

УДК 621.3:681.2:681.586.773
DOI: 10.31891/2219-9365-2021-67-1-17

МАТУС С. К.

Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку

КВАСНИКОВ В. П.

Національний авіаційний університет

МОДЕЛЮВАННЯ СТАТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК П'ЄЗОПРИВОДА ДЛЯ МІКРОНАСОСА

У роботі досліджені статичні характеристики п'єзопривода багат шарової структури для мікронасоса перистальтичного типу. Розраховані переміщення багат шарового п'єзоелектричного актюатора, при поздовжньому п'єзо ефекті і управлінні за напругою, який армовано пружним елементом та з'єднано з мембраною із полімерного ауксетика. Для практичного використання п'єзоприводів багат шарової структури необхідні знання їх основних характеристик: п'єзомодулів, пружних податливостей, модулів пружності полімерного ауксетика.

Ключові слова: п'єзопривод, мікронасос, статична характеристика, ауксетик, п'єзо елемент.

S. MATUS

State University of Intellectual Technologies and Communications

V. KVASNIKOV

National Aviation University

MODELING OF STATIC CHARACTERISTICS OF PIEZOELECTRIC ACTUATOR FOR A MICROPUMP

The pace of development of precision technologies is growing every year, which is inextricably linked with the improvement of precision dosing systems, positioning for promising areas of science and technology, such as robotics, laser technology, active and adaptive optics, medicine, biotechnology, nanotechnology, engineering and . Accordingly, with the creation of such modern systems, the requirements for accuracy, operating frequencies, generating forces, power actuators, etc. are growing. for modern equipment.

The piezoelectric actuator in the micropumps allows rate changes of flow for a wider range. Promising to ensure the continuity and accuracy of fluid supply are peristaltic micropumps with piezodrive, which create the fluid movement due to the bending deformation of the tube of the channel associated with the longitudinal or transverse piezoelectric effect. The study of the micropump actuator static and dynamic characteristics as an object of control is necessary to calculate the control systems of piezoelectric actuators for pumping small volumes of liquids. The static characteristics of multilayer connectors for peristaltic micropump had explored during the work. The multilayer piezoelectric actuator displacements with a longitudinal piezoelectric effect and voltage control, which is reinforced with an elastic element and connected to a membrane of polymer auxetic are calculated. The use of membranes from the auxetic in the design of the micropump will improve its functional and structural characteristics. The piezoelectric actuators of multilayer structure practical use needs knowledge of their basic characteristics: piezomodules, elastic ductility, modules of elasticity of polymeric auxetic. To increase the rigidity of the multilayer piezoelectric actuator mechanical characteristics its design is selected from the minimum elastic reporting.

Key words: piezoelectric actuator, micropump, static characteristic, auxetic, piezoelectric element.

Вступ. Темп розвитку прецизійних технологій зростає з кожним роком, що нерозривно пов'язано із удосконаленням систем прецизійного дозування, позиціонування для перспективних напрямків науки і техніки, таких як робототехніка, лазерні технології, системи активної і адаптивної оптики, медицина, біотехнології, нанотехнології, машинобудування та ін. Відповідно при створенні таких сучасних систем зростають і вимоги до точності, робочих частот, генеруючих зусиль, потужності виконавчих механізмів та ін. Використання точних електро механічних приводів, які працюють на основі електромагнітопружності (п'єзоелектричного, п'єзомагнітного, електрострикційного, магнітострикційного ефектів) перспективно для сучасного обладнання.

В системах управління для підвищення точності і неперервності перекачування рідин малого об'єму, а також для точного позиціонування та переміщення об'єктів з нано- і мікрометровою точністю, використовують виконавчі п'єзоелектричні механізми – актюатори [1–3], які працюють на основі зворотного п'єзо ефекту, при цьому переміщення досягається за рахунок деформації п'єзо елемента при прикладанні зовнішньої електричної напруги. У найпростішому випадку п'єзоактюатором називають п'єзо елемент закріплений певний чином. П'єзоелектричні актюатори забезпечують переміщення від одиниць до 200–300 мкм із точністю 0,01–0,005 нм, вони розвивають зусилля до 50 кН, мають високу чутливість, а резонансна частота рухомої частини привода може сягати декілька десятків кілогерц [3]. Такі точні п'єзоелектричні приводи працюють у межах робочих навантажень, забезпечуючи тим самим пружні деформації виконавчого механізму.

Аналіз останніх досліджень. Існують різні фізичні принципи побудови мікронасосів для перекачування рідин малого об'єму, в роботах [4–5] наведена їх детальна класифікація. У роботі [6]

наведений аналіз різних приводів і показано, що п'єзоелектричний привод в мікронасосах дозволяє отримати більш широкий діапазон зміни швидкості потоку, від 0,015 мл/хв до 90,28 мл/хв при поперечному перерізі каналу 1 мм² і тиску до 200 кПа.

В роботі [7] наведений детальний огляд мікронасосів, згідно класифікації п'єзоелектричні мікронасоси поділяють на два основні типи: мембранні і перистальтичні. На відміну від класичних перистальтичних насосів [8], в яких робоча рідина переміщується в середині еластичної трубки, яка періодично стискається роликми, які по ній переміщуються, а відновлення об'єму робочої камери відбувається за рахунок пружності трубки, у п'єзонасосах скорочення або збільшення об'єму камери відбувається примусово п'єзоелектричним деформуванням її стінок. Пристрій перистальтичного типу, що містить п'єзопривод, складається із послідовно деформуючих робочих камер [5, 9]. Для перекачування рідин використовують біжучу хвилю деформацій замкнутого об'єму. Енергія біжучої хвилі передається руху рідини яка перекачується. Хвилеподібний рух утворюється від стиснення або розтягування п'єзоелементів, при подачі на них змінної збуджуючої напруги. Форма хвилі і робочий об'єм залежать від напруги на кожному п'єзоелементі. Продуктивність насосу визначається частотою напруги живлення і об'ємом камери. Основними перевагами перистальтичних п'єзонасосів є забезпечення безперервності та точності подачі рідини, незначний перепад тиску, здатність перекачувати в'язкі і чутливі до змішування рідини, простота конструкції. Відомі конструкції мікронасосів мембранного типу, наприклад, мають впускні і випускні клапани або декілька камер [6], які з'єднуються каналами або використовується елемент дифузор-сопло [10], працюють дискретно, що не дає змоги забезпечити рівномірного перекачування рідини. Отже, найбільш перспективними є перистальтичні мікронасоси із п'єзоприводами, що створюють рух рідини за рахунок деформації згину трубки каналу п'єзоелементом на основі поздовжнього або поперечного п'єзоефекту.

Постановка задачі. Дослідження статичних і динамічних характеристик актюатора мікронасосу, як об'єкта управління, необхідно для розрахунку систем управління п'єзоприводами для перекачування рідин малого об'єму. Тому в роботі пропонується дослідити статичні характеристики п'єзопривода багат шарової структури для мікронасоса перистальтичного типу та визначити переміщення багат шарового армованого п'єзоелектричного актюатора при поздовжньому п'єзоефекті і управлінні за напругою.

Вирішення поставленої задачі. П'єзопривод при поздовжньому п'єзоефекті представляє собою пластину (рис. 1), товщиною δ з електродами, які нанесені на грані, що перпендикулярні до вісі 3, площа яких дорівнює S_0 .

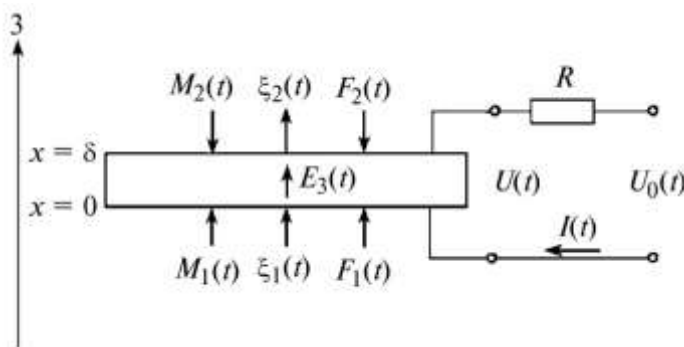


Рис. 1. Схема п'єзопривода при поздовжньому п'єзоефекті

Рівняння електропружності для зворотного п'єзоефекту при управлінні п'єзоприводом за напругою має вигляд:

$$S_3 = d_{33}E_3(t) + s_{33}^E T_3(x, t), \quad (1)$$

де $S_3 = \frac{\partial \xi(x, t)}{\partial x}$ – відносне зміщення перерізу п'єзоелемента по вісі 3, де ξ – переміщення; d_{33} –

п'єзомодуль при поздовжній поляризації пластини (поздовжній п'єзоефект); $E_3(t) = U(t)/\delta$ – напруженість електричного поля у п'єзоприводі по вісі 3, де $U(t)$ – напруга на електродах п'єзоелемента, δ – його товщина; $s_{33}^E = 1/E_{30}$ – пружна податливість по вісі 3, E_{30} – модуль Юнга п'єзокерамічної кераміки; $T_3 = -F/S_0$ – механічна напруга у п'єзоприводі; F – зовнішня сила; S_0 – площа перерізу п'єзоелемента.

Кінематична схема багат шарового п'єзопривода мікронасосу представлена на рис. 2. На відміну від простого п'єзоелемента, п'єзопривод багат шарової структури має у статиці без навантаження збільшений в n разів діапазон переміщення, що залежить від числа п'єзошарів. П'єзошари з'єднані механічно послідовно, а електрично – паралельно.

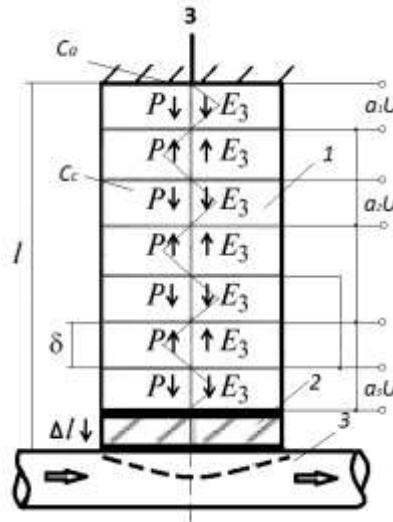


Рис. 2. Кінематична схема п'єзопривода мікронасосу багат шарової структури
1 – п'єзоактюатор; 2 – мембрана із полімерного ауксетика; 3 – еластична трубка

З рівняння зворотного п'єзоефекту (1) при $E = const$ отримуємо рівняння статичної характеристики при поздовжньому п'єзоефекті і управлінні за напругою

$$\Delta l = d_{33}nU - s_{33}^E Fl / S_0 \quad (2)$$

де Δl – переміщення п'єзопривода; $l = n\delta$ – довжина; n – кількість п'єзоелементів; δ – довжина п'єзоелемента.

У статичі при поздовжньому п'єзоефекті при управлінні за напругою при $F = 0$ максимальне переміщення п'єзопривода багат шарової структури буде мати вигляд: $\Delta l_{max} = d_{33}nU_{max}$, де U_{max} – максимальна напруга на електродах.

Отримуємо відносно переміщення приводу

$$\frac{\Delta l}{l} = d_{33} \frac{U}{\delta} - s_{33}^E \frac{F}{S_0}.$$

Жорсткість навантаження є основним параметром зовнішнього навантаження п'єзопривода, що визначає його конструктивні параметри і є відношенням сили пружної реакції навантаження до деформації навантаження. Отже, відповідно знайдемо переміщення для п'єзопривода багат шарової структури із врахуванням жорсткості:

$$\Delta l = d_{33}nU - \frac{F}{C_c} \quad (3)$$

де $C_c = \frac{S_0}{(s_{33}^E l)}$ – жорсткість багат шарового п'єзопривода із управлінням за напругою при

поздовжньому п'єзоефекті; $F = F_0 + C_a \Delta l$ – зовнішня сила; $F_0 = \sigma_{a0} S_0$ – сила попереднього початкового підтискання пружним елементом; σ_{a0} – механічна напруга армування у п'єзоприводі; C_a – жорсткість армуючого елемента.

Розглянемо статичні характеристики приводу багат шарової структури, армованого пружним елементом з'єднаного з мембраною із полімерного ауксетика, при управлінні за напругою. Ауксетика – це матеріали з нелінійними і аномальними деформаційними властивостями, які дозволяють отримати адаптивну (приспосувальну) механічну реакцію матеріалу на зовнішній вплив [11], вони демонструють поведінку з від'ємним коефіцієнтом Пуассона. Використання в конструкції мікронасосу мембрани із ауксетика дозволить покращити його експлуатаційні і конструктивні характеристики. Отже, вираз для переміщення приводу багат шарової структури, армованого попружним елементом з'єднаного з мембраною із полімерного ауксетика:

$$\Delta l = d_{33}nU - \frac{\sigma_{a0}S_0 + C_a\Delta l + \frac{\Delta l}{l}E_{e1}S_0 + \frac{\Delta l}{l}E_{e2}S_1}{\frac{S_0}{s_{33}^E l}}$$

$$\Delta l = \frac{d_{33}nU - s_{33}^E l \sigma_{a0}}{1 + \left(\frac{C_a l}{S_0} + E_{1e} + kE_{2e} \right) s_{33}^E},$$

де $k = \frac{S_1}{S_0}$; $E_{1e} = 2,95 \cdot 10^9$ Н/м² – ауксетик; $E_{2e} = 5,5 \cdot 10^9$ Н/м – поліпропілен

$$\Delta l = \frac{d_{33}nU - s_{33}^E n \delta \sigma_{a0}}{1 + (2E_{1e} + kE_{2e}) s_{33}^E}, \quad (3)$$

Статичні характеристики (рис. 3) п'єзоелектричного привода мікронасоса отримані для п'єзопластин із кераміки ЦТС-19: $d_{33} = 4 \cdot 10^{-10}$ м/В – п'єзомодуль; $l = 1 \cdot 10^{-3}$ м – довжина багатошарового пьезопривода; $s_{33}^E = 3 \cdot 10^{-11}$ м²/Н – пружна податливість по вісі 3; $S_0 = 10 \cdot 10^{-3}$ м² – площа перерізу п'єзоелемента; $S_1 = S_0$; $\sigma_{a0} = 5 \cdot 10^5$ – механічна напружка армування у п'єзоприводі; $\delta = 1 \cdot 10^{-5}$ м – товщина п'єзоелемента; $n = 10 \dots 24$ кількість шарів; $U = 100 \dots 500$ В напружка збудження; $E_{1e} = 2,95 \cdot 10^9$ Н/м² – модуль пружності ауксетика [12]; $E_{2e} = 5,5 \cdot 10^9$ Н/м – модуль пружності поліпропілену.

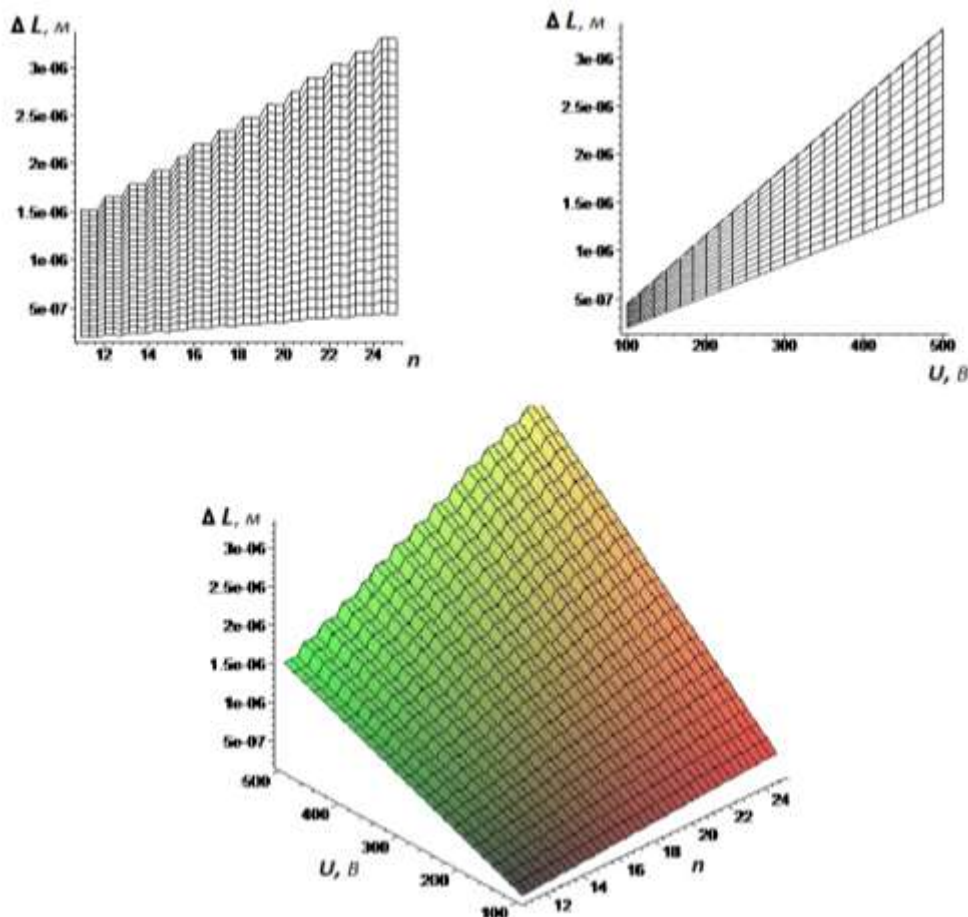


Рис. 3. Статичні характеристики п'єзопривода багатошарової структури при управлінні за напругою

Аналіз отриманих результатів показує, що при управлінні за напругою переміщення із врахуванням жорсткості в залежності від кількості п'єзоелементів у структурі актюатора, складає від $5 \cdot 10^{-7}$ м до $3 \cdot 10^{-6}$ м,

тобто діапазон переміщення п'єзопривода пропорційний п'єзомодулю і напруги живлення. Для ефективного використання робочого діапазону переміщень потрібно враховувати жорсткість багатопарового привода.

Висновки. Отримані характеристики п'єзопривода багатопарової структури для мікронасоса, армованого пружним елементом з'єднаного з мембраною із полімерного ауксетика, при управлінні за напругою дозволяють розрахувати статичні режими роботи багатопарових приводів в залежності від їх фізичних і геометричних параметрів. Використання в конструкції мікронасосу мембрани з ауксетика дозволить покращити його конструктивні і експлуатаційні характеристики.

References

1. Bardin V. A. Kontrol i upravlenie v sistemah precizionnogo pozicionirovaniya na osnove pezoektricheskij aktyuatorov / V. A. Bardin, V. A. Vasilev, P.G. Rudakov, R.V. Yuloskov // Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma «Nadezhnost i kachestvo». – 2016. – Tom. 1. – S. 308-312.
2. Amelchenko A. G. Usilivayushchij differentsialnyj pezoektricheskij aktyuator dlya sistem upravleniya vysokotochnogo pozicionirovaniya / A. G. Amelchenko, V. A. Bardin, V. A. Vasilev, P.S. Carev // Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma «Nadezhnost i kachestvo». – 2018. – Tom. 2. – S. 120-125.
3. Levashkin D.G. Sistemy avtomaticheskogo kontrolya: ucheb. posobie / D.G. Levashkin: - Tolyatti: TGU. 2008. – 128 s.
4. Nisar, A. Afzulpurkar, N. Mahaisavariya, B., Tuantranont, A. MEMS-based micropumps in drug delivery and biomedical applications. Sensors and Actuators B: Chemical. 130(2), 917-942 (2008); doi:10.1016/j.sbs.2007.10.064.
5. Brian D. Iverson, S.V. Garimella. Recent advances in microscale pumping technologies: a review and evaluation. Microfluid Nanofluid (2008)5: 145-174; doi:10.1007/s10404-008-0266-8.
6. Farid Amirouche, Yu Zhou, Tom Johnson. Current micropump technologies and their biomedical applications. Microsystem Technologies 15, 647-666 (2009); doi:10.1007/s00542-009-0804-7.
7. Laser D.J., Santiago J.G. A Review of Micro Pumps. Journal of Micromechanics and Microengineering 14(6):R35 (2004); doi:10.1088/0960-1317/14/6/R01.
8. Jozsef Klespitz, Levente Kovacs. Peristaltic pumps – a review on working and control possibilities. IEEE 12th International Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics. pp. 191-194 (2014); doi:10.1109/SAMI.2014.6822404.
9. Cohen Y B, Chang Z. Piezoelectrically actuated miniature peristaltic pump. In: Proceedings of the SPIE Smart Structures Conference, SPIE, 2001, 4327: 425-432.
10. Ali Ostadfar, E.H. Ravich. Issledovanie harakteristik implantiruемого besklapannogo nasosa dlya biologicheskikh zhidkostej i lekarstvennyh sredstv // Medicinskaya tekhnika. 2013. № 1(277). S. 42-46.
11. N. Novak, M. Borovinsek, M. Vesenjak, C. Körner, S. Tanaka, K. Hokamoto, Z. Ren, Phys. Status Solidi B 256(1), 1800040 (2019); doi:10.1002/pssb.201800040.
12. ShevchukT., BoryukM., KrivtsovV., KuklaV. and MashchenkoV. Viscoelastic Properties of Filled Polyurethane Auxetics. Physics and Chemistry of Solid State. 22, 2 (Jun. 2021), 328-335; doi:10.15330/pess.22.2.328-335.