

DOI 10.5862/JEST.238.18

УДК 621.7.077: 681.513.3

А.Б. Смирнов, Ф. Зуен Хоанг, М.Н. Полищук

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ДВУХКООРДИНАТНОГО СТОЛИКА С ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ АКТЮАТОРАМИ

A.B. Smirnov, Ph. Diep Hoang, M.N. Polishchuk

COMPUTER MODELING OF THE XY-STAGE WITH PIEZOELECTRIC ACTUATORS

В работе приведены результаты аналитического исследования и компьютерного моделирования работы двухкоординатного столика микроскопа с пьезоэлектрическим приводом. Описан принцип действия двухкоординатного операционного столика микроскопа с параллельной кинематикой с биморфными пьезоэлектрическими актюаторами (БПА). Найдены зависимости перемещений столика по осям X и Y от электрических напряжений, подаваемых на БПА в квазистатическом режиме. Составлены уравнения движения столика по двум координатам, на основе которых выведены передаточные функции перемещений столика при управляющих воздействиях – напряжениях на БПА. Для компьютерного моделирования в среде SIMULINK разработаны структурные схемы системы управления с ПИД-регулятором при шаговом ступенчатом воздействии по осям X и Y . Компьютерное моделирование показало, что при введении ПИД-регулятора в систему управления динамическая система ведет себя как аperiodическое звено с достаточным для решения задач позиционирования быстродействием.

ДВУХКООРДИНАТНЫЙ ОПЕРАЦИОННЫЙ СТОЛИК МИКРОСКОПА; БИМОРФНЫЙ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ АКТЮАТОР; ТОЧНОЕ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЕ; ПИД-РЕГУЛЯТОР; КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ; БЫСТРОДЕЙСТВИЕ СИСТЕМЫ.

The study provides results of analytical research and computer simulation of an XY microscope stage with a piezoelectric actuator. It describes the operating principles of the XY microscope stage with parallel kinematics with bimorph piezoelectric actuators (BPA). We found the dependences of the displacement stage for the X and Y axes of the voltages applied to the BPA in quasi-static mode. We compiled equations of motion of the stage in two coordinates. Transfer functions of the displacement stage during controlling actions, i.e., voltage on BPA, are derived on the basis of equations of motion. We developed block diagrams of the control system with a PID controller for computer modeling in SIMULINK at stepping exposure by the X and Y axes. Computer modeling has shown that with the introduction of the PID controller into the control system the dynamic system acts like an aperiodic link with sufficient speed positioning tasks.

OPERATING XY MICROSCOPE STAGE; BIMORPH PIEZOELECTRIC ACTUATOR; ACCURATE POSITIONING; PID CONTROLLER; COMPUTER MODELING; SYSTEM RESPONSE SPEED.

Научные успехи современной биологии и медицины, в частности в диагностике и лазерной микродиссекции клеток, связаны с прогрессом в создании новых устройств микроперемещений, способных проводить действия на клеточном уровне [1, 2]. При работе с микрообъектами необходимы микроманипуляционные системы, в состав которых входят микроманипуляторы и многокоординатные позиционирующие предметные сто-

лики, чья рабочая область находится в поле зрения микроскопа. Такие фирмы, как Physik Instrumente, Cedrat Technologies, New Scale Technologies и др., производят высокоточную микропозиционирующую технику с пьезоэлектрическими приводами, однако их продукция сложна в изготовлении и имеет высокую стоимость. Создание относительно простых, дешевых и компактных устройств и их исследование – актуальная задача.

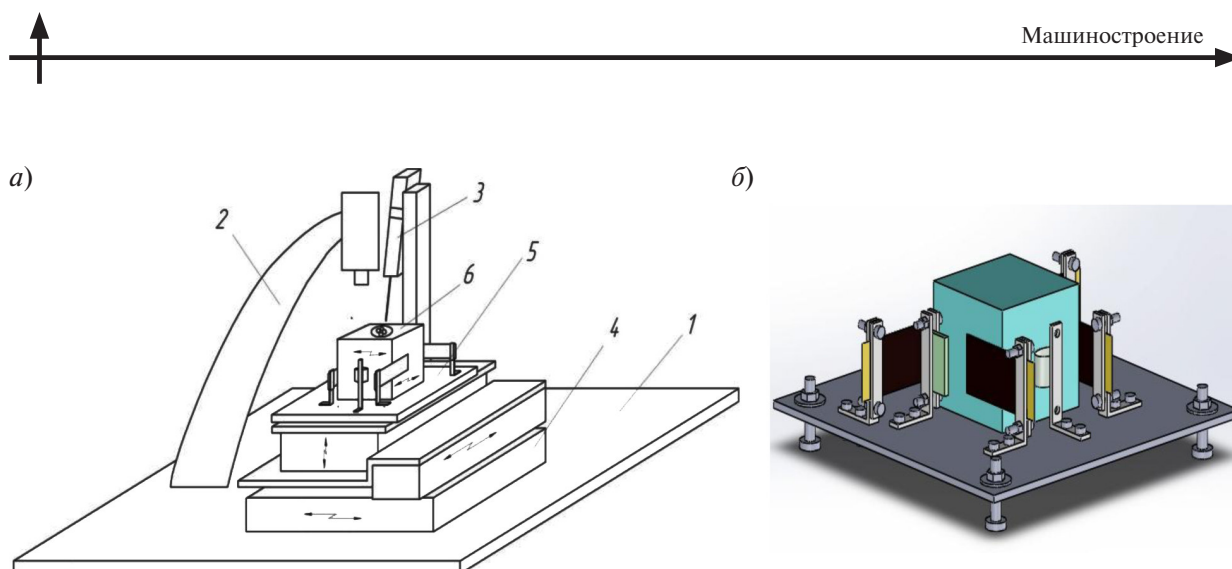


Рис. 1. Схема (а) комплекса для исследования микрообъектов (1 – стол; 2 – микроскоп; 3 – микроманипулятор; 4 – трехкоординатный модуль грубых перемещений; 5 – двухкоординатный модуль точных перемещений; 6 – операционный столик с микрообъектом) и 3D-модель модуля точных перемещений (б)

Одно из наиболее эффективных направлений в разработке высокоточных позиционирующих систем – это создание двухступенчатых по уровню точности устройств [3]. Такое направление перспективно для операционных столиков микроскопов, входящих в состав комплексов исследования микрообъектов. Многокоординатный операционный столик с этим принципом построения может состоять из модуля грубых и больших перемещений, на который устанавливается модуль точных и малых перемещений (рис. 1).

Цель исследования – разработка математических моделей модуля точных перемещений двухкоординатного столика с параллельной кинематикой, имеющего простую конструкцию, возможность корректировки углового смещения и низкую стоимость. Планируется разработать

такой двухкоординатный столик с пьезоприводом при диапазоне перемещения по двум осям до 1 мм с точностью позиционирования до 0,1 мкм, который устанавливается на двухкоординатный модуль грубых перемещений, выполненный на базе шаговых двигателей с диапазоном перемещения по осям порядка 50 мм и более.

Принцип действия двухкоординатного столика

Рассмотрим принцип действия двухкоординатного столика (рис. 2, а) с четырьмя пьезоактюаторами. Биморфные пьезоэлектрические актюаторы (БПА) 1, 2 и 3, 4 закреплены консольно на основании 5 и контактируют выступами свободных концов со столиком 6. Пружина 7, выполненная, например, в виде упругого тонкого кольца, прижимает столик 6 к выступам БПА 1, 2 [4].

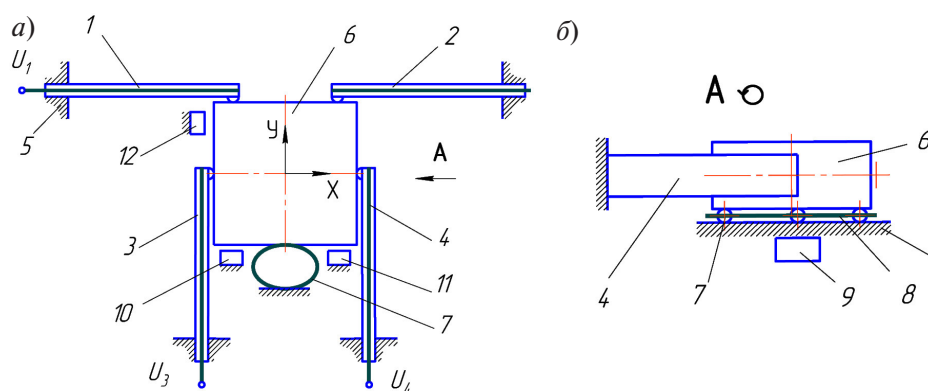


Рис. 2. Схема двухкоординатного столика: а) вид сверху; б) вид по стрелке А

Столик *б* установлен на шариках *7*, которые находятся на плоскости основания *5* (рис. 2, б). Шарика *7* размещены в гнездах плоского сепаратора *8*, который предотвращает их раскатывание. Прижим столика *б* к основанию *5* может осуществляться при помощи постоянного магнита *9*. На основании закреплены датчики перемещения *10* и *11*, которые определяют положение столика *б* по оси *Y*, а также имеется датчик перемещения *12*, определяющий положение столика по оси *X*.

При подаче электрических напряжений $U_1 = U_2$ на БПА *1* и *2* они изгибаются, и их свободные концы перемещают столик *б* по оси *Y* вниз, сжимая пружину *7*. При изменении знака напряжений U_1 и U_2 на противоположные концы БПА *1* и *2* перемещаются по оси *Y* вверх. За счет этого пружина *7* разжимается и перемещает столик *б* вверх. При неравном силовом воздействии БПА *1* и *2*, кроме перемещения вдоль оси *Y*, возникает угловое перемещение столика *б* в плоскости *XU*. По этой причине показания датчиков *10* и *11* будут разными, и система управления скорректирует напряжения U_1 и U_2 , чтобы выравнять показания датчиков *10* и *11*.

Для перемещения столика по оси *X* на БПА *3* и *4* подаются электрические напряжения $U_3 = U_4$. В этом случае свободные концы БПА перемещаются в одну сторону, сдвигая столик *б* вправо или влево в зависимости от знака напряжений. Такой принцип движения столика сходен с принципом перемещения детали в пьезоэлектрическом захвате с микропозиционированием [5, 6].

Для определения зависимости перемещения столика от напряжений, подаваемых на БПА в квазистатическом режиме, рассмотрим поведение БПА *1* при подаче напряжения U_1 отдельно без столика в квазистатическом режиме. При подаче напряжения U_1 свободный конец БПА *1* перемещается на величину ξ_0 :

$$\xi_0 = AU_1, \quad (1)$$

$$\text{где } A = \frac{3}{4} \frac{d_{31} \left[\left(h_p + \frac{h_M}{2} \right)^2 - \frac{h_M^2}{4} \right] l^2}{\left[E_M s_{11}^E \frac{h_M^3}{8} + \left(h_p + \frac{h_M}{2} \right)^3 - \frac{h_M^3}{8} \right] h_p};$$

E_M – модуль упругости средней пассивной части (рессора) БПА; s_{11}^E – податливость пьезокерамики; d_{31} – пьезомодуль; h_M и h_p – толщины со-

ответственно рессоры и пьезоэлектрического элемента БПА (формула 6.28 из [7]).

Условно будем считать, что перемещение $\xi_0 > 0$ в случае, когда свободный конец БПА *1* перемещается вниз, что соответствует напряжению $U_1 > 0$. Аналогично перемещению $\xi_0 < 0$ соответствует напряжению $U_1 < 0$. Для остальных БПА также будет справедливо (1), т. е. перемещение свободного конца БПА пропорционально подаваемому напряжению на каждый из четырех БПА:

$$\xi_{0i} = AU_i, \text{ где } i = 1, 2, 3, 4.$$

Чтобы восстановить первоначальное положение свободного конца БПА *1*, нужно приложить внешнюю блокирующую силу F_0 , которую можно найти из формулы, определяющей перемещение консольно закрепленной упругой балки:

$$\xi_0 = \frac{F_0 \lambda^3}{3}, \quad (2)$$

где λ – податливость поперечного сечения БПА, определяемая по (6.36) из [7],

$$\lambda = \frac{12}{b \left\{ E_M h_M^3 + 2 \frac{h_p^3}{s_{11}^E} \left[1 + 3 \left(1 + \frac{h_M}{h_p} \right)^2 \right] \right\}};$$

b – ширина БПА. Зависимость силы F , развиваемой БПА *1* на конце при подаче напряжения U_1 , от перемещения свободного конца имеет вид

$$F = -\frac{F_0}{\xi_0} \xi + F_0. \quad (3)$$

Графически она выражена известной механической характеристикой БПА (рис. 3, б). В частном случае при $F = 0$ перемещение свободного конца БПА максимально: $\xi = \xi_0$.

Подставив в (3) F_0 из (2), получим

$$F = \frac{3}{\lambda^3} (\xi_0 - \xi). \quad (4)$$

В этом выражении ξ_0 линейно зависит от приложенного напряжения U , поэтому развиваемая БПА сила F также линейно зависит от U .

Расчет перемещений столика по осям X и Y

Рассмотрим схему нагружения столика при одновременной подаче одинакового напряжения на БПА *1* и *2* (рис. 3, а). В этом случае на столик действуют силы F_1 и F_2 со стороны БПА *1* и *2*, а также сила F_c со стороны пружины.

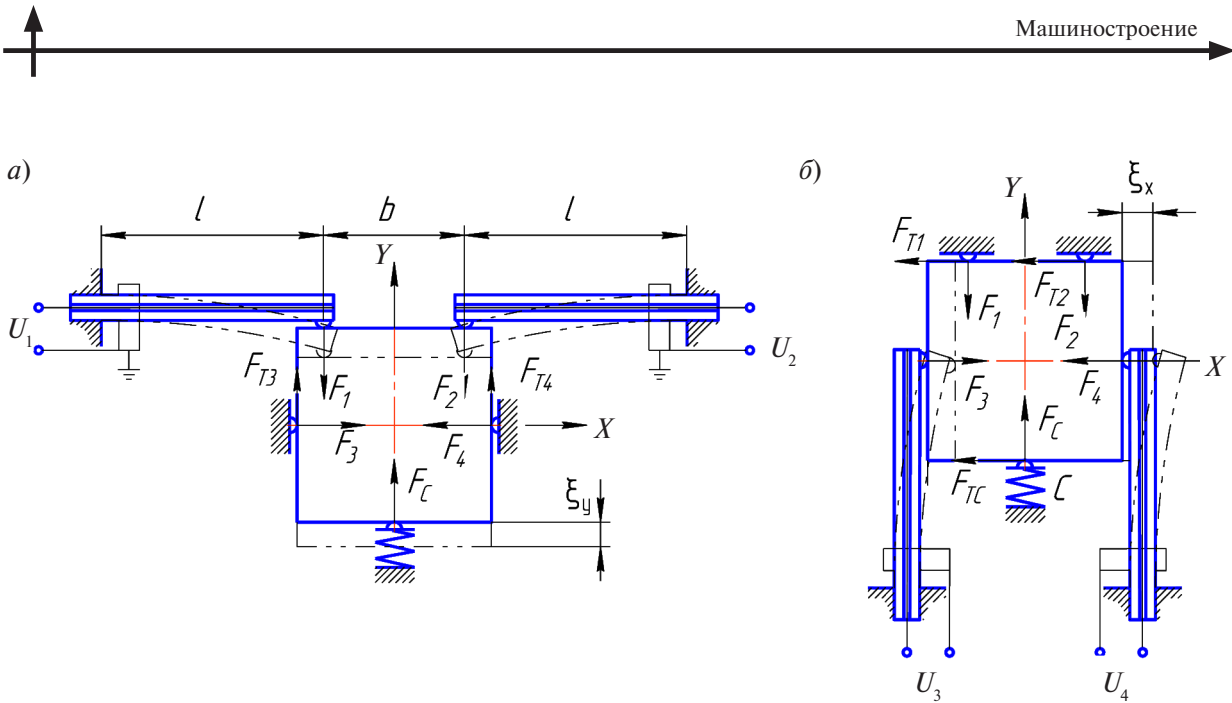


Рис. 3. Расчетная схема столика: а) при работе БПА 1 и 2; б) при работе БПА 3 и 4

Будем считать положение равновесия столика при $U_1 = U_2 = U_3 = U_4 = 0$ начальным положением. Допустим, что силы трения $F_{T3}, F_{T4} \ll \ll F_1, F_2, F_c$ и ими можно пренебречь. Силы трения между столиком и основанием также не учитываем. Тогда уравнение равновесия по оси Y имеет вид

$$F_1 + F_2 - F_c = 0, \tag{5}$$

а сила пружины $F_c = C \xi_y$, где C – коэффициент жесткости пружины, ξ_y – перемещение столика по оси Y .

Подставив в (5) силы $F_1 = F_2$ из (4), получим

$$\frac{6}{\lambda^3} (\xi_0 - \xi_y) = C \xi_y,$$

откуда перемещение по оси Y равно

$$\xi_y = \frac{\xi_0}{1 + \frac{\lambda^3 C}{6}}. \tag{6}$$

Из (6) следует, что максимальное перемещение столика по оси Y будет при условии $\lambda^3 C \rightarrow 0$. Это означает следующее: БПА 1 и 2 должны иметь минимальную податливость поперечного сечения λ и минимальное значение длины l , а также должен быть минимальный коэффициент жесткости пружины C . Таким образом, для увеличения перемещения ξ_y необходимо повысить жесткость БПА за счет увеличения толщины h_p пластин биморфа и его укорочения. Однако в

этом случае необходимо увеличивать напряжения U_1 и U_2 . Минимум жесткости пружины ограничен тем, что сжатая пружина должна преодолевать силы трения.

При подаче напряжения U_3 и U_4 на БПА 3 и 4 происходит перемещение столика по оси X (рис. 4, б). В этом случае на столик действуют силы F_3 и F_4 со стороны БПА 3 и 4. При фиксированном положении БПА 1 и 2 точки контакта столика со свободными концами БПА 1 и 2 при прижме столика пружиной C будут выполнять роль направляющих при перемещении его вдоль оси X .

Предположим, что свободные концы БПА 3 и 4 контактируют со столиком при $U_3 = U_4 = 0$. Допустим, что силы F_3, F_4 действуют по оси X , а силы трения F_{T1}, F_{T2}, F_{T3} в указанных точках контакта много меньше F_3, F_4 . Силы трения между столиком и основанием также не учитываем. При этих условиях определим перемещение ξ_x .

Подадим напряжение $U_3 > 0$ на БПА 3, а на БПА 4 – $U_4 = 0$. В этом случае БПА 4 будет действовать, как пассивная пружина, и столик переместится по оси X на величину ξ_{x3} . Уравнение статики по оси X имеет вид

$$F_3 - F_{04} = 0, \tag{7}$$

где сила сопротивления БПА 4, действующего как пружина, равна $F_{04} = C_p \xi_{x3}$.

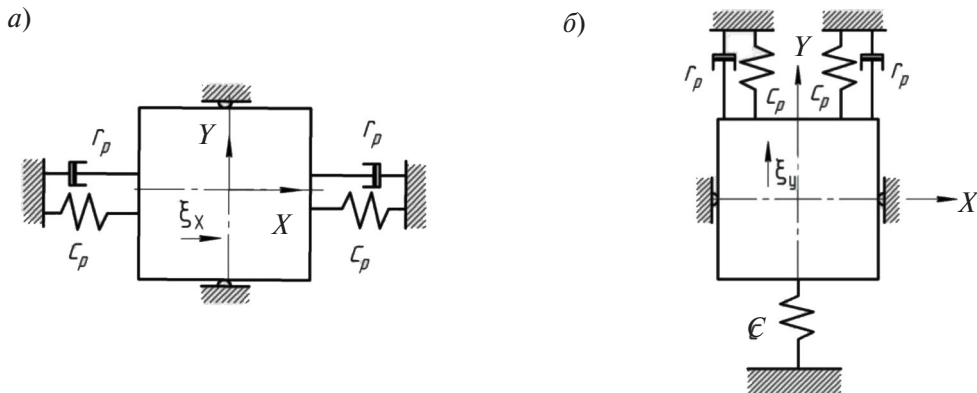


Рис. 4. Динамическая модель двухкоординатного столика с пьезоприводом: а) при движении по оси X ; б) придвижении по оси Y

Коэффициент жесткости C_p находим из (2):

$$C_p = \frac{3}{\lambda^3}$$
 Откуда окончательно получим

$$\xi_{X3} = \frac{\xi_0}{2}$$
 а с учетом (1) перемещение столика при подаче напряжения U_3

$$\xi_{X3} = \frac{A}{2} U_3.$$

Таким образом, при подаче напряжения U_3 только на БПА 3 столик переместится на величину в два раза меньшую, чем при отсутствии БПА 4.

Учитывая принцип суперпозиции в линейных системах, при одновременной подаче напряжений U_3 и U_4 перемещение столика по оси X определяется выражением

$$\xi_X = \frac{A}{2} (U_3 + U_4). \quad (8)$$

Рассмотрим случай, когда при $U_3 = U_4 = 0$ концы БПА 3, 4 не контактируют со столиком, то есть между БПА 3, 4 и столиком существуют малые зазоры (например, порядка десятых долей микрометров). Для повышения точности позиционирования необходимо обеспечить силовое замыкание и постоянный контакт БПА 3, 4 со столиком при любом его положении. Для этого необходимо подавать напряжения $U_3 \approx U_4$, причем $U_3 > U_4 > 0$ при перемещении столика вправо от начального положения $\xi_X = 0$ (в этом случае напряжение U_3 меняется от 0 до U_{\max}) и, наоборот, при перемещении влево от начального положения $\xi_X = 0$ напряжение U_4 меняется от 0 до $-U_{\max}$.

Чтобы в крайней правой и левой точках был гарантированный контакт столика с обоими БПА необходимо выполнить соответствующие условия:

$$U_{4\max} = U_{\max} (1 - \delta); U_{3\max} = U_{\max} (1 - \delta), \quad (9)$$

где $\delta = 0,02 - 0,04$ (значение δ зависит от требуемой точности позиционирования и динамических характеристик).

В этом случае максимальные перемещения столика по оси X вправо ($\xi_X > 0$) и влево ($\xi_X < 0$) от начального положения вычисляются по формуле

$$\xi_{X\max} = \pm A U_{\max} \left(1 - \frac{\delta}{2}\right). \quad (10)$$

Приведенные выше зависимости позволяют разработать алгоритм управляющих сигналов, подаваемых на БПА, необходимых для перемещения столика по двум координатам.

Динамика двухкоординатного столика

Рассмотрим динамическую модель двухкоординатного столика при перемещениях по осям X и Y (рис. 4). Считаем перемещения столика по осям X и Y независимыми и рассматриваем динамическую систему «столик–БПА» в диапазоне частот до первой собственной частоты.

Приведенная масса m^* столика, в которую входит собственно масса столика, а также массы подвижных частей БПА, определяется следующим образом:

$$m^* = m + 2k_m m_p, \quad (11)$$

где m – масса столика; m_p – масса одного БПА; $k_m = 0,235$ – коэффициент приведения [7].

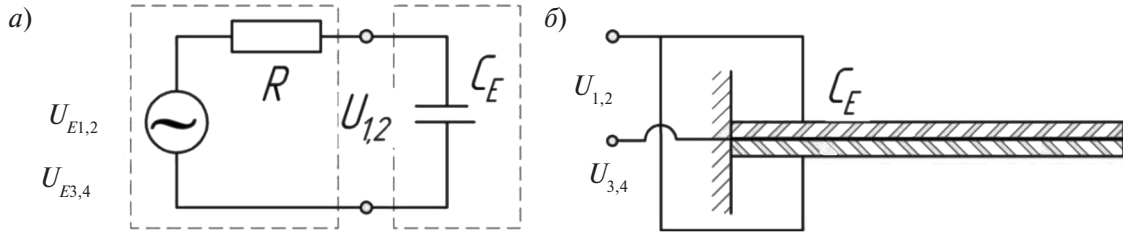


Рис. 5. Схема упругой системы БПА с внешней нагрузкой: а – принципиальная электрическая схема; б – электромеханическая схема

Пьезоактюаторы БПА 1–4 характеризуются в динамической модели элементом упругости с коэффициентом жесткости C_p , так как все БПА имеют одинаковые параметры. Каждый БПА характеризуется также элементом демпфирования с коэффициентом демпфирования r_p . Пружина с коэффициентом жесткости C имеет демпфирование на порядок меньше, чем БПА, поэтому его учитывать не будем.

Уравнения, соответствующее принятой динамической модели столика при движении по осям X и Y , имеют вид

$$\begin{aligned} m^* \ddot{\xi}_x + r_x \dot{\xi}_x + c_x \xi_x &= g_x U_{3,4} - g_{Fx} F_x; \\ m^* \ddot{\xi}_y + r_y \dot{\xi}_y + c_y \xi_y &= g_y U_{3,4} - g_{Fy} F_y, \end{aligned}$$

где m^* – приведенная масса столика; $\xi_{x,y}$ – перемещения центра столика по осям X, Y ; $r_{x,y}$ – суммарные коэффициенты сопротивления динамической системы при движении по осям X и Y ; $c_{x,y}$ – суммарные коэффициенты жесткости столика по осям X и Y ; $g_{x,y}$ – коэффициенты пропорциональности между перемещением и напряжениями при $U_1 = U_2$ и $U_3 = -U_4$.

Коэффициенты жесткости определяются суммой коэффициентов жесткостей двух БПА:

$$c_x = 2C_p; \quad c_y = 2C_p + C, \quad (12)$$

где $C = k_C C_p$ – коэффициента жесткости пружины; k_C – коэффициент приведения, который можно варьировать при исследовании модели.

Суммарные коэффициенты сопротивления равны сумме коэффициентов демпфирования двух БПА: $r_x = r_y = 2r_p$. В справочниках по пьезоэлектрическим материалам обычно демпфирование характеризуется механической добротностью Q_m , которая эквивалентна обратной величине параметра затухания переходного процесса [8]:

$$\xi_{x,y} = \frac{1}{2Q_m} = \frac{r_{x,y}}{2\sqrt{m^* c_{x,y}}}. \quad (13)$$

Используя преобразование Лапласа, передаточные функции для управляющих воздействий по осям X и Y приведем к виду $W_x(p) = \frac{\xi_x}{U_{3,4}}$, $W_y(p) = \frac{\xi_y}{U_{1,2}}$, где $\xi_x, \xi_y, U_{1,2}, U_{3,4}$ – изображения соответствующих переменных. После преобразований передаточные функции можно представить следующим образом:

$$\begin{aligned} W_x(p) &= \frac{g_x}{c_x (T_x^2 p^2 + 2\zeta_x T_x p + 1)}; \\ W_y(p) &= \frac{g_y}{c_y (T_y^2 p^2 + 2\zeta_y T_y p + 1)}, \end{aligned} \quad (14)$$

где $T_{x,y} = \sqrt{\frac{m^*}{c_{x,y}}}$ – постоянные времени; $g_x = c_x A$; $g_y = \frac{c_y A}{1 + \frac{\lambda^3 C}{6}}$.

Схема упругой системы БПА, работающего в режиме привода микроперемещений в области частот до низшей собственной частоты, представлена на рис. 5, а, б [7].

Для перемещения по X управляющие напряжения U_{E3}, U_{E4} подаваемые на БПА 3 и 4, трансформируются в напряжения U_3, U_4 за счет интегрирующих RC_E -цепочек, где активное сопротивление R является выходным сопротивлением источника питания упругой системы с БПА, а электрическая емкость $C_E = 2 \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{h_p}$ – емкость конденсатора, образованного электродами пьезокерамических элементов биморфа. Здесь ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость пьезоэлектрической среды; ϵ_0 – ди-

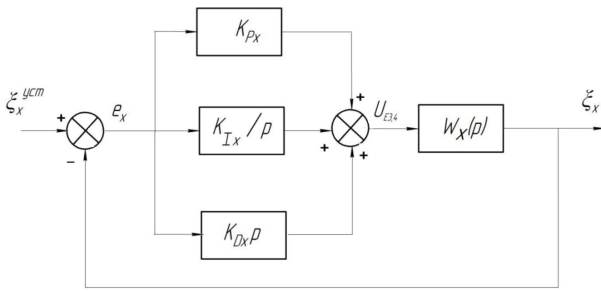


Рис. 6. Структурная схема системы управления по оси X с ПИД-регулятором

электрическая проницаемость вакуума; S – площадь электрода; h_p – толщина пьезоэлемента. Аналогично для перемещения по оси Y управляющие напряжения U_{E1} , U_{E2} , подаваемое на БПА 1 и 2 от источника переменного напряжения, трансформируется в напряжения U_1 , U_2 .

Рассматривая отклики системы ξ_x и ξ_y на управляющие воздействия U_{Ex} и U_{Ey} , можно представить передаточные функции следующим образом:

$$W_x(p) = W_U(p)W_x(p) = \frac{1}{T_1 p + 1} \frac{A}{(T_x^2 p^2 + 2\zeta_x T_x p + 1)}$$

и

$$W_y(p) = W_U(p)W_y(p) = \frac{1}{T_1 p + 1} \frac{A}{(T_y^2 p^2 + 2\zeta_y T_y p + 1) \left(1 + \frac{\lambda^3 c}{6}\right)},$$

в которых передаточная функция первого звена представляет собой аperiodическое звено

$$W_U(p) = \frac{1}{T_1 p + 1},$$

где p – оператор Лапласа; $T_1 = RC_E$ – постоянная времени.

Для управления перемещением столика по осям X и Y с применением обратной связи по положению наиболее эффективно использовать ПИД-регулятор, передаточная функция которого имеет вид

$$W_{PIDx,y}(p) = K_{Px,y} + \frac{K_{Ix,y}}{p} + K_{Dx,y} p,$$

где $K_{Px,y}$, $K_{Ix,y}$ и $K_{Dx,y}$ – коэффициенты усиления для пропорционального, интегрального и дифференциального звеньев для перемещений по осям X и Y [9, 10]. Как утверждают авторы статьи

[11], для микроперемещений перспективным является использование емкостного датчика в качестве датчика положения.

В нашем случае структурная схема системы управления по оси X будет иметь вид, показанный на рис. 6 (аналогичная структурная схема для перемещения по оси Y не показана). Установочное значение перемещения столика $\xi_x^{уст}$ на первом сумматоре сравнивается с перемещением столика ξ_x , в результате чего на вход ПИД-регулятора подается сигнал рассогласования e_x . Суммарный электрический сигнал со второго сумматора $U_{E3,4}$ подается на БПА 3, 4, который преобразуется ими в перемещение столика ξ_x .

Для обеспечения требуемых параметров качества регулирования (быстродействие и коэффициент перерегулирования) необходимо подобрать коэффициенты K_p , K_i и K_d . Это можно выполнить с помощью программы Matlab Simulink.

Моделирование динамики двухкоординатного столика

Для моделирования и исследования системы управления столика использовались параметры биморфных пьезоактюаторов фирмы APC (Stripe Actuator №40-2020): $U_{1-4} = \pm 100$ В; $E_M = 0,22 \cdot 10^{11}$ Па; $S_1^E = 17 \cdot 10^{-12}$ Па $^{-1}$; $d_{31} = 550 \cdot 10^{-12}$ м/В; $h_M = 0,16 \cdot 10^{-3}$ м; $h_p = 0,24 \cdot 10^{-3}$ м; $b = 20 \cdot 10^{-3}$ м; $l = 3 \cdot 10^{-2}$ м.

В среде Matlab Simulink были составлены структурные схемы для разомкнутой системы при воздействиях по осям X и Y (рис. 7).

Реакция упругой системы на единичное ступенчатое воздействие при $U = 100$ В характеризуется весьма сильным колебательным процессом (рис. 8, а) – перерегулирование достигает 50 %.

Установившиеся значения перемещений при ступенчатом воздействии $U = 100$ В по оси X – $3,98 \cdot 10^{-4}$ м, по оси Y – $3,90 \cdot 10^{-4}$ м. Различие перемещений связано в основном с тем, что по оси

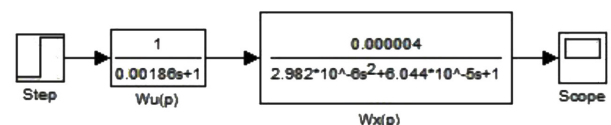


Рис. 7. Структурная схема динамической системы с БПА без обратной связи при воздействии по оси X

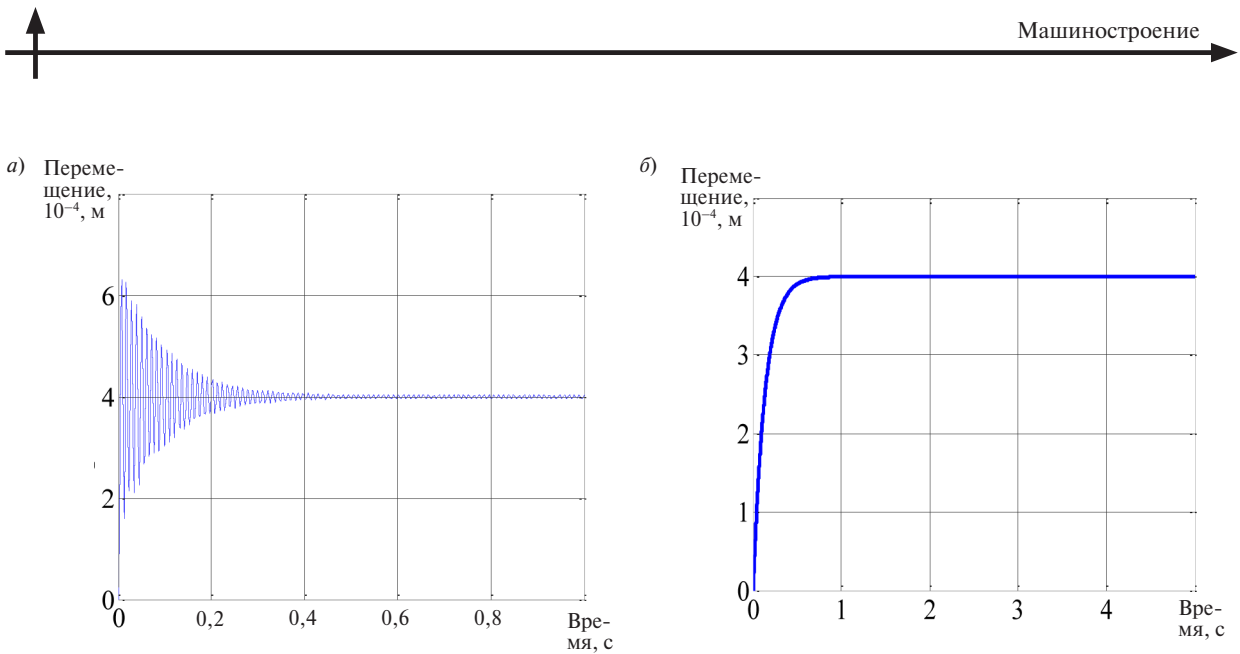


Рис. 8. Переходный процесс системы для оси X при $U = 100$ В: а) без обратной связи; б) с обратной связью и с ПИД-регулятором

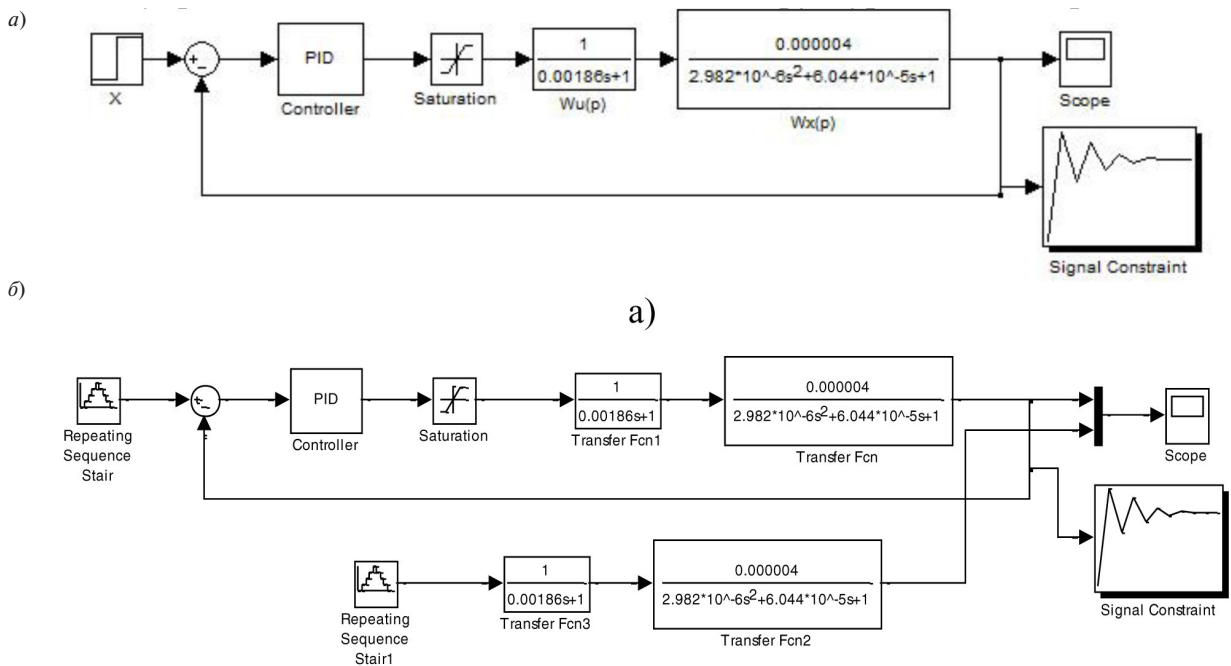


Рис. 9. Структурная схема системы управления по оси X с ПИД-регулятором: а) при единичном ступенчатом воздействии; б) при шаговом воздействии

У на упругую систему дополнительно действует пружина с коэффициентом жесткости $C = 0,1C_p$. Быстродействие в обоих случаях – около 0,5 с.

Для системы управления с обратной связью и ПИД-регуляторами в цепях управления для X и Y были составлены структурные схемы (рис. 9).

Для определения коэффициентов ПИД-регуляторов был применен блок Signal Constraint программы Matlab Simulink.

В результате определены следующие значения коэффициентов усиления пропорционального, интегрального и дифференциального звеньев для движения по оси Y: $K_{py} = 1,30 \cdot 10^4$,

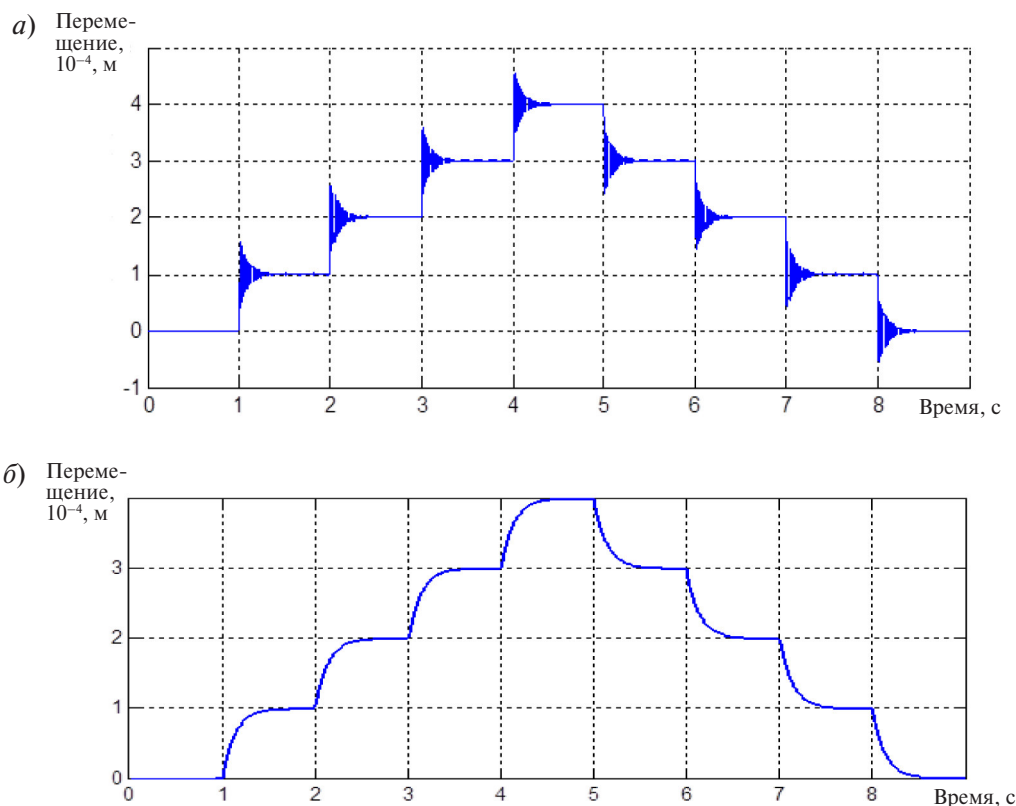


Рис. 10. Зависимость перемещения столика вперед и назад по оси X при шаговом ступенчатом воздействии $U = 25$ В и частоте следования шагов 1 Гц для системы управления: а) без обратной связи; б) с обратной связью и ПИД-регулятором

$K_{ly} = 1,95 \cdot 10^6$ и $K_{dy} = 1,16$; по оси X : $K_{px} = 6,01 \cdot 10^{-12}$, $K_{lx} = 1,82 \cdot 10^6$ и $K_{dx} = 5,00$. Для полученных коэффициентов усиления графики переходных процессов в системе при ступенчатом воздействии $U = 100$ В соответствуют переходным процессам апериодических звеньев без перерегулирования (рис. 8, б) при быстродадействии, удовлетворяющем требованиям задания – до 0,5 с.

При работе с микрообъектами часто используют автоматический режим работы с многократным шаговым перемещением столика по координатам X и Y для получения данных или осуществления физических воздействий на площадке порядка 1×1 мм². Поэтому целесообразно рассмотреть поведение системы по осям X и Y при ступенчатом возрастающем и ниспадающем входных сигналах. Для компьютерного моделирования разработаны структурные схемы системы управления с ПИД-регулятором при шаговом ступенчатом воздействии по осям X (рис. 9) и Y .

Компьютерное моделирование по структурной схеме (см. рис. 9) показало, что при частоте следования сигналов 1 Гц и шаге изменения напряжения $U = 25$ В графики перемещений столика по осям X и Y также имеют апериодический характер (рис. 10, б), в отличие от перемещений системы без обратной связи (рис. 10, а).

Найденные в результате компьютерного моделирования коэффициенты ПИД-регулятора позволяют разработать систему управления столиком для перемещения в шаговом режиме по обеим осям без перерегулирования и с приемлемым быстродадействием.

Заключение

Создание двухкоординатных операционных столиков с параллельной кинематикой и биморфными пьезоэлектрическими актюаторами в качестве приводов – реальная и выполнимая задача.

Системе управления столика без обратных связей по положению свойственны переходные процессы, характерные для колебательных систем с большой степенью перерегулирования (до 50 %). Быстродействие такой системы удовлетворяет требованиям (не превышает 0,5 с).

Система управления столика с обратной связью по положению и ПИД-регулятором позволяет избавиться от перерегулирования. При подобранных при помощи программного блока

Signal Constraint коэффициентах усиления система стала близка по характеру к аperiodическому звену первого порядка. Быстродействие системы осталось на том же уровне.

Результаты компьютерного моделирования позволяют разработать систему управления столиком с ПИД-регулятором для перемещения в шаговом режиме по обеим осям без перерегулирования и с достаточным для решения задач позиционирования быстродействием.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Подгорный О.В., Лазарев В.Н., Говорун В.М.** Лазерная микродиссекция в биологии и медицине [Электр. ресурс] // URL: http://www.tsitologiya.cytspb.rssi.ru/54_5/podgorny_ms.pdf (дата обращения 11.01.2016).

2. Лазерная микродиссекция и катапультирование PALM [Электр. ресурс] URL: www.img.ras.ru/files/PUBLIC/CCU/Microdissector.pdf (дата обращения 11.01.2016).

3. **Никольский А.А.** Точные двухканальные следящие электроприводы с пьезокомпенсаторами. М.: Энергоатомиздат, 1988. 160 с.

4. **Зиеп Хоанг Ф., Смирнов А.Б.** Двухкоординатный столик с пьезоприводом // Научный форум с международным участием «Неделя науки СПбПУ»: материалы научно-практической конференции 1-6 декабря 2014. Институт металлургии, машиностроения и транспорта СПбПУ. Ч. 2. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2015. С. 13–17.

5. **Патент РФ на изобретение № 2529126.** Пьезоэлектрический схват / Смирнов А.Б., Крушинский И.А., Борисевич А.В. Приоритет 25.04.2013.

6. **Смирнов А.Б., Крушинский И.А.** Исследование пьезоэлектрического схвата с резонансным очувствлением и микропозиционированием // Изв. вузов.

Приборостроение. 2010. Т. 53. № 2. С. 33–37.

7. **Смирнов А.Б.** Элементная база автоматических машин и оборудования. Мехатронные модули микроперемещений технологических машин: Учеб. пособие. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. 172 с. [Электр. ресурс] URL: <http://elib.spbstu.ru/dl/2/3878.pdf/view> (дата обращения 11.01.2016).

8. **Скучик Е.** Простые и сложные колебательные системы. М.: Мир, 1970. 557 с.

9. **Fang-Jung Shiou [et al].** Development of a real-time closed-loop micro-/nano-positioning system embedded with a capacitive sensor. Meas. Sci. Technol. // 2010.21 054007. [Электр. ресурс] URL: <http://iopscience.iop.org/0957-0233/21/5/054007/> (дата обращения 11.01.2016).

10. **Ravi Kant Jain, Somajyoti Majumder, Bhaskar Ghosh.** Design and analysis of piezoelectric actuator for micro gripper // International Journal of Mechanics and Materials in Design. September. 2015. Vol. 11. Iss. 3. P. 253–276.

11. **Yangmin Li, Qingsong Xu.** Development and Assessment of a Novel Decoupled XY Parallel Micropositioning Platform // IEEE. Asme Transactions On Mechatronics. 2010. Vol. 15, No. 1. P. 125–135.

REFERENCES

1. **Podgornyy O.V., Lazarev V.N., Govorun V.M.** Lazernaya mikrodisektsiya v biologii i meditsine [Laser microdissection for biology medicine]. Available: [Elektr. resurs]. URL: http://www.tsitologiya.cytspb.rssi.ru/54_5/podgorny_ms.pdf (data obrashcheniya 11.01.2016). (rus)

2. Lazernaya mikrodisektsiya i katapultirovaniye PALM [Laser microdissection and bailouts PALM]. Available: www.img.ras.ru/files/PUBLIC/CCU/Microdissector.pdf (Accessed 11.01.2016). (rus)

3. **Nikolskiy A.A.** Tochnyye dvukhkanalnyye sledyashchiye elektroprivody s pyezokompensatorami [Precision two-channel tracking drive with piezoelectric compensators]. M.: Energoatomizdat, 1988. 160 s.(rus).

4. **Ziep Hoang Phi, Smirnov A.B.** Dvukhkoordinatnyy stolik s pyezoprivodom [Operating XY stage with piezodrive]. Nauchnyy forum s mezhdunarodnym uchastiyem «Nedelya nauki SPbPU»: materialy nauchno-prakticheskoy konferentsii 1-6 dekabrya 2014. Institut metallurgii, mashinostroyeniya i transporta SPbPU. Ch. 2. [The scientific forum with international participation «Science Week SPbPU»]. SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2015. S.13-17 (rus).

5. **Patent RF na izobreteniyе № 2529126.** Pyezoelektricheskiy skhvat [Patent for Piezoelectric gripper of robot] / Smirnov A.B., Krushinskiy I.A., Borisovich A.V. Prioritet 25.04.2013.

6. **Smirnov A.B., Krushinskiy I.A.** Issledovaniye pyezoelektricheskogo skhvata s rezonansnym ochuvstvleniyem i mikropozitsionirovaniyem [The study of piezoelectric gripper with resonant sensitization and micropositioning]. *Izv. Vuzov. Priborostroyeniye*. 2010. T. 53, № 2. S. 33–37 (rus).

7. **Smirnov A.B.** Elementnaya baza avtomaticheskikh mashin i oborudovaniya. Mekhatronnyye moduli mikroperemeshcheniy tekhnologicheskikh mashin [Element base of automatic machinery and equipment. Mechatronic modules micromovings technological machines]. SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2008. 172 s. (rus). Available: <http://elibr.spbstu.ru/dl/2/3878.pdf/view> (Accessed 11.01.2016). (rus)

8. **Skuchik Ye.** Prostyye i slozhnyye kolebatelnyye sistemy [Simple and complex oscillatory systems]. M.:

Mir, 1970. 557 s. (rus)

9. **Fang-Jung Shiou [et al].** Development of a real-time closed-loop micro-/nano-positioning system embedded with a capacitive sensor. 2010. *Meas. Sci. Technol.* 21 054007. [Elektr. resurs] Available: <http://iopscience.iop.org/0957-0233/21/5/054007/> (Accessed 11.01.2016).

10. **Ravi Kant Jain, Somajyoti Majumder, Bhaskar Ghosh.** Design and analysis of piezoelectric actuator for micro gripper. *International Journal of Mechanics and Materials in Design*. 2015, Vol. 11, Iss. 3. P. 253–276.

11. **Yangmin Li, Qingsong Xu.** Development and Assessment of a Novel Decoupled XY Parallel Micropositioning Platform. *IEEE. Asme Transactions On Mechatronics*. Vol. 15, No. 1. 2010. P. 125–135.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ/AUTHORS

СМИРНОВ Аркадий Борисович – доктор технических наук профессор Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: 123smirnov@list.ru

SMIRNOV Arkadii B. – Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. 29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: 123smirnov@list.ru

ЗИЕП ХОАНГ Фи – аспирант Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: longhoang1791986@yahoo.com

ДИЕР НОАНГ Phi – Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. 29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: longhoang1791986@yahoo.com

ПОЛИЩУК Михаил Нусимович – кандидат технических наук доцент, Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: polishchuck@mail.ru

POLISHCHUK Mikhail N. – Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. 29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: polishchuck@mail.ru