На правах рукописи

СМИРНОВ Аркадий Борисович

ОСНОВЫ ТЕОРИИ И ПРОЕКТИРОВАНИЯ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ МИКРОПЕРЕМЕЩЕНИЙ С ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ПРИВОДАМИ

05.02.05 – Роботы, мехатроника и робототехнические системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

доктора технических наук

Санкт-Петербург

2004

Работа выполнена в государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Научный консультант:

- доктор технических наук, профессор Дьяченко Владимир Алексеевич.

Официальные оппоненты:

- доктор технических наук, профессор Жавнер Виктор Леонидович;
- доктор технических наук, профессор Тимофеев Борис Павлович;
- доктор технических наук, профессор Тисенко Виктор Николаевич.

Ведущая организация – ФГУП ЦНИИ «Гидроприбор», Санкт-Петербург.

Защита диссертации состоится «11» мая 2004 в часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.12 при ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, первый учебный корпус, ауд. 41

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан « » апреля 2004 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.229.12,
кандидат технических наук, доцент А.Н. Евграфов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Стремительно развивающаяся отрасль микромеханики в различных областях техники, включая микроэлектронику, приборостроение, медицинскую технику, дала мощный импульс внедрению пьезоэлектрических преобразователей (ПП) в качестве двигателей и упругих устройств на их основе. Появляются все новые области использования ПП для манипуляционных задач рабочих органов высокоточных миниатюрных и микромеханических систем.

Существует большой спектр технических задач, в которых необходимо обеспечить линейные перемещения микрообъектов до 0,01 – 1 мм и угловые перемещения до $0{,}5^0$ – 3^0 при дискретности движения порядка 1 мкм и 10 угл. сек. К этим системам микроперемещений (СМП) в первую очередь относятся микроманипуляторы для биологических исследований на уровне клетки, манипуляторы для сборки микроустройств (микроклапанов, микроэлектродвигателей, электромагнитных микрореле) и микроэлектронных схем, а также оптико-механические устройства: лазерные сканеры, системы юстировки и адаптивной оптики. Такие микроманипуляционные системы на базе традиционных электромеханических приводов громоздки и дороги. Требования высокой компактности и точности программного воспроизведения движения дали толчок для развития пьезоэлектрических мехатронных систем, в которых в малых объемах сосредоточены элементы как приводов и механических передач, так и средств управления.

Важный принцип мехатроники, заключающийся в соединении в единую систему электромеханических преобразователей энергии, передаточных механизмов и рабочих органов, может быть воплощен в приборостроении при помощи ПП, встроенных в передаточные механизмы или даже непосредственно в рабочие органы. Использование в одних элементах как прямого, так и обратного пьезоэффектов позволяет соединить в единой целое привод и датчики обратной связи. Этим достигается высокая компактность устройств в целом.

Однако обобщенный системный подход к анализу и проектированию мехатронных пьезоэлектрических систем в настоящее время не сформировался. В научных работах обычно рассматриваются конкретные реализации, которые весьма разнородны. По этой причине актуальна разработка теории и методики расчета и проектирования СМП с ПП. Следует выделить важный аспект этой проблемы. При создании микромеханических систем необходимо иметь данные о таких свойствах, характеристиках и параметрах, определяющих стратегию поиска оптимальной конструкции мехатронной микросистемы, как траектории движения характерных точек выходного звена, его максимальные перемещения, силовые характеристики, управляемость системы в заданном частотном диапазоне. Исходя из этого, в первую очередь необходимо проанализировать известные СМП с целью определения границ указанных выше параметров. Далее следует решить задачу по определению геометрических и физических характеристик элементов, преобразующих электрическую энергию в механическую, и всей микромеханической системы в целом при заданных ограничениях на габариты, развиваемые силы, диапазоны рабочих частот и т.д. Заключительным этапом разработки мехатронной системы является параметрическая оптимизация.

Для успешного решения поставленных задач нужно разработать ряд типовых схемных решений СМП, математических моделей модулей СМП с характерными кинематическими признаками, для которых можно рассчитать требуемые параметры. К таким модулям можно отнести упругие устройства, конечные звенья которых совершают либо поступательное, либо вращательное, либо сложное движение. При проектировании СМП, состоящих из последовательного и параллельного соединения указанных модулей, необходимо согласовать их входные и выходные параметры.

Для создания эффективных СМП необходимо решить указанные проблемы, поэтому тема диссертации, в которой разрабатываются вопросы теории и проектирования СМП, является актуальной.

Цель и задачи работы. Целью диссертационной работы является разработка основ теории и методов проектирования модулей систем микроперемещений на базе пьезоэлектрических приводов, а также выработка практических рекомендаций по созданию высокоэффективных систем микроперемещений в приборостроении, полученных в результате теоретических и экспериментальных исследований. Для достижения поставленной цели потребовалось решить следующие задачи:

- классифицировать СМП и их приводы, выявить оптимальные варианты;
- разработать концепцию и принципы построения манипуляционных СМП;
- провести анализ характера движений рабочих органов СМП;
- сформулировать и проанализировать требования к модулям с ПП, воспроизводящим заданные траектории движения;
- разработать схемные решения принципиально новых упругих устройств с ПП, отвечающих комплексу технических требований;
- определить параметры формы деформированного состояния пьезокерамических элементов, входящих в состав ПП, при подаче напряжения;
- разработать методику расчета перемещений многокоординатных упругих систем при одновременном действии подаваемого на ПП электрического напряжения и внешних сил;
- провести структурную и параметрическую оптимизацию СМП;
- оценить собственные частоты полученных систем;
- определить амплитуды вынужденных колебаний выходных звеньев СМП с учетом добротности механических и пьезоэлектрических элементов систем;
- провести экспериментальные исследования разработанных систем с ПП и сравнить их результаты с результатами математического моделирования;
- сформулировать и обосновать рекомендации по расчету и проектированию новых устройств с ПП.

Методы исследования. В работе использованы методы теоретической механики, теории упругости, теории автоматического управления, системного

анализа, физики упругих пьезоэлектрических и пассивных упругих сред, численные методы расчета перемещений и деформаций, пакеты прикладных программ MatCad-2000.

Научная новизна и положения, выносимые на защиту. Представленная на защиту диссертация является обобщением проведенных автором многолетних исследований и разработок, в результате которых впервые решена комплексная проблема создания теоретических основ и методологии расчета и проектирования принципиально новых многокоординатных систем микроперемещений и их модулей на базе ПП.

1. Концепция построения мехатронных многокоординатных манипуляционных СМП с древовидной структурой, позволяющих достигать высокой надежности и вариативности манипулирования при минимальном усложнении конструкций.
2. Комплекс новых схемных решений упругих СМП с биморфными ПП, отличающихся укороченными кинематическими цепями модулей микроперемещений по сравнению с другими средствами преобразования электрической энергии в механическую.
3. Систематизация схемных и кинематических решений СМП на базе биморфных ПП по виду траекторий характерных точек выходных звеньев.
4. Методика расчета упругих многокоординатных систем с биморфными ПП, позволяющая определить перемещения выходных звеньев, деформации и механические напряжения элементов систем в квазистационарном и динамическом режимах при подаче электрического напряжения.
5. Комплекс расчетных моделей модулей упругих систем с биморфными ПП, имеющих разомкнутые и замкнутые кинематические цепи, и их параметрическая оптимизация.
6. Методика анализа динамики модулей микроперемещений при внешней механической нагрузке с учетом внутренних потерь в пьезоэлектрических и механических средах.

Новизна схемных и технических решений подтверждена семью патентами РФ, европейским и патентом PCT.

Практическая ценность результатов работы. Использование результатов работы дает возможность создать широкий спектр мехатронных СМП различного назначения и определить перспективные направления их развития. Применение методики расчета упругих систем с биморфными ПП позволяет быстро провести анализ физической картины СМП при действии электрического напряжения и внешних механических нагрузок, оценить и выбрать вариант кинематической схемы системы и его модулей. Она дает возможность найти параметры элементов системы, при которых перемещения выходного звена и силовые характеристики максимальны. Разработанная методика расчета динамических моделей СМП с биморфными ПП дает возможность оценить амплитуды колебаний в резонансных режимах.

Разработанные конкретные решения микромеханических модулей позволяют применять их для медицинской техники в качестве микроманипуляторов, эндоскопических и микрохирургических микророботов, для точного приборостроения и электронной промышленности в качестве сборочных манипуляторов, вибропитателей миниатюрных деталей, многокоординатных систем ориентации и перемещения столиков микроскопов, микроустройств пневмогидроавтоматики и оптоэлектроники, работающих в условиях вакуума, агрессивных сред и повышенной температуры, для миниатюрных мобильных систем мониторинга.

Реализация результатов работы. Результаты работы реализованы на ведущих приборостроительных предприятиях: АО ЭЛМ в комплексе питателей миниатюрных поверхностно монтируемых радиокомпонентов для автоматических линий сборки селекторов каналов, в НПО «Петродворцовый часовой завод» в виде вибропитателей миниатюрных деталей часовых механизмов, ГИПО (г. Казань) в качестве шагового привода линейных перемещений автоматизированного комплекса производства дифракционных решеток.

Результаты работы в настоящее время активно используются в учебном процессе в СПбГПУ и СТАНКИНе при обучении по специальностям «Мехатроника» и «Роботы и робототехнические системы».

Апробация работы. Основные научные положения и результаты работы докладывались и получили одобрение в различных организациях на научных семинарах, конференциях и научно-технических Советах: Международной научно-технической конференции «Измерительные и информационные технологии и приборы в охране здоровья», – Москва, 1999; Российской научно-технической конференции «Информационные и бизнес-технологии 21 века», – СПб, 1999; Международной научно-технической конференции «Пьезотехника-2000», – Москва, 2000; научно-практической конференции «Формирование технической политики инновационных наукоемких технологий», – СПб, 2001; 5-й и 7-й Всероссийских конференциях по проблемам науки и высшей школы «Фундаментальные исследования в технических вузах», – СПб, 2001 и 2003; 13-й и 14-й научно-технических конференциях «Экстремальная робототехника» – СПб, 2002 и 2003.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 30 печатных работ, в том числе 4 книжных издания, в которых отражены полученные результаты.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 9 глав основного текста, заключения, 167 рис., 12 таблиц, списка литературы (162 наименования) общим объемом 330 с.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведен обзор состояния рассматриваемой проблемы, обоснована актуальность, сформулированы цели и задачи диссертационной работы, приведены аргументы научной новизны и положения, выносимые на защиту, а также изложены сведения об апробации работы. Отмечается перспективность создания мехатронных СМП на базе ПП, определены их преимущества по отношению к системам, оснащенным другими приводами.

Большое количество исследований в области СМП посвящено отдельным элементам пьезотехники, таким как ПП, работающие на растяжение-сжатие и на изгиб. В работах Р.Ю. Бансявичуса, Р.Г. Джагупова, А.А. Ерофеева, У Кеди, Б.А. Кудрявцева, В.В. Лавриненко, А.А. Никольского, А.Е. Панича, В.З. Партона, С.И. Пугачева, У. Мэзона, К.М. Рагульскиса и других отечественных и зарубежных авторов проведены серьезные теоретические и экспериментальные исследования пьезоэлектриков, которые позволили создать теорию пьезосреды. Эти же авторы создали целую гамму устройств, в которых ПП работают с большой эффективностью. Однако в большинстве работ (диссертационные работы В.А. Гришко, О.В. Даринцева, Джамал Рисан Ахмеда, В.А. Коваленко, Д.Л. Расторгуева, О.В. Федотова, А.М. Щербина и др.) рассматриваются вопросы разработки и расчета конкретных устройств микроперемещений на базе ПП и иных преобразователей энергии без учета требований к характеру и траекториям движения выходного звена, уделяется мало внимания методике расчета сложных упругих систем при одновременном действии управляющих и возмущающих воздействий.

В Российской Федерации работы по созданию и исследованию устройств с ПП ведутся в АО «ЭЛПА» (г. Зеленоград), НКТБ «Пьезоприбор» (г. Ростов-на-Дону), ОКБ «СОЛТО» (г. Москва), НИИРЛ МГТУ им. Н.Э. Баумана, ЦНИИ «Гидроприбор» (Санкт-Петербург), Институте нанотехнологий (г. Москва), АО «Электроприбор» (Санкт- Петербург), СПбГПУ (Санкт-Петербург), УГАТУ (г. Уфа) и в других организациях.

В первой главе рассмотрены структура и особенности функционирования СМП, выявлены основные направления развития, разработана их классификация и сформулированы проблемы создания. Основные проблемы заключаются в расширении диапазонов перемещений и увеличении числа степеней свободы, определении наиболее эффективных видов приводов для конкретных задач приборостроения, разработке алгоритмов и систем управления, а также в создании малогабаритных источников электропитания. Выдвинута концепция

построения мехатронных многокоординатных микроманипуляционных систем, согласно которой наибольшей надежности, гибкости и универсальности соответствует древовидная структура СМП, соответствующая бионическим принципам. Для большинства рассмотренных задач микромеханики наилучшим является привод на базе ПП. Анализ известных устройств микроперемещений показывает, что пьезоэлектрические преобразовательные элементы являются наиболее перспективными по сочетанию силовых характеристик приводов, их быстродействию, технологичности и низкой себестоимости в серийном производстве.

Вторая глава посвящена анализу пьезоэлектрических мехатронных модулей микроперемещений и возможностям их совершенствования. Основные преимущества ПП заключаются в высоких удельных силовых характеристиках, малых значениях электрических токов и потерь, высокой надежности в работе и технологичности изготовления в серийном производстве, а также в радиационной, химической и температурной стойкости. К недостаткам ПП можно отнести сравнительно высокое напряжение, подаваемое на электроды, проявление гистерезиса, нестабильность пьезоэлектрических параметров, влияние изменения влажности на электрические параметры, малые мощности.

В СМП наиболее эффективными являются составные, трубчатые и биморфные ПП. Рассмотрены преимущества и недостатки каждого из указанных типов ПП. При высоких требованиях к силовым характеристикам используют составные (до 10^4 Н), а в случае, когда необходимы относительно большие перемещения (до 1 мм), используют биморфные. Трубчатые ПП имеют самую простую конструкцию и высокую надежность, а при помощи особого расположения электродов могут иметь несколько степеней свободы. Наиболее перспективные ПП для микроманипуляционных систем, для которых не нужна высокая жесткость конструкции, являются биморфные пьезоэлектрические преобразователи (БПП), отвечающие принципам мехатроники. В них используются из-

гибные деформации многослойных структур, состоящих из активных (пьезокерамических) слоев и и неактивных (металлических) слоев.

На рис.1 приведена диаграмма, отражающая энергетические характеристики ПП, выпускаемых отечественной промышленностью, имеющих близкие габариты (максимальный габаритный размер – в диапазоне от 40 до 200 мм). Как видно из графиков, наибольшее перемещение достигается при помощи биморфных ПП, а максимальная энергия накапливается в составных ПП. Трубчатые ПП являются промежуточными по своим энергетическим характеристикам, а по перемещению они имеют наихудшие показатели.

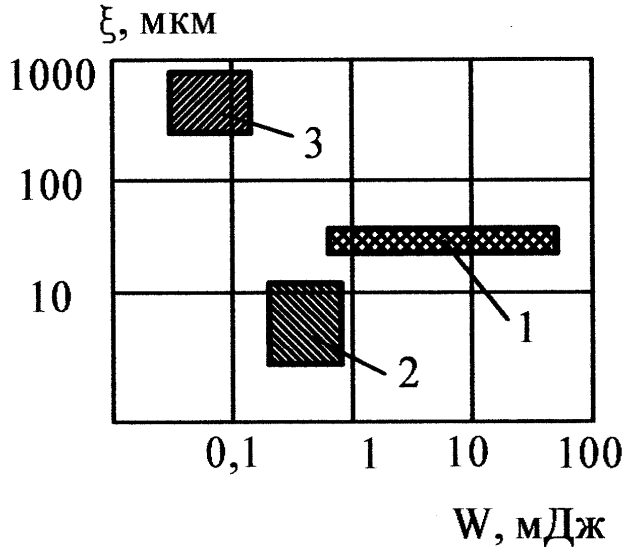

Рис.1. Диаграмма «накопленная энергия – максимальное перемещение», 1 – составные пьезоприводы, 2 – трубчатые пьезоприводы, 3 – биморфные пьезоприводы

Для применения составных пьезоприводов в манипуляционных СМП часто бывает недостаточным их перемещение, а накопленная энергия и сила, развиваемая ими, явно избыточны. Поэтому одна из основных задач упругих механических передач состоит в увеличении хода (мультиплекции перемещений) привода за счет уменьшения силы (рис.2, а). Аналогичная задача может быть также решена для трубчатых пьезоприводов и БПП за счет последовательного соединения приводов (рис.2, б, в). Для БПП перемещения в принципе достаточны (в некоторых случаях есть потребность их увеличения), но необходимо повысить силу привода. Такая задача может быть решена за счет уменьшения хода БПП. Более перспективный путь – это параллельное соединение

БПП. В этом случае происходит суммирование накопленной энергии при сохранении уровня перемещений (рис.2, г).

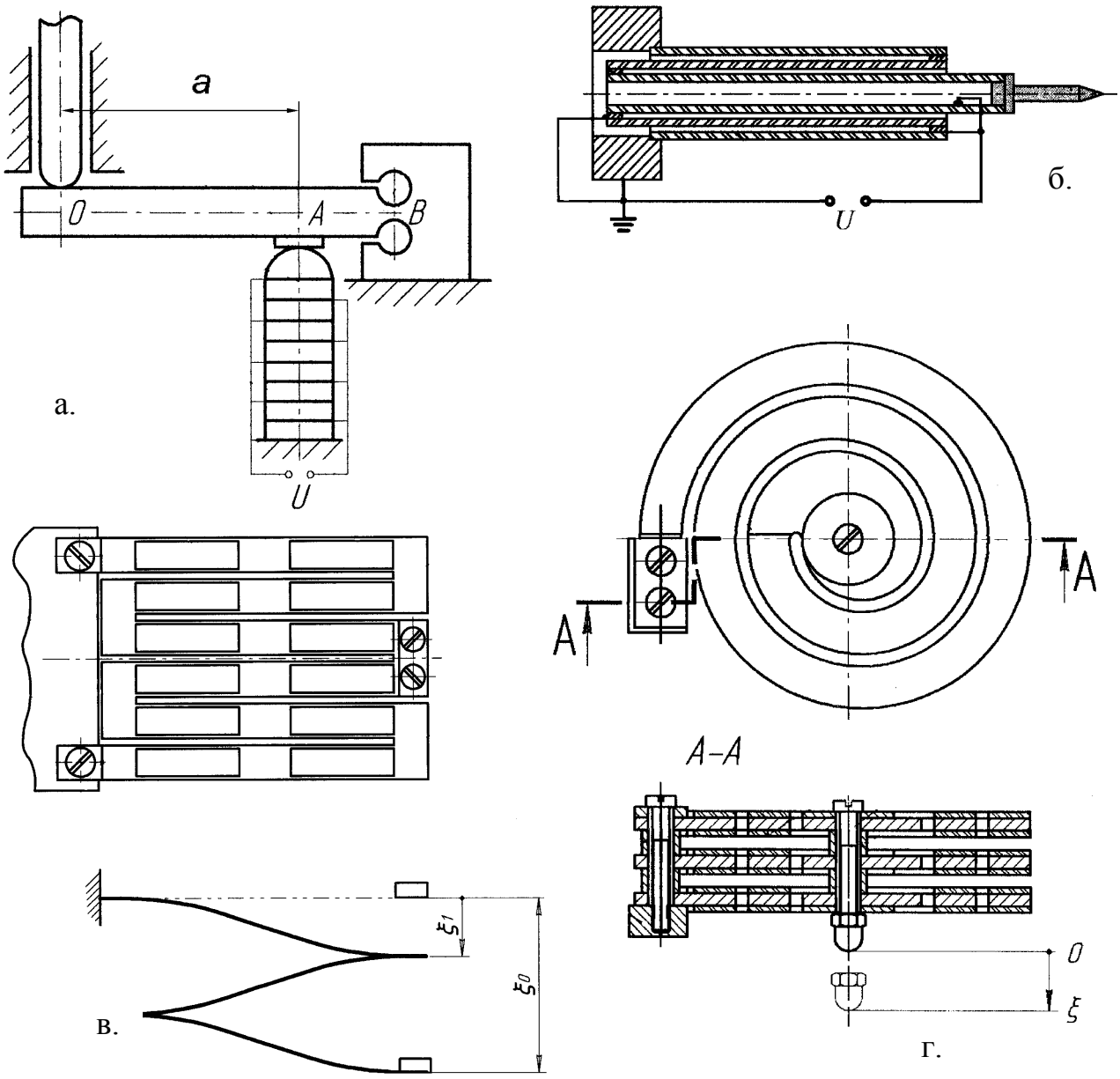

Рис.2. Примеры мультиплекции микроперемещений выходных звеньев (а, б, в) и силы привода (г)

Основными задачами при разработке пьезоэлектрических модулей микроперемещений являются расширение функциональных возможностей (степеней свободы), увеличение диапазона перемещений, развиваемых сил и повышение точности.

Существенное (в несколько раз) увеличение диапазона перемещений до единиц миллиметра при минимальном увеличении общих габаритов возможно

за счет следующих технических решений: применения механических передач для составных пьезопреобразователей (рис.2, а), последовательного соединения коаксиально расположенных трубчатых пьезопреобразователей (рис.2, б), последовательного соединенния прямоугольных БПП или выполнения ПП виде спиральных БПП (рис.2, в, г).

Третья глава посвящена теоретическим основам проектирования новых элементов модулей микроперемещений с БПП и исследованию их кинематики. Показано, что длина кинематических цепей в сложных многокоординатных микромеханических системах существенно укорачивается при применении БПП по сравнению с другими типами ПП. Это связано с тем, что каждый БПП является одновременно преобразователем электрической энергии в механическую и упругим кинематическим передаточным звеном. Рассмотрены модули с ПП, в которых основной задачей является мультиплекция перемещений выходного звена, а дополнительной задачей при их проектировании является увеличение жесткости и силы привода. Основные характерные виды движений выходного звена СМП для модулей с одной степенью свободы – это возвратно-поступательное, плоскопараллельное, качательное и пространственное движения, для модулей с несколькими степенями свободы – это движение выходного звена, точки которого совершают перемещение по замкнутой траектории и по незамкнутой траектории.

В зависимости от требуемого вида движения выходного звена автором предлагается использовать активные упругие направляющие для поступательного движения, в которых БПП выполняют функции упругих рессор (рис.4, 5); активные упругие шарниры (АУШ) с БПП для осуществления качательного движения выходного звена относительно неподвижной точки (рис.6); модули с БПП для осуществления движения по винтовой линии; модули с БПП для осуществления движения выходного звена с двумя и тремя степенями свободы. Активные упругие направляющие, состоящие из рессор 1, БПП 2 и подвижной платформы 3 (рис.4, а), можно использовать в качестве модулей поступатель-

ных микроперемещений для позиционирующих устройств, столиков микроскопов, наращивание силы привода осуществляется за счет увеличения числа рессор 1 и БПП 2. Активный упругий параллелограмм (АУП) по рис.4, б,

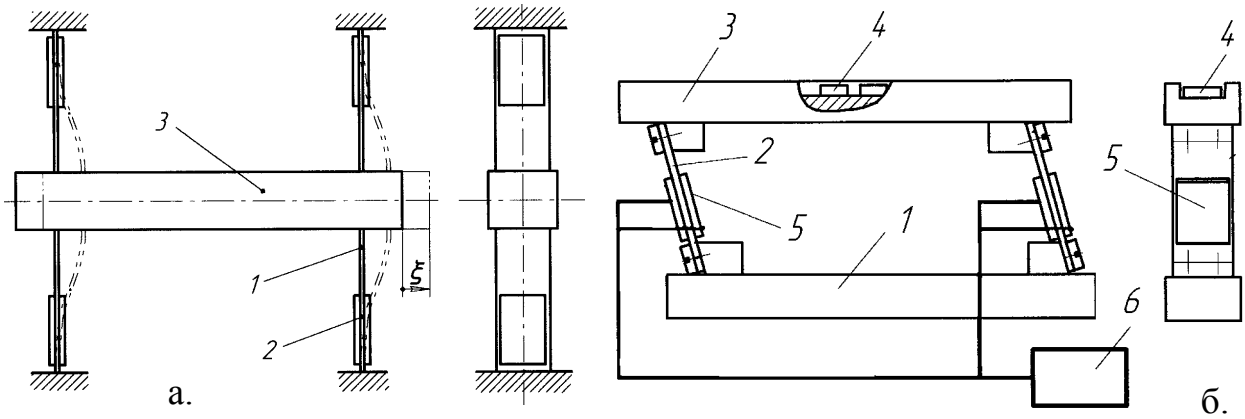

Рис.4. Активные упругие направляющие

содержащий основание 1, наклонные рессоры 2, платформу 3 с перемещаемыми микродеталями 4 и БПП 5, запитываемые переменным током в резонансном режиме от генератора 6, может служить вибропитателем микродеталей в автоматических сборочных линиях часовой и электронной промышленности. Если рессора с БПП расположена параллельно платформе, то размер вибропитателя по высоте существенно снижается.

АУШ (рис.5, а), содержащий рессору 1, два БПП 2, 3 и выходное звено 4,

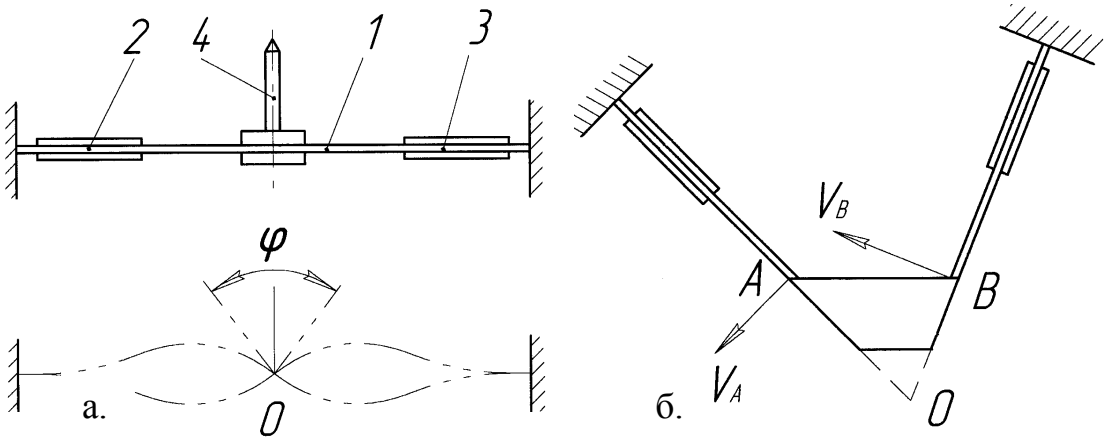

Рис.5. Активные упругие шарниры

совершающее качательное движение относительно точки *0*, можно применять для сканирования оптическим лучом, а также для осуществления вращательно-

го движения роторов вибродвигателей. АУШ (рис.5, б) позволяет освободить пространство вблизи точки качания *0*.

Для осуществления движения по винтовой линии можно предложить упругое устройство со скрученной лентой и БПП (рис.6, а) и упругое устройство (рис.6, б), на основании 1 которого установлены три наклонные рессоры с БПП 2 и платформа 3. Первое устройство может быть стрелочным указателем, т.к. оно может иметь большой угол поворота φ, а второе – вибробункером для подачи микродеталей.

В зависимости от решаемых задач выходное звено микроманипуляционных систем может иметь от двух до шести степеней свободы. Последовательное соединение модулей микроперемещений с пьезоприводами, каждый из которых имеет одну степень свободы, дает возможность управлять траекторией движения объекта манипулирования.

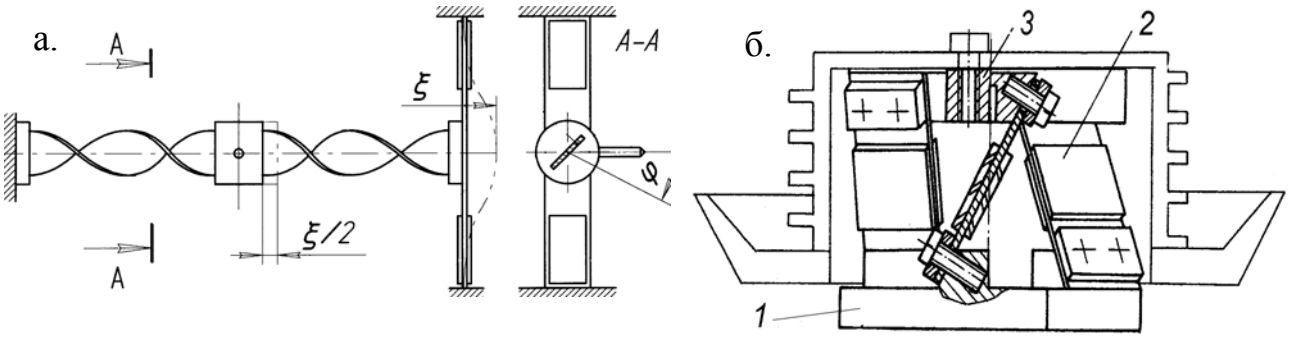

Рис.6. Упругие устройства с БПП для получения движения по винтовой линии

Это традиционное построение кинематически разомкнутых систем имеет существенный недостаток – большие габариты и пониженную жесткость. Более эффективны системы с замкнутыми кинематическими цепями. Крестообразное упругое устройство с параллельными рессорами и БПП (рис.7, а) позволяет выходному звену иметь три управляемых степени свободы, а устройство на базе платформы Стюарта – шесть степеней свободы за счет шести ПП (рис.7, б). Микроманипуляторы, оснащенные подобными многокоординатными модулями точных перемещений, позволяют расширить зоны обслуживания. С их помощью также можно осуществлять сканирование по двум координатам.

Многокоординатные устройства с использованием проскальзывания между выходным звеном и толкателями позволяют создать широкий спектр вибрационных пьезодвигателей, в частности для навигационных приборов с высоким разрешением (рис.8).

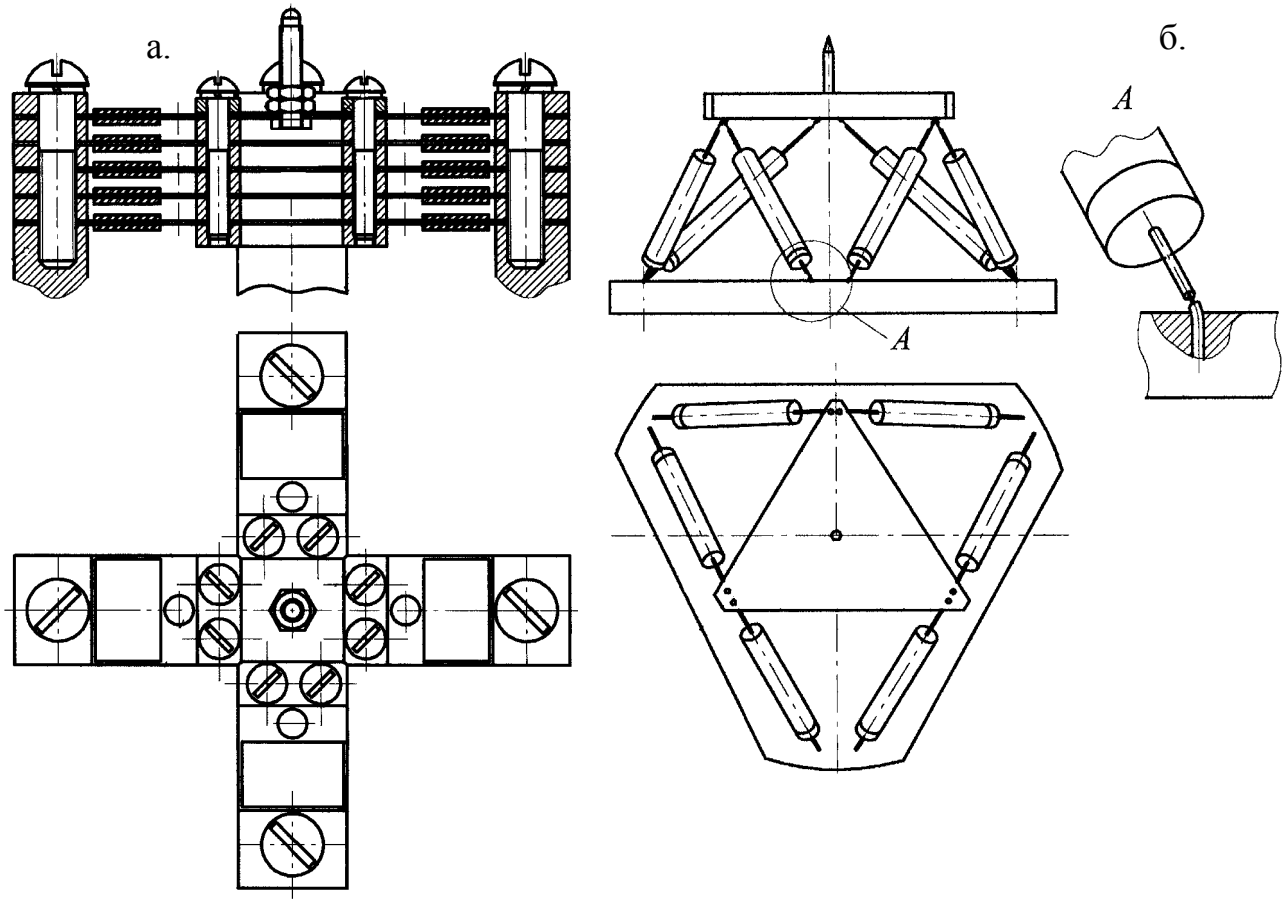

Рис.7. Многокоординатные устройства с БПП

В качестве приводов толкателей служат АУШ по рис.5, а, управляемые от нескольких генераторов, сигналы которых сдвинуты по фазе. Траектория движения концов толкателей, необходимая для движения выходного звена, может быть эллипсообразной или в виде восьмерки. Выполненные автором исследования кинематики модулей микроперемещений с БПП показали следующее:

- применение БПП в качестве приводов микроперемещений позволяет укоротить кинематические цепи модулей и увеличить диапазон перемещений;
- основными активными кинематическими звеньями с БПП являются активные упругие параллелограммы и активные упругие шарниры;

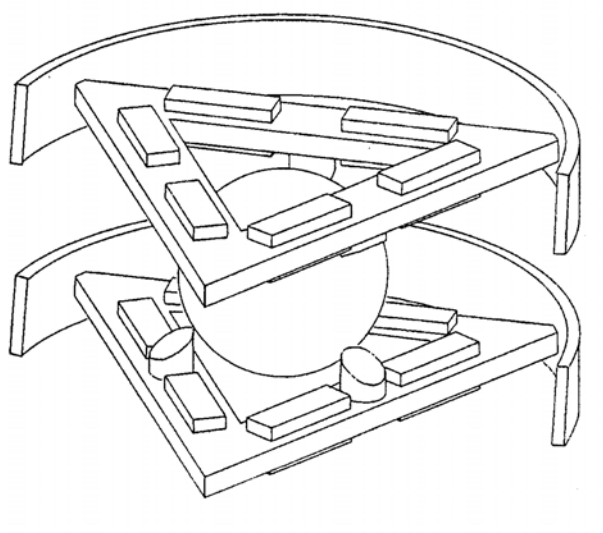

Рис.8. Трехкоординатный пьезодвигатель навигационного прибора

- использование замкнутых упругих кинематических цепей и последовательного соединения модулей с БПП позволяют также получить ММС с несколькими степенями свободы;
- повышение силы привода можно получить наращиванием количества параллельно соединенных между собой рессор с БПП.

Четвертая глава посвящена разработке расчетных моделей модулей микроперемещений на базе составных и трубчатых ПП. Для тонких пьезокерамических дисков (шайб), из которых набираются составные пьезопреобразователи, а также для пьезокерамических трубок и тонких пластин, линейные матричные уравнения обратного пьезоэффекта удобно представить в виде

$$S = s^E T + d_t E, \qquad (1)$$

где S и T – механические упругие деформации и напряжения, E – электрическая напряженность поля, s - постоянные податливости, d - пьезомодули, нижний индекс t – означает транспонирование, верхний индекс E - означает, что константы выбраны при постоянной напряженности электрического поля. При этом выборе уравнений существенно упрощаются граничные условия.

Перемещение рабочего торца ПП, работающего на растяжение-сжатие, в зависимости от внешней силы P и электрического напряжения U можно представить в виде $\xi = B_\xi \cdot U - C_\xi P$, где B_ξ и C_ξ – коэффициенты, зависящие от параметров ПП, причем учитываются ограничения по электрическому напряжению и по силе затяжки P_0. С учетом этого выражения рассчитаны характеристики модуля с мультиплексной передачей по рис.2, а с учетом деформаций рычага и контактных деформаций в точке A в квазистационарном режиме. Най-

дены оптимальные соотношения параметров для конкретных примеров устройств с общими габаритами 60x50x23 мм при $U = 300$ В, при которых значение коэффициента усиления максимально приближено к его значению для абсолютно жесткого рычага с идеальным шарниром (рис.9).

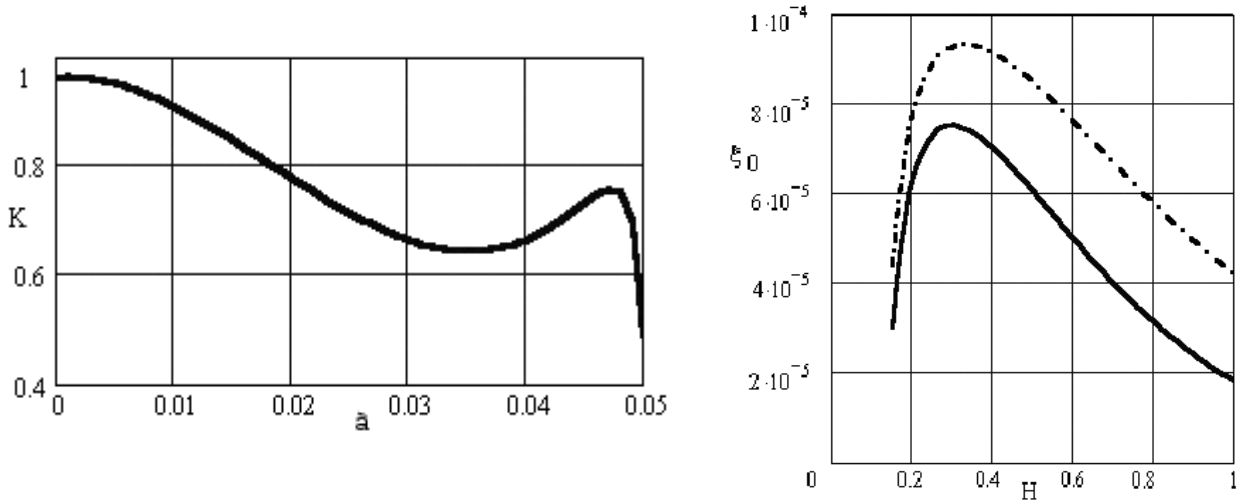

Рис.9. Зависимость коэффициента эффективности мультиплекции K от расстояния a и зависимости перемещений выходного звена от относительной толщины упругого шарнира H (перемещения и расстояние в м)

Найдены также оптимальные соотношения между толщинами упругого шарнира и рычага, при которых коэффициент мультиплекции максимален. При малых значениях этого соотношения H работа устройства становится неэффективной. Аналитически определены коэффициенты мультиплекции при различных соотношениях параметров рычага и упругого шарнира. Выявлены пределы коэффициента усиления перемещений в зависимости от нагрузки и конструктивных особенностей. Проведенное аналитическое исследование позволяет решить задачу оптимизации параметров модуля. Изложенный метод служит основой для САПР модулей мультиплекции. Внешняя нагрузка существенно влияет на перемещение выходного звена модуля мультиплекции. При этом выявлено, что при относительно малых нагрузках можно применять трубчатые пьезопреобразователи, при больших нагрузках (свыше $P = 100$ Н при рассмотренных габаритах устройства) необходимы составные пьезопреобразователи. Этот вывод связан с тем, что жесткость последнего на порядок выше.

Пятая глава посвящена разработке методики расчета упругих систем с БПП и сравнительному анализу расчетных моделей БПП. Известны пакеты прикладных программ для расчета методом конечных элементов перемещений пластин с БПП (например, «Feapiezo-1, 2»), которые дают высокоточные результаты. Для работы с этими программами требуются мощные компьютеры.

Однако при проектировании высокая точность часто не оправдана, т.к. по ОСТ II 0444-87 (Материалы пьезокерамические) допустим разброс значений параметров пьезокерамики до 20%. Для разработчика миниатюрных устройств достаточны относительно грубые оценки, а не сами точные значения перемещений, углов поворота выходных звеньев устройств с БПП. Обычно создатели новых систем микромеханики проверяют свои идеи на экспериментальных образцах, внося шаг за шагом коррекцию в их параметры. Наиболее часто встречающийся тип БПП – это вытянутая в одном направлении пластина, состоящая из трех склеенных между собой элементов – двух тонких пьезокерамических пластин и одной металлической пластины между ними. При соблюдении определенной полярности (поляризации) пьезоэлементов при подаче на них электрического напряжения пластина БПП изгибается в двух плоскостях.

Автором на базе уравнений (1) разработаны линейные расчетные модели БПП в виде многослойной пластины при действии электрического напряжения (рис.10 а, б) с учетом деформаций в двух плоскостях с фиксированной точкой и заделкой по ребру, а также в виде стержня при различных условиях закрепления. Показано, что наилучшее приближение к эксперименту имеет модель многослойной пластины с заделкой по ребру. Наиболее простая модель – стержень дает удовлетворительные результаты (максимальное расхождение с экспериментом – 16%) при $h_M / h_P \le 3$, где h_M – толщина металлической рессоры, h_P – толщина пьезопластин. При длине пьезопластин больших в 3-4 раза их ширины и при соотношении толщин рессоры и пьезопластин не более 3 (что характерно для большинства разработанных автором модулей микроперемещений) расчетная модель в виде стержня практически не отличается от расчетной модели в

виде пластины (отличия не более 5%). При $h_M / h_P \approx 2{,}7$ на поверхности пьезопластин механическое напряжение минимально (численное значение отношения соответствует пьезокерамике ЦТС 19 и дюралюминиевой рессоре).

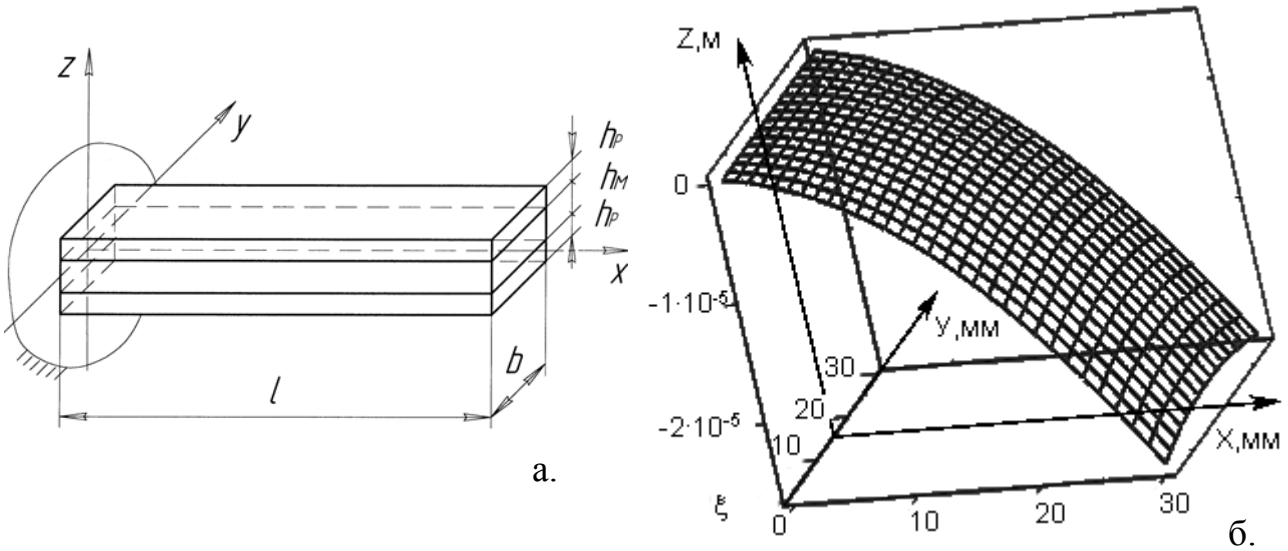

Рис.10. Расчетная схема БПП (а), срединная поверхность защемленного с одного края БПП при подаче электрического напряжения (б)

Рассчитаны и проанализированы распределения деформаций и напряжений по поперечному сечению БПП в стержневой модели при действии электрического напряжения (рис.11). Общий характер распределения механических напряжений и деформаций по сечению качественно похож на характер распределения этих величин от температуры в биметаллических пластинах. Однако в биметаллических устройствах не может существовать пассивный слой как в БПП и, кроме того, картина распределения указанных характеристик не может быть симметричной относительно нейтральной линии изгиба.

Сравнительный анализ зависимости деформации от приложенного напряжения для БПП и деформации от температуры для биметаллов свидетельствует о том, что при отсутствии внешней нагрузки относительная деформация постоянна по длине, поэтому нейтральная линия имеет в обоих случаях постоянную кривизну по длине, т.е. изогнутые элементы имеют форму дуги окружности. Показано, что при определенном соотношении толщин слоев БПП на внешних поверхностях пьезоэлементов механические напряжения равны нулю.

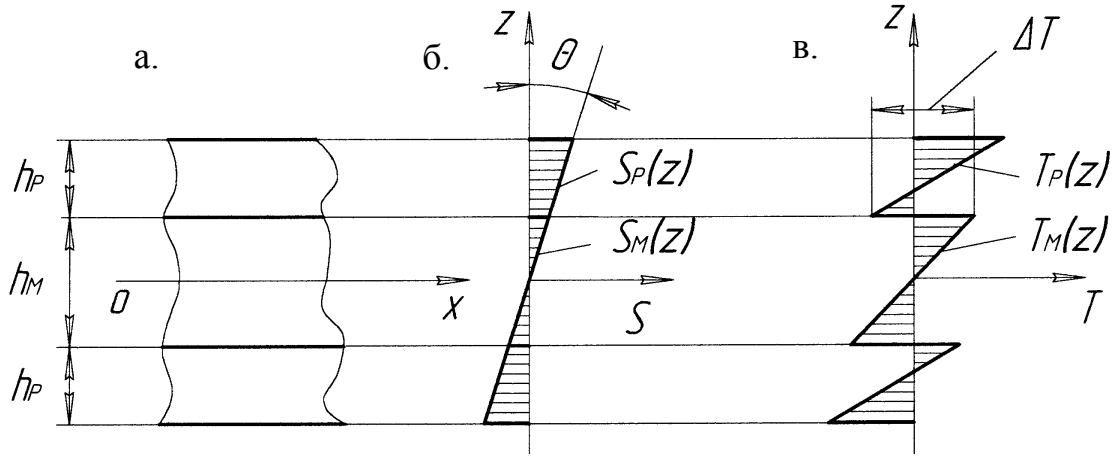

Рис.11. Участок БПП (а), эпюра деформаций (б), эпюра механических напряжений (в)

Разработанная автором методика расчета перемещений элементов упругих систем с БПП заключается в замене действия электрического напряжения U на действие моментов M_E. Доказана эквивалентность такой замены электрического воздействия на пьезокерамические пластины внешними моментами, приложенными к границам этих пластин и приводящими к их изгибу. Эквивалентный момент определяется по формуле

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

где s_{11}^E - податливость пьезокерамики при постоянной напряженности электрического поля, d_{31} - пьезоэлектрический модуль пьезопластины при действии электрического напряжения в направлении, перпендикулярном деформации пьезопластины, E_M – модуль упругости металлической рессоры, λ_B – податливость сечения БПП. Справедливость такой замены подтверждена экспериментальными исследованиями. Предложенная методика позволяет определять перемещения в любых точках сложных микроманипуляционных систем при помощи известных принципов и методов решения задач изгиба (принцип Кастильяно, метод Мора и т.д.).

Шестая глава посвящена разработке и исследованию расчетных моделей модулей микроперемещений с БПП, имеющих одну степень свободы. Рассмотрены несколько микромеханических модулей в виде АУП (рис.4) при действии внешних сил и эквивалентных моментов M_E, заменяющих действие электрического напряжения U. Для АУП с габаритами 60x60x14 мм и $U = 300$ В из графиков (рис.12) определены оптимальные соотношения длин пьезоэлементов и рессоры, при которых перемещения и накопленная энергия максимальны. Разработаны расчетные модели «низкого» упругого параллелограмма с БПП, расположенными параллельно его основанию и АУП с упругими шарнирами на концах рессор. Определены зависимости углов поворота рессор и перемещения платформы от геометрических параметров «низкого» устройства.

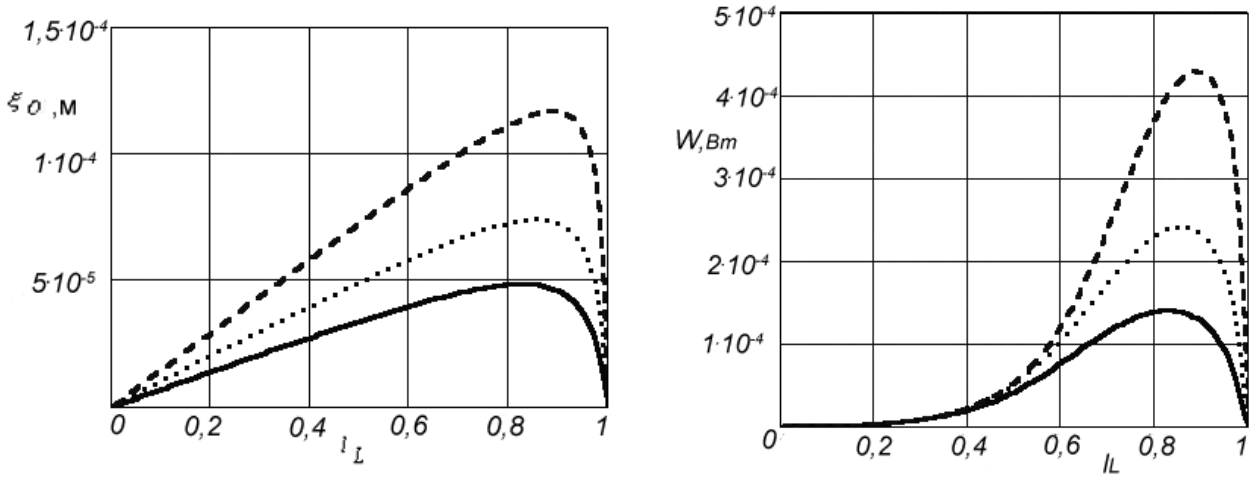

Рис.12. Зависимости перемещения платформы (а) и накопленной энергии (б) от относительной длины пьезоэлементов $l_L = l/L$

Во всех перечисленных случаях установлены зависимости перемещения выходного звена от внешней нагрузки, а также собственные частоты модулей. Определены физические и геометрические параметры систем, при которых перемещение максимально. Рассмотренные варианты АУП могут быть использованы в качестве приводных элементов столиков микроскопов, вибропитателей, устройств точного перемещения щупов измерительных головок, устройств ориентации проволоки электроэрозионных станков.

Расчеты показали, что АУП с упругими шарнирами на концах рессор дает перемещение в 2 раза больше, чем АУП по рис.4, однако жесткость его меньше

при прочих равных условиях. Сравнение рассчитанных характеристик отдельной консольной рессоры с БПП и рессоры с БПП в составе АУП приводит к следующим выводам. Жесткость консольного БПП по в 3-5 раз меньше, чем жесткость АУП, который может включать в себя несколько рессор с БПП (это ведет к пропорциональному увеличению жесткости АУП). Однако перемещения свободного конца консольного БПП в 3-5 раз выше, чем у параллелограмма. Поэтому консольная конструкция эффективна для манипулирования объектами при малых внешних воздействиях (например, в оптических системах в квазистационарных режимах). Для мехатронных систем со сложным движением и внешним воздействием более перспективна конструкция со структурой активного параллелограмма.

Рассмотрены и разработаны расчетные модели АУШ различного типа: для схем по рис.5 а и 5 б. Определены зависимости углов поворота выходных звеньев и накопленной энергии от конструктивных параметров. Для обеспечения максимума угла поворота и жесткости системы БПП должны располагаться ближе к центру рессоры.

Последовательное соединение модулей с поступательным движением – АУП и модулей с вращательным движением – АУШ позволит создать СМП с различными траекториями выходного звена. Разработанные выше расчетные модели позволяют состыковывать их в единый расчетный блок для САПР.

Седьмая глава посвящена методике расчета микромеханических модулей с управляемыми формами упругих перемещений выходного звена (с несколькими степенями свободы выходного звена). Для системы, сформированной на базе АУШ (рис.13, а) при внешней нагрузке в виде момента M_0 и силы P_0, действие двух управляющих напряжений U_{01} и U_{02} в соответствии с разработанной методикой заменено эквивалентными моментами M_{E1} и M_{E2}. Область перемещения конца выходного звена имеет форму ромба (рис.13, б). Размеры области определяются коэффициентами A и B, зависящими от параметров АУШ, и максимальным значением U управляющих напряжений. При гармони-

ческих напряжениях, подаваемых на два БПП и сдвинутых по фазе на 90^0, конец рабочего звена имеет эллиптическую траекторию. Максимальная жесткость системы достигается при тех же параметрах, что и для рассмотренного выше АУШ.

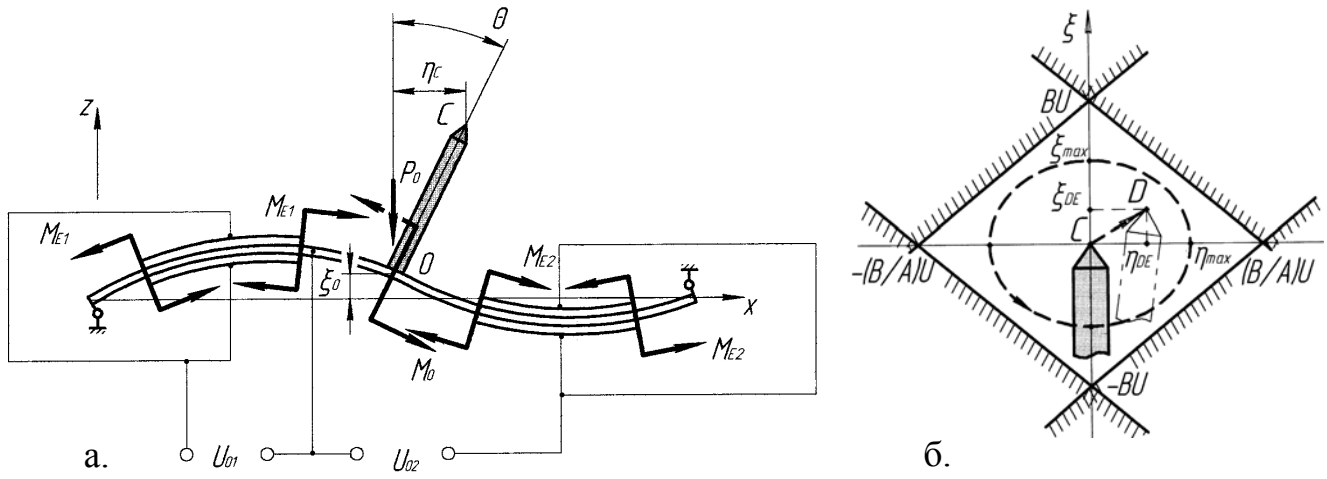

Рис.13. Расчетная схема двухкоординатного модуля (а) и области перемещения конца выходного звена (б)

Двухкоординатный модуль на базе двух АУП с мультиплексным упругим механизмом при тех же габаритах, жесткости, что и предыдущее устройство, имеет угловое перемещение в 3-5 раз больше. Расчеты показали, что существует оптимальное значение длины выходного звена, при котором достигается максимум его поворота. Недостатком конструкции является пониженная жесткость системы в направлении, перпендикулярном плоскости действия. Для повышения жесткости предложено соединить с выходным звеном еще два АУП, расположенных перпендикулярно имеющимся, однако в этом случае система теряет одну степень свободы.

Отличие следующего модуля с тремя степенями свободы от рассмотренных выше заключается в том, что он выполнен не по схеме последовательного соединения, а по схеме замкнутой кинематической цепи (рис.14). Расчеты показали, что жесткость таких упругих систем выше при равных габаритах. Введение в конструкцию тонких стержней круглого сечения, соединяющих АУП с выходным звеном, позволяет сократить размеры модуля и одновременно повы-

сить амплитуды качания выходного звена θ. Введение упругих шарниров на концах рессор увеличивает θ в два раза.

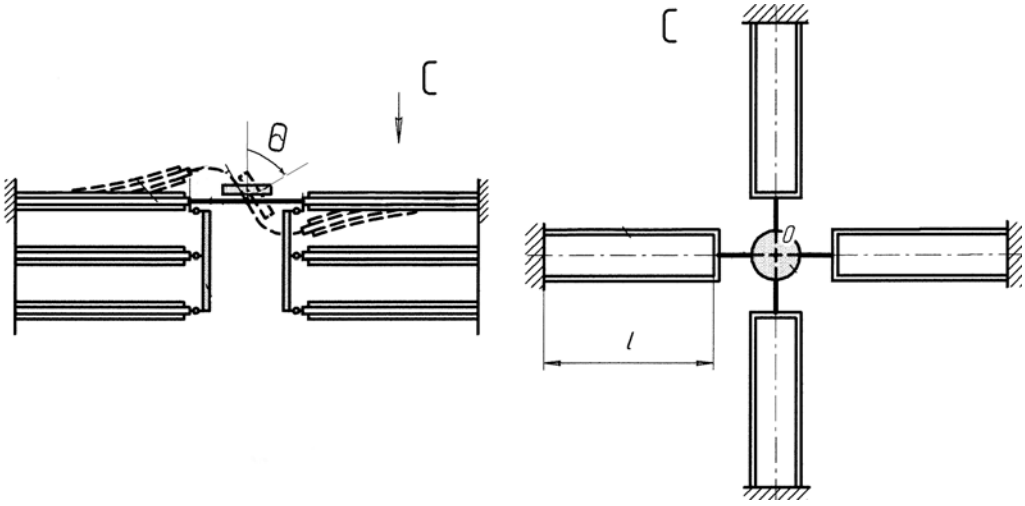

Рис.14. Двухкоординатный сканер

Двухкоординатный сканер с компенсацией осевого смещения зеркала по этой схеме позволяет использовать его для миниатюрной видеосистемы, в которой в качестве дисплея служит непосредственно сетчатка глаза зрителя (области применения: видеосистемы для микрохирургов, операторов микросборочных центров, пилотов). Имея два таких устройства, можно получить стереоскопическое изображение.

Приведенные в главе 7 расчеты показывают, что микроманипуляционные системы с БПП конструктивно просты, имеют малые габариты и способны осуществлять перемещения до миллиметра и нескольких градусов. Для повышения зоны манипулирования целесообразна оптимизация параметров упругой системы. Если требуется существенно увеличить рабочую зону манипулятора, то такую систему необходимо устанавливать на устройствах грубого перемещения, имеющих другие приводы, например, как в микроманипуляторе для биологических исследований компании «Narishige», они могут быть гидравлическими. Возможное применение эллиптических траекторий конца выходного звена – это перемещение объекта при его помощи, например, в многокоординатных виброприводах.

Восьмая глава посвящена исследованию динамики упругих систем с БПП. Для микроманипуляционных систем скорости, ускорения рабочего органа и его инерционные характеристики малы, поэтому вопросы динамики не актуальны, однако для приборных СМП, в частности для виброприводов, систем сканирования и устройств микрогидро- и пневмоавтоматики они важны.

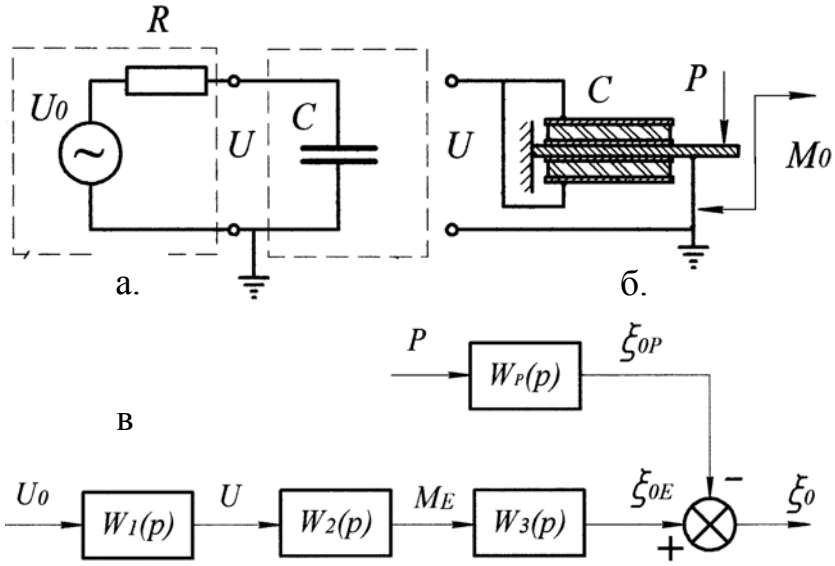

Рис.15. Схема БПП упругой системы с БПП с внешней нагрузкой: а – принципиальная электрическая схема, б – электромеханическая схема, в – структурная схема

Электрическую схему упругой системы с БПП, работающей в режиме привода микроперемещений в области частот до низшей собственной частоты, можно представить следующим образом (рис.15 а, б). Управляющее напряжение U_0, подаваемое от источника переменного напряжения трансформируется из-за RC-цепочки в напряжение U, преобразуемое в перемещение ξ_0 выходного звена за счет обратного пьезоэффекта. Внешними нагрузками упругой системы с БПП являются сила P и момент M_0. Структурная схема модуля микроперемещений с одной степенью свободы определяется электрическими, электромеханическими и механическими параметрами системы (рис.15, в).

Была определена передаточная функция системы с одной степенью свободы с учетом внутренних потерь. Первое звено отражает электрическую часть системы, второе звено – электромеханическую часть системы и третье звено механическую часть. Специфика БПП как преобразователя электрической энергии в механическую заключена в передаточной функции второго звена, представляющего собой безынерционное звено. С учетом потерь она имеет вид

$W_2(p)=\bar{k}_2$, где $\bar{k}_2$ – комплексный коэффициент преобразования. Его можно найти из формулы для эквивалентного момента (2):

$$\bar{k}_2=\frac{M_E}{U}=\frac{3}{2}\cdot\frac{d_{31}\left[\left(h_P+\frac{h_M}{2}\right)^2-\frac{h_M^2}{4}\right]}{\left\{\bar{E}_M\bar{s}_{11}^E\frac{h_M^3}{8}+\left[\left(h_P+\frac{h_M}{2}\right)^3-\frac{h_M^3}{8}\right]\right\}h_P\bar{\lambda}_B},\text{ где } \bar{E}_M=E_M(1+j\frac{1}{Q_M}),$$

$$\bar{\lambda}_B=\frac{12}{b\left\{\bar{E}_M h_M^3+2\frac{h_P^3}{\bar{s}_{11}^E}\left[1+3\left(1+\frac{h_M}{h_P}\right)^2\right]\right\}}\text{ и } \bar{s}_{11}^E=s_{11}^E\left(1+j\frac{1}{Q_P}\right)^{-1},$$ – комплексные модуль упругости металла рессоры, податливость сечения биморфа и податливость пьезокерамики, Q_M – добротность материала металлической рессоры, Q_P – механическая добротность пьезокерамики.

При работе упругих систем с БПП в вибрационном режиме важно знать добротность всей системы Q_B, чтобы оценить амплитуды перемещений выходного звена вблизи резонанса и потребляемую мощность, сформулировать требования к системе управления. Результаты исследований добротности АУП, рассмотренного в главе 6, отражены на рис.16. Значение добротности для дюралюминия, из которого выполнены рессоры, – $Q_M\approx 1000$. С увеличением добротности пьезокерамики Q_P добротность системы Q_B возрастает до значения Q_M, а с увеличением толщины пьезоэлементов добротность Q_B падает от значения Q_M до значения Q_P. Отсюда следует вывод, что для виброустройств толщина пьезоэлементов должна быть как можно меньше по отношению к толщине рессор. При применении упругой системы с БПП в качестве микроманипуляционного модуля или виброустройства по приведенным зависимостям можно выбрать параметры элементов АУП с требуемым значением Q_B. Механическая добротность, вычисленная по экспериментальным данным по показаниям пьезодатчиков, наклеенных на рессору, составляет $Q_{\exp}=60$, что 40% ниже, чем Q_B. По-видимому, уменьшение $Q_{\exp}$ по сравнению с Q_B возникает

вследствие механических потерь в клеевых соединениях пьезопластин с рессорами, а также из-за погрешностей измерения частот и Q_M.

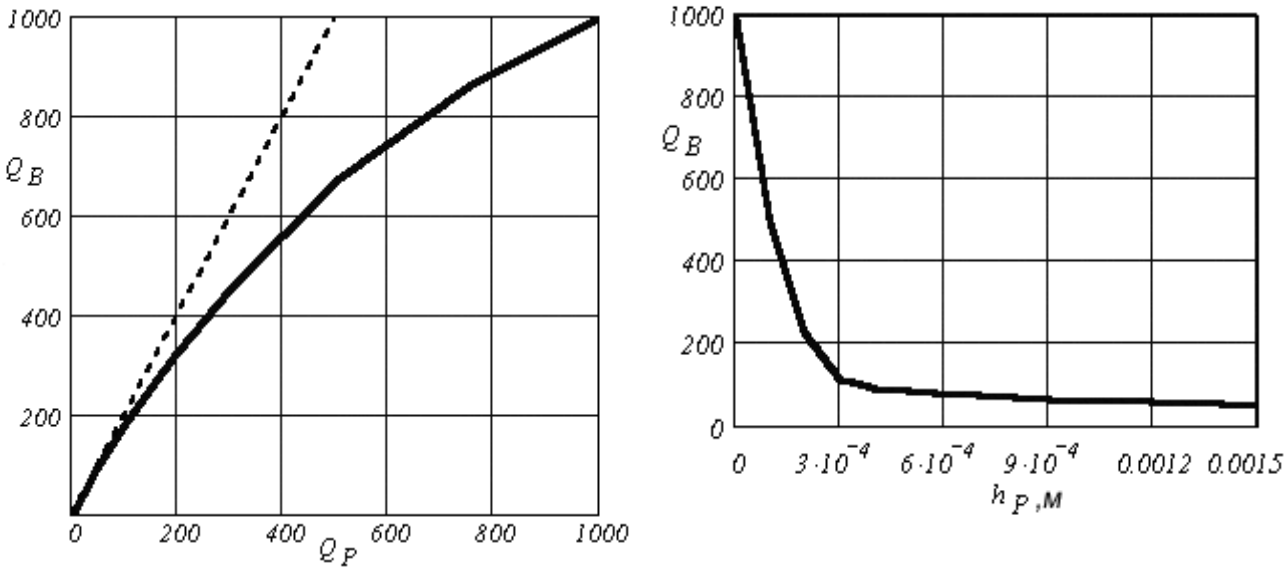

Рис.16.Зависимости добротности АУП от добротности пьезокерамики и от толщины пьезоэлементов

По результатам исследования динамики сделаны следующие выводы.

1. Системы имеют ярко выраженный характер колебательных звеньев с малым демпфированием. Электрические параметры пьезоэлементов оказывают на поведение системы в целом малое влияние по сравнению с механическими элементами.

2. Сравнение частотных характеристик, полученных аналитическим и экспериментальным путями, показывает, что на демпфирование основное влияние оказывает механическая добротность пьезокерамики.

3. Добротность системы по внешнему механическому воздействию Q_{PB} выше, чем добротность по управляющему сигналу Q_B.

Девятая глава посвящена экспериментальному исследованию и описанию реализованных модулей с БПП и систем управления, а также основам их САПР. Были сформулированы следующие цели экспериментальных исследований. 1) Оценить достоверность расчетных моделей упругих систем с БПП. 2) Доказать возможность применения метода эквивалентных моментов для рас-

чета сложных упругих систем с БПП. 3) Определить эксплуатационные характеристики транспортирующих устройств в вибрационном режиме.

Экспериментальные исследования основаны на методах измерения при помощи оптических и контактных методов снятия данных. Сравнение экспериментальных и теоретических исследований показало высокую достоверность методов расчета (различия в результатах варьировались от 5 до 15 %).

Приведены параметры разработанных автором вибрационных устройств с БПП: миниатюрых вибролотков на базе АУП и миниатюрых вибробункеров для транспортирования и ориентации микроизделий. Приведены данные о разработанном линейном шаговым двигателе, примененном при изготовлении дифракционных решеток.

Системы управления вибропитателей с БПП должны обеспечивать заданную скорость транспортирования миниатюрных деталей, находящихся на лотке питателя. Эта цель достигается стабилизацией частоты колебаний платформы обычно в резонансном режиме и регулированием амплитуды напряжения, подаваемого на БПП. Для управления работой группы вибропитателей рассмотрены три варианта. Во-первых, использование авторезонансного режима за счет положительной обратной связи по напряжению. Во-вторых, использование источника напряжения с одним генератором качающейся частоты. Он обеспечивает плавное управление скоростью транспортирования деталей в широком диапазоне путем обычной регулировки напряжения, подаваемого на каждый вибропитатель. При качании частоты колебаний в диапазоне, охватывающем резонансные частоты всех вибропитателей, на каждом лотке периодически будет происходить движение деталей. В-третьих, возможно использование компьютера в качестве формирователя группы источников переменного напряжения с частотами, соответствующими резонансу каждого вибропитателя в отдельности. Амплитуды напряжения, подаваемого на вибропитатели, могут регулироваться по отдельности, исходя из заданных скоростей транспортирования деталей.

Трехкоординатный вибродвигатель (рис. 8), предназначенный для использования в системе автоматического слежения за космическими объектами, имеет независимые приводы трех толкателей, обеспечивающие заданные законы движения сферы. Для этого формируются эллиптические траектории движения торцов трех толкателей, их частота колебаний и амплитуды. Система управления имеет три контура автоматической автоподстройки – по частоте, амплитуде и фазе.

Разработанные элементы интерактивной САПР пьезоэлектрических СМП включают в себя блок технических требований для СМП, блок схемных решений модулей СМП, блок математических моделей модулей, а также блоки физико-механических параметров пьезокерамических материалов. Для проектирования СМП с пьезоприводами формулируются технические требования, исходя из которых, САПР предлагает одно – два наиболее эффективных схемных решения. Далее осуществляется ввод физических параметров пьезокерамики и пассивных элементов, на базе которых производится расчет перемещений и деформаций модулей СМП в квазистационарном режиме и проверка пьезоэлементов на электрическую и механическую прочность. Если полученные характеристики удовлетворяют техническим требованиям, то осуществляются аналогичные расчеты и расчет собственных частот в динамическом режиме (в противном случае производится ручная коррекция геометрических и физических параметров элементов модуля СМП). После проверки пьезоэлементов на прочность в динамическом режиме блок данных передается в систему разработки конструкторской документации.

Исходя из оценки реальных значений параметров СМП, были даны рекомендации по практическому использованию пьезоэлектрических систем микроперемещений в различных областях техники.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Представленная на защиту диссертация является обобщением проведенных автором исследований и разработок, в результате которых решена комплексная проблема создания и развития принципиально новых многокоординатных систем микроперемещений и их модулей на базе пьезоэлектрических преобразователей. Главный итог работы – это разработка теоретических и методических основ нового научного направления в создании новейших систем микроперемещений на базе пьезоэлектрических преобразователей.

1. Предложена концепция мехатронных манипуляционных систем микроперемещений с древовидной структурой, основанной на принципах бионики, позволяющая достичь высокой вариативности манипулирования с минимальным усложнением конструкций микроманипуляторов.

2. На основе анализа видов движения выходных звеньев СМП предложены новые схемные решения мехатронных модулей с одной, двумя и тремя степенями свободы на базе БПП. Показано, что БПП сокращает кинематическую цепь модулей микроперемещений по сравнению с другими элементами, преобразующими электрическую энергию в механическую.

3. Разработаны и проанализированы математические модели БПП. На основе результатов экспериментов сделан выбор расчетной модели, которая использована для анализа и синтеза модулей упругих систем микроперемещений с одной и несколькими степенями свободы. Определено распределение механических напряжений и деформаций по сечению БПП при подаче электрического напряжения.

4. Разработана и внедрена в учебный процесс СПбГПУ методика расчета перемещений, деформаций и силовых характеристик упругих систем микроперемещений с БПП, позволяющая анализировать и синтезировать предложенные многокоординатные устройства.

5. Разработан комплекс математических моделей модулей микроперемещений с одной и несколькими степенями свободы на базе БПП, имеющими разомкнутые и замкнутые кинематические цепи. Созданы компьютерные программы для расчета модулей с поступательным и вращательным движением выходного звена. Определены рабочие зоны и траектории движения концов выходных звеньев модулей с несколькими степенями свободы. Рассчитаны параметры упругих систем, при которых перемещения выходных звеньев и развиваемые силы максимальны.

6. Проведен анализ динамических характеристик модулей микроперемещений с учетом внешней механической нагрузки и внутренних потерь. Определены добротности и амплитудно- и фазочастотные характеристики модулей.

7. Разработаны конструкции и внедрен ряд миниатюрных вибропитателей микроизделий часовой и электронной техники, работающих на базе БПП. Разработан и внедрен прецизионный шаговый пьезопривод на базе составных пьезопреобразователей для изготовления дифракционных решеток. Разработаны трехкоординатный сферический пьезодвигатель и система управления для космического навигационного прибора. Даны практические рекомендации по практическому применению пьезоэлектрических систем микроперемещений.

8. Разработаны элементы САПР модулей СМП с БПП, позволяющие определить основные параметры модулей и создать конструкторскую документацию.

Результаты этой работы позволяют повысить эффективность принципиально новых мехатронных устройств микроперемещений с ПП за счет оптимизации их параметров. Предложенные новые технические решения устройств микроперемещений открывают путь для дальнейшего развития одного из самых перспективных направлений высокотехнологических систем микромеханики.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Смирнов А.Б. Мехатроника и робототехника. Системы микроперемещений с пьезоэлектрическими приводами: Учеб. пособие. – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2003. – 160 с.

2. Смирнов А.Б. Пьезоэлектрические вибропитатели: Учеб. пособие.– СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1995. – 32 с.

3. Краснослободцев В.Я., Смирнов А.Б., Лиходедов Н.П. Инновационный инжиниринг: Учеб. пособие. – СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1998. – 122 с.

4. Ерофеев А.А., Смирнов А.Б., Уланов В.Н. Волновые пьезодвигатели. Л.: ЛДНТП, 1989. – 28 с.

5. Смирнов А.Б. Методика расчета упругих систем с биморфными пьезопреобразователями // Изв. Вузов. Приборостроение. 2003. Т. 46, № 1. С. 48 – 54.

6. Дьяченко В.А., Смирнов А.Б. Расчет и проектирование микроманипуляторов с пьезоприводами // Микросистемотехника. 2003. № 3. С. 34 – 38.

7. Дьяченко В.А., Смирнов А.Б. Микроманипуляционные системы с биморфными пьезоприводами // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2002. № 1. С. 73 – 79.

8. Дьяченко В.А., Смирнов А.Б. Пьезоэлектрические устройства мехатроники // Мехатроника. 2002. № 2. С. 38 –46.

9. Смирнов А.Б. Сравнительный анализ моделей биморфных пьезоэлектрических преобразователей // М-лы VII Всероссийской конф. по проблемам науки и высшей школы «Фундаментальные исследования в технических университетах» СПб.: СПбГПУ, 2003. С.210 – 211.

10. Дьяченко В.А., Смирнов А.Б. Расчет и проектирование микроманипуляторов с пьезоприводом // М-лы XIII научн.-технич. конф. «Экстремальная робототехника» СПб.: СПбГПУ, 2003. С. 85 – 92.

11. Дьяченко В.А., Смирнов А.Б. Расчет и проектирование микроманипуляторов с пьезоприводом // Мехатроника, автоматизация, управление. 2002. № 5. С. 40 – 44.

12. Смирнов А.Б. Активные упругие направляющие и шарниры с биморфными пьезопреобразователями // М-лы V Всероссийской конф. по проблемам науки и высшей школы «Фундаментальные исследования в технических университетах» СПб.: СПбГПУ, 2001. С.185 – 186.

13. Смирнов А.Б. Сканирующие устройства с пьезоприводом // М-лы научн.-практич. конф. «Формирование технической политики инновационных наукоемких технологий» СПб.: СПбГТУ, 2001. С. 178 – 181.

14. Смирнов А.Б., Попов А.Н. Мультиплекция перемещений биморфных пьезоприводов // М-лы научн.-практич. конф. «Формирование технической политики инновационных наукоемких технологий» СПб.: СПбГТУ, 2001. С. 175 – 178.

15. Ерофеев С.А., Ерофеев А.А., Смирнов А.Б. Сферический пьезодвигатель многокоординатных систем точного позиционирования // М-лы Междунар. на-

учн.-техн. конф. «Пьезотехника-2000». – М.: Изд-во МИРЭА. 2000. С. 266 – 268.

16.Смирнов А.Б. Пьезоэлектрические устройства микрогидроавтоматики // Труды Междунар. Бизнес-Форума «Информационные и бизнес-технологии XXI века» СПб.: СПбГТУ, 2000. С. 53 – 56.

17.Смирнов А.Б., Дубровский В.О. Устройства подачи и дозирования лекарственных растворов с пьезоэлектрическим приводом // М-лы Междунар. научн.-техн. конф. «Измерительные и информационные технологии и приборы в охране здоровья» СПб.: СПбГТУ, 1999. С. 84 – 86.

18.Ерофеев А.А., Смирнов А.Б., Уланов В.Н. Исследование вибропитателей с пьезоприводом//Сб. научн. тр. СПбГТУ №457. СПб.: СПбГТУ, 1996. С. 47–51.

19.Ерофеев А.А., Смирнов А.Б., Уланов В.Н. Пьезоэлектрический низкочастотный привод вибропитателей // Тезисы докл. Междунар. научн.-техн. конф. «Пьезотехника-94» Томск, изд. ИПУ «Томинформ», 1994. С. 65 – 69.

20.Ерофеев А.А., Смирнов А.Б., Уланов В.Н. Пьезоэлектрические биморфные преобразователи для вибропитателей // Вычислительная техника, автоматика и радиоэлектроника. Сб. научн. трудов. СПб.: СПбГТУ, 1993. С. 34 – 40.

21.Ерофеев А.А., Бойцов С.В., Смирнов А.Б., Уланов В.Н. Использование пьезодвигателей в приводах грубых перемещений сканирующего туннельного микроскопа // М-лы Междунар. научн.-техн. конф. «Пьезотехника-92», СПб.: ЛДНТП, 1992. С. 55 – 57.

22.Смирнов А.Б., Уланов В.Н. Системы управления волновых пьезодвигателей // Вычислительная техника, автоматика и радиоэлектроника. Сб. научн. трудов. СПб.: ЛГТУ, 1991. С. 110 – 114.

23.Европатент №EP1166371. Vibration Actuator. 2002. Andersen B., Blanke M., Smirnov A.B., Yerofeev A.A., Yerofeev S.A.

24.Патент РФ №2166832. Многокоординатный пьезодвигатель. 2001. Ерофеев А.А., Смирнов А.Б., Ерофеев С.А.

25.Патент PCT №WO0030186. Vibration Actuator. 2000. Andersen B., Blanke M., Smirnov A.B., Yerofeev A.A., Yerofeev S.A.

26.Патент РФ №2089378. Пьезоэлектрическая бритва. 1997. Смирнов А.Б., Абрамов А.В., Яринич С.В.

27.Патент РФ №2069162. Виброконвейер для миниатюрных деталей. 1996. Смирнов А.Б.

28.Патент РФ №2030343. Виброконвейер. 1995. Смирнов А.Б., Абрамов А.В., Бронников М.Б., Уланов В.Н., Яринич С.В.

29.Свидетельство РФ на полезную модель №487. 1995. Вибропитатель для миниатюрных деталей. Смирнов А.Б., Абрамов А.В., Бронников М.Б., Яринич С.В.

30.Авторское свидетельство СССР №1461354. 1989. Позиционирующий пьезопривод. Ерофеев А.А., Смирнов А.Б., Уланов В.Н.