]. Available: <http://www.dtimotors.com>. [Accessed 20 01 2020].
- [5] S. Petrenko, V. Lavrinenko and V. Zhelyaskov, "Piezoelectric linear motor". USA Patent 9,705,425 B2, 2017.
- [6] "IKO International," USA: IKO International, Inc. / Nippon Thompson Co., Ltd, 2019. [Online]. Available: <http://www.ikont.com/>. [Accessed 20 01 2020].
- [7] S. Petrenko, A. Omelian, O. Lysenko and V. Antonyuk, "Doslidzhennya suputn`ogo udarno-vibracziynogo shumu p'ezoelektrichnogo dviguna v rezhimi mikro- ta nanoshvidkostej," *NTUU "KPI"*, *Seri`ya Radi`otekhnika*, no. 78, pp. 67-73, 2019. DOI: [10.20535/RADAP.2019.78.67-73](https://doi.org/10.20535/RADAP.2019.78.67-73)
- [8] R. Faty`khova, Kontrol` optiko-mekhanicheskikh priborov: Uchebnoe posobie, Moskva: Mashinostroenie, 1988.
- [9] E. Leun and M. Korenev, "Ustrojstvo dlya izmereniya otklonenij ot pryamolinejnosti". Rosijskaya Federacziya Patent 96103210, 20 04 1998.
- [10] "iC Haus," Germany: iC Haus, 2020. [Online]. Available: <http://www.ichaus.de>. [Accessed 20 01 2020].
- [11] "Raspberry PI," UK: Raspberry PI, 2020. [Online]. Available: <http://www.raspberrypi.org>. [Accessed 20 01 2020].
- [12] R. Gonsales and R. Vuds, Czifrovaya obrabotka izobrazhenij, Moskva: Tekhnosfera, 2005.



Петренко^с С. Ф., д.т.н. проф., ORCID [0000-0002-3588-9378](https://orcid.org/0000-0002-3588-9378)

ООО«Лілея»
Київ, Україна

Аннотація—В роботі розглянута система контролю кутової стабільності лінійного п'єзоелектричного двигача високої роз-раздільного здатності на базі автоколіматора з цифровою обробкою інформації. На основі цієї системи проведено дослідження прямокутності ходу лінійного п'єзоелектричного двигача типу LPM5 / BSP-1540SL, а саме його кутових переміщень Pitch (θ_y), Yaw (θ_z) і Roll (θ_x). Показано можливість вимірювання кутової стабільності на великій відстані переміщення з точністю ~ 5 кут.с. На основі отриманих експериментальних результатів уста-новлено, що найбільшим змінам піддаються кути Pitch і Roll (~ 3 кут.хвилин). Отримані результати вимірювання кутів Pitch, Yaw і Roll дозволяють провести розробку моделі погрешностей багатовисової мікрomanipуляційної системи з метою урахування їх при проектуванні системи управління.

Ключові слова - лінійний п'єзоелектричний двигач; система контролю; автоколіматори; кутові мінуты; кутові секунды; CCD-матриця

UDC 621.2

Angular Stability Control System for Linear Pie-Zoelectric Motor

A. V. Omelian^f, ORCID [0000-0001-5481-6871](https://orcid.org/0000-0001-5481-6871)

O. M. Lysenko^с, Dr.Sc.(Eng.) Prof., ORCID [0000-0003-1051-1149](https://orcid.org/0000-0003-1051-1149)

National technical university of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv polytechnic institute"
Kyiv, Ukraine

S. F. Petrenko^с, Dr.Sc.(Eng.) Prof., ORCID [0000-0002-3588-9378](https://orcid.org/0000-0002-3588-9378)

Lileia LTD
Kyiv, Ukraine

Abstract—The paper is devoted to the system for measuring the stability of the angles Yaw (θ_z), Pitch (θ_y) and Roll (θ_x) of a linear piezoelectric motor type LPM5 / BSP-1540SL, which allowed to measure the angular deviations of the piezoelectric carriage depending on its position.

The system was based on the use of the auto-collimation method, which provided the measurement of the angular discrepancy between its own optical axis of the auto-collimator and the normal to the plane of the mirror-reflecting surface.

To measure the angular deviation of the carriage of the engine was used AK-0,5U auto-collimator with an optical resolution of 0.5 arc seconds. The auto-collimator scale was marked up in steps of 0.5 arcmin (30 arcsec), and its informative optical reference was made as a green intersection. This feature was later used to determine its position on the image obtained with the CCD matrix OV5647. The image obtained from the matrix had a resolution of 1024x768 pixels. In the matrix image, the distance between adjacent labels (auto-collimator scale step) was ~ 35 pixels, that is, the electronic resolution of the matrix was near to ~ 1 arc second.

For control the engine speed and its position was used an optical encoder iC-PX3212 with a resolution of 2.6 μm . The control system also includes a single-board computer RaspberryPi 3B + , which allowed to control the engine via USB data protocol, receive images via MIPI-CSI protocol, process images from the array, and output it to the monitor via HDMI. During the experiment, 376 images were obtained (188 images when measuring Pitch, Yaw angles, and 188 images when measuring Roll angle). Image processing was performed using PIL (image) and "numpy" libraries in Python programming language.

Was demonstrated the possibility of measuring angular stability over a large distance of movement with an accuracy of 5 arc.sec. On the basis of the experimental results obtained, it was found that most changed the angles of Pitch and Roll (~ 3 angular minutes). The results obtained by measuring the angles of Pitch, Yaw and Roll make it possible to develop a model of errors of a multi-axis micromanipulation system in order to take them into account when designing the control system.

Keywords — linear piezoelectric motor; control system; auto-collimator; angular minutes; angular seconds; CCD-matrix

