

[0000-0003-1727-3286] **С. О. Філімонов**, к.т.н., доцент,

e-mail: s.filimonov@chdtu.edu.ua

[0000-0001-9241-1760] **Н. В. Філімонова**, к.т.н., старший викладач,

e-mail: nv.filimonova2015@gmail.com

Д. С. Бачеріков, аспірант,

e-mail: ababka94@gmail.com

А. О. Мисан, аспірант

e-mail: andreyka.misan@gmail.com

Черкаський державний технологічний університет

б-р Шевченка, 460, м. Черкаси, 18000, Україна

РОЗРОБКА П'ЄЗОДВИГУНА ДЛЯ БІОПРОТЕЗА

Нині в усьому світі розробка, дослідження і створення п'єзоелектричних двигунів є досить актуальною і важливою проблемою, що привертає велику кількість дослідників. Такий інтерес обумовлений перспективою створення малогабаритних п'єзоелектричних двигунів.

Основною метою цієї статті є дослідження та вдосконалення п'єзодвигунів задля використання їх у біопротезах як актуаторів.

Проведено аналіз закордонних конструкцій п'єзодвигунів. Визначено, що існуючі конструкції мають ряд недоліків, основні з яких – висока керуюча напруга, малий діапазон переміщення рухомої частини та складність виготовлення конструкції. Розроблено вдосконалену конструкцію п'єзодвигуна на основі біморфних п'єзоелементів. Виготовлено дослідний зразок розробленого п'єзодвигуна та отримано результати досліджень, котрі показали, що при використанні такого п'єзодвигуна збільшиться діапазон коливань та зменшиться амплітуда керуючого сигналу.

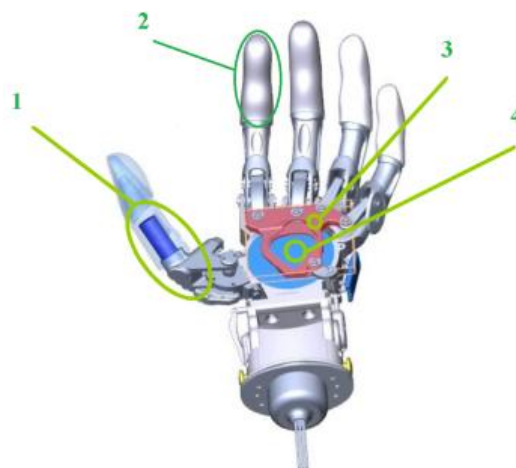
Ключові слова: біопротез, п'єзоелектричний двигун, біморфний п'єзоелемент.

Вступ. Біопротези використовують для відновлення рук з різними рівнями ампутації, а також у випадках вродженого недорозвитення верхніх кінцівок [1].

Окрім медичного призначення, біопротези широко використовуються у військовій сфері, зокрема в робототехніці, а також застосовуються в науково-дослідницькій сфері як маніпулятори, що працюють з небезпечними речовинами. На рисунку 1 зображено конструкцію біопротеза [2].

Одним із основних елементів, який впливає на роботу біопротеза і точність виконання рухів пальців, є двигуни. Двигуни бувають різних видів, найбільш поширеними є електромагнітні двигуни.

Електромагнітні мікроелектродвигуни (колекторні, крокові та безколекторні) нині досягли вершини мініатюризації. При подальшому зменшенні розмірів ускладнюється процес складання, а також втрачається ефективність двигуна.



1 – електродвигун;
2 – прогумовані кінцівки протеза;
3 – вузол переміщення пальців;
4 – головний привід біопротеза
Рисунок 1 – Конструкція біопротеза

Для намотки котушок статора доводиться використовувати тонший дріт, який має вищий опір. Так, при зменшенні розмірів колекторних мікроелектродвигунів до 6 мм

більша частка електричної енергії перетворюється в тепло, а не в механічну енергію. У більшості випадків для отримання лінійних приводів на базі електродвигунів є необхідним застосування додаткових механічних передач і редукторів, які перетворюють обертальний рух у поступальний і забезпечують потрібну точність позиціонування. При цьому зростають розміри всього пристрою, а значна частина енергії витрачається на подолання тертя в механічній передачі.

Діаграма, зображена на рисунку 2, показує, що при розмірах, менших 7 мм (діаметр корпусу двигуна), вигідніше застосовувати п'єзоелектричні двигуни, а не електромагнітні [3].

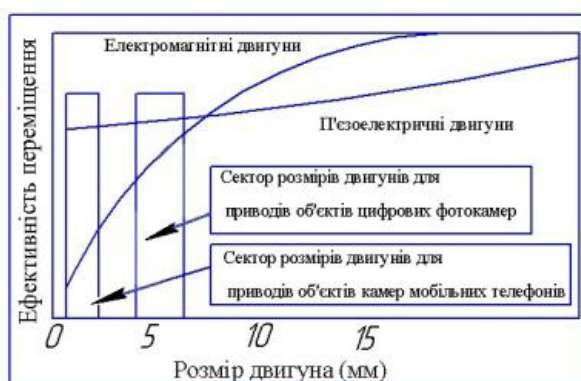


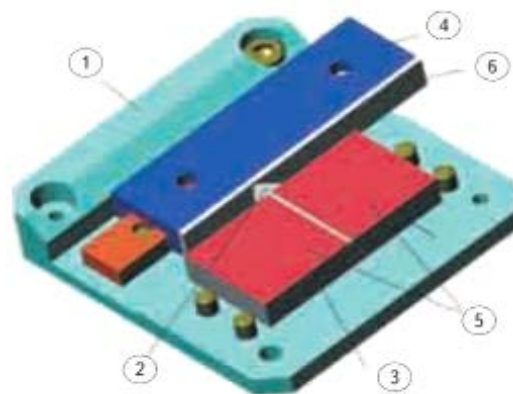
Рисунок 2 – Діаграма ефективності використання двигунів різних типів

Основними перевагами п'єзоелектричних двигунів є: широкий діапазон регулювання частот обертання ($0-300 \text{ хв}^{-1}$), можливість малих, у межах оберту вала, переміщень (частки кутових секунд), високий момент на валу, великий гальмівний момент на валу в знеструмленому стані, безінерційність, безшумна робота, малі маса та габарити, простота системи управління, відсутність передавальних механізмів і необхідності їх обслуговування, мале енергоспоживання, іскровибухобезпечність [3].

Один із видів конструкцій п'єзодвигунів, що використовуються як актуатори в біопротезі, наведено на рисунку 3 [4]. П'єзодвигун працює наступним чином. На два керамічні електроди подаються імпульси з частотою в десятки і сотні кілогерц. Завдяки коливанням п'єзокерамічної пластини 3 виконується рух рухомої каретки 4.

Основними недоліками цієї конструкції є: великі габарити, малий діапазон переми-

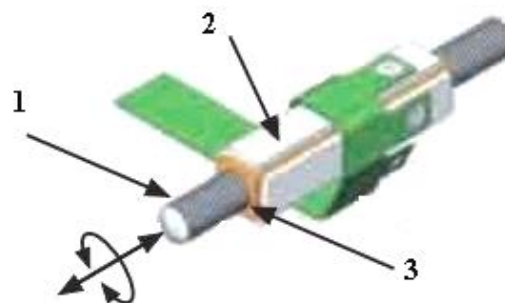
щення рухомої частини, висока керуюча напруга.



- 1 – нерухома кераміка; 2 – алюмінієвий виштовхувач; 3 – керамічний п'єзоактуатор; 4 – рухома каретка; 5 – збуджувальний електрод; 6 – фрикціон

Рисунок 3 – П'єзодвигун фірми PI

На рисунку 4 зображено схему і конструкцію резонансного п'єзоелектричного двигуна Squiggle фірми NST [5]. Основними елементами п'єзоелектричного двигуна є: чотиригранна металева муфта (з немагнітного матеріалу) з внутрішньою різьбою, ходовий гвинт і чотири пластини п'єзокераміки. Пластини п'єзокераміки прикріплені на гранях металевої муфти.



- 1 – ходовий вал; 2 – п'єзокераміка; 3 – металевий профіль з різьбою

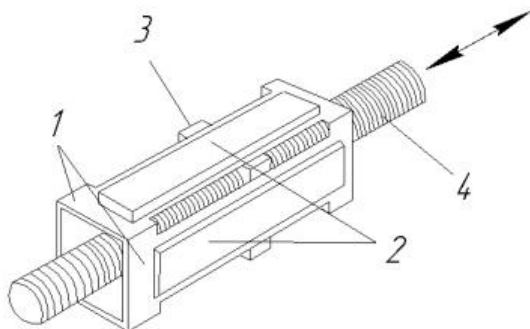
Рисунок 4 – П'єзодвигун серії SQL

Керування здійснюється за допомогою двох сигналів, що зсунуті по фазі на 90° .

Основними недоліками цієї конструкції є висока керуюча напруга та складність виготовлення конструкції.

Метою роботи є вдосконалення п'єзоелектричного двигуна задля його використання в біопротезах як актуатора.

Для вирішення цієї проблеми авторами запропоновано конструкцію п'єзодвигуна, яку зображено на рисунку 5.



1 – мідна пластина; 2 – біморфний п'єзоелемент;
3 – чотиригранна металева гайка;
4 – ходовий вал

Рисунок 5 – Будова п'єзоелектричного двигуна вдосконаленої конструкції

На рисунку 6 зображено експериментальний зразок вдосконаленого п'єзоелектричного двигуна.



Рисунок 6 – Експериментальний зразок розробленого п'єзоелектричного двигуна

Особливістю п'єзодвигуна розробленої конструкції є використання біморфних п'єзоелементів. Біморфний п'єзоелемент – це тонка металева пластина, до якої приклеєний п'єзоелемент, лицьові поверхні якого покриті електродами [6].

Біморфні п'єзоелементи між собою з'єднані на торцях мідних пластин за допомогою пайки, а чотиригранна металева гайка нерухомо закріплена по центру біморфного п'єзоелемента, де наявна максимальна амплітуда коливань.

При подачі двофазної напруги на протилежні пари пластин п'єзокераміки виникають механічні коливання, які передаються металевій гайці. В результаті ходовий вал обертається і лінійно переміщується відносно

муфти. Змінюючи зрушення фаз, можна змінювати напрямок руху гвинта.

Біморфні п'єзоелементи 2 складаються з металевої пластини, виконаної з напівтвердої латуні Л63 розміром 35x8x0,3 мм. П'єзоелементи з п'єзокераміки ЦТС-19 мають розміри 29x7x1 мм. Використання біморфних п'єзоелементів 2 дозволило знизити їх резонансну частоту до декількох сотень герц.

Коефіцієнт жорсткості біморфних п'єзоелементів 2 можна визначити за формулою [7, 8]

$$k_{1-4} = 3[\lambda_B L^3 + (L-l)\Delta]^{-1}, \quad (1)$$

де

$$\Delta = \lambda_M - \lambda_B,$$

$$\lambda_M = E_M J_M,$$

$$\lambda_B = E_M J_M + E_{II} J_{II}^* = \frac{12}{b \left(E_M h_M^3 + E_{II} h_{II}^3 \left(1 + 3 \left(1 + \frac{h_M}{h_{II}} \right)^2 \right) \right)},$$

E_M – модуль пружності металевої пластини;

E_{II} – модуль пружності п'єзоелемента, який можна знайти через піддатливість поляризованої п'єзокераміки; $E_{II} = (s_{11}^E)^{-1}$;

$$J_M = \frac{b h_M^3}{12};$$

$$J_{II}^* = J_{II} + \frac{(h_M + h_{II})^2}{4} \Omega_{II}; \quad J_{II} = \frac{b h_{II}^3}{12}; \quad \Omega_{II} = b h_{II};$$

b – ширина біморфного п'єзоелемента; h_M – товщина металевої пластини; h_{II} – товщина п'єзоелемента.

Для визначення форми механічних коливань, резонансної частоти та максимальної амплітуди коливань використовувався пакет програм COMSOL Multiphysics [9, 10].

На рисунку 7 зображено результати чисельного моделювання коливань одного з чотирьох біморфних п'єзоелементів.

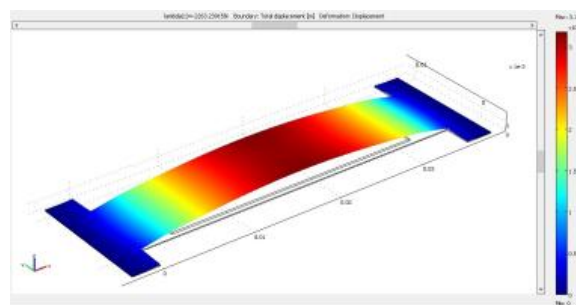


Рисунок 7 – Результати чисельного моделювання коливань біморфного п'єзоелемента

З рисунка 7 видно, що біморфний п'єзоелемент має вигнуту форму коливань. Амплітуда коливань становить 0,3 мкм, частота коливань – 226 Гц.

Використання біморфних п'єзоелементів у розробленому п'єзоелектричному двигуні дозволило збільшити амплітуду коливань та зменшити амплітуду керуючого сигналу.

Отримані дані можна використовувати при проектуванні пристроїв, де використовуються п'єзокерамічні актуатори.

Список літератури

- [1] М. В. Архипов, В. Ф. Головин, и В. В. Журавлев, "Обзор состояния робототехники в восстановительной медицине", *Мехатроника, автоматизация, управление*, № 8, с. 42–50, Москва, 2011.
- [2] Ю. А. Попадюха, "Особенности бiónических протезів верхних кінцівок", *Молодіжний науковий вісник Східноєвропейського національного університету імені Лесі Українки. Фізичне виховання і спорт: журнал / уклад. А. В. Цьось, та А. І. Альошина. Луцьк: Східноєвроп. нац. ун-т ім. Лесі Українки, вип. 25, с. 26–42, 2017.*
- [3] А. Самарин, "Миниатюрные пьезоэлектрические двигатели", *Компоненты и технологии*, № 10, с. 36–41, Москва, 2006.
- [4] В. Л. Ланин, и И. Петухов, "Пьезодвигатели в технологическом оборудовании микросварки", *Технологии в электронной промышленности*, № 4, с. 64–69, 2012.
- [5] D. A. Henderson, and L. Sheryl, Piezoelectric motors move miniaturization forward. New scale technologies. Available: <http://www.newscaletech.com>
- [6] В. М. Шарапов, и С. А. Филимонов, "Сканер для зондовых наномикроскопов на основе биморфных пьезоэлементов", *Методологические аспекты сканирующей зондовой микроскопии: VII Междунар. семинар. Минск, 2008, с. 204–209.*
- [7] В. М. Шарапов, М. П. Мусиенко, и Е. В. Шарапова, *Пьезокерамические датчики*. Москва: Техносфера, 2006.
- [8] V. Sharapov, *Piezoceramic sensors*. New York: Springer Verlag, 2011.

- [9] L. Spicci, and M. Cati, "Thermal analysis of a piezo-disk ultrasound probe", in *Comsol Conference*. Paris, 2012.
- [10] В. Я. Гальченко, Ю. Ю. Бондаренко, С. О. Филимонов, и Н. В. Филимонова, "Определение влияния геометрических параметров пьезокерамической пластины на амплитудные характеристики линейного пьезодвигателя", *Електротехніка і електромеханіка: журнал*, № 1, с. 17–22, 2019.
doi: 10.20998/2074-272X.2019.1.03.

References

- [1] M. V. Arkhipov, V. F. Golovin, and V. V. Zhuravlev, "The review of robotics state in restorative medicine", *Mekhanotronika, avtomatizatsiya, upravleniye*, no. 8, pp. 42–50, Moscow, 2011 [in Russian].
- [2] Yu. A. Popadiukha, "Peculiarities of bionic prostheses of upper extremities", *Molodizhnyi naukovyi visnyk Skhidnoievropеiskoho natsionalnoho universytetu imeni Lesi Ukrainky. Fizychnе vykhovannia i sport: journ. Lutsk: Skhidnoievrop. nats. un-t im. Lesi Ukrainky, iss. 25, pp. 26–42, 2017 [in Ukrainian].*
- [3] A. Samarin, "Microsized piezoelectric motors", *Komponenty i tekhnologiyi*, no. 10, pp. 36–41, Moscow, 2006 [in Russian].
- [4] V. L. Lanin, and I. Petukhov, "Piezoelectric motors in microwelding technological equipment", *Tekhnologiyi v elektronnoi promyshlennosti*, no. 4, pp. 64–69, 2012 [in Russian].
- [5] D. A. Henderson, and L. Sheryl, Piezoelectric motors move miniaturization forward. New scale technologies. Available: <http://www.newscaletech.com>
- [6] V. M. Sharapov, and S. A. Filimonov, "Scanner for probe nanomicroscopes based on bimorph piezoelements", *Metodologicheskiye aspekty skaniruiushchei zondovoi mikroskopiyy: VII Internat. seminar. Minsk, 2008, pp. 204–209 [in Russian].*
- [7] V. M. Sharapov, M. P. Musienko, and E. V. Sharapova, *Piezoceramic sensors*. Moscow: Technosfera, 2006 [in Russian].
- [8] V. Sharapov, *Piezoceramic sensors*. New York: Springer Verlag, 2011.
- [9] L. Spicci, and M. Cati, "Thermal analysis of a piezo-disk ultrasound probe", in *Comsol Conference*. Paris, 2012.

- [10] V. Ya. Galchenko, Yu. Yu. Bondarenko, S. O. Filimonov, and N. V. Filimonova, "Determination of the influence of geometric parameters of piezoceramic plate on amplitude characteristics of linear piezomotor", *Elektrotehnika i Elektromehanika*, no. 1, pp. 17–22, 2019 [in Russian]. doi: 10.20998/2074-272X.2019.1.03.

S. O. Filimonov, *Ph. D., associate professor*,

e-mail: s.filimonov@chdtu.edu.ua

N. V. Filimonova, *Ph. D., senior lecturer*,

e-mail: nv.filimonova2015@gmail.com

D. S. Bacherikov, *graduate student*,

e-mail: ababka94@gmail.com

A. O. Misan, *graduate student*

e-mail: andreyka.misan@gmail.com

Cherkasy State Technological University

Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine

DEVELOPMENT OF PIEZOELECTRIC MOTOR FOR BIOPROSTHESIS

Currently, worldwide, the development and research of piezoelectric motors is a very relevant and important problem that attracts a large number of researchers. The interest in this problem is due to the prospect of creating small piezoelectric motors. This allows to obtain unique devices in which electric vibrations turn into rotary movement, in addition, the rotating moment that develops on the shaft of such an engine is so large that eliminates the need for a mechanical gearbox to increase the torque. The world leaders in the production of piezoelectric motors are the following companies: Physik Instrumente (PI), New Scale Technologies and others.

The main purpose of this paper is to study and improve piezomotors, for the use in bioprostheses as actuators.

Piezomotors are the main element of many microelectromechanical systems that are used in military sphere, in particular in robotics, and also in scientific research instruments. But all these piezoelectric motors have a number of disadvantages, the main of which are: high control voltage, small range of movement of the moving parts, the complexity of manufacturing structures, and large dimensions that reduce their application in various fields.

Based on the drawbacks of these constructions, we have proposed and developed our own piezoelectric motor design, and simulated one biomorphic plate in the COMSOL Multiphysics program package. With the COMSOL Multiphysics program, forms of mechanical oscillations, deformations, resonance frequency of bending oscillations, and maximum amplitude of oscillations are determined. Also, in this paper, the coefficient of stiffness of bimorph piezoelements is given, thus, a qualitative mathematical model can significantly reduce the time and costs for the development of bimorph piezoelements.

The use of bimorph piezoelectric cells in the developed piezoelectric motor increases the amplitude of oscillations, and reduces the amplitude of the control signal. The obtained data can be used in the design of devices where piezoceramic actuators are used.

Keywords: bioprosthesis, piezoelectric motor, bimorph piezoelement.

Стаття надійшла 14.07.2019

Прийнято 09.08.2019