

УДК 621.313
DOI [https://doi.org/10.15589/znp2026.1\(503\).1.32](https://doi.org/10.15589/znp2026.1(503).1.32)

MICROMANIPULATOR TRACKING SYSTEM BASED ON A PIEZOELECTRIC MOTOR

СЛІДКУВАЛЬНА СИСТЕМА МІКРОМАНІПУЛЯТОРА НА ОСНОВІ П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНОГО ДВИГУНА

Dmitry U. Shareyko
dshareyko.mk@gmail.com
ORCID: 0009-0000-6460-9331

Ivan S. Biliuk
ivanbilyuk@gmail.com
ORCID: 0000-0003-1654-7468

Oleg V. Savchenko
savchenko1984@gmail.com
ORCID: 0000-0002-9718-7857

Д. Ю. Шарейко,
канд. техн. наук, доцент

І. С. Білюк,
канд. техн. наук, доцент

О. В. Савченко,
завідувач лабораторіями

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв

Abstract. Purpose. The purpose of this study is to develop and theoretically substantiate a tracking control system for a micromanipulator based on a piezoelectric motor, taking into account its dynamic properties and hysteretic nonlinearity, as well as to determine the conditions for ensuring absolute stability when forming nano- and micro-displacements. **Methodology.** The study is based on the methods of automatic control theory, mathematical modeling and analysis of nonlinear systems. To describe the dynamics of the piezoelectric transducer, the wave equation was used taking into account damping, the inverse piezoelectric effect equation and the Laplace transform in order to obtain transfer functions for longitudinal and transverse piezoelectric effects. The analysis of absolute stability was carried out using the frequency criterion for systems with sector hysteretic nonlinearity. The study of the system was carried out by analyzing the structural diagram and timing diagrams of the formation of control pulses. **Results.** The transfer functions of the composite piezoelectric transducer are obtained taking into account the inertial load and their parameters in the operating frequency range are determined. The stationary set of equilibrium positions is analytically established and the width of the quiescent zone for the longitudinal and transverse piezoelectric effects is determined. Sufficient conditions for the absolute stability of the control system are formulated, which can be taken into account when implementing algorithms in microcontrollers in software. A control principle based on regulating the duration of the power pulses is proposed, which ensures the formation of controlled microsteps and their grouping by speed. **Scientific novelty.** It consists in a complex combination of the dynamic model of the piezoelectric transducer with an analytical description of hysteresis nonlinearity and determination of the conditions for the absolute stability of the tracking system, as well as in deriving expressions for the width of the quiescent zone for different types of piezoelectric effects. **Practical significance.** The proposed control system can be used in the design of high-precision micromanipulators and piezoelectric electric drives operating in nano- and micropositioning modes, with increased requirements for accuracy, stability and controllability under conditions of disturbing influences.

Key words: piezoelectric motor; micromanipulator; tracking system; transfer function; hysteresis; absolute stability; stability criterion; nano- and microdisplacement; pulse control; electric drive.

Анотація. Мета. Метою даного дослідження є розроблення та теоретичне обґрунтування слідкувальної системи керування мікроманіпулятором на основі п'єзоелектричного двигуна з урахуванням його динамічних властивостей і гістерезисної нелінійності, а також визначення умов забезпечення абсолютної стійкості при формуванні нано- та мікропереміщень. **Методика.** Дослідження базується на методах теорії автоматичного керування, математичного моделювання та аналізу нелінійних систем. Для опису динаміки п'єзоперетворювача використано хвильове рівняння з урахуванням загасання, рівняння зворотного п'єзоефекту та перетворення Лапласа з метою отримання передаточних функцій при подовжньому і поперечному п'єзоефектах. Аналіз абсолютної стійкості проведено із застосуванням частотного критерію для систем із секторною гістерезисною

нелінійністю. Дослідження роботи системи здійснено шляхом аналізу структурної схеми та часових діаграм формування керуючих імпульсів. *Результати.* Отримано передаточні функції складеного п'єзоперетворювача з урахуванням інерційного навантаження та визначено їх параметри в робочому діапазоні частот. Аналітично встановлено стаціонарну множину положень рівноваги та визначено ширину зони спокою для подовжнього й поперечного п'єзо ефектів. Сформульовано достатні умови абсолютної стійкості системи керування, які можуть бути враховані при програмній реалізації алгоритмів у мікроконтролерах. Запропоновано принцип керування на основі регулювання тривалості імпульсів живлення, що забезпечує формування керованих мікрокроків і їх групування за швидкістю. *Наукова новизна.* Полягає у комплексному поєднанні динамічної моделі п'єзоперетворювача з аналітичним описом гістерезисної нелінійності та визначенням умов абсолютної стійкості слідувальної системи, а також у виведенні виразів для ширини зони спокою при різних типах п'єзо ефекту. *Практична значимість.* Запропонована система керування може бути використана при проектуванні високоточних мікроманіпуляторів і п'єзоелектричних електроприводів, що працюють у режимах нано- та мікропозиціонування, з підвищеними вимогами до точності, стійкості та керованості в умовах збурюючих впливів.

Ключові слова: п'єзоелектричний двигун; мікроманіпулятор; слідувальна система; передаточна функція; гістерезис; абсолютна стійкість; критерій стійкості; нано- та мікропереміщення; імпульсне керування; електропривод.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Слідувальна система автоматичного керування мікроманіпулятора змінює режим роботи від безперервного обертання вала виконавчого двигуна до кутового переміщення. При цьому мікропереміщення однозначно зав'язане на швидкість і навики. Тому актуальним стало завдання забезпечення можливості одночасного формування малих одиничних мікропереміщень і їх угруповання за швидкістю (часом). Задачу можна розв'язати за рахунок використання п'єзоелектричного двигуна, як показано в роботі Brahim M. [1]. Зміна величини кроку проводиться за рахунок тривалості керованого імпульсу живлення залежно від величини амплітуди вхідного сигналу розузгодження, як описано у роботі Gu G.-Y., Zhu L.-M., Su C.-Y., Ding H. та Fatikow S. [2]. Величина цього кроку може змінюватися в значних межах від сотень кутових градусів, одиниць кутових секунд до мікропереміщень.

Сучасні системи керування п'єзоелектричними двигунами мають мікропроцесорне керування, проте потребують головного зворотного зв'язку внаслідок повзучості та вібрацій, як показано у роботах Brahim M. [1], Gu G.-Y., Zhu L.-M., Su C.-Y., Ding H. та Fatikow S. [2], а також Tavallaei M. A., Atashzar S. F. та Drangova M. [3]. Використання головного зворотного зв'язку у цьому випадку призводить до тривалих перехідних процесів. До того ж система керування п'єзоелектричним двигуном нелінійна й притаманна суттєва нелінійність типу гістерезис. Отже виникають небезпека виникнення автоколивань і проблеми зі стійкістю. Проте саме головний зворотний зв'язок може покращити точність системи автоматичного керування при переході від обертового режиму до крокового. Отже ставиться задача створити слідувальну систему керування п'єзоелектричним двигуном, визначити умови її стійкості та підтвердити адекватність розрахунків.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

У роботі авторів Merry R. J., De Kleijn N. C., Van de Molengraft M. J. G. [4] розглянута система керування п'єзоелектричного двигуна з ПІД регулятором. Представлені результати експериментальних досліджень показують суттєве перерегулювання, а також усталену помилку керування при зміні амплітуди і фази керуючого впливу. Зменшення, але не повне усунення зазначених недоліків у роботі Golubovic E., Uzunovic T., Zhakypov Z. та Sabanovic A. [5] досягається за рахунок застосування адаптивного регулятора. У роботах Merry R. J., Holierhoek J. L., Van de Molengraft J. G., Zhakypov Z., Golubovic, E., Uzunovic T. та Sabanovic A. [6–8] розглядається покращення показників якості керування за рахунок зміни коефіцієнта передачі розімкнутої системи автоматичного керування. Проте у цих роботах не розглядається як у динаміці впливає раптова зміна навантаження на показники якості керування. У роботі Szufnarowski F. та Schneider A. [9] розглядається поведінка електропривода в умовах навантаження та визначена залежність між силою та швидкістю двигуна, проте дослідження виконано для лінеаризованої задачі. Адаптивне керування було запропоновано у роботі Škorc G., Šafarič R. та Rojko A. [10], де залежність швидкості від перерегулювання визначається на основі експериментальних тестів.

Отже можливість покращення показників якості керування обмежені залежностями встановленими в діапазоні нанокроку, що випробується. Для компенсації збурень, які не залежать від часу, використовується повторне керування у роботах Merry R., Kessels D., Van de Molengraft M. J. G. та Steinbuch M. [11, 12], а також Škorc G., Čas, J., Brezovnik S. та Šafarič R. [13]. У всіх означених роботах точність підвищується лише у часткових випадках. Проте оскільки система автоматичного керування нелінійна то зовнішній вплив може привести не лише до погіршення показників

якості керування, но і створити проблеми зі стійкістю. Тому потрібно обов'язково враховувати в алгоритмі керування залежності які гарантують абсолютну стійкість системи керування п'єзоелектричним двигуном.

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Попри активний розвиток теорії та практики п'єзоелектричних електроприводів, проблема забезпечення високоточного та стійкого керування в умовах суттєвої нелінійності залишається повністю не розв'язаною. Існуючі дослідження переважно спрямовані на покращення окремих показників якості шляхом параметричної оптимізації або застосування спеціалізованих алгоритмів для конкретних конструкцій приводів, що не формує універсального підходу до синтезу систем керування. Недостатньо узагальненими залишаються питання комплексного врахування динамічних властивостей п'єзоперетворювача, його гістерезисної нелінійності та впливу навантаження в межах єдиної математичної моделі. У більшості робіт нелінійні ефекти або спрощуються, або аналізуються ізольовано від задач забезпечення гарантованої стійкості замкнутої системи.

Також не отримано загальних аналітичних умов, які б дозволяли забезпечити абсолютну стійкість слідкувальних систем п'єзоелектричних електроприводів при переході між різними режимами роботи та дії збурюючих факторів. Відсутність такого формалізованого підходу обмежує можливість прогнозування поведінки системи на етапі проєктування.

Отже, невирішеною частиною загальної проблеми є створення узагальненої моделі та методики синтезу системи керування п'єзоелектричним електроприводом, яка одночасно враховує його динамічні та нелінійні властивості та забезпечує гарантовану стійкість і точність позиціонування.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою даного дослідження є розроблення та теоретичне обґрунтування слідкувальної системи керування мікроманіпулятором на основі

п'єзоелектричного двигуна з урахуванням його динамічних властивостей і гістерезисної нелінійності, а також визначення умов забезпечення абсолютної стійкості при формуванні нано- та мікропереміщень.

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Об'єкт дослідження – процеси керування та позиціонування в слідкувальній системі мікроманіпулятора на основі п'єзоелектричного електропривода в умовах дії нелінійностей та інерційного навантаження.

Предмет дослідження – математичні моделі, динамічні характеристики та умови абсолютної стійкості замкнутої системи керування п'єзоелектричним двигуном з урахуванням гістерезисної нелінійності п'єзоперетворювача та імпульсного способу формування мікропереміщень.

Методи дослідження. У роботі використано методи теорії автоматичного керування, математичного та структурного моделювання нелінійних динамічних систем. Для опису роботи п'єзоперетворювача застосовано хвильове рівняння з урахуванням загасання та рівняння зворотного п'єзоефекту. Передаточні функції отримано на основі операційного методу з використанням перетворення Лапласа. Аналіз стійкості замкнутої системи виконано із застосуванням частотних критеріїв абсолютної стійкості для систем із секторною нелінійністю. Оцінювання працездатності запропонованої структури здійснювалося шляхом аналізу структурної схеми системи керування та часових діаграм формування керуючих імпульсів.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

На рис. 1 представлена блок-схема електропривода.

Система містить: п'єзоелектричний двигун 1 реверсивного обертання, представлений у вигляді двох незалежних п'єзоелектричних двигунів однонаправленого обертання PM1 і PM2 із загальним валом і їх блоками живлення PS1 і PS2 відповідно; датчик зворотного зв'язку 2; блок порівняння 3; блок управління реверсом 4; блок регулювання тривалості кроку 5; генератор

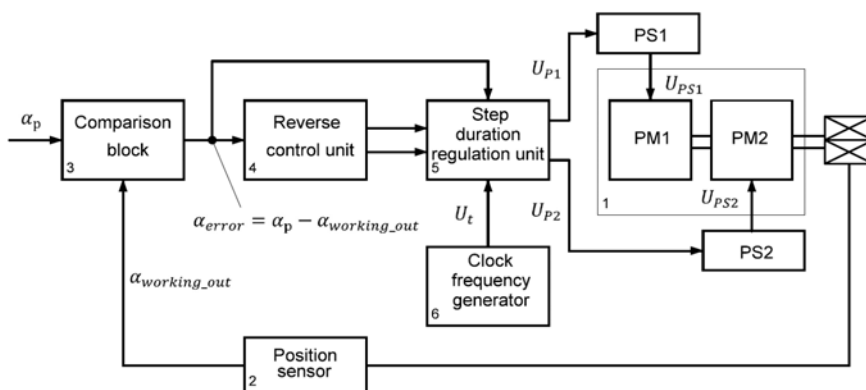


Рис. 1. Блок-схема слідкувальної системи на основі п'єзоелектричного двигуна

тактової частоти 6. Тривалість імпульсу живлення τ_i є функція амплітуди сигналу $\alpha_{\text{ном}}$, $\tau_i = f(\alpha_{\text{ном}})$.

При відпрацюванні сигналу розузгодження, тривалість U_{ps} зменшується до нуля, тобто $\tau_{i1} > \tau_{i2} > \dots > \tau_{in}$. П'єзоелектричний двигун в такій системі дозволяє здійснювати плавний перехід від режиму безперервного обертання до крокового. При цьому точність відробітку визначатиметься мінімальним кутовим кроком для даної конструкції п'єзоелектричного двигуна. Динамічні характеристики і передавальні функції п'єзоперетворювача для нано- і мікропереміщень (рис. 2) розраховуються на основі сумісного рішення хвильового рівняння, що описує розповсюдження хвилі в довгій лінії зі загасанням без викривлень, рівняння п'єзо ефекту при нульових початкових і відповідних граничних умовах.

$$\left[\frac{1}{(\tilde{n}^E)^2} \frac{\partial^2 \xi(x, t)}{\partial t^2} \right] + \frac{(2\alpha/\tilde{n}^E) \partial \xi(x, t)}{\partial t^2} + \alpha^2 \frac{\partial^2 \xi(x, t)}{\partial x^2} = 0, \quad (1)$$

де $\xi(x, t)$ – зсув перерізу п'єзоперетворювача; x – координата; t – час; c – швидкість звуку при постійній напруженості електричного поля $E = \text{const}$ в п'єзоперетворювачі; α – коефіцієнт загасання хвилі, що враховує загасання коливань через розсіювання енергії на теплові втрати при розповсюдженні хвилі в п'єзоперетворювачі.

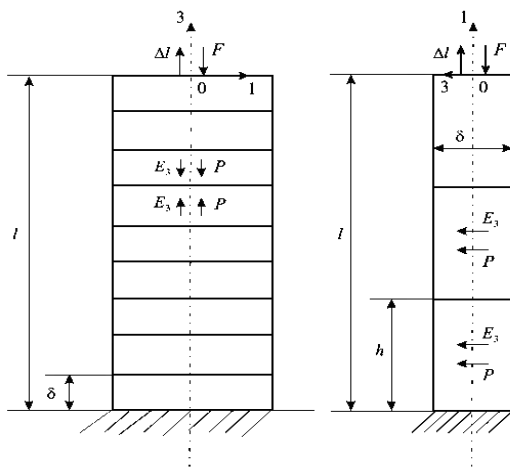


Рис. 2. Складений п'єзоперетворювач при подовжньому (а) та поперечному (б) п'єзо ефекті

Рівняння зворотного подовжнього п'єзо ефекту при керуванні п'єзоперетворювача за напругою:

де $S_3 = \frac{\partial \xi(x, t)}{\partial x}$ – відносне переміщення перерізу п'єзоперетворювача (рис. 2, а) по осі 3; d_{33} – п'єзомодуль при подовжньому п'єзо ефекті; $E_3(t) = \frac{U(t)}{\delta}$ – напруженість електричного поля по осі 3; $U(t)$ – напруга на електроді п'єзопластини; S_{33}^E – пружна податливість по осі 3 при $E = \text{const}$; $T_3(x, t)$ – механічна напруга по осі 3; δ – товщина п'єзопластини; P – вектор поляризації.

Для складеного п'єзоперетворювача із закріпленим торцем при подовжньому п'єзо ефекті і інерційному навантаженні для $x=0$ маємо $\xi(x, t) = 0$ і для $x = l = n\delta$, де l – довжина п'єзоперетворювача; n – число п'єзопластин, отримуємо рівняння сил, що діють на торці п'єзоперетворювача, у вигляді:

$$T_3 S_0 = - \frac{M \partial^2 \xi(x, t)}{\partial t^2}, \quad (3)$$

де M – маса навантаження, яка переміщується.

В наслідок перетворення за Лапласом хвильового рівняння (1) отримуємо лінійне звичайне диференціальне рівняння другого порядку з параметром p у вигляді

$$\frac{d^2 \Xi(x, p)}{dx^2} - \left[\frac{1}{(c^E)^2} p^2 + \frac{2\alpha}{c^E} p + \alpha^2 \right] \Xi(x, p) = 0, \quad (4)$$

Отже, з рівняння зворотного п'єзо ефекту (2) з урахуванням для x на торець п'єзоперетворювача сил (3) отримуємо

$$\left. \frac{d \Xi(x, p)}{dx} \right|_{x=l} = d_{33} E_3(p) - \frac{S_{33}^E M p^2 \Xi(p)}{S_0}, \quad (5)$$

де $\Xi(p)$, $\Xi(x, p)$ – перетворення Лапласа переміщення торця п'єзоперетворювача та переміщення розрізу п'єзоперетворювача при нульових умовах.

Враховуючи, що один торець п'єзоперетворювача жорстко закріплений при $x = 0$, отримуємо вираз

$$\Xi(x, p) = \frac{\Xi(p) \text{sh}(x\gamma)}{\text{sh}(l\gamma)}, \quad \left. \frac{d \Xi(x, p)}{dx} \right|_{x=l} = \frac{\Xi(p) \gamma}{\text{th}(l\gamma)}, \quad \gamma = \frac{p}{c^E} + \alpha.$$

Для складеного п'єзоперетворювача, закріпленого одним торцем, при подовжньому п'єзо ефекті і інерційному навантаженню

$$\frac{\Xi(p) \gamma}{\text{th}(l\gamma)} + \frac{\Xi(p) S_{33}^E M p^2}{S_0} = d_{33} E_3(p), \quad (6)$$

Якщо за вхідну величину прийняти зображення Лапласа напруги джерела живлення $U_0(p)$, то з виразу (6) визначаємо передавальну функцію складеного п'єзоперетворювача у вигляді:

$$W_1(p) = \frac{\Xi(p)}{U_0(p)} = - \frac{l^2 \text{th}(l\gamma) / (m(c^E)^2)}{(T_a p + 1) [M^2 \text{th}(l\gamma) p^2 / (m(c^E)^2 + l\gamma)]}, \quad (7)$$

$$T_a = R n C_0,$$

де m – маса складеного п'єзоперетворювача, T_a , R , C_0 – відповідно постійна часу аперіодичної ланки, опір узгоджених ланцюгів та ємність п'єзопластини у складеному п'єзоперетворювачі.

Рівняння зворотного поперечного п'єзо ефекту при керуванні п'єзоперетворювача за напругою має вигляд:

де $S_1 = \frac{\partial \xi(x, t)}{\partial x}$ – відносне зміщення розрізу п'єзоперетворювача (рис. 2, б) по осі 1; d_{31} – п'єзомодуль при поперечному п'єзо ефекті; $E_3(t) = \frac{U(t)}{\delta}$ – напруженість електричного поля по осі 3; S_{11}^E – пружна податливість по осі 1 при $E = \text{const}$; $T_1(x, t)$ – механічна напруженість по осі 1; $l = n\delta$ – довжина складеного п'єзоперетворювача; h – висота п'єзопластини.

Аналогічно отримуємо передавальну функцію складеного п'єзоперетворювача, який закріплений однією гранню, при $M/m \gg 1$ та поперечному п'єзоєфекті. Отже передавальна функція $W_2(p)$ складеного п'єзоперетворювача на робочих частотах при подовжньому п'єзоєфекті та пружноінерційному навантаженні у діапазоні робочих частот $0 < \omega < 0,01 c^E/l$ записується у вигляді:

$$W_2(p) = \frac{\Xi(p)}{U(p)} = \frac{d_{33} n U_{\max} / [1 + (C_a + C_e)/C_c]}{T_t^2 p^2 + 2T_t \xi_t p + 1}, \quad (9)$$

$$T_t = \sqrt{M/(C_a + C_e + C_c)};$$

$$\xi_t = \frac{\alpha l^2 C_c}{3c^E \sqrt{M/(C_a + C_e + C_c)}},$$

де T_t , ξ_t – відповідно постійна часу та коефіцієнт загасання коливальної ланки для складеного п'єзоперетворювача при подовжньому п'єзоєфекті та пружноінерційному навантаженні.

Дослідження абсолютної стійкості системи керування деформацією п'єзоперетворювача для нано-і мікропереміщень при детермінованих діях проведемо на основі критерію Якубовича. При описі системи використовуємо передавальну функцію лінійної частини системи $W(p)$ і гістерезисну функцію S_3 або S_1 п'єзоперетворювача при подовжньому і поперечному п'єзоєфектах.

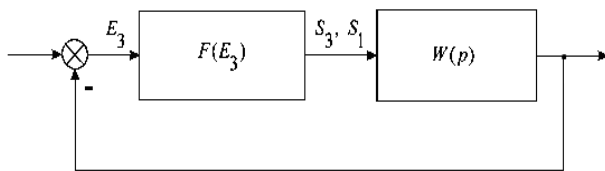


Рис. 3. Узагальнена структурна схема системи керування деформацією п'єзоперетворювача

Опис гістерезисної не лінійності п'єзоперетворювача при подовжньому п'єзоєфекті в загальному виді виглядає як [14]:

$$S_3 = F[E_3|_0, t, S_3(0), \text{sign} \dot{E}_3], \quad (10)$$

Значення функції S_3 в кожен момент часу t залежить від поведінки напруженості електричного поля E_3 на проміжку $[0, t]$, від t , від початкового значення $S_3(0)$ і знаку швидкості E_3 зміни напруженості поля. При цьому $S_3(0)$ повинно належати деякій додатково заданій безлічці $L[E_3(0)]$, яка залежить у загальному випадку від $E_3(0)$. Розглянемо гістерезисну характеристику п'єзоперетворювача. Безліччю $L[E_3(0)]$ є вертикальний відрізок $[S_3^0, -S_3^0]$ – перетин осі ординат з петлею гістерезису, знятої при максимально допустимій напруженості поля в п'єзоперетворювачі. Припустимо, що лінійна частина системи керування стійка. На площині (E_3, S_3) проведемо пряму A з рівнянням

$E_3 + W(0)S_3 = 0$, де $W(0)$ – значення передавальної функції лінійної частини системи керування при $p \rightarrow 0$. Безліч точок M перетину цієї прямої з гістерезисною характеристикою являє собою відрізок прямої, який виділений на рис. 4.

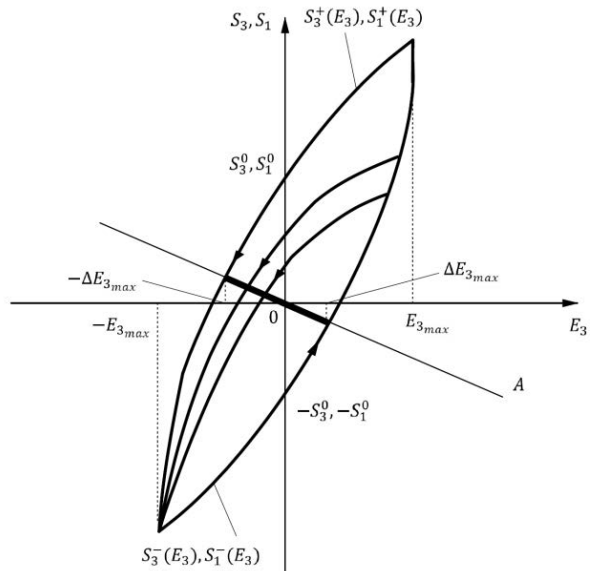


Рис. 4. Гістерезисна характеристика п'єзоперетворювача при подовжньому та поперечному п'єзоєфекті

Нехай E_{30}, S_{30} – стаціонарне рішення системи. Тоді отримуємо

$$E_{30} + W(0)S_{30} = 0, \quad (11)$$

Таким чином, стаціонарною безліччю M системи буде виділений безліччю пар (E_{30}, S_{30}) відрізок прямої A . Кожній точці перетину гістерезисної не лінійності з власними циклами і прямою A відповідає одне положення рівноваги з координатами (E_{30}, S_{30}) . Визначимо проекцію стаціонарної безлічі положень рівноваги торця п'єзоперетворювача на вісь X , де координата $x = E_3/E_{3\max}$. Підставимо в рівняння прямої (11) аналітичний опис основної гістерезисної петлі п'єзоперетворювача для подовжнього п'єзоєфекта у вигляді

$$S_3 = d_{33} E_3 - \gamma_{33} E_{3\max} \left(1 - \frac{E_3^2}{E_{3\max}^2} \right)^{n_{33}} \text{sign} \dot{E}_3 \quad (12),$$

де $E_{3\max}$ – амплітуда напруженості електричного поля в п'єзоперетворювачі; $\gamma_{33} = S_3^0/E_{3\max}$ – залишковий гістерезис при подовжньому п'єзоєфекті по осі 3; S_0 – залишкова відносна величина статичної гістерезисної характеристики по осі 3 при $E_3 = 0$; n_{33} – ступеневий коефіцієнт, який визначається за формою гістерезисної кривої при подовжньому п'єзоєфекті.

Знайдемо ширину зони спокою 2Δ . Для визначення ширини зони спокою, підставляючи значення $E_{30} = \Delta E_{3\max}$ у вираз (11), отримаємо

$$\Delta E_{3\max} + W(0)S_3^-(\Delta E_{3\max}) = 0, \quad (13)$$

де Δ – відносне значення напруженості електричного

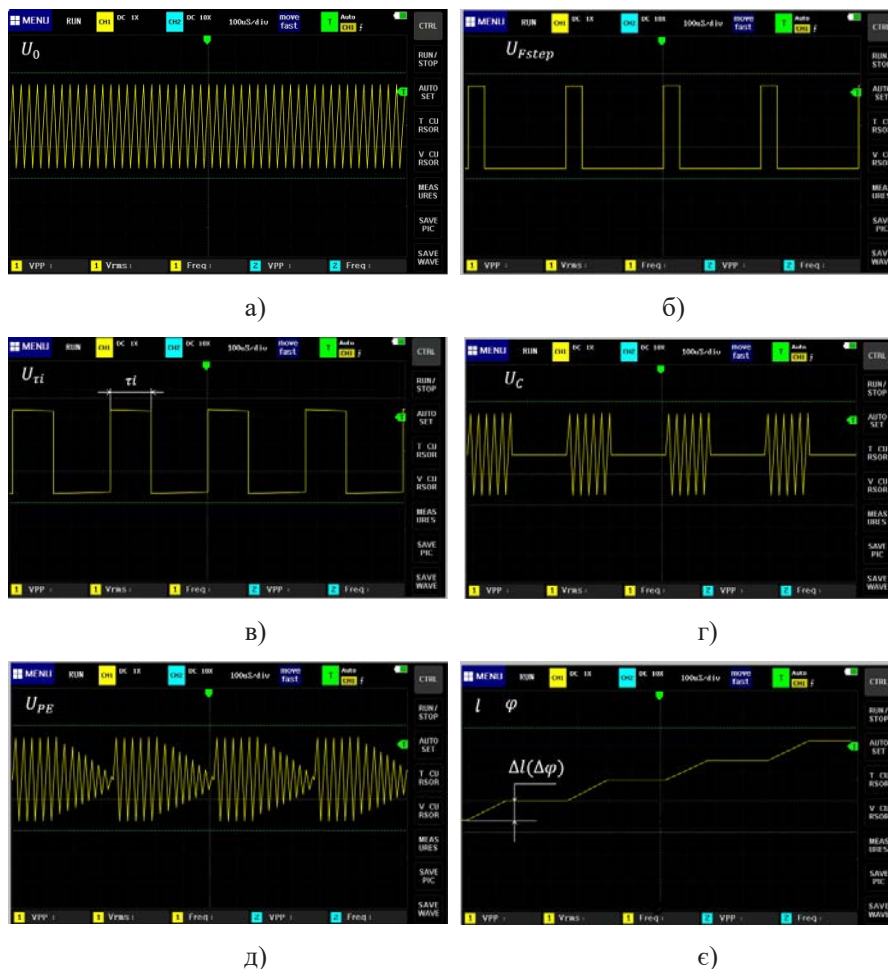


Рис. 6. Елюри напруг, які пояснюють роботу маніпулятора

проходження імпульсів керування F_{cl} . Використання такого пристрою за рахунок одночасного формування мікроподач і їх угруповання в часі дозволило значно поліпшити характеристики маніпулятора.

ВИСНОВКИ

Проведений аналіз сучасних наукових досліджень у галузі п'єзоелектричних електроприводів показав, що задача суттєвого підвищення показників якості керування замкнутих систем у загальному випадку залишається невирешеною на рівні універсальних математичних моделей. Існуючі підходи дозволяють частково зменшити перерегулювання або усталену похибку, однак не встановлюють чітких причинно-наслідкових закономірностей виникнення цих явищ. У більшості випадків покращення характеристик досягається шляхом параметричного синтезу конкретного електропривода без узагальнення отриманих результатів.

На основі виведених передаточних функцій п'єзоелектричного двигуна з урахуванням його динамічних властивостей та гістерезисної нелінійності визначено достатні умови абсолютної стійкості системи керування. Отримані співвідношення можуть бути безпосередньо використані при програмній реалізації алгоритмів керування в мікроконтролерних системах, що забезпечує підвищення надійності та прогнозованості роботи електропривода.

Розроблено структурну схему системи керування п'єзоелектричним електроприводом із формуванням керування імпульсів змінної тривалості, що дозволяє реалізувати режим мікрокрокового позиціонування та забезпечити узгодження мікропереміщень за швидкістю. Аналіз наведених осцилограм підтверджує адекватність запропонованої математичної моделі та працездатність синтезованої системи.

REFERENCES

- [1] Brahim, M. (2017). Modeling and position control of piezoelectric motors (Doctoral dissertation). Paris, France.
- [2] Gu, G.-Y., Zhu, L.-M., Su, C.-Y., Ding, H., & Fatikow, S. (2016). Modeling and control of piezoactuated nanopositioning stages: A survey. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 13, 313–332.

- [3] Tavallaei, M. A., Atashzar, S. F., & Drangova, M. (2016). Robust motion control of ultrasonic motors under temperature disturbance. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 63, 2360–2368.
- [4] Merry, R. J., De Kleijn, N. C., Van de Molengraft, M. J. G., & Steinbuch, M. (2009). Using a walking piezo actuator to drive and control a high-precision stage. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 14, 21–31.
- [5] Golubovic, E., Uzunovic, T., Zhakypov, Z., & Sabanovic, A. (2013). Adaptive control of piezoelectric walker actuator. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics (ICM)* (pp. 132–137).
- [6] Merry, R. J., Holierhoek, J. L., Van de Molengraft, M. J. G., & Steinbuch, M. (2014). Gain scheduling control of a walking piezo actuator. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 19, 954–962.
- [7] Zhakypov, Z., Golubovic, E., Uzunovic, T., & Sabanovic, A. (2013). High precision control of a walking piezoelectric motor in bending mode. In *Proceedings of the 9th Asian Control Conference (ASCC)* (pp. 1–6).
- [8] Uzunovic, T., Golubovic, E., & Sabanovic, A. (2015). Piezo LEGS driving principle based on coordinate transformation. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 20, 1395–1405.
- [9] Szufnarowski, F., & Schneider, A. (2010). Compliant piezo-flex drives for muscle-like, antagonistic actuation of robot joints. In *Proceedings of the IEEE RAS and EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechanics (BioRob)* (pp. 381–388).
- [10] Škorc, G., Šafarič, R., & Rojko, A. (2010). Polynomial control technique for adaptive positioning within sub-micrometer scale. In *Proceedings of the IEEE International Workshop on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region (RAAD)* (pp. 131–136).
- [11] Merry, R., Kessels, D., Van de Molengraft, M. J. G., & Steinbuch, M. (2009). Repetitive control applied to a walking piezo actuator. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Control and Automation (ICCA)* (pp. 854–859).
- [12] Merry, R. J., Kessels, D., Heemels, W., Van de Molengraft, M. J. G., & Steinbuch, M. (2011). Delay-varying repetitive control with application to a walking piezo actuator. *Automatica*, 47, 1737–1743.
- [13] Škorc, G., Čas, J., Brezovnik, S., & Šafarič, R. (2011). Position control with parameter adaptation for a nano-robotic cell. *Strojniški vestnik – Journal of Mechanical Engineering*, 57, 313–322.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Brahim, M. (2017). Modeling and position control of piezoelectric motors (Doctoral dissertation). Paris, France.
- [2] Gu, G.-Y., Zhu, L.-M., Su, C.-Y., Ding, H., & Fatikow, S. (2016). Modeling and control of piezoactuated nanopositioning stages: A survey. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 13, 313–332.
- [3] Tavallaei, M. A., Atashzar, S. F., & Drangova, M. (2016). Robust motion control of ultrasonic motors under temperature disturbance. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 63, 2360–2368.
- [4] Merry, R. J., De Kleijn, N. C., Van de Molengraft, M. J. G., & Steinbuch, M. (2009). Using a walking piezo actuator to drive and control a high-precision stage. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 14, 21–31.
- [5] Golubovic, E., Uzunovic, T., Zhakypov, Z., & Sabanovic, A. (2013). Adaptive control of piezoelectric walker actuator. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics (ICM)* (pp. 132–137).
- [6] Merry, R. J., Holierhoek, J. L., Van de Molengraft, M. J. G., & Steinbuch, M. (2014). Gain scheduling control of a walking piezo actuator. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 19, 954–962.
- [7] Zhakypov, Z., Golubovic, E., Uzunovic, T., & Sabanovic, A. (2013). High precision control of a walking piezoelectric motor in bending mode. In *Proceedings of the 9th Asian Control Conference (ASCC)* (pp. 1–6).
- [8] Uzunovic, T., Golubovic, E., & Sabanovic, A. (2015). Piezo LEGS driving principle based on coordinate transformation. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 20, 1395–1405.
- [9] Szufnarowski, F., & Schneider, A. (2010). Compliant piezo-flex drives for muscle-like, antagonistic actuation of robot joints. In *Proceedings of the IEEE RAS and EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechanics (BioRob)* (pp. 381–388).
- [10] Škorc, G., Šafarič, R., & Rojko, A. (2010). Polynomial control technique for adaptive positioning within sub-micrometer scale. In *Proceedings of the IEEE International Workshop on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region (RAAD)* (pp. 131–136).
- [11] Merry, R., Kessels, D., Van de Molengraft, M. J. G., & Steinbuch, M. (2009). Repetitive control applied to a walking piezo actuator. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Control and Automation (ICCA)* (pp. 854–859).
- [12] Merry, R. J., Kessels, D., Heemels, W., Van de Molengraft, M. J. G., & Steinbuch, M. (2011). Delay-varying repetitive control with application to a walking piezo actuator. *Automatica*, 47, 1737–1743.
- [13] Škorc, G., Čas, J., Brezovnik, S., & Šafarič, R. (2011). Position control with parameter adaptation for a nano-robotic cell. *Strojniški vestnik – Journal of Mechanical Engineering*, 57, 313–322.

© Шарейко Д. Ю., Білюк І. С., Савченко О. В.

Дата першого надходження статті до видання: 23.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 20.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 22.05.2026



Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)