

На правах рукописи



ЗИЕП ХОАНГ ФИ

**МЕХАТРОННЫЙ МОДУЛЬ ТОЧНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ
ДВУХКООРДИНАТНОГО СТОЛИКА С БИМОРФНЫМИ
ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ АКТЮАТОРАМИ**

Специальность: 05.02.05 - Роботы, мехатроника и робототехнические системы

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» на кафедре «Автоматы»

Научный руководитель **Смирнов Аркадий Борисович**
доктор технических наук, профессор кафедры
«Автоматы» ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский
политехнический университет Петра Великого»

Официальные оппоненты: **Пугачев Сергей Иванович**
доктор технических наук, главный научный сотрудник
АО «Концерн «Морское подводное оружие –
Гидроприбор»;

Рытов Евгений Юрьевич
кандидат технических наук, доцент кафедры физики
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный
морской технический университет»

Ведущая организация ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский национальный
исследовательский университет информационных
технологий, механики и оптики».

Защита состоится 19 декабря 2017 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.12 при ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГАОУ ВО «СПбПУ» и на сайте www.spbstu.ru.

Автореферат разослан " ... " 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



А.Н. Евграфов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

На сегодняшний день разработки ученых все чаще имеют отношение к объектам микромира. При работе с микрообъектами необходимы микроманипуляционные системы, в состав которых обычно входят микроскоп с системой технического зрения, микроманипуляторы и автоматизированные многокоординатные предметные столики.

Сейчас на рынке присутствует много типов многокоординатных столиков точного позиционирования разных фирм таких, как Jiangxi Liansheng Technolog (Китай), Schneeberger (Швейцария), SKF (Швеция), Aerotech (США), Physik Instrumente (Германия), Комнет (Россия), Standa (Литва) и др. Столики этих фирм имеют высокую точность позиционирования порядка десятков или сотен нанометров, однако они стоят очень дорого и сложны в изготовлении. Есть ряд задач, для которых требования по точности несколько ниже, и использовать такую дорогую и сложную технику не целесообразно.

Благодаря преимуществам пьезоэлектрических приводов, таким как высокая жесткость, точность, компактность и невысокая стоимость, заслуживают внимания многокоординатные системы, состоящие из модуля грубых перемещений больших диапазонов и модуля точных перемещений с пьезоэлектрическими приводами с использованием мехатронных принципов построения.

Объектом разработки диссертации является автоматизированный модуль точных перемещений столика для комплексов исследований микрообъектов (КИМ), предназначенных для изучения биологического клеточного материала (например, для выделения одной или нескольких клеток, измерения мембранной проводимости клеток и т.д.), а также для тестирования компонентов микроэлектронной техники.

Цель работы - разработка модуля точных перемещений двухкоординатного столика с параллельной кинематикой на основе мехатронных принципов построения и биморфных пьезоэлектрических актюаторов (БПА). Такой модуль точных перемещений для указанных задач позволяет иметь при общих габаритах порядка 100x100x20 мм диапазон перемещения по двум осям 0,5 мм с точностью позиционирования 0,5 мкм.

Основные задачи

Для достижения указанной цели поставлены и решены следующие задачи:

1. Анализ конструкций и систем управления многокоординатных столиков с пьезоэлектрическими актюаторами, предназначенных для точного позиционирования объектов.
2. Разработка модуля точных перемещений двухкоординатного столика с параллельной кинематикой с БПА, основанного на мехатронных принципах построения.

3. Разработка аналитических моделей работы модуля точных перемещений столика в квазистатическом и динамическом режимах.

4. Исследование модуля точных перемещений столика в квазистатическом и динамическом режимах методом компьютерного моделирования в среде *Comsol Multiphysics* и *Matlab Simulink*.

5. Разработка экспериментальной установки для исследования действующего макета модуля точных перемещений столика.

6. Разработка и изготовление действующего макета модуля точных перемещений столика и его экспериментальное исследование.

7. Разработка алгоритмов управления и схемы управления модуля точных перемещений двухкоординатного столика с БПА.

Научная новизна

1. Получено новое схемное решение компактного модуля точных перемещений двухкоординатного столика с БПА, обеспечивающее больший диапазон перемещений столика по двум осям и более простое решение по сравнению с аналогичными известными устройствами за счет использования мехатронных принципов построения и параллельной кинематики.

2. Получены аналитические выражения для расчета перемещений столика по двум ортогональным осям и углу поворота столика в зависимости от напряжений на БПА.

3. Предложены передаточные функции модуля точных перемещений столика с БПА, устанавливающие связь между напряжениями на БПА и перемещениями столика по двум координатам.

4. В результате компьютерного моделирования модуля точных перемещений определены параметры системы управления при заданных значениях быстродействия системы, как для линейных моделей, так и нелинейных с учетом гистерезиса БПА, а также уточнены указанные параметры за счет использования экспериментально полученной механической добротности динамической системы двухкоординатного столика.

5. Разработаны метод и алгоритмы управления модулем точных перемещений столика с БПА на основе мехатронных принципов, позволяющие упростить кинематику всего устройства и повысить быстродействие.

Практическая значимость

1. Предложена новая компактная, простая и быстроустанавливаемая конструкция мехатронного модуля точных перемещений двухкоординатного столика с БПА.

2. Разработан действующий макет модуля точных перемещений двухкоординатного столика с БПА, на котором отработаны принципы управления.

3. Оптимизированы параметры системы управления столика по критерию быстродействия для использования его в исследованиях микрообъектов в области биологии и электронной техники.

4. Материалы диссертации могут быть полезны работникам отраслей науки, относящихся к применению пьезоактюаторов в области мехатроники и робототехники, а также для обучения студентов в области экспериментальных исследований.

На защиту выносятся:

1. Принцип действия, схемное и конструктивное решение модуля точных перемещений двухкоординатного столика с БПА на основе мехатронных принципов построения.

2. Аналитические зависимости перемещения по двум осям и угла поворота столика от приложенного к БПА напряжения в квазистатическом режиме.

3. Передаточные функции модуля точных перемещений двухкоординатного столика с БПА, устанавливающие связь между управляющими напряжениями и его перемещениями по осям в динамических режимах.

4. Результаты компьютерного моделирования работы модуля точных перемещений двухкоординатного столика с БПА, позволяющие определить параметры системы управления.

5. Метод и алгоритмы управления модуля точных перемещений двухкоординатного столика с БПА.

Методы исследования

Аналитические методы исследования модуля точных перемещений двухкоординатного столика с БПА основаны на математическом анализе механики твердого и деформируемого тела, теории автоматического управления. Для моделирования столика методом конечных элементов были использованы пакеты прикладных программ *Comsol Multiphysics*, *Solid Works*. Моделирование динамики системы управления было выполнено в *Matlab Simulink*. Для вычислений и построения графиков использовался пакет *MathCAD*. Экспериментальные исследования проводились с помощью телевизионно-микроскопического комплекса МБС-10, разработанного автором экспериментального стенда и универсальных электроизмерительных приборов.

Достоверность результатов исследований подтверждается корректностью использования допущений и упрощений в расчетах, соответствии результатов экспериментов и теоретических результатов построения математических моделей объекта исследования. Полученные результаты не противоречат выводам научных работ других авторов.

Личный вклад автора. Диссертационная работа выполнена автором самостоятельно, и ее основные результаты представлены в 9 научных публикациях. При использовании результатов исследований других авторов указаны литературные источники.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы представлялись и докладывались на III международной научно-практической конференции 2014 г. "Фундаментальная наука и технологии", на V международной научно-практической конференции 2016 г. "Современное машиностроение: наука и образование", на Неделе науки СПбПУ 2014, 2015, на семинарах кафедры «Автоматы».

Публикации. Основные теоретические и практические результаты диссертации опубликованы в 9 статьях, среди которых 2 – в ведущих рецензируемых журналах из перечня ВАК.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка используемой литературы и приложения. Она изложена на 136 странице, включает 88 рисунков, 1 таблицу. Список литературы содержит 89 наименований. Приложение представлено на 2 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы проблемы в области мехатронных систем точного позиционирования, определена цель и основные задачи исследований. Отражены научная новизна и практическая значимость работы.

Первая глава посвящена анализу научно-технической литературы по существующим многокоординатным системам точного позиционирования, дана их классификация по важнейшим признакам. Показано, что ведущими компаниями развитых стран на рынке предлагаются многочисленные типы многокоординатных систем точного позиционирования для приборов и устройств различного назначения. Их продукция отличается конструктивным и схемным разнообразием и областями применения, эти устройства, как правило, имеют высокую точность позиционирования. Однако они дороги и сложны в изготовлении, и во многих случаях использования точность таких систем избыточна.

Приведен анализ преимуществ и недостатков пьезоэлектрических приводов миниатюрных устройств точного позиционирования. Вопросам применения пьезоэлектрических приводов посвящены работы многих российских и зарубежных авторов, таких как А.А. Ерофеев, Р.Ю. Бансявичус, К.М. Рагульскис, В.В. Лавриненко, С.И. Пугачев, А.Б. Смирнов, Chunsheng Zhao, D.A. Henderson, Haifen Li, Thomas W.

Secord, F. Claeysen и др. Однако, работ, в которых рассматриваются пьезоэлектрические устройства с параллельной кинематикой, опубликовано немного.

Для задач в области биологии, медицины и электронного машиностроения, связанных с работой над микрообъектами, эффективно использовать пьезопроводы на базе БПА с параллельной кинематикой. Разрабатываемый модуль точных перемещений двухкоординатного предметного столика для перемещения микрообъектов должен обладать компактностью, конструктивной простотой и относительно низкой стоимостью.

В главе рассмотрены методы исследований, которые применялись в области изучения пьезоэлектрических устройств точного позиционирования, пригодные для решения задач диссертации. Показана перспективность и эффективность использования в системе управления столика емкостных датчиков перемещения для получения точного позиционирования и программ *Comsol Multiphysics, Matlab Simulink* для компьютерного моделирования разрабатываемого столика. В конце главы перечислены задачи диссертации.

Вторая глава посвящена разработке принципов действия модуля точных перемещений двухкоординатного столика с БПА, основанного на мехатронных принципах построения, и его аналитическому исследованию.

В первой части этой главы предложен новый принцип действия двухкоординатного столика (рис. 1) с четырьмя биморфными пьезоактюаторами. В разработанном устройстве БПА 1, 2 и 3, 4 закреплены консольно на основании 5 и контактируют выступами со столиком 6. Пружина 7, выполненная, например, в виде упругого тонкого кольца из бериллиевой бронзы, прижимает столик 6 к выступам БПА 1, 2. Столик 6 установлен на шариках 10, которые находятся на плоском основании 5. Шарики 10 размещены в гнездах сепаратора 8, который предотвращает их раскатывание.

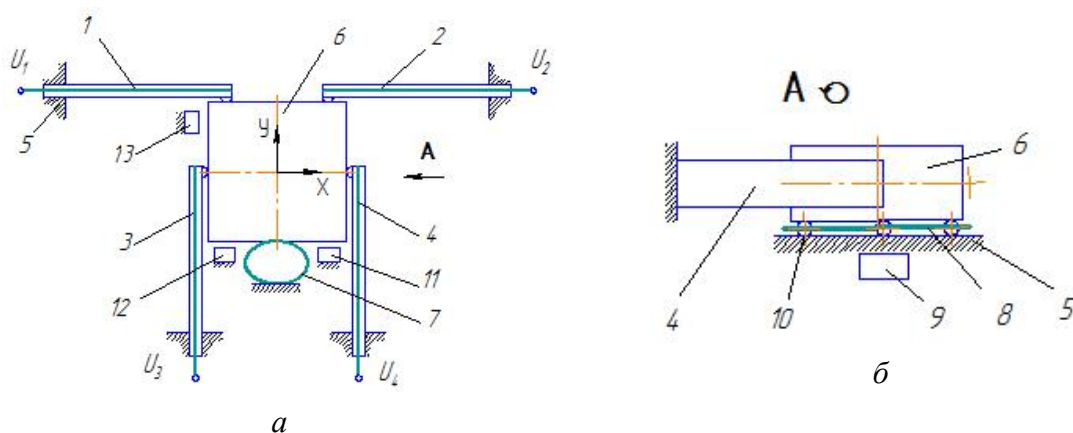


Рис. 1. Схема модуля точных перемещений двухкоординатного столика с БПА:
а – вид сверху, б – по стрелке А

Прижим столика 6 к основанию 5 может осуществляться при помощи постоянного магнита 9. На основании закреплены емкостные датчики перемещения 11 и 12, которые определяют положение столика 6 по оси Y , а также имеется датчик перемещения 13, определяющий положение столика по оси X . Показания всех трех датчиков определяют также угловое положение столика в плоскости XU . При подаче электрических напряжений $U_1=U_2$ на БПА 1 и 2 они изгибаются, и их свободные концы перемещают столик 6 по оси Y вниз, сжимая пружину 7. При изменении знака напряжений U_1 и U_2 на противоположный – концы БПА 1 и 2 перемещаются по оси Y вверх. За счет этого пружина 7 разжимается и перемещает столик 6 вверх. При неравном силовом воздействии БПА 1 и 2 кроме перемещения вдоль оси Y возникает угловое перемещение столика 6 в плоскости XU . По этой причине показания датчиков 11 и 12 будут разными, и система управления скорректирует напряжения U_1 и U_2 , чтобы выровнять показания датчиков 11 и 12.

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 6 вправо или влево в зависимости от знака напряжений.

Во второй части этой главы разработана математическая модель модуля точных перемещений двухкоординатного столика без учета инерционных сил, т. е. в квазистатическом режиме, когда ускорение и скорость не оказывают влияние на зависимость «электрическое напряжение – перемещение»

Рассмотрена схема нагружения столика при одновременной подаче одинаковых напряжений на БПА 1 и 2 для движения столика по оси Y (рис. 2, а) и при одновременной подаче одинакового напряжения на БПА 3 и 4 для движения столика по оси X (рис. 2, б).

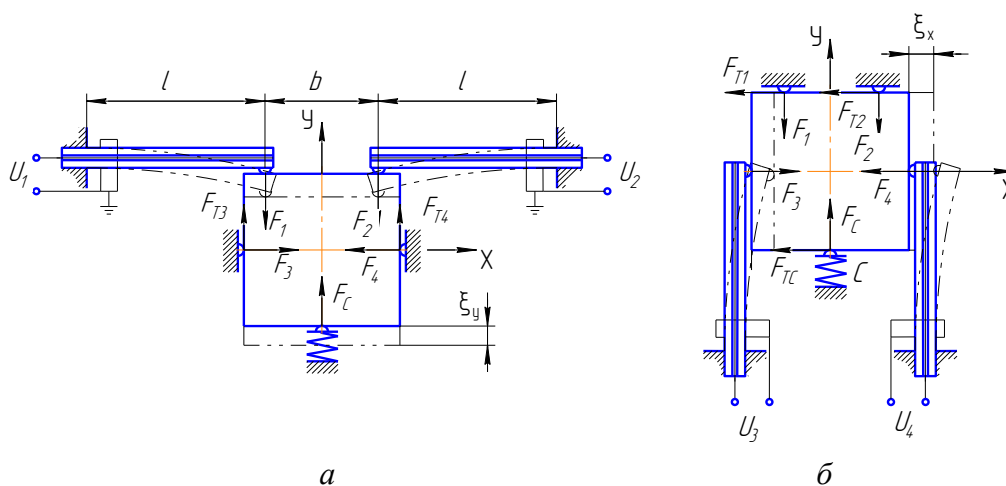


Рис. 2. Расчетная схема: а – при работе БПА 1 и 2; б – при работе БПА 3 и 4

В первом случае на столик действуют силы F_1 и F_2 со стороны БПА 1 и 2, а также сила F_C со стороны пружины. Во втором 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 прижмем столика пружиной C будут выполнять роль направляющих при перемещении его вдоль оси X .

После решения уравнений равновесия по осям X и Y , перемещение по осям Y, X :

$$\xi_y = \frac{\xi_0}{1 + \frac{\lambda l^3 C}{6}}, \quad \xi_x = \frac{A}{2}(U_3 + U_4), \quad (1)$$

где λ – податливость поперечного сечения БПА; C – коэффициент жесткости пружины; ξ_0 – перемещение свободного конца БПА (без столика) при подаче напряжения $U=U_1=U_2$, вычисляемое по формуле

$$\xi_0 = A \cdot U = \frac{3}{4} \cdot \frac{d_{31} \left[\left(h_p + \frac{h_M}{2} \right)^2 - \frac{h_M^2}{4} \right] l^2}{\left[E_M s_{11}^E \frac{h_M^3}{8} + \left(h_p + \frac{h_M}{2} \right)^3 - \frac{h_M^3}{8} \right] h_p} \cdot U,$$

где 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 соответственно, l – длина БПА.

Различие перемещений по осям X и Y связано в основном с тем, что по оси Y на упругую систему дополнительно действует упругое звено. При подаче неодинаковых напряжений U_1 на БПА 1 и U_2 на БПА 2 на столик действуют неодинаковые силы F_1 и F_2 , а также сила упругости F_C . В результате столик поворачивается на угол α и в центр столика смещается на Δ_x и Δ_y (рис. 3).

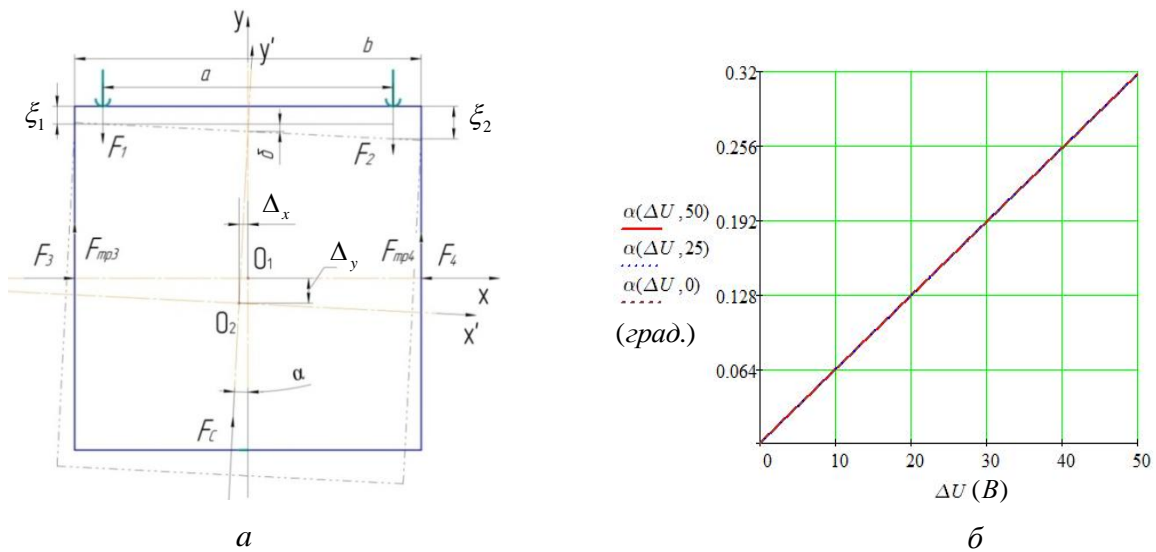


Рис. 3. Поворот столика при $U_1 \neq U_2$: a – расчетная схема, b – зависимость угла поворота от ΔU

Угол поворота столика α прямо пропорционален отклонению напряжений U_1, U_2 на БПА 1, 2 и не зависит от значения приложенного напряжения U_1 .

В третьей части этой главы определяются динамические характеристики двухкоординатного столика. В предположении о независимости перемещений столика по осям X и Y рассмотрена динамическая модель системы *столлик - БПА* (рис. 4, здесь c_p и r_p коэффициенты жесткости и сопротивления БПА) в диапазоне частот до первой собственной частоты.

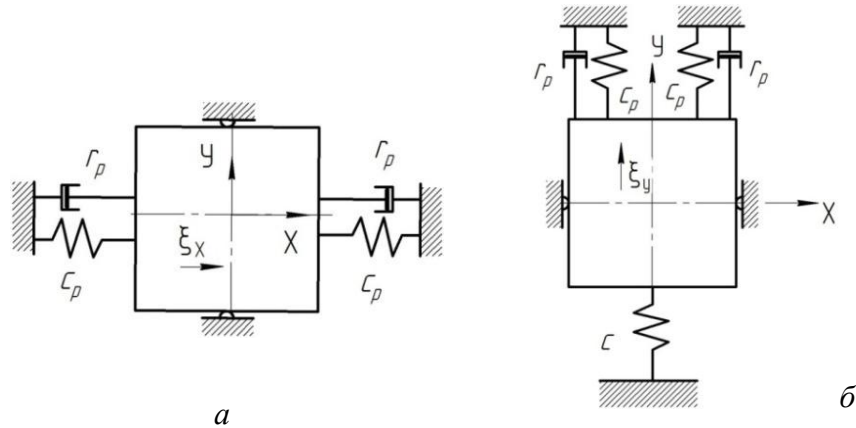


Рис. 4. Динамическая модель модуля точных перемещений двухкоординатного столика:
а – при движении по оси X , б – при движении по оси Y

Уравнения для *линейной модели* столика при движении по осям X и Y , имеют вид

$$m^* \ddot{\xi}_x + r_x \dot{\xi}_x + c_x \xi_x = g_x U_{3,4}; \quad m^* \ddot{\xi}_y + r_y \dot{\xi}_y + c_y \xi_y = g_y U_{1,2} \quad (2)$$

где m^* – приведенная масса столика, ξ_x, ξ_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 , $g_x = c_x A$, $g_y = \frac{c_y A}{1 + \frac{\lambda l^3 C}{6}}$ – коэффициенты пропорциональности между

перемещениями и напряжениями при $U_1=U_2$ и $U_3=-U_4$, A – коэффициент, зависящий от геометрии и материала пьезокерамических элементов актюатора. Используя преобразование Лапласа, передаточные функции от напряжения к перемещению получим:

$$W_x(p) = \frac{1}{T_1 p + 1} \cdot \frac{A}{(T_x^2 p^2 + 2\zeta_x T_x p + 1)} \quad \text{и} \quad W_y(p) = \frac{1}{T_1 p + 1} \cdot \frac{A}{(T_y^2 p^2 + 2\zeta_y T_y p + 1) \left(1 + \frac{\lambda l^3 C}{6}\right)} \quad (3)$$

где p – оператор Лапласа, постоянная времени $T_1 = RC_E$ где R – сопротивлением источника питания упругой системы с БПА, C_E – статическая емкость БПА, C – коэффициент жесткости пружины, $T_{x,y} = \sqrt{\frac{m^*}{C_{x,y}}}$ – постоянные времени.

Для **нелинейной модели столика** одним из факторов, влияющих на работу динамической системы, является нелинейная зависимость перемещения столика от управляющего напряжения, например, из-за гистерезиса, свойственного пьезокерамике (рис. 13).

Используя преобразование Лапласа, были найдены передаточные функции столика:

$$W_x(p) = \frac{1}{T_1 p + 1} \cdot \frac{f(U_E)}{(T_x^2 p^2 + 2\zeta_x T_x p + 1)} \quad \text{и} \quad W_y(p) = \frac{1}{T_1 p + 1} \cdot \frac{f(U_E)}{(T_y^2 p^2 + 2\zeta_y T_y p + 1) \left(1 + \frac{\lambda l^3 C}{6}\right)} \quad (4)$$

где $f(U_E)$ – нелинейная функция, определяющая зависимость перемещения БПА от подаваемого напряжения; U_E – управляющее напряжение от источника переменного напряжения. Передаточные функции (3) и (4) были использованы для анализа динамики столика.

Третья глава посвящена компьютерному моделированию работы модуля точных перемещений предметного столика с БПА в среде *Matlab Simulink* и *Comsol Multiphysics*.

Задача моделирования в среде *Matlab Simulink* заключается в нахождении основных параметров системы управления, удовлетворяющих требованиям по быстродействию (порядка 0,05 – 0,15 с) и точности (порядка 0,5 мкм). Для учета влияния сил сопротивления перемещению выходного звена в компьютерной модели использованы численные значения механической добротности динамической системы по осям X и Y , полученные в результате экспериментов в 4-ой главе.

Для **линейной модели**, в частности, рассмотрены отклики динамической системы на управляющее напряжение $U = 50$ В по осям X и Y (рис. 5 и 6).

Для **нелинейной модели** с учетом гистерезиса проанализировано поведение столика с обратной связью и ПИД-регулятором, в частности, при перемещении из точки с координатой $x = 20$ мкм в точку $x = 50$ мкм. На рис. 7 представлена структурная схема динамической модели, а на рис. 9 а – результаты моделирования, которые показали, что быстродействие в случаях линейной и нелинейной моделей было примерно одинаковым.

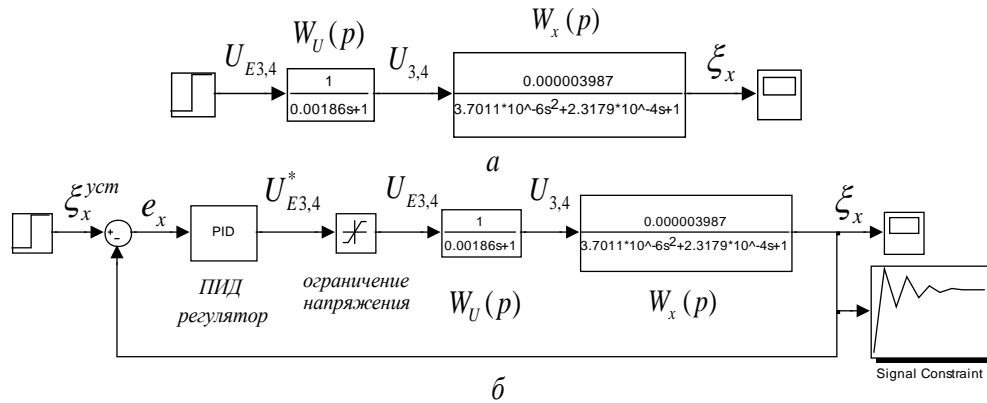


Рис. 5. Структурная схема динамической системы по оси X :
 a – без обратной связи, b – с обратной связью и с ПИД-регулятором

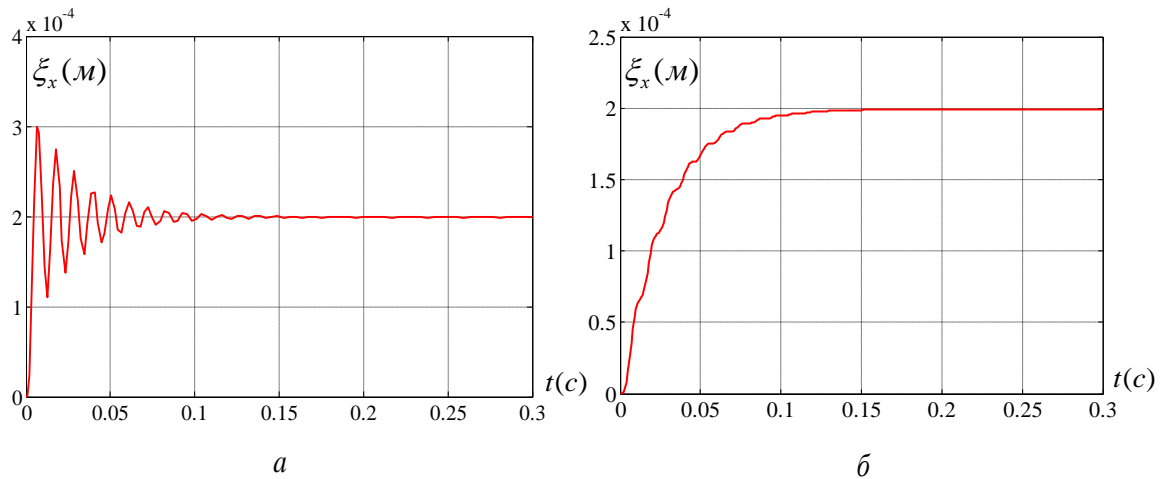


Рис. 6. Переходный процесс системы для оси X при $U=50$ В
 a – без обратной связи, b – с обратной связью и с ПИД-регулятором

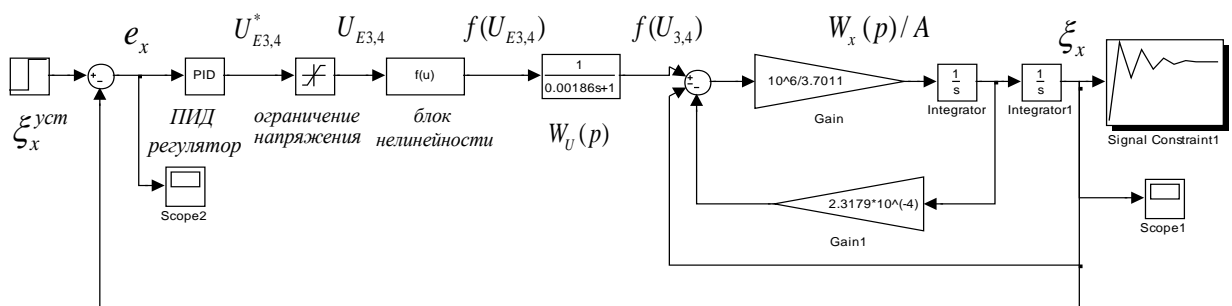


Рис. 7. Структурная схема нелинейной динамической системы с обратной связью и ПИД-регулятором

Далее были предложен новый метод организации управления для улучшения характеристик столика:

- улучшить динамику можно, форсировав переходный процесс путем добавки к управляющему напряжению от ПИД-регулятора некой дополнительной уставки. Эта

уставка вычисляется в зависимости от положения требуемой точки позиционирования аппроксимированием гистерезисной петли;

- упростить работу системы управления можно, отключив управление по рассогласованию в момент, когда погрешность позиционирования станет меньше допустимой величины, например, при $|e| < 0,5$ мкм (рис. 8).

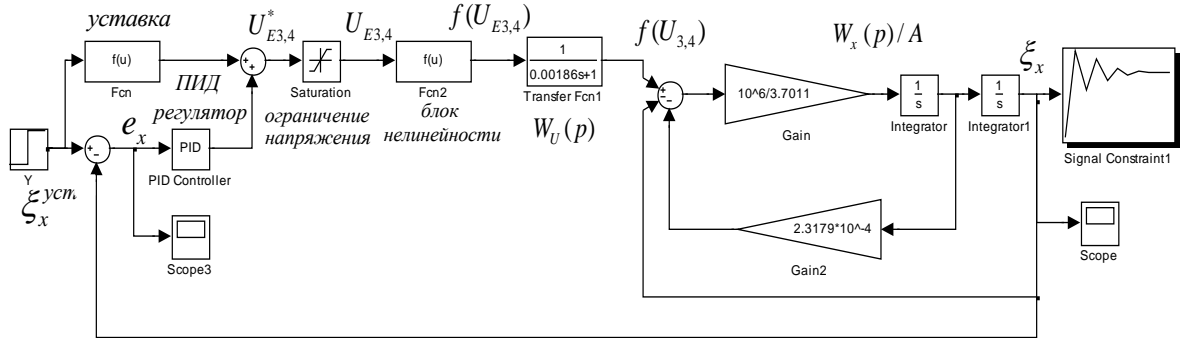


Рис. 8. Структурная схема нелинейной динамической системы с уставкой по оси X

Такой вариант показал существенное повышение быстродействия (рис. 9, б) по сравнению с первым (примерно в 6 раз).

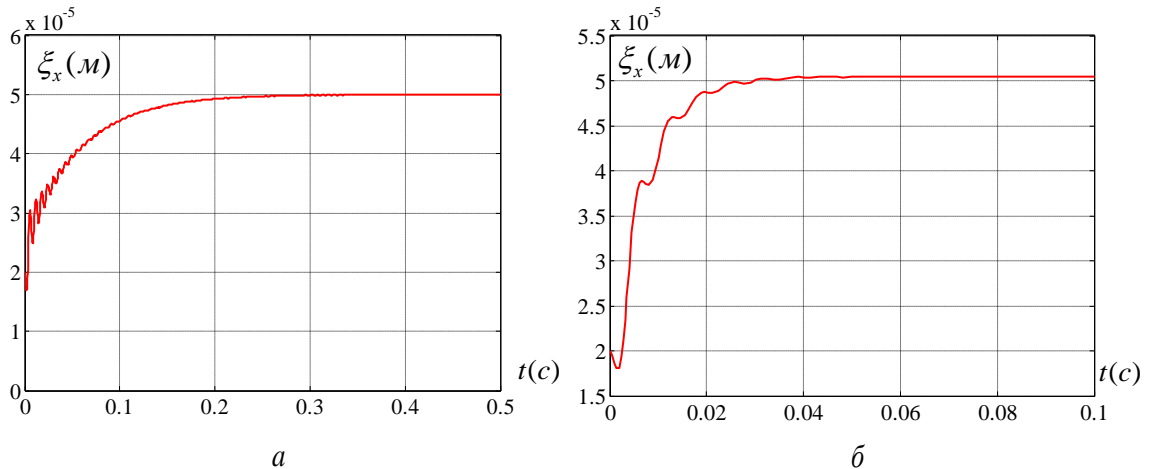


Рис. 9. Позиционирование столика при перемещении из точки $x = 20$ мкм в точку $x = 50$ мкм:

а – с ПИД-регулятором, б – с ПИД регулятором и с добавлением уставки

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. На рис. 10 показаны результаты компьютерного по оси X при частоте следования сигналов 1 Гц и шаге изменения координаты $\Delta x = 10$ мкм.

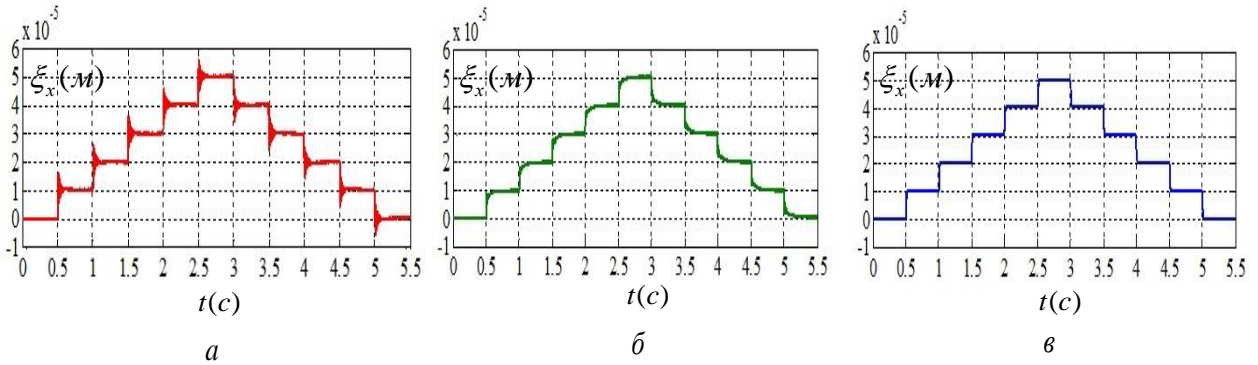


Рис. 10. Режим шагового перемещения по оси X :

а – без обратных связей; б – с обратной связью; в – с обратной связью и с уставкой

Из результатов моделирования в среде *Matlab Simulink* стоит отметить, что:

- система управления столика без обратных связей по положению имеет переходные процессы, характерные для колебательных систем с большой степенью перерегулирования (до 50 %). Быстродействие такой системы составляет 0,3 с;

- управление с обратной связью по положению и ПИД-регулятором позволяет избавиться от перерегулирования и свести к нулю установившуюся статическую ошибку. При подобранных при помощи программного блока *Signal Constraint* коэффициентах усиления можно обеспечить поведение системы близким по характеру к апериодическому. Быстродействие линейной системы при этом 0,15 с, а быстродействие нелинейной системы при этом составляло 0,3 с;

- результаты компьютерного моделирования позволяют выбрать параметры разрабатываемой системы управления столиком с ПИД-регулятором для перемещения в шаговом режиме по обеим осям без перерегулирования и с достаточным для решения задач позиционирования быстродействием;

- наличие нелинейности типа «гистерезис», свойственной пьезокерамике, из которой сделаны БПА, повышает сложность управления приводом модуля микроперемещений из-за неоднозначной связи между управляющим напряжением и развиваемым усилием БПА;

- для увеличения быстродействия позиционирования нелинейной системы предложено добавить к управляющему напряжению от ПИД-регулятора некой дополнительной уставки. Следствием такого способа управления является улучшение быстродействия системы в 6 раз. При этом время переходного процесса составляет 0,05 с, что является хорошим результатом настройки системы управления.

В среде *Comsol Multiphysics 5.2* было проведено моделирование перемещения модуля точных перемещений столика по осям X , Y в статическом режиме при подаче напряжения на БПА. В качестве примера на рис. 11 изображено перемещение столика по оси X при одновременной подаче на БПА 3, 4 напряжения $U=50$ В.

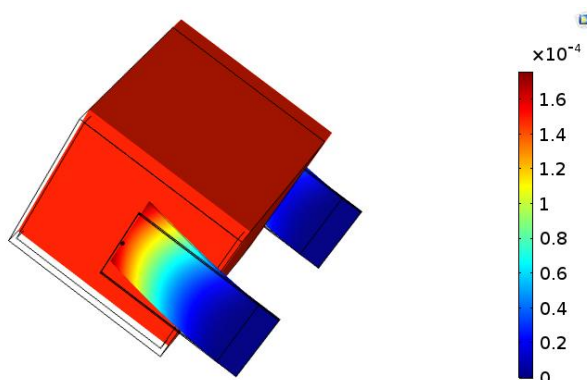


Рис. 11. Перемещение столика по оси X при $U=50$ В

С помощью *Comsol Multiphysics* и конкретно, используя его специальный модуль *Piezoelectric Devices* для моделирования пьезоэлектрических элементов, позволяет наблюдать процессы перемещения столика во времени. Результаты сравнения компьютерного моделирования и экспериментов показали, что перемещения столика по оси X , найденные с помощью программы *Comsol Multiphysics*, больше результатов эксперимента на 12% (см. главу 4).

Четвертая глава посвящена экспериментальным исследованиям модуля точных перемещений столика с БПА. Для проведения исследований были разработан действующий макет столика с БПА (рис. 12, а) и составлена экспериментальная установка (рис. 12, б).

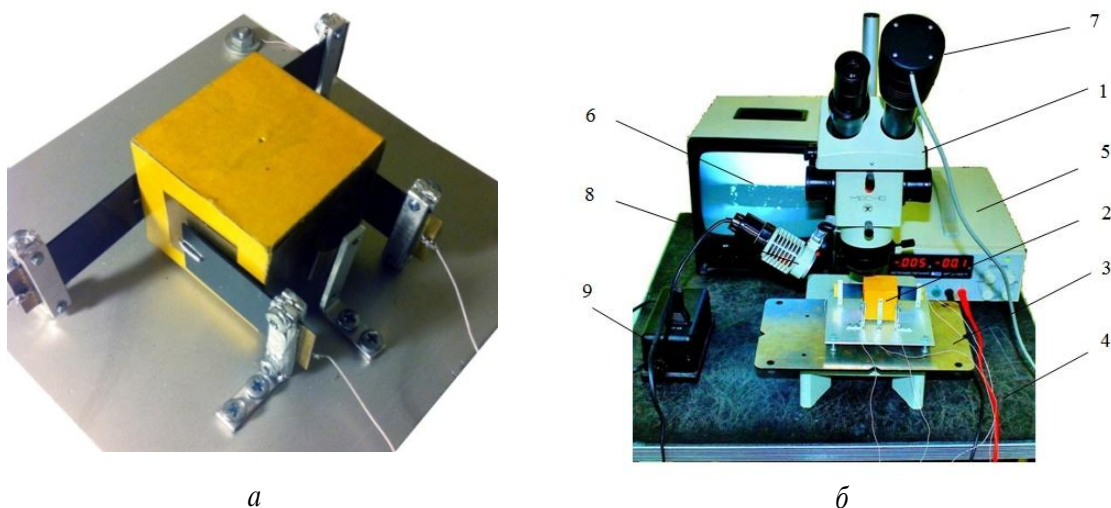


Рис. 12. Действующий макет модуля точных перемещений двухкоординатного столика (а) и экспериментальная установка (б): 1 – микроскоп; 2 – столик; 3 – основание; 4 – установочная плита; 5 – источник напряжения; 6 – монитор; 7 – видеокамера; 8 – лампа; 9 – регулятор освещения

Результаты исследования *в квазистатическом режиме* приведены на рис. 13. График 1 соответствует сериям экспериментов перемещения свободных концов БПА без столика, график 2 соответствует теоретической зависимости, подсчитанной по формуле (1), график 3 соответствует сериям экспериментов перемещения столика. Диапазон перемещений свободного БПА оказался меньше расчетного, вычисляемого по формуле (1) на 21%, диапазон перемещений столика по обеим осям примерно в 1,6 раза меньше, чем у свободного БПА из-за сил трения, причем графики гистерезисных петель сдвигаются по осям X и Y вверх относительно начала координат. Также видно, что гистерезис для зависимости перемещений столика по оси X от напряжения имеет коэффициент гистерезиса 58%, а по оси Y – 32%, т. е. по оси X гистерезис почти в два раза больше, чем по оси Y . 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 материала (бериллиевая бронза) которой на порядок меньше, чем у пьезокерамики.

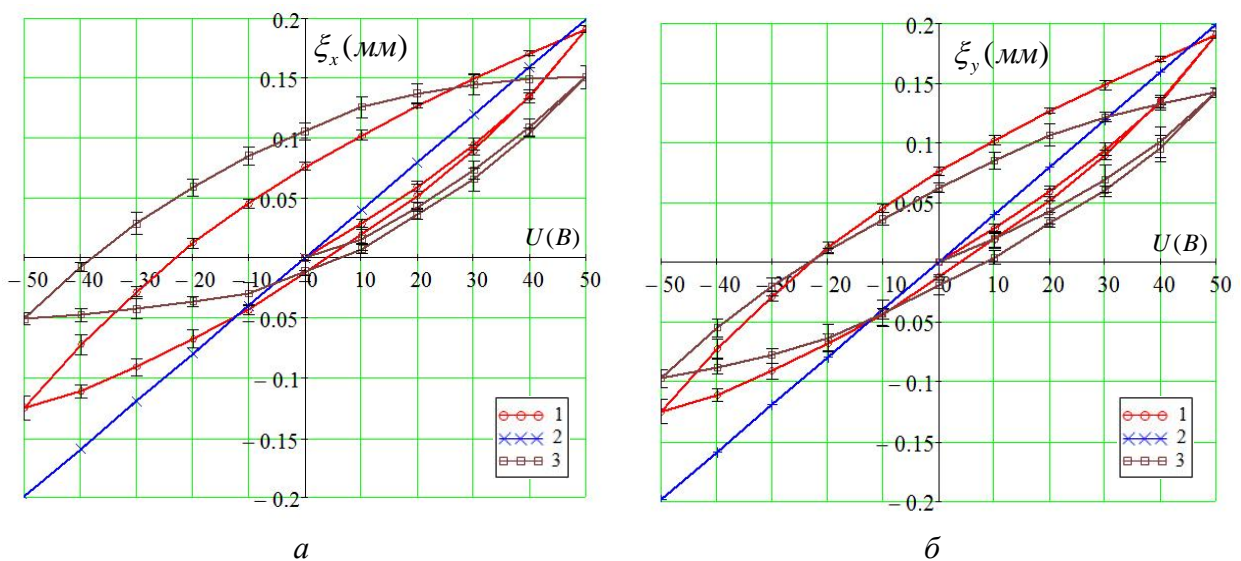


Рис. 13. Зависимости перемещений от напряжения: a – по оси X ; b – по оси Y

По оси X фактически действует только один БПА, толкающий 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 при постоянном контакте с ним.

Результаты исследования *в динамическом режиме* приведены на рис. 14, a – для оси X и на рис. 14, b – для оси Y .

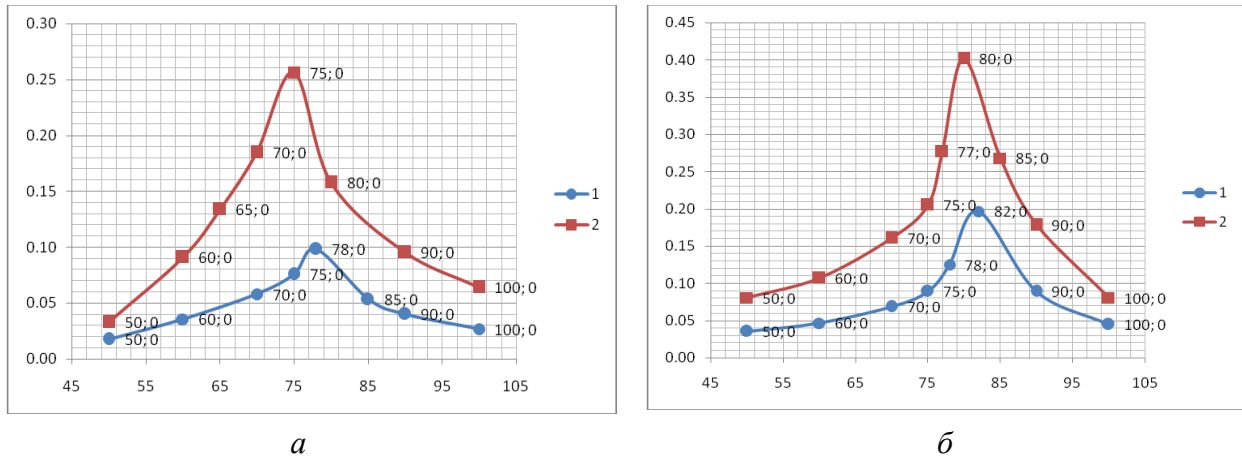


Рис. 14. Зависимости амплитуды колебаний (мм) от частоты (Гц):

a – по оси X ; b – по оси Y

Графики под номерами 1 соответствуют $U=10$ В, графики под номерами 2 соответствуют $U=20$ В. Из рис. 14 видно, что собственные частоты по оси X : $f=75$ Гц (механическая добротность $Q=8,3$) и по оси Y : $f=80$ Гц (механическая добротность $Q=10,8$) при $U=20$ В. Таким образом, выяснено, что управлять системой можно на частотах не более $f=20$ Гц. Найденные экспериментально механические добротности системы позволяют повысить точность компьютерного моделирования динамической системы столика и использовать их для уточнения коэффициентов ПИД- регуляторов в системе управления (см. глава 3).

Пятая глава посвящена алгоритмам управления модуля точных перемещений двухкоординатным столиком и описанию элементов системы управления. Эти алгоритмы имеют различия при перемещениях по осям X и Y . Так как по оси Y существует постоянное силовое замыкание при помощи пружины, то проблем по оси Y нет. Для оси X ситуация сложнее.

Для повышения точности позиционирования необходимо обеспечить силовое замыкание и постоянный контакт БПА 3, 4 со столиком при его любом положении. Это можно сделать, следуя мехатронным принципам построения, когда регулировка осуществляется при помощи системы управления, то есть за счет программного обеспечения. В этом случае условие гарантированного контакта столика с двумя БПА при любом положении столика соответствует $U_3 \neq U_4$ кроме крайних точек. Для симметрии при движении вправо и влево в начальном положении, то есть при $\xi_x = 0$, необходимым условием будет $U_3 = -U_4 = U_{\max}$.

Для обеспечения плоскопараллельного движения по осям X и Y с заданной точностью необходимо использовать показания датчиков 11, 12, 13 (рис. 1). В разработанном алгоритме управления, запрашивая показания этих датчиков, система

управления при угловом отклонении возвращает столик в положение, перпендикулярное начальному положению.

В качестве датчиков перемещения были выбраны емкостные датчики перемещений на базе контроллера AD7746 фирмы Analog Device. В их состав входят сигма-дельта ($\Sigma-\Delta$) преобразователи емкости в цифровой код с высоким разрешением. Измеряемая емкость подключается непосредственно к входам преобразователя. Его архитектура обеспечивает высокое разрешение (24 бита без пропуска кодов, эффективное разрешение до 21 бита), высокую линейность ($\pm 0.01\%$) и малую погрешность (за счет заводской калибровки). Были определены размеры емкостных датчиков модуля точных перемещений, в частности каждый из трех датчиков содержит два одинаковых квадратных электрода (по 10x10 мм каждый) на корпусе модуля, подключенных к системе управления, и один электрод, площадь которого в два раза больше, закрепленный на подвижном столике. Минимальный зазор между ними должен составлять не менее 0,1 мм.

Для системы управления были выбраны контроллер dSPACE - DS1104 с 16-разрядным аналого-цифровым преобразователем и 16-разрядным цифро-аналоговым преобразователем и два высоковольтных усилителя 601C фирмы TREK (стабилизированный по постоянному току высоковольтный усилитель мощности), разработанный для обеспечения прецизионного управления выходным напряжением в диапазоне: от 0 до ± 300 В, по постоянному или пикам переменного тока. Выходные токи в диапазоне: от 0 до ± 10 мА (постоянный), от 0 до ± 20 мА. Указанные типы датчиков, контроллера и усилителей позволяют решить поставленную задачу.

Основные результаты и выводы

1. Решена актуальная научно-техническая задача, заключающаяся в разработке принципов построения мехатронного модуля точных перемещений двухкоординатного столика с БПА с более простой и компактной конструкцией по сравнению с известными системами точного позиционирования.

2. Проведены теоретические исследования работы столика с целью улучшения его технических характеристик. В частности, получены:

- зависимости перемещений по осям X , Y и угла поворота столика от приложенного напряжения на БПА. Результаты расчетов показали, что перемещение столика по оси Y меньше, чем перемещение по оси X за счет влияния жесткости пружины, а угол поворота столика прямо пропорционален разности напряжений на БПА и не зависит от значения приложенного напряжения;

- передаточные функции столика, устанавливающие связь между управляющим напряжением и перемещением столика по двум осям. Их различие по осям X и Y

связано в основном с тем, что по оси Y на упругую систему дополнительно действует упругое звено.

3. Проведено компьютерное моделирование работы столика для линейной и нелинейной моделей. Выявлено, что система управления без обратных связей по положению имеет переходные процессы, характерные для колебательных систем с большой степенью перерегулирования. Предложена структурная схема системы управления столика с ПИД-регулятором, которая позволяет избавиться от перерегулирования и свести к нулю установившуюся статическую ошибку. Предложен новый метод организации управления путем добавки к управляющему напряжению от ПИД-регулятора дополнительной уставки, зависящей от точности позиционирования, с отключением управления по рассогласованию в момент, когда погрешность позиционирования станет меньше заданной величины. Это позволило существенно увеличить быстродействие.

4. На основе полученных математических моделей разработаны алгоритмы управления модуля точных перемещений столика с БПА по осям X и Y , позволяющие функционировать столику в автоматическом и ручном режимах.

5. Разработан макет и экспериментально исследованы статические и динамические характеристики столика, верифицирующие его математические модели. Экспериментально показано, что нелинейность типа «гистерезис», свойственная пьезокерамике, повышает сложность управления из-за неоднозначной связи между управляющим напряжением и развиваемым усилием БПА. Для повышения точности компьютерного моделирования и для нахождения коэффициентов ПИД-регулятора с заданными параметрами динамической системы предложено использовать экспериментальные данные о механической добротности динамической системы с БПА.

Основные положения диссертации отражены в следующих работах:

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК

1. Зиеп Хоанг Фи. Исследование предметного столика с биморфными пьезоактюаторами / Зиеп Хоанг Фи, А.Б. Смирнов // Изв. вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59, № 12. – С. 1043-1048.

2. Зиеп Хоанг Фи. Компьютерное моделирование работы двухкоординатного столика с пьезоэлектрическими актюаторами / А.Б. Смирнов, Зиеп Хоанг Фи, М.Н. Полищук // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 1(238), 2016. – С. 172-182.

Публикации в других изданиях

3. Зиеп Хоанг Фи. Разработка и исследование двухкоординатного столика с пьезоэлектрическими актюаторами / Зиеп Хоанг Фи, А.Б. Смирнов, М.Н. Полищук // Современное машиностроение: Наука и образование: Материалы 5-й Междунар. науч.-практ. конференции. / СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. – С. 677-686.

4. Зиеп Хоанг Фи. Моделирование динамики модуля микропозиционирования / Зиеп Хоанг Фи, А.Б. Смирнов, М.Н. Полищук // Современное машиностроение: Наука и образование: Материалы 5-й Междунар. науч.-практ. конференции. / Под ред. А.Н. Евграфова и А.А. Поповича. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. – С. 665-676.

5. Зиеп Хоанг Фи. Компьютерное моделирование динамики двухкоординатного столика с пьезоприводом / Зиеп Хоанг Фи, Смирнов А.Б. // Неделя науки СПбПУ: м-лы научн. форума с междунар. участием, 30 ноября 5 декабря 2015 г. Лучшие доклады.– СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. – С. 83-88.

6. Зиеп Хоанг Фи. Исследование биморфных пьезоактюаторов двухкоординатного столика / Зиеп Хоанг Фи, Э.Ю. Егорова, А.Б. Смирнов // 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.17-21.

7. Зиеп Хоанг Фи. Двухкоординатный столик с пьезоприводом / Зиеп Хоанг Фи, А.Б. Смирнов // 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.

8. Зиеп Хоанг Фи. Моделирование двухкоординатного столика с пьезоприводом / Зиеп Хоанг Фи, А.Б. Смирнов // Неделя науки СПбПУ: материалы научного форума с международным участием. Институт металлургии, машиностроения и транспорта. Часть I. - Изд-во Политехн. ун-та, 2015. – С. 6-9.

9. Зиеп Хоанг Фи. Пьезоэлектрические микроманипуляционные и позиционирующие устройства с параллельной кинематикой / А.Б. Смирнов, П.Ю. Гедько, Зиеп Хоанг Фи // Материалы III международной научно-практической конференции «21 век: фундаментальная наука и технологии» 23-24 января 2014 г. Изд. CreateSpace, North Charleston, USA, 2014. – С.161-163.