

ТЕОРІЯ ТА ПРАКТИКА СУЧАСНОГО ПРЕЦИЗІЙНОГО ПРИЛАДОБУДУВАННЯ

УДК 621.3

СИСТЕМА КЕРУВАННЯ П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНИМ ДВИГУНОМ¹⁾Петренко С. Ф., ¹⁾Омелян А. В., ²⁾Антонюк В. С., ²⁾Новаковський О. Г.¹⁾Мале науково-виробниче підприємство ТОВ «Лілея», Київ, Україна²⁾Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, УкраїнаE-mail: victor.antoniuk@gmail.com

В роботі розглянуто можливість підвищення точності керування п'єзоелектричним двигуном, а саме за струмом і швидкістю, з урахуванням специфіки частотної характеристики п'єзодвигуна з прямокутним резонатором. Запропоновано системи керування (за струмом та швидкістю) п'єзоелектричним двигуном з прямокутним резонатором з урахуванням специфіки частотної характеристики п'єзоелемента та двигуна.

Підтверджена точність керування на серійних двигунах (LPM-2M, LPM-5, PM-1124) за струмом 1-2%, за швидкістю 2-5% зі значним розширенням діапазону керування величинами мікро-, та нано- швидкостей.

Ключові слова: п'єзоелектричний двигун, лінійний двигун, обертальний двигун, п'єзоелемент, п'єзоелектричні резонансні характеристики, швидкість, струм, система керування.

Вступ.

Перспектива використання п'єзоелектричних двигунів в мікро- та нано- системах (мікроманіпулятори, мікророботи тощо), які використовуються в виробництві інтегральних мікросхем, в генній інженерії для маніпуляцій всередині окремих живих клітин, тощо, робить актуальною проблему їх постійного вдосконалення [1 – 3].

Останнім часом значна увага також приділяється використанню п'єзоелектричних двигунів в якості приводів мікроверстатів для виготовлення мікродеталей, різальних інструментів на основі окремих кристалів алмазів, різки, свердління і шліфування рубінових каменів для механічних або електромеханічних пристроїв.

При цьому, потрібно постійно вдосконалювати систему керування п'єзоелектричним двигуном для забезпечення стабільності в безперервному, квазібезперервному і/або кроковому старт-стопному режимі [4].

Основою будь-якого п'єзоелектричного двигуна слугує п'єзоелектричний генератор (п'єзоелемент) механічних ультразвукових коливань, частоту яких (і вихідну потужність в цілому) можна легко регулювати в широких діапазонах за допомогою загальновідомих принципів, наприклад керуючи енергією збудження п'єзоелемента.

В п'єзоелектричних двигунах використовуються різні види резонаторів (п'єзоелементів), працюючих на різних типах коливань (радіальні, повздовжні, вигинальні, крутильні тощо) [1, 4].

Найчастіше, це кільцевий п'єзоелектричний резонатор (п'єзоелемент у вигляді кільця), в якому формуються радіальні ультразвукові коливання, які

в подальшому трансформуються в направлений рух ротора [1, 4 – 7].

Основною характеристикою такого двигуна є частотна характеристика п'єзоелемента – залежність струму I через п'єзоелемент (або на вході генератора збудження) від частоти F збудження п'єзоелемента.

Для кільцевих резонаторів ця характеристика має явно виражений резонансний характер (рис. 1, а), а резонанс струму практично співпадає з резонансом швидкості обертання V двигуна (рис. 1, б).

Керування таким двигуном здійснюється шляхом підстроювання робочої точки (частоти) збудження п'єзоелемента F на максимум резонансної характеристики (точка 1, рис. 1, а). Такий метод керування завжди дозволяє підтримувати максимальну швидкість обертання (точка 1, рис. 1, б) [1, 8].

Недоліком такого методу керування є те, що він не дозволяє змінювати швидкість в широких межах, або компенсувати зміну швидкості, наприклад, при температурному впливі.

Для цього необхідно змінювати зовнішню напругу живлення і будувати керуючі силові ланцюги, що часто не виправдане. До того ж, цей спосіб керування є аналоговим, а не цифровим.

Існує метод керування, в якому вибір робочої точки (робочої частоти) здійснюється на правому схилі частотної характеристики п'єзоелемента двигуна (точка 2, рис. 1, а), і в цьому випадку статичні характеристики двигуна подібні характеристикам двигуна постійного струму.

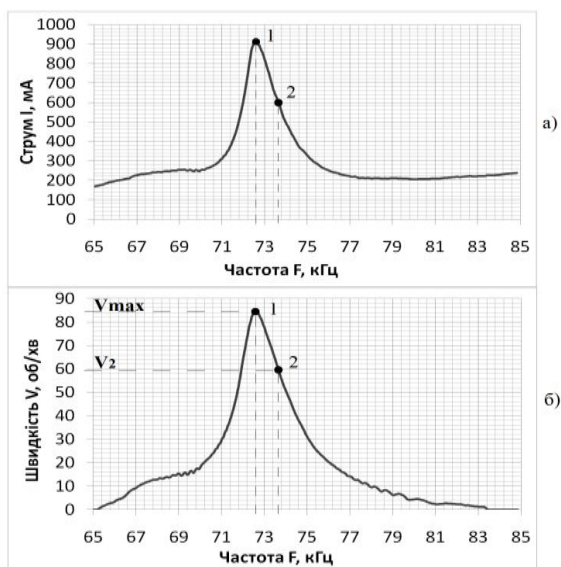


Рис. 1. Типові частотні характеристики п'єзодвигуна з кільцевим резонатором, на прикладі п'єзодвигуна PM-20R [9]

Цей метод дозволяє регулювати швидкість в широких межах (точка 2, рис. 1, б), змінюючи положення точки 2 на правому схилі частотної характеристики, і компенсувати різні зміни самої частотної характеристики двигуна, наприклад, викликані температурним впливом [1].

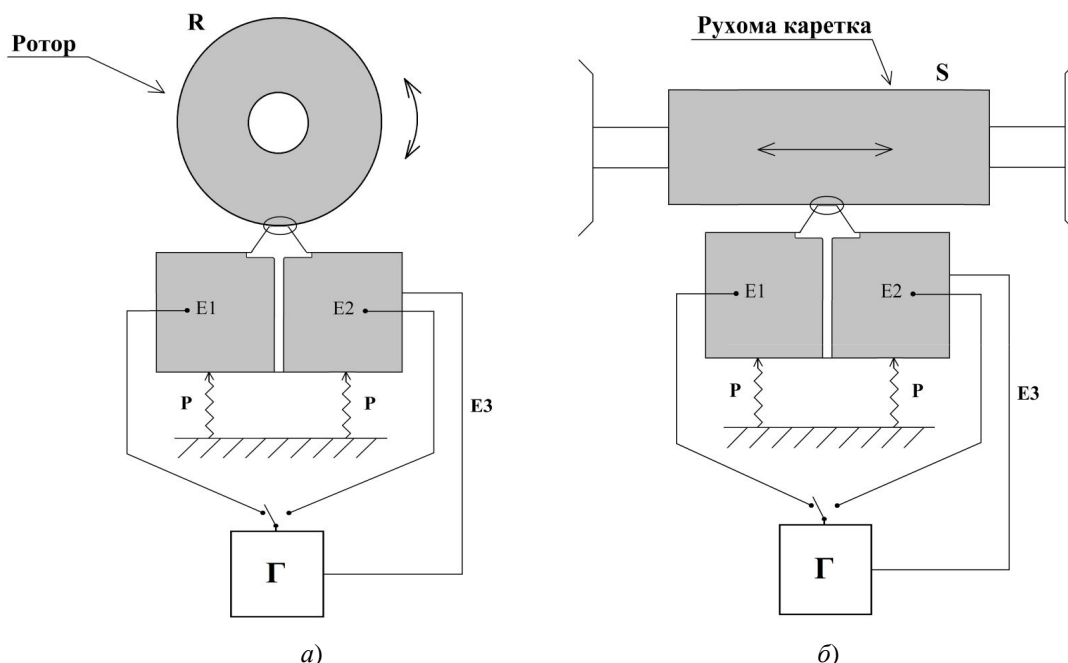


Рис. 2. Схеми обертового (а) і лінійного (б) п'єзодвигуна з прямокутним резонатором: R – ротор обертового двигуна S – слайдер (рухома каретка) лінійного двигуна; $E1$, $E2$, $E3$, – електроди п'єзоелемента; P – пружина; Γ – генератор

Але останнім часом з'явилася ціла серія п'єзоелектричних двигунів з прямокутним резонатором [10, 11].

Типова схема такого двигуна представлена на рис. 2.

На відміну від регулярних частотних характеристик, властивих кільцевим резонаторам з радіальною модою коливань, частотна характеристика п'єзоелектричного двигуна з прямокутним резонатором має (принаймні) два характерних близько розмішених резонансних піка – правий і лівий (рис. 3, а).

Фізично – відбувається розщеплення основного резонансу на дві (або більше) складових, а відповідно виникає і два (або більше) правих схилів резонансної характеристики, що ускладнює керування за вищевказаними методами.

Метою роботи є підвищення точності керування п'єзоелектричним двигуном, а саме за струмом і швидкістю, з урахуванням специфіки частотної характеристики п'єзодвигуна з прямокутним резонатором.

Основна частина

Експериментально підтверджено, що більш ефективним для роботи двигуна є правий резонансний пік з частотою F_{right} (рис. 3, а) і його правий схил (гілка).

Це підтверджується частотною характеристикою самого двигуна – залежністю швидкості двигуна V від частоти збудження F (рис. 3, б).

Тому вся подальша ідеологія методу та системи керування базувалася на правому схилі правого резонансного піка частотної характеристики п'єзоелемента.

Наприклад, заданий струм стабілізації (керування) I_0 буде реалізовуватися при робочій частоті збудження п'єзоелемента FE (рис. 3, а), який відповідає правому схилу правого резонансного піка частотної характеристики.

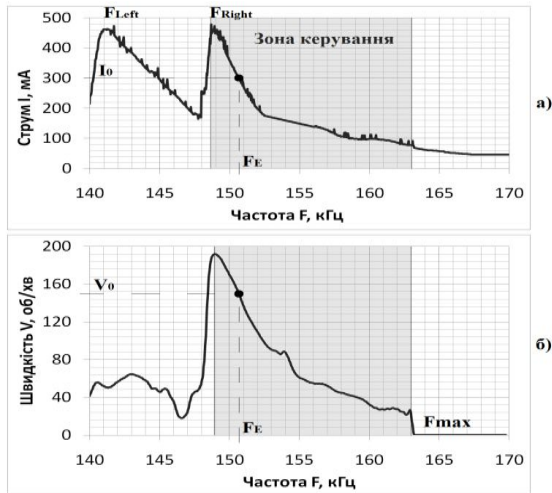


Рис. 3. Частотні характеристики п'єзодвигуна з прямокутним резонатором: F – частота збудження п'єзоелемента; F_{left} – резонансна частота лівого піка; F_{right} – резонансна частота правого піка; F_{max} – максимальна частота в зоні керування

Аналогічно, задана швидкість V_0 буде відповідати частоті FE правого схилу правого резонансного піка частотної характеристики (рис. 3, б).

Блок-схема такої системи керування для стабілізації струму представлена на рис. 4 (в якості прикладу вибрана версія обертового двигуна).

При надходженні команди на ввімкнення двигуна через зовнішній порт керування, на виході схеми керування виробляється сигнал, який запускає одне з пліч генератора, на виході якого формується сигнал частоти збудження п'єзоелемента, наприклад $FE1$, це так звана початкова частота “вкидання”, яка знаходиться на правому схилі правого піка частотної характеристики п'єзоелемента.

Далі цей сигнал з частотою $FE1$ підсилюється, проходячи через підсилювач, і надходить на електрод $E1$ п'єзоелемента.

За рахунок зворотного п'єзоелектричного ефекту в п'єзоелементі відбувається збудження взаємно ортогональних механічних коливань, суперпозиція яких здійснює обертання ротора двигуна проти годинникової стрілки.

При цьому значення струму через п'єзоелемент $I_{кер1}$ (сигнал керування), надходить на вхід схеми порівняння, порівнюється з опорним заданим I_0 значенням і на виході блока порівняння формується

сигнал похибки $\Delta = (I_0 - I_{кер1})$, який надходить на схему керування 8.

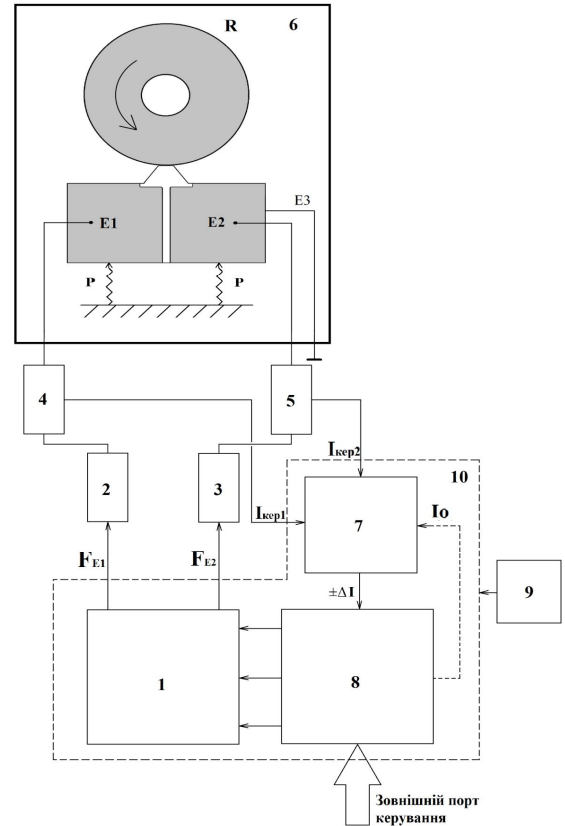


Рис. 4. Схема керування двигуном за струмом: 1 - керований генератор; 2,3 - підсилювачі; 4,5 - вимірювачі струму; 6 - п'єзоелектричний двигун; 7 - схема порівняння; 8 - схема керування; 9 - джерело живлення; 10 - керуючий модуль

На виході схеми керування формується сигнал на збільшення частоти генератора при негативному результаті (сигнал похибки), або на зменшення частоти при позитивному результаті.

Процес продовжується доки сигнал похибки не стане рівним нулю, тобто частота $FE1$ стане рівною частоті FE (рис. 3, а).

Блок-схема такої системи керування для стабілізації швидкості представлена на рис. 5 (в якості прикладу вибрана версія лінійного двигуна).

Робота такої системи відбувається аналогічним чином, за тим лише винятком, що в якості сигналу керування $V_{кер}$ використовується швидкість двигуна, яка вимірюється за допомогою датчика швидкості.

Сигнал керування $V_{кер}$ надходить на вхід схеми порівняння, порівнюється з опорним заданим $V_{зад}$ і на виході блока порівняння формується сигнал похибки $\Delta = (V_0 - V_{кер})$, який надходить на схему керування.

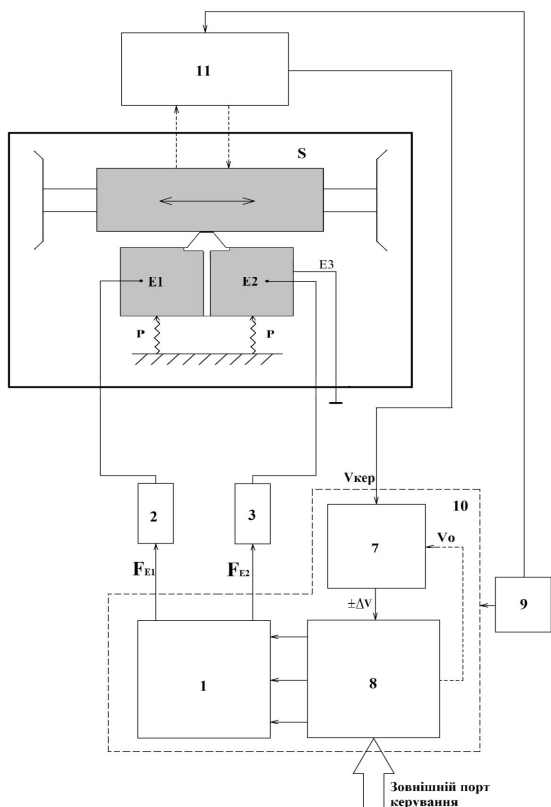


Рис. 5. Схема керування двигуном за швидкістю: 1 - керований генератор; 2,3 - підсилювачі; 6 - п'єзоелектричний двигун; 7 - схема порівняння; 8 - схема керування; 9 - джерело живлення; 10 - керуючий модуль, 11 - датчик швидкості

При цьому на виході схеми керування форму-



Рис. 6. Серійні п'єзоелектричні двигуни з прямокутним резонатором

Підтверджено високу ефективність таких систем (точність стабілізації за струмом 1-2%, за швидкістю - 2-5%) зі значним розширенням діапазону керування величинами мікро- та нано- швидкостей.

Використання запропонованого технічного рішення в прецизійному мікро- та нано- приладобудуванні дозволить значно підвищити їх точність та можливість використання таких приладів з п'єзоелектричними двигунами у широкому діапазо-

ється сигнал на збільшення частоти генератора при негативному результаті (сигналу похибки), або зменшення частоти при позитивному результаті.

Процес продовжується допоки сигнал похибки не стане рівним нулю, тобто частота FE1 стане рівною частоті FE, (рис. 3, б).

Відпрацювання вищевказаних систем відбувалося на лінійних двигунах LPM-2M, LPM-5 та обертальних PM-1124R компанії Discovery Technology International (рис. 6) [10].

В якості датчика швидкості використано оптичний енкодер іс-rx3212 з роздільною здатністю 2.6 мкм для лінійного двигуна та 40 кут.с для обертального [12].

При цьому, вдалося забезпечити точність керування за струмом 1...2%, точність керування за швидкістю 2...5%, розширити діапазон керування за швидкістю у бік менших швидкостей і довести їх до 0.01 об/хв. для обертальних двигунів та 0.02 мм/с - для лінійних, розширити температурний діапазон роботи від -50С до +80С внаслідок компенсації температурного зсуву резонансної частоти двигуна, забезпечити стабільність постійної швидкості при робочому моменті до 30мН·м, силі до 2 Н, забезпечити стабільну роботу в імпульсному режимі керування.

Висновки

Розроблено та апробовано на серійних п'єзоелектричних двигунах систему стабілізації за струмом та швидкістю.

ні зовнішніх експлуатаційних факторів.

Водночас, впровадження запропонованих систем керування п'єзоелектричними двигунами з прямокутним резонатором дозволить підвищити точність мікроманіпуляційних систем та прецизійних приладів до десятків нанометрів та здійснити розширення температурно-експлуатаційного діапазону від -50⁰С до +80⁰С.

Література

- Петренко С. Ф. Пьезоэлектрический двигатель в приборостроении. Киев: Корнійчук, 2002. 96 с.
- Новаковский А. Г. Применения пьезоэлектрических актуаторов в микроманипуляторах / А. Г. Новаковский, В. С. Антонюк, С. Ф. Петренко // Вісник Черкаського державного технологічного університету: Серія технічних наук. 2017. Вип. №4. С. 5 – 10.
- 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: Збірник наукових праць Харків: НТУ "ХПІ". 2008. Вип. 2 (17). С. 12 – 20.
- Лавриненко В. В. Принципы построения пьезоэлектрических моторов. Основы теории и реализация. Lambert, 2015. 227 с.
- П'єзоелектричний генератор механічних коливань і п'єзоелектричний двигун на його основі (варіанти): пат. 84065 Україна. МПК H02N 2/00, H02N 2/10. Опубл. 10.09.2008 р., бюл. № 17.
- Петренко С. Ф. Расчет кольцевого резонатора пьезоэлектрического двигателя и его моделирование в программном продукте ANSYS / К. С. Козько, С. Ф. Петренко, Е. Н. Безвесильная // [Электрон. моделирование](#). 2012. 34, № 3. С. 105 – 113.
- Петренко С. Ф. Дослідження ресурсних характеристик п'єзоелектричного двигуна / Горбатюк О. О., Петренко С. Ф. // Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування. 2012. Вип. 44. С. 105 – 111.
- Омелян А. В. Програмне забезпечення керуванням п'єзоелектричного двигуна / А. В. Омелян, С. Ф. Петренко // X Міжнародна науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Погляд у майбутнє приладобудування»: зб. статей. Київ. С. 75.
- Piezo Technologies [Електронний ресурс]: Київ: Piezo Technologies, 1992 - 2018. – URL: www.piezotech.com.ua (дата звернення 1.05.2018).
- Digital International Technology. USA: Digital International Technology, 2017. [Електронний ресурс]: URL: www.dtimotors.com (дата звернення 1.05.2018).
- Piezoelectric Quasi-Resonance Linear Motors Based on Acoustic Standing Wave With Combined Resonator: US Patent 8,710,719 B2. 2014.
- Germany: iC-Haus, 2017. URL: www.ichaus.de (дата звернення 1.05.2018).

УДК 621.3

¹С. Ф. Петренко, ¹А. В. Омелян, ²В. С. Антонюк, ²А. Г. Новаковский¹Малое научно-производственное предприятие ООО «Лилея», Киев, Украина;²Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, Украина**СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ДВИГАТЕЛЕМ**

В работе рассмотрена возможность повышения точности управления пьезоэлектрическим двигателем, а именно по току и скорости с учетом специфики частотной характеристики ультразвуковой двигатель с прямоугольным резонатором.

Предложены системы управления (по току и скоростью) пьезоэлектрическим двигателем с прямоугольным резонатором с учета специфики частотной характеристики пьезоэлемента и двигателя.

Разработана и апробирована на серийных пьезоэлектрических двигателях система стабилизации по току и скорости.

Подтверждена точность управления на серийных двигателях (LPM-2M, LPM-5, PM-1124) по току 1 ... 2%, по скорости 2 ... 5% со значительным расширением диапазона управления в сторону микро- и нано- скоростей.

Предложенные систем управления пьезоэлектрическими двигателями с прямоугольным резонатором повышают точность микроманипуляционных систем и прецизионных приборов до десятков нанометров и расширяют температурно-эксплуатационный диапазон от -50⁰С до +80⁰С

Ключевые слова: пьезоэлектрический двигатель, линейный двигатель, вращающий двигатель, пьезоэлемент, пьезоэлектрические резонансные характеристики, скорость, ток, система управления.

¹S. F. Petrenko, ¹A. V. Omelyan, ²V. S. Antonyuk, ²O. G. Novakovsky¹Small Research and Production Enterprise LLC "Lileia", Kyiv, Ukraine;²National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine**PIEZOELECTRIC MOTOR CONTROL SYSTEM**

The perspective of using piezoelectric motors in micro and nano-scale systems used in the production of integrated circuits, genetic engineering for manipulations within individual living cells, etc., makes the problem of their constant improvement a high-priority task.

Recently, considerable attention is also paid to the usage of piezoelectric motors as microcontroller drives for the manufacture of micro-units, cutting tools based on individual diamond crystals, cutting, drilling and grinding of ruby stones for mechanical or electromechanical devices.

In such case, there is a need for continuous improvement of piezoelectric motor control systems to ensure stability in all possible operating modes.

This paper considers the possibility of improving the accuracy of the piezoelectric motor control, specifically, current and speed, taking into account the specificity of the frequency response of a piezoelectric motor with a rectangular resonator.

The control systems (by current and speed) are proposed by a piezoelectric motor with a rectangular resonator taking into account the specificity of the frequency characteristic of the piezoelectric element and the motor.

The system for stabilizing current and speed is developed and tested on serial piezoelectric motors.

The accuracy of control on serial motors (LPM-2M, LPM-5, PM-1124) is confirmed at a current of 1 ... 2% at a speed of 2-5% with a significant expansion of the control range towards the micro- and nano-velocity side.

The offered control systems of piezoelectric motors with a rectangular resonator, which increase the accuracy of micromanipulation systems and precision instruments to dozens of nanometers and extend the temperature-operation range from -50°C to + 80°C due to compensation of the temperature shift of the engine's resonant frequency, and also provide stability of constant speed at working values of torque and force, and stable operation in pulsed control mode.

Key words: piezoelectric motor, linear motor, rotational motor, piezoelement, piezoelectric resonance characteristics, speed, current, control system.

*Надійшла до редакції
25 квітня 2018 року*

*Рецензовано
15 травня 2018 року*