

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕДМЕТНОГО СТОЛИКА С БИМОРФНЫМИ ПЬЕЗОАКТЮАТОРАМИ

ЗИЕП ХОАНГ ФИ, А. Б. СМЕРНОВ

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
195251, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: 123smirnov@list.ru

Проанализированы варианты многокоординатных платформ приборов для микропозиционирования объектов. Предложен двухкоординатный предметный столик микроскопа с параллельной кинематикой и пьезоэлектрическим приводом на базе биморфных пьезоактюаторов. Приведены результаты экспериментальных исследований действующего макета столика и сделаны выводы по их использованию.

Ключевые слова: предметный столик, конструкция, биморфные пьезоэлектрические актюаторы, эксперименты, микроперемещение, напряжение, гистерезис

В исследованиях в области микроэлектроники, биологии широко используются различные устройства для систем микро- и нанопозиционирования с 1—6 степенями подвижности [1, 2]. Мировым лидером в производстве таких устройств является компания Physik Instrumente (PI, Германия), которая более чем за тридцать лет разработала широкую гамму устройств позиционирования с пьезоэлектрическими приводами [3]. Для относительно больших перемещений (до 50—100 мм) с погрешностью порядка нанометров в качестве пьезоприводов используются ультразвуковые пьезодвигатели, для микроперемещений (до 1—10 мкм) с такой же погрешностью — пьезоэлектрические многослойные актюаторы, работающие на растяжение—сжатие. Во втором случае заслуживает внимания конструкция многокоординатных предметных столиков компании PI с пакетными многослойными пьезоактюаторами (рис. 1). Двухкоординатный предметный столик с последовательной кинематикой (рис. 1, а) содержит основание 1, представляющее собой рамку с квадратным окном, внутри которого находится подвижная платформа 2 в виде такой же рамки. Платформа может перемещаться относительно основания 1 по одной оси X в упругих направляющих 3 с помощью пьезоактюатора 4. Вторая подвижная платформа 5 внутри 2 имеет возможность перемещаться относительно нее по оси Y в упругих направляющих 6 при помощи пьезоактюатора 7. Недостатком такой упругой системы с последовательной кинематикой являются большие габариты. Свободный от указанного недостатка операционный столик (рис. 1, б) с параллельной кинематикой содержит основание 1 в виде квадратного окна, в котором подвижная платформа 2 может перемещаться относительно него по осям X и Y и поворачиваться вокруг оси Z в упругих направляющих 3.

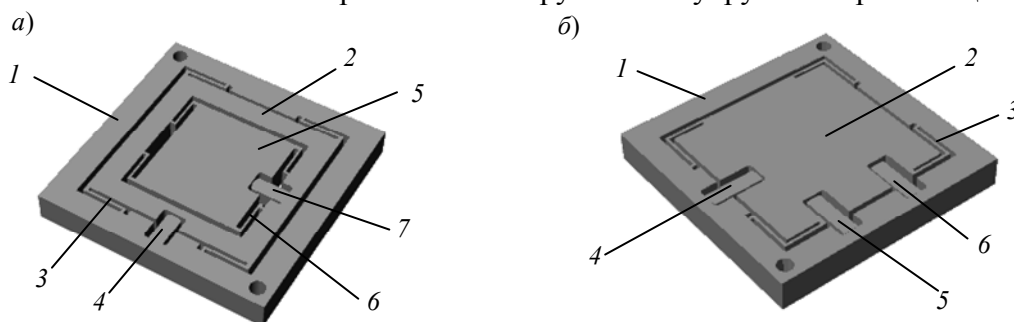


Рис. 1

При помощи пьезоактюатора 4 осуществляется микроперемещение платформы 2 по оси X , а при помощи пьезоактюаторов 5 и 6 — по оси Y (в случае подачи на них одинакового напряжения). Для поворота вокруг оси Z , перпендикулярной плоскости XY , на пьезоактюаторы 5 и 6 подаются разные напряжения. На свободных участках боковых граней платформы установлены три емкостных датчика перемещений. Для повышения диапазона перемещений в 3—4 раза, но при значительном увеличении габаритов, возможно использование изгибно-натяжных пьезоактюаторов [4].

Для работы с микрообъектами при медицинских и биологических исследованиях (пример: выделение одной или нескольких клеток для микроэррей-исследований при разработке молекулярных маркеров для персонализированной медицины; измерение мембранной проводимости клеток) часто необходимы микроперемещения предметного столика до 1 мм по двум осям с погрешностью не более 0,1 мкм и поворот до $0,01^\circ$ [5, 6]. Поэтому возникла идея использования биморфных пьезоэлектрических актюаторов (БПА) по схеме с параллельной кинематикой, подобной представленной на рис. 1, б.

Для грубых перемещений по осям X , Y , Z в диапазоне до 50 мм возможно использование трехкоординатного модуля на базе шаговых двигателей. Авторами настоящей статьи разработан автоматизированный столик для микроскопа, состоящий из трехкоординатного модуля грубых перемещений, на подвижной платформе которого закреплен модуль точных перемещений на базе биморфных пьезоактюаторов с предметным столиком. В этом случае нет необходимости оснащать модуль грубых перемещений датчиками перемещений.

Такая автоматизированная система имеет на порядок ниже стоимость по сравнению с высокоточными одномодульными позиционирующими системами такого же диапазона перемещений, оснащенными абсолютными энкодерами в качестве датчиков перемещений.

Двухкоординатный модуль точных перемещений (МТП), обеспечивающий возможность угловой корректировки предметного столика (рис. 2), состоит из БПА 1—4, выступы которых контактируют со столиком 5, пружины 6 и датчиков положения 7—9. При подаче напряжений U_1 и U_2 на БПА 1 и 2 столик перемещается по оси Y , а при подаче напряжений U_3 и U_4 на БПА 3 и 4 — по оси X . Пружина 6 служит для поджима столика к БПА 1 и 2.

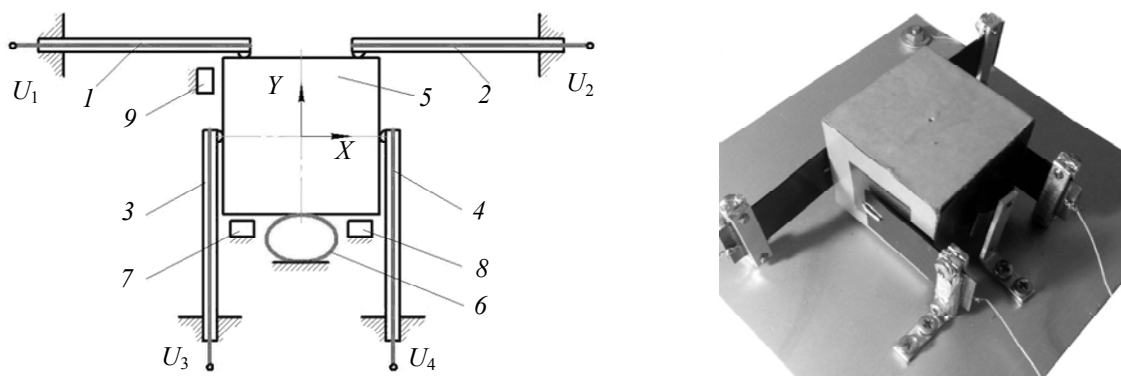


Рис. 2

Задачей экспериментального исследования действующего макета МТП являлось определение зависимости микроперемещений по двум координатам от напряжений, подаваемых на БПА, в квазистатическом режиме. Цель исследования — определить работоспособность предложенного устройства и диапазона микроперемещений. В действующем макете МТП предметный столик размером 40×40×40 мм может двигаться относительно основания на трех промежуточных стальных шариках диаметром 1,5 мм. В качестве БПА были использованы пьезоактюаторы фирмы APC размером 40×20×0,6 мм (Stripe Actuator №40-2020) [7].

Для проведения исследований была разработана экспериментальная установка (рис. 3), состоящая из микроскопа (МБС-10) 1, двухкоординатного столика 2 с БПА, неподвижного

основания 3, зафиксированного на установочной плите 4. Все БПА были поочередно подключены к регулируемому источнику напряжения 5. Полученное с помощью видеокамеры (МТН-222) 7 изображение исследуемой зоны столика выводилось на монитор (VM9/12) 6. Для определения перемещений изображения были предварительно откалиброваны с погрешностью 5 мкм при помощи концевых мер длины. Для повышения качества изображения использовалась лампа 8 с регулятором освещения 9.

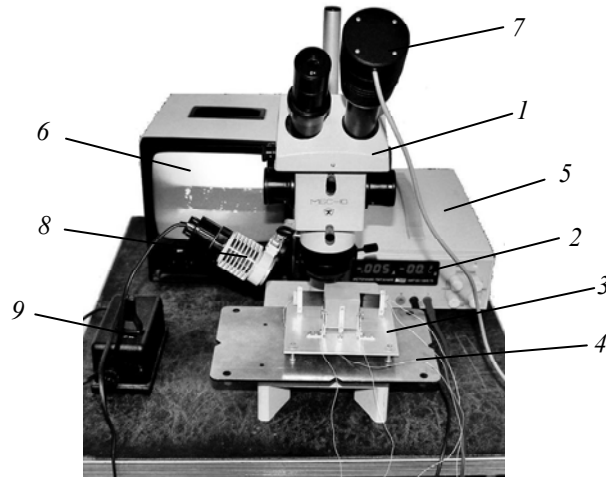


Рис. 3

При исследовании микроперемещений был проведен ряд опытов с напряжением в диапазоне от -50 В до $+50$ В (шаг 10 В) при стабильной температуре 21 °С. Первоначально экспериментальные значения имели большой разброс, поэтому для получения достоверных результатов потребовалось предварительно сделать несколько пробных прогонов (режим „тренировки“). Аналогичное „поведение“ БПА, используемых в качестве приводов адаптивных деформируемых зеркал лазерных систем, отмечено в статье В. Д. Попова [8], а также в [9].

На начальном этапе проводились эксперименты без столика с каждым БПА, закрепленным при помощи винтов на неподвижном основании уголком с планкой через резиновую прокладку. Прокладка предназначена для регулирования прижима БПА к уголку. Перемещения измерялись на свободном конце БПА с толкателем в виде закрепленной стальной скобки.

На рис. 4 проиллюстрирована зависимость перемещения конца БПА от подаваемого напряжения в диапазонах $0...+50$ и $0...-50$ В для двух значений силы затяжки F_3 винтов (сила затяжки определялась по степени сжатия резиновой прокладки).

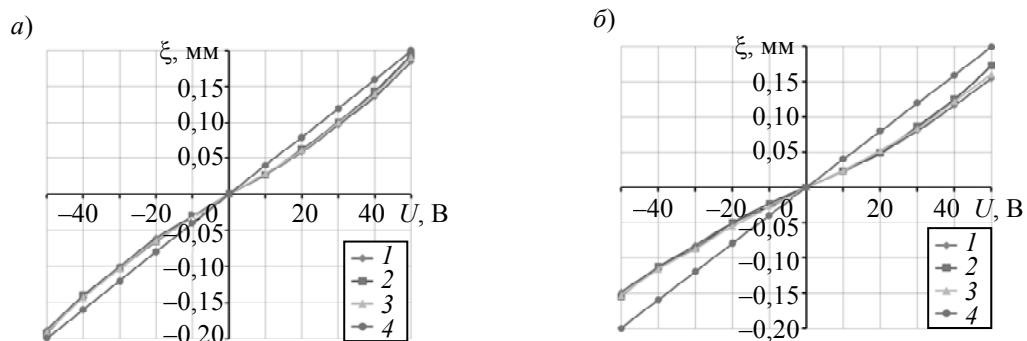


Рис. 4

Кривые 1—3 получены экспериментально, а 4 соответствует теоретической зависимости по формуле

$$\xi = \frac{3}{4} \cdot \frac{d_{31} \left[\left(h_P + \frac{h_M}{2} \right)^2 - \frac{h_M^2}{4} \right] l^2}{\left[E_M s_{11}^E \frac{h_M^3}{8} + \left(h_P + \frac{h_M}{2} \right)^3 - \frac{h_M^3}{8} \right] h_P} U, \quad (1)$$

где l — длина БПА, ξ — перемещение свободного конца БПА, E_M — модуль упругости средней пассивной части (рессоры) БПА, s_{11}^E — податливость пьезокерамики, d_{31} — пьезомодуль, h_M и h_P — толщина рессоры и пьезоэлектрического элемента БПА соответственно, U — напряжение (формула (6.28) из [10]). Численные значения параметров БПА взяты из [7].

Результаты экспериментов и расчетов показали, что при $F_3 \approx 20$ Н (рис. 4, а) экспериментальные зависимости близки к теоретической в крайних точках измерений и имеют максимальное отклонение (16 %) в середине диапазона. В случае $F_3 \approx 40$ Н (рис. 4, б) экспериментальные значения перемещений меньше теоретических во всем диапазоне напряжений, максимальное отклонение — 25 %. Таким образом, чем больше сила затяжки, тем меньше перемещение свободного конца БПА.

На втором этапе проводились эксперименты по определению зависимости перемещения концов БПА без столика (при силе затяжки 20 Н) и столика по осям X и Y от напряжения, подаваемого на соответствующие БПА, в циклическом режиме. Результаты исследований действующего макета двухкоординатного столика приведены на рис. 5, а — для оси X и б — для оси Y . Кривые 1 соответствуют перемещению свободных концов БПА без столика, 2—4 — сериям экспериментов перемещения столика, 5 — теоретической зависимости по формуле (1).

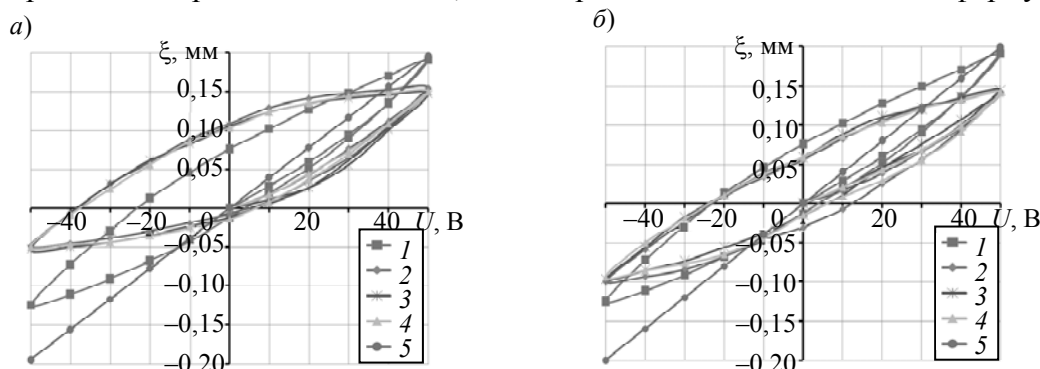


Рис. 5

Из графиков видно, что полная амплитуда перемещений столика (диапазон напряжений $-50 \dots +50$ В) составляет: по оси X — 60 % от амплитуды перемещений свободного БПА и 50 % от полной амплитуды по формуле (1); по оси Y — 85 % от амплитуды перемещений свободного БПА и 63 % от полной амплитуды по формуле (1). Из этого можно сделать вывод, что на силы сопротивления столика при движении относительно основания и БПА по оси X тратится ≈ 40 % энергии, по оси Y — ≈ 15 %. Это связано с тем, что при движении по оси X силы трения выше из-за действия пружины, поджимающей столик к БПА вдоль оси Y . Таким образом, диапазон перемещений столика по обеим осям примерно в два раза меньше, чем у свободного БПА, причем графики гистерезисных петель сдвигаются по осям X и Y вверх относительно начала координат.

Из графиков также видно, что гистерезис для перемещений столика по оси X имеет коэффициент 58 %, а по оси Y — 32 %. Коэффициент гистерезиса для БПА без столика по оси X — 26 % (рис. 5, а) и 27 % — по оси Y (рис. 5, б), это связано с различием кинематических цепей при перемещениях столика по осям X и Y : по оси Y оба БПА действуют в одном направлении, преодолевая совместно силы трения и действие пружины, упругий гистерезис ма-

териала (бериллиевая бронза) которой на порядок меньше гистерезиса пьезокерамики. По оси X фактически действует только один БПА, толкая столик. При этом он преодолевает силы трения и малое сопротивление второго БПА, который, двигаясь параллельно в том же направлении, что и первый, только придерживает столик и постоянно контактирует с ним.

Сравнение гистерезисных замкнутых кривых 1 и 2—4 на рис. 5, а показывает, что коэффициент гистерезиса при воздействии на столик по оси X в 2,2 раза больше коэффициента гистерезиса одиночного БПА без столика. Аналогично из рис. 5, б следует, что коэффициент гистерезиса при действии двух БПА на столик в 1,2 раза больше, чем для одиночного БПА без столика.

Гистерезис существенно усложняет ручное управление выходом столика в заданную точку по координатам X и Y . Для облегчения этой задачи необходимо введение обратной связи по обеим координатам. В этом случае точность позиционирования столика будет зависеть от стабильности напряжения, подаваемого на БПА, и точности его задания, а также погрешности датчиков положения.

Результаты экспериментальных исследований и их анализ показали, что:

— для получения стабильного характера зависимости перемещения столика от подачи напряжения необходимо выполнить несколько движений во всем диапазоне, для этого система управления должна обеспечивать режим „тренировки“;

— на диапазон перемещений свободного БПА (без столика) влияет сила затяжки крепления (чем она больше, тем меньше перемещение БПА: диапазон перемещений уменьшается на 25 % при увеличении силы затяжки в два раза);

— в циклическом режиме по оси X гистерезис составляет 58 %, по оси Y — 31 %. Почти двукратное различие гистерезисов связано в основном с тем, что при перемещении столика на одинаковое расстояние по оси Y действуют оба БПА, по оси X один БПА перемещает столик, а второй БПА его придерживает;

— при движении по оси X на силы сопротивления тратится примерно в 2,5—3 раза больше энергии, чем при движении по оси Y из-за преодоления больших сил трения между столиком и БПА при действии пружины. Диапазон перемещений примерно в два раза меньше диапазона перемещений для свободного БПА;

— для обеспечения высокой стабильности и точности позиционирования столика необходимо введение в систему управления обратной связи по положению.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Li Y. and Xu Q. Development and assessment of a novel decoupled XY parallel micropositioning platform // IEEE/ASME Transact. on Mechatronics. 2010. Vol. 15, N 1.
2. Kang D. Development of six-axis parallel nano-positioning system based on flexure joints and piezoelectric stepping positioners: Ph.D. Thesis. KAIST, 2007. 100 p.
3. Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG [Электронный ресурс]: <<http://www.physikinstrumente.com/products.html>>.
4. Бардин В. А. Системы управления высокоточными устройствами позиционирования на основе пьезоэлектрических актюаторов: Дис. ... канд. техн. наук. Пенза, 2015. 169 с.
5. Ciofani G., Mencassi A. Piezoelectric Nanomaterials for Biomedical Applications. Berlin—Heidelberg: Springer-Verlag, 2012. 245 p.
6. Подгорный О. В., Лазарев В. Н., Говорун В. М. Лазерная микродиссекция в биологии и медицине [Электронный ресурс]: <http://www.tsitologiya.cytspb.rssi.ru/54_5/podgorny_ms.pdf>.
7. APC International, Ltd. [Электронный ресурс]: <<https://www.americanpiezo.com/standard-products/strip-actuators.html>>.

8. Попов В. Д. Исследование гистерезиса биморфных деформируемых зеркал [Электронный ресурс]: <<http://pvd2.narod.ru/publ/hysteresis/hysteresis.htm>>.
9. Andò B., Giannone P., and Graziani S. A Low-Cost Experimental Setup to Characterize Piezoelectric Cantilever Bimorphs // IEEE Transact. on Instrumentation and Measurement. 2008. Vol. 57, N 1.
10. Смирнов А. Б. Элементная база автоматических машин и оборудования. Мехатронные модули микроперемещений технологических машин. СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. 172 с.

Сведения об авторах

- Зиен Хоанг Фи** — аспирант; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого; E-mail: longhoang1791986@yahoo.com
- Аркадий Борисович Смирнов** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого; E-mail: 123smirnov@list.ru

Рекомендована СПбПУ

Поступила в редакцию
23.03.16 г.

Ссылка для цитирования: Зиен Хоанг Фи, Смирнов А. Б. Исследование предметного столика с биморфными пьезоактюаторами // Изв. вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59, № 12. С. 1043—1048.

STUDY OF STAGE WITH THE BIMORPH PIEZO-ACTUATORS

Diep Hoang P, A. B. Smirnov

*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
195251, St. Petersburg, Russia
E-mail: 123smirnov@list.ru*

Variants of multi-axis platforms used in devices for object micro-positioning are analyzed. A microscope XY-stage with parallel kinematic and piezoelectric drive based on bimorph actuators is recommended. Results of experimental study of the XY-stage are presented and conclusions are formulated.

Keywords: XY-stage, design, bimorph piezoelectric actuators, experiments, micro displacement, voltage, hysteresis

Data on authors

- Diep Hoang P** — Post-Graduate Student; Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University; E-mail: longhoang1791986@yahoo.com
- Arcady B. Smirnov** — Dr. Sci., Professor; Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University; E-mail: 123smirnov@list.ru

For citation: Diep Hoang P, Smirnov A. B. Study of stage with the bimorph piezo-actuators multi-axis platforms devices for micropositioning of objects // Izv. vuzov. Priborostroyeniye. 2016. Vol. 59, N 12. P. 1043—1048 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2016-59-12-1043-1048