

А. Г. Новаковский,
В. С. Антонюк, д.т.н., профессор,
Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»
проспект Победы, 37, Киев, 13027, Украина
С. Ф. Петренко, д.т.н., профессор
НПК ООО «ЛИЛЕЯ», Киев, Украина

ПРИМЕНЕНИЯ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АКТУАТОРОВ В МИКРОМАНИПУЛЯТОРАХ

В статье рассмотрены особенности использования пьезоэлектрических актуаторов в микроманипуляционных системах для осуществления перемещений на микронном уровне. Проведен анализ применения пьезоэлектрических актуаторов в микроманипуляционных системах разнообразных сфер деятельности человека. Показана эффективность использования пьезоэлектрических актуаторов в микрохирургии и биологии. Установлено, что перспективным является направление использования актуаторов в микроманипуляционных системах станков с ЧПУ для обеспечения перемещений во всех необходимых степенях свободы с минимальными погрешностями.

Ключевые слова: пьезоэлектрические актуаторы, микроманипуляторы, станки с ЧПУ, точность позиционирования, пьезоэлектрические преобразователи.

Актуальность. В настоящее время все более возрастающее значение приобретают прецизионные технологии, с которыми неразрывно связано создание новых устройств мехатроники и робототехники.

Создание таких устройств требует повышения точности приводов и, соответственно, точности перемещения их рабочих органов. Для осуществления микроперемещений на микронном уровне движения микроманипуляторов осуществляются за счет применения пьезоэлектрических актуаторов [1, 2].

Главным преимуществом таких устройств является беспрецедентная точность позиционирования, достигающая сотые и даже тысячные доли микрометра. Кроме того, они надежны, долговечны, обладают отличным быстродействием, развивают высокие ускорения и сочетают большое развиваемое усилие с компактностью. Очень важно и то, что пьезоактуаторы не имеют вращающихся и скользящих частей, не требуют смазывания и обслуживания, способны работать при низких температурах и в вакууме [3].

Так, например, в микрохирургии, благодаря замкнутой кинематической структуре, механизм платформы дельта-робота обладает большей жесткостью и выдерживает большую нагрузку в сравнении с механизмами, состав-

ленными в виде открытых кинематических цепей [4-6].

Применение роботизированных платформ позволяет осуществлять сверхточные манипуляции во время операции путем фильтрации тремора, а также масштабирования движения, чем значительно облегчает работу оператора и снижает вероятность ошибок, что весьма критично в данной области [7, 8].

Использование пьезоэлектрических актуаторов в микроманипуляционных системах также позволяет проведение операций на качественно новом уровне [9].

Вопросами проектирования робототехнических комплексов, их информационно-измерительных и управляющих систем, в том числе с применением пьезоэлектрических манипуляторов, занимались отечественные и зарубежные ученые В. П. Андреев, В. Л. Афонин, С. А. Воротников, Е. А. Девянин, М. Б. Игнатъев, П. Д. Крутько, Ю. В. Подураев, Л. Б. Рапопорт, А. М. Формальский, В. М. Шарапов, H. Asada, Y. Kuwata, M. Liu, A. Nüchter, S. Thrun, A. Waj-Fraj, A. West и др.

Исследования в области биологии при манипуляциях с клетками с применением пьезоэлектрических актуаторов значительно расширяют возможности экспериментальных исследований и позволяют снизить стоимость

проведения анализов ДНК и операции ЭКО [10-12].

Однако, несмотря на все выше заявленные преимущества, широкое распространение пьезоактуаторов ограничено рядом недостатков таких устройств, а именно: небольшой длиной хода, ограничивающей область их использования, и высокой ценой. Кроме того, при выборе между различными типами пьезоэлектрических актуаторов следует обращать внимание на исполняемое движение и требуемые характеристики устройств, что также снижает уровень их унификации.

Поэтому, в данной статье рассматриваются особенности применения пьезоэлектрических актуаторов в микроманипуляционных системах для осуществления перемещений на микронном уровне.

Целью данной статьи является анализ областей применения пьезоэлектрических актуаторов в микроманипуляторных системах с дальнейшими рекомендациями относительно применения этих систем для обеспечения перемещений с различными степенями свободы, гарантирующего минимум погрешности таких перемещений.

Анализ применения пьезоэлектрических актуаторов в микроманипуляторах. Широкая распространенность пьезоэлектрических актуаторов в микроманипуляционных системах, в первую очередь, связана с особенностями их функционирования.

В основе принципа их действия лежит обратный пьезоэлектрический эффект, то есть механическая деформация кристалла при воздействии на него электрического поля. При этом осуществляется преобразование электрического напряжения в небольшое, но крайне точно контролируемое линейное перемещение с высоким развиваемым усилием возвратно-поступательного движения.

Параллельную кинематическую структуру пьезоэлектрических актуаторов в микроманипуляторах используют системы наклона зеркал с одной подвижной платформой для всех направлений движения.

Данные системы показывают более высокую линейность характеристик, чем может быть достигнута путем последовательного переключения двух одноосных систем, при этом они остаются чрезвычайно компактными.

Системы наклона зеркал с пьезоэлектрическими актуаторами подходят как для высокودинамичной работы, такой как трек-

кинг, сканирование, стабилизация изображения, устранение дрейфа и вибрации, так и для статического позиционирования оптических систем и заготовок.

Известно также применение многослойного актуатора в контроллере потока припоя при производстве полупроводниковых систем, требующих сверхточного контроля (рис. 1) [13].

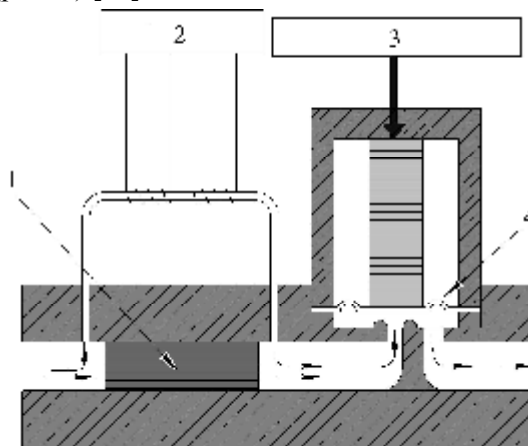


Рис. 1. Схема контроллера потока припоя в разрезе: 1 – проход; 2 – управление потоком; 3 – пьезоэлектрический актуатор; 4 – диафрагма

Использование пьезоэлектрического привода для управления мембраной позволяет контролировать поток точнее и быстрее, чем при использовании традиционного электромагнитного клапана.

Так, в работе [14] говорится про две разработанные системы управления для прецизионного позиционирования на основе усиливающего пьезоэлектрического актуатора, применяемые в многофункциональном тестовом оборудовании. В результате этого была разработана компьютерная модель упругой рамки усиливающего пьезоактуатора, проведено ее исследование, введены изгибные элементы в виде вырезов и оптимизированы их размеры для получения максимальной точности при максимальном диапазоне перемещения, что позволило обеспечить диапазон перемещения 104 мкм и увеличить точность позиционирования до 12 нм.

Следующий вариант использования пьезоактуаторов в промышленности – применение на этапе контроля точности положения системы экспонирования (рис. 2) [13].

Благодаря высокой гибкости и модульности конструкции, обеспечивающей минимальное время простоев, установки прецизионного совмещения и экспонирования широко

применяются в мире в области технологии микросистем, микроэлектромеханических систем (МЭМС) и биомикроэлектромеханических систем (БиоМЭМС), производства силовых компонентов, встроенной оптики и микрооптики, мультикристалльных модулей, в области нанотехнологий, тонкопленочных и гибридных технологий [15].

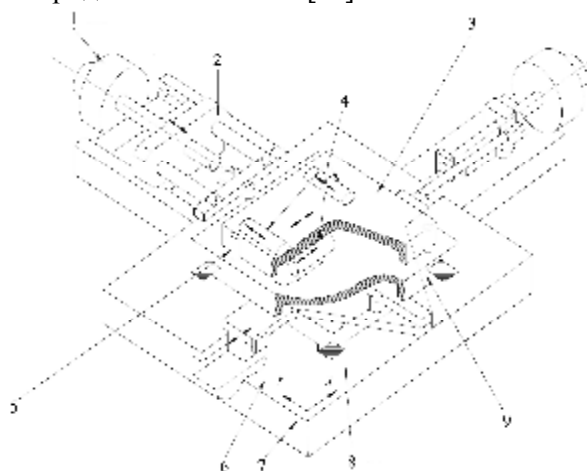


Рис. 2. Схема системы экспонирования в разрезе:
1 – двигатель постоянного тока; 2 – рамка привода оси Y; 3 – платформа прецизионного перемещения; 4 – пьезоэлектрический актуатор;
5 – поддерживающий гибкий вал; 6 – плоскость перемещения XY; 7 – основание; 8 – слайдер;
9 – столик грубого перемещения

Грубое/быстрое перемещение в данной системе выполняется с помощью серводвигателя постоянного тока; прецизионное же перемещение осуществляется с помощью пьезоэлектрического привода [16]. Тот же метод применяется в других системах.

Так, например, известны оригинальные решения [17, 18], в которых пьезоэлектрические актуаторы применяются для сопоставления оптической оси оптоволоконного кабеля (рис. 3).

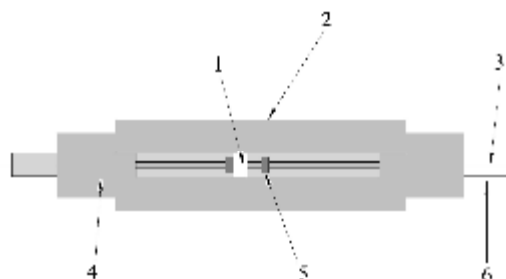


Рис. 3. Микроманипуляционная система сопоставления оптической оси оптоволоконного кабеля:
1 – воздушный зазор; 2 – пьезоэлектрический актуатор; 3 – оптоволоконно; 4 – гнездо для оптоволоконного кабеля; 5 – зеркало; 6 – стеклянная гильза

Подобная система коррекции работает следующим образом: к пьезоэлектрическому приводу с отверстием в центре с двух сторон присоединяется оптоволоконный кабель.

Непосредственно привод центрирует оптическую ось двух кабелей на нанометровом уровне, что является одним из наиболее эффективных применений характеристик пьезоэлектрических актуаторов.

С 2000-х годов пьезоэлектрические актуаторы находят широкое применение в области потребительской электроники, например, в видеооборудовании. Одно из типичных применений – CCD привод.

Современные цветные видеокамеры для улучшения качества изображения используют метод «отклонения пикселей».

Суть метода – смещение CCD-матрицы на половину пикселя в горизонтальном направлении для увеличения количества «видимых пикселей».

Поскольку каждый CCD-пиксель обычно имеет размер от 5 до 7 мкм, расстояние отклонения составляет примерно половину от этого, или от 2,5 до 3,5 мкм.

Пьезоэлектрический актуатор также применяется для механической коррекции отклонений.

Универсальность, демонстрируемая применением данного устройства, привлекает внимание инженеров из-за его высокой точности позиционного управления и высокой скорости отклика при отслеживании съемки камеры.

Метод «отклонения пикселя» также используется для ЖК-проекторов с большой диагональю и видеокамер. Техника CCD привода также применяется для создания более компактного электронного оборудования, такого как цифровые камеры.

По мере увеличения количества пикселей число цифровых камер, в которых применяется метод стабилизации изображения, также увеличилось.

Бюджетные цифровые камеры часто корректируют размытие картинки, возникающее при дрожании рук, посредством электроники, дорогие же устройства, производящие изображения высокой четкости, корректируют «эффект дрожания рук» оптическими средствами.

Высокая скорость отклика пьезоэлектрического актуатора незаменима при выпол-

нении оптической коррекции изображения высокой чёткости.

Так, на рис. 4 схематично показана система коррекции изображения в цифровой камере.

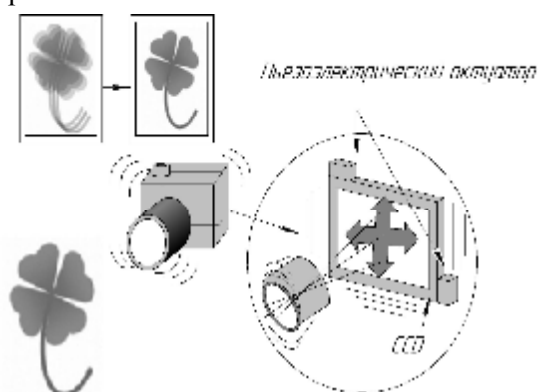


Рис. 4. Система коррекции изображения

Эта система корректирует эффект «дрожащих рук», перемещая CCD в плоскости XY и «нейтрализуя» эффект от движения рук, регистрируемых гиросенсором, соответственно пьезоэлектрический актуатор используется для управления матрицей CCD.

Выводы. Проведя анализ областей применения пьезоэлектрических актуаторов в микроманипуляторных системах, показана возможность применения этих устройств для обеспечения перемещений с различными степенями свободы, гарантирующего минимальные их погрешности.

Прогноз мирового рынка микроманипуляторных систем консалтинговой компанией "Yole Développement" (Франция) позволил установить, что на сегодняшний момент этот рынок почти достиг отметки 8 млрд. долл. США, а уже к 2021 году – составит около 12 млрд. долл. США [19].

Такое увеличение рынка микроманипуляторных систем связано с ростом спроса на них, резкое увеличение объемов производства, в свою очередь, ведет к значительному уменьшению себестоимости этих устройств. Так, например, типичный пьезоэлектрический актуатор в 2007 году стоил более одной тыс. долл. США, но уже в 2015 году аналогичное устройство при том же уровне функциональности имело стоимость около одного десятка долл. США.

Перспективным направлением является применение пьезоэлектрических актуаторов в микроманипуляционных системах станков с ЧПУ. С помощью таких систем можно обес-

печивать микроперемещения во всех необходимых степенях свободы в зависимости от поставленной задачи и с минимальными погрешностями (суммарная погрешность не должна превышать 5%).

Список литературы

1. Бобцов А. А., Бойков В. И., Быстров С. В., Григорьев В. В. Исполнительные устройства и системы для микроперемещений. Санкт-Петербург: СПбГУ ИТМО, 2011. 131 с.
2. Антонюк В. С., Белова А. В., Петренко С. Ф. Підвищення точності позиціонування лінійних направляючих мікроманіпуляційних систем з п'єзоелектричним двигуном. *Високі технології в машинобудуванні: зб. наук. праць*. Харків: НТУ «ХПІ», 2008. Вип. 2 (17). С. 12–20.
3. Пьезоэлектрические актуаторы пластинчатые изгибного типа. URL: <http://www.elpapiezo.ru/curve.shtml> (дата обращения: 15.10.2017).
4. Tan U. X., Latt W. T., Shee C. Y., Ang W. T. A low-cost flexure-based handheld mechanism for micromanipulation. *IEEE ASME Trans. Mechatronics*. 2011. Iss. 4. P. 773–778.
5. Choi D., Riviere C. Flexure-based manipulator for active handheld microsurgical instrument. *Proc. 27th Annu. Int. Conf. IEEE Eng. Med. Biol. Soc.* 2005. Iss. 5. P. 5085–5088.
6. Sungwook Y., Mac-Lachlan R. A., Riviere C. N. Manipulator design and operation for a six-degree-of-freedom handheld tremor-canceling microsurgical instrument *IEEE ASME Trans. Mechatronics*. 2015. V. 20 (2). P. 761–772.
7. Бардин В. А., Васильев В. А., Чернов П. С. Влияние внутренних дестабилизирующих факторов на пьезоактуаторы и системы нано- и микропозиционирования. *Университетское образование (МКУО-2014): XVIII Междунар. науч.-метод. конф.* (г. Пенза, 10-11 апреля 2014 г.). Пенза: Изд-во ПГУ, 2014. 584 с.
8. Fleming A. J. A review of nanometer resolution position sensors: Operation and performance. *Sensors and Actuators A*. 2013. № 190. P. 106–126.
9. Бардин В. А., Васильев В. А., Чернов П. С. Принципы построения и пер-

- спективы исследований пьезоактюаторов для нано- и микропозиционирования. *Нано- и микросистемная техника*. Москва: Новые технологии, 2015. № 1. С. 90–93.
10. Ramadan A., Inoue K., Arai T., Takubo T. New architecture of a hybrid two-fingered micro-nano manipulator hand: optimization and design. *Adv. Robot.* 2008. V. 2. Iss. 2–3. P. 235–260.
 11. Рябцов А. В. Специальные типы пьезоэлектрических актуаторов для оптических коммутационных устройств. *Вісник ДУИКТ*. 2013. № 1. С. 53–57.
 12. Antonjuk V. S., Pryhodko A. V. To study how micromanipulation system work at the nanoscale. *Вісник НТУУ «КПІ». Серія Приладобудування*. 2012. Вип. 44. С. 5–15.
 13. Ланин В., Турцевич А., Керенцев А. Дозирование припоя при автоматизированном монтаже кристаллов полупроводниковых приборов. *Компоненты и технологии*. 2008. № 11. С. 154–158.
 14. Амельченко А. Г., Бардин В. А., Васильев В. А. Системы управления и элементы усиливающего пьезоэлектрического актуатора для прецизионного позиционирования. *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки*. 2015. № 3 (35). С. 111–124.
 15. Fleming M. B., Hutley M. C. Blazed diffractive optics. *Appl. Opt.* 1997. Iss. 36. P. 4635–4643.
 16. Bondarenko M., Bondarenko I. Power supply method of micro- and nanosystem engineering devices. *Energy Challenges & Mechanics: 6th International Symp. (Inverness, 14-18 August 2016)*. Inverness, Scotland, UK, 2016. P. 245–246.
 17. Канашевич Г. В., Бондаренко М. О. Сучасні варіанти з'єднань волоконно-оптичних ліній зв'язку. *Вісник Черкаського інженерно-технологічного інституту. Серія: Техн. науки: зб. наук. праць*. Черкаси: ЧІТІ, 1998. № 3. С. 56–62.
 18. Бардин В. А., Васильев В. А. Принципы построения пьезоактюаторов для нано- и микроперемещений. *Опто-, наноэлектроника, нанотехнологии и микросистемы: тр. XVI Междунар. конф.* Ульяновск: УлГУ, 2013. С. 316–317.
 19. Status of the MEMS industry 2016 Edition. Sample of the analysis – 2016. Lyon, France: Yole Development SARL.
- ### References
1. Bobtsov, A. A., Boikov, V. I., Bystrov, S. V., Grigorev, V. V. (2011) Implementing devices and systems for micromovements. SPb.: SPbGU ITMO, 131 p.
 2. Antoniuk, V. S., Belova, A. V., Petrenko, S. F. (2008) Improved positioning accuracy of linear guiding micromanipulation systems with piezoelectric motor. *Vysoki tehnolohiyi v mashynobuduvanni: collection of scientific works*. Kharkiv: NTU “KhPI”, v. 2 (17), pp. 12–20.
 3. Piezoelectric actuators lamellar bending type. URL: <http://www.elpapiezoz.ru/curve.shtml> (15.10.2017).
 4. Tan, U. X., Latt, W. T., Shee, C. Y., Ang, W.T. (2011) A low-cost flexure-based handheld mechanism for micromanipulation. *IEEE ASME Trans. Mechatronics*, iss. 4, pp. 773–778.
 5. Choi, D., Riviere, C. (2005) Flexure-based manipulator for active handheld microsurgical instrument. *Proc. 27th Annu. Int. Conf. IEEE Eng. Med. Biol. Soc*, iss. 5, pp. 5085–5088.
 6. Sungwook, Y., MacLachlan, R. A., Riviere, C. N. (2015) Manipulator design and operation for a six-degree-of-freedom handheld tremor-canceling microsurgical instrument. *IEEE ASME Trans. Mechatron*, v. 20 (2), pp. 761–772.
 7. Bardin, V. A., Vasilev, V. A., Chernov, P. S. (2014) Influence of internal destabilizing factors on piezoactuators and nano- and micropositional systems. *Universitetskoye obrazovaniye (MKUO-2014): XVIII Internat. sci. method. conf.* (Penza, April 10-11, 2014). Penza: PSU, 584 p.
 8. Fleming, A. J. (2013) A review of nanometer resolution position sensors: operation and performance. *Sensors and Actuators A*, № 190, pp. 106–126.
 9. Bardin, V.A., Vasiliev, V. A., Chernov, P. S. (2015) Principles of construction and prospect of research of piezoelectric actuators for nano- and micropositioning. *Nano i mikrosistemnaya tehnika*. Moscow: Novyye tehnologiyi, iss. 1, pp. 90–93.
 10. Ramadan, A., Inoue, K., Arai, T., Takubo, T. (2008) New architecture of a hybrid two-fingered micro-nano manipulator hand: optimization and design. *Adv. Robot*, v. 2, iss. 2–3, pp. 235–260.

11. Ryabtsov, A. V. (2013) Special types of piezoelectric actuators for optical switching devices. *Visnyk DUIKT*, iss.1, pp. 53–57.
12. Antonjuk, V. S., Pryhodko, A. V. (2012) To study how micromanipulation system work at the nanoscale. *Visnyk NTUU "KPI"*, v. 44, pp. 5–15.
13. Lanin, V. Turtsevich, A., Kerentsev, A. (2008) Dosing of solder in the automated installation of crystals of semiconducting devices. *Komponenty i tehnologiyi*, iss. 11, pp. 154–158.
14. Amelchenko, A. G., Bardin, V. A. Vasiliev V. A. (2015) Control systems and elements of a reinforcing piezoelectric actuator for precision positioning. *Izvestiya vysshyyh uchebnyh zavedenuu. Povolzhskii region. Tehnicheskiye nauki*, iss. 3 (35), pp. 111–124.
15. Fleming, M. B., Hutley, M. C. (1997) Blazed diffractive optics. *Appl. Opt.*, iss. 36, pp. 4635–4643.
16. Bondarenko, M., Bondarenko, I. (2016) Power supply method of micro- and nano-system engineering devices. *Energy Challenges & Mechanics: 6th Internat. Symp. (Inverness, August 14-18, 2016)*. Inverness, Scotland, UK, pp. 245–246.
17. Kanashevich, G. V., Bondarenko, M. O. (1998) Modern variants of connections of fiber optic communication lines. *Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo tehnologichnogo universitetu. Seria: Tehnichni nauky: collection of scientific works*. Cherkasy: ChITI, iss. 3, pp. 56–62.
18. Bardin, V. A., Vasil'ev, V. A. (2013) Principles of constructing piezoactuators for nano- and microspaces. *Opto-, nanoelektronika, nanotehnologiyi i mikrosistemy: proc. of XVI Internat. conf.* Ulyanovsk: USU, pp. 316–317.
19. Status of the MEMS industry 2016 Edition. Sample of the analysis – 2016, Lyon, France: Yole Development SARL.

A. G. Novakovskii,

V. S. Antoniuk, D.Sc., professor,

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kiev Polytechnic Institute”

37, Peremohy ave., Kyiv, 03056, Ukraine,

S. F. Petrenko, D.Sc., professor

Research and production complex “Lileya”, Kyiv, Ukraine

APPLICATIONS OF PIEZOELECTRIC ACTUATORS IN MICROMANIPULATORS

In the article features of the use of piezoelectric actuators in micromanipulative systems for carrying out displacements at micron level are considered. The purpose of this article is to analyze the application areas of piezoelectric actuators in micromanipulative systems with further recommendations regarding the application of these systems to provide movement with varying degrees of freedom, which guarantees minimum errors in such displacements. The analysis of the application of piezoelectric actuators in micromanipulative systems of various areas of human activity has been carried out. The effectiveness of using piezoelectric actuators in microsurgery and biology is shown. It has been established that the direction of the use of actuators in micromanipulative systems of CNC machines is promising to ensure the movements in all necessary degrees of freedom with minimal errors.

Keywords: piezoelectric actuators, micromanipulators, CNC machines, positioning accuracy, piezoelectric transducers.

Статтю представляє В. С. Антонюк, д.т.н., професор.