

На правах рукописи



Ляпунов Данил Юрьевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ
ЕМКОСТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ С ПЛЕНОЧНЫМИ
ЭЛЕМЕНТАМИ**

Специальность 05.09.01 – Электромеханика и
электрические аппараты

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск 2010

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» на кафедре электропривода и электрооборудования

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Бекишев Рудольф Фридрихович

Научный консультант: доктор технических наук, профессор
Букреев Виктор Григорьевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Кербель Борис Моисеевич

кандидат технических наук, доцент
Орлов Юрий Александрович

Ведущее предприятие: Обособленное подразделение «Научно-исследовательский институт автоматики и электромеханики Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники», г. Томск

Защита состоится 29 декабря 2010 года в 15 часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д212.269.11 при Национальном исследовательском Томском политехническом университете по адресу: 634050, г. Томск, ул. Усова, 7, аудитория 217.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Автореферат разослан «26» ноября 2010 г.

Ученый секретарь совета по защите
докторских и кандидатских диссертаций
к.т.н., доцент



Ю.Н. Дементьев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

Микроэлектромеханические емкостные преобразователи в настоящее время широко используются в качестве датчиков и микродвигателей как основные функциональные элементы микроэлектромеханических систем (МЭМС). Их энергоемкость в области малых мощностей значительно превосходит энергоемкости индуктивных аналогов.

К областям использования емкостных микроэлектромеханических преобразователей относятся: высокоточные позиционные электроприводы для изготовления устройств нано- и микросистемной техники, контроль и диагностика технического состояния объектов, системы неразрушающего контроля конструкций, системы навигации для авиационной и космической техники, системы безопасности транспортных средств и т. д.

Исследования в области МЭМС выполняются в РАН (Институт проблем механики, Институт кристаллографии, Институт автоматики и электрометрии), в научных центрах университетов (МГТУ им. Н. Э. Баумана, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет (Центр микротехнологии и диагностики), Московский авиационно-технологический институт), исследовательский центр суперкомпьютеров и нейрокомпьютеров (г. Таганрог), НПК «Технологический центр» при МИЭТ (г. Зеленоград), в МНТК «Робот»,) и других организациях.

За рубежом данное направление развивают исследователи: prof. Tomas Bifano Boston University Photonics center, Professor Albert P. Pisano University of California Berkeley Mechanical Engineering, Professor Joey Talghader Nanosystems research group, Kenji Uchino International Center for Actuators and Transducers (ICAT) The Pensilvania State University и др.

Среди мировых фирм лидерами в производстве МЭМС являются Analog Devices, Texas Instruments, STMicroelectronics, Freescale Semiconductor.

Основным функциональным элементом в микроэлектромеханических емкостных преобразователях является тонкая диэлектрическая пленка, которая используется для создания рабочего электрического поля и электромеханического преобразования энергии.

Для оценки особенностей емкостных преобразователей, учетом нелинейностей механических и электрических свойств материалов необходимы математические модели, позволяющие исследовать характеристики, как на стадии проектирования, так и в процессе управления рабочими режимами МЭМС.

Перспективным направлением в области создания МЭМС является применение многофункциональных электромеханических преобразователей, обеспечивающих не только перемещение полезной нагрузки системы, но и одновременно выполняющего роль измерительного датчика положения. При этом важной характеристикой электромеханического преобразователя является его энергоэффективность.

Таким образом, актуальными являются разработка новых конструкций энергоэффективных микроэлектромеханических емкостных преобразователей и исследование их характеристик.

Объектом исследования является микроэлектромеханические емкостные преобразователи с пленочными элементами.

Предметом исследования является конструкция микроэлектромеханического емкостного преобразователя и его электромеханические характеристики.

Цель работы состоит в разработке способов улучшения свойств микроэлектромеханических емкостных преобразователей с пленочными элементами.

Для достижения указанной цели необходимо решить **следующие задачи**:

- 1) обозначить основные особенности и тенденции развития микроэлектромеханических систем;
- 2) исследовать пути улучшения технических характеристик емкостных преобразователей;
- 3) рассмотреть возможности изготовления элементов емкостных преобразователей с использованием современных материалов и тонкопленочных технологий;
- 4) разработать математическую модель электромеханических характеристик;
- 5) определить основные рекомендации по проектированию микроэлектромеханических емкостных преобразователей энергии;
- 6) провести экспериментальные исследования и оценить полученные результаты.

Методы исследования. В диссертационной работе применены: математическая теория электромеханического преобразования энергии, численные методы решения дифференциальных уравнений, математическое моделирование и программирование в средах Elcut-5.7, MathCAD-14, Matlab-2008. Проверка результатов теоретических исследований осуществлялась экспериментальными методами.

Достоверность полученных результатов. Обоснованность и достоверность научных выводов и результатов базируется на строгом использовании математического аппарата теории электромеханического преобразования энергии и теории диэлектриков, подтверждается моделированием на основе современных программных продуктов, качественным и количественным соответствием данных теоретических исследований с экспериментальными данными.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Предложена модель электромеханической характеристики емкостного гребневого преобразователя, учитывающая нелинейный характер изменения жесткости упругого элемента его подвижной части.

2. Создана методика оптимизации размеров электродов неподвижной части микроэлектромеханического устройства с катящимся ротором и их взаимного пространственного положения, позволяющая рассчитывать конструкции преобразователей с высокой энергоемкостью.

3. Разработана конструкция емкостного преобразователя с обратимым преобразованием энергии, позволяющая одновременно получить сенсорные и актюаторные свойства микроэлектромеханического устройства.

Практическая ценность работы:

1. Создана компьютерная программа, позволяющая определять энергоемкость микроэлектромеханических преобразователей с учетом изменений геометрических размеров подвижного и неподвижного элементов и параметров применяемых диэлектрических материалов.

2. Разработана компьютерная программа, рассчитывающая оптимальную ширину электродов микроэлектромеханического емкостного преобразователя с катящимся ротором по критерию максимальной силы.

3. Разработана компьютерная программа, обеспечивающая расчет статических характеристик емкостного микроэлектромеханизма с обратимым преобразованием энергии с учетом параметров U-образного электрода.

Реализация результатов работы. Вариант конструкции емкостного преобразователя, выполняющего функции датчика давления, и методика расчета его элементов, позволяющая вычислять давление газообразной среды на основе деформации гибкого элемента преобразователя, используется на предприятии ОАО «Манотомь» (г. Томск) в качестве экспериментального образца. Вариант конструкции микроэлектромеханизма применяется в фирме ООО «НПФ ТДМ» (г. Томск) для оценки уровня вибрации щеточно-коллекторного узла электродвигателя постоянного тока в составе регистрирующей установки. Результаты исследований также используются в учебном процессе подготовки студентов энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического института по направлению «Электроэнергетика и электротехника» по курсу «Теория электромеханического преобразования энергии».

Основные защищаемые положения:

1. Методика оптимизации размеров электродов неподвижной части микроэлектромеханического устройства с катящимся ротором и их взаимного пространственного положения, позволяющая рассчитывать конструкции преобразователей с высокой энергоемкостью.

2. Динамическая модель электромеханической характеристики гребневого емкостного преобразователя с пленочными элементами, учитывающая нелинейный характер изменения жесткости упругого элемента.

3. Конструкция емкостного преобразователя с обратимым преобразованием энергии, позволяющая одновременно получить сенсорные и актюаторные свойства микроэлектромеханического устройства.

4. Рекомендации на основе численных результатов моделирования конструкций, направленные на повышение энергоемкости микроэлектромеханических преобразователей.

5. Компьютерные программы, позволяющие определить энергоемкость микроэлектромеханических преобразователей с учетом геометрических конфигураций подвижного и неподвижного частей и параметров применяемых диэлектрических материалов, рассчитать статические и динамические характери-

стики микроэлектромеханических преобразователей с емкостными пленочными элементами.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы обсуждались на следующих конференциях: X Юбилейной международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии», г. Томск, 2004 – 2009 гг.; VII Русско-корейской конференции KORUS, г. Томск, 2004 г.; Всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации», г. Новосибирск, 2004 – 2006 гг.; VI Международной научно-технической конференции «Измерение. Контроль. Информатизация», г. Барнаул, 2005 г.; V Региональной научно-практической студенческой конференции «Электротехника. Электромеханика. Электротехнологии», г. Томск, 2005 г.; Всероссийской конференции – конкурсе инновационных проектов студентов и аспирантов по приоритетному направлению Программы «Энергетика и энергосбережение», г. Томск, 2006 г.; Международной научно-технической конференции «Электромеханические преобразователи энергии», г. Томск, 2005 – 2009 гг.; V Международной (XVI Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП, г. Санкт-Петербург, 2007 г.; Всероссийской научно-технической конференции «Электроэнергия: от получения и распределения до эффективного использования», г. Томск, 2008 г.; Международной конференции IFOST, Вьетнам, г. Хошимин, 2009.

Публикации. Результаты выполненных исследований отражены в 27 научных работах, в том числе: 4 статьях в изданиях, рекомендуемых ВАК РФ, 1 патенте РФ на полезную модель, 2 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Структура диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения. Общий объем работы составляет 145 страниц, включая 56 рисунков, 10 таблиц, списка литературы из 105 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность проводимой разработки, сформулирована цель диссертационной работы, научная новизна и практическая ценность исследований, приведены основные положения, выносимые на защиту, представлена структура диссертации.

В первой главе проведен анализ области исследований, рассмотрены основные тенденции развития МЭМС, в том числе емкостных преобразователей, обоснованы перспективы применения емкостных преобразователей для изготовления микроэлектромеханических систем. Рассмотрены основные существующие конструкции устройств микросистемной техники, представлены способы преобразования энергии и предложена конструкция емкостного электро-механизма с обратимым преобразованием энергии.

Емкостные преобразователи с пленочными элементами, применяемые в МЭМС, являются основными функциональными элементами благодаря высокой устойчивости к электромагнитным помехам и повышенной энергоемкости по сравнению с индуктивными и пьезоэлектрическими аналогами в области малых размеров (до 100 мкм) и мощностей (до 1 Вт). Свойства тонких пленок (толщиной до 5 мкм), используемых для изготовления пленочных элементов, их однородность, отсутствие дефектов значительно улучшает работу микроэлектромеханических устройств. Для совершенствования конструкций емкостных преобразователей необходимы материалы, как проводников, так и диэлектриков, с повышенными механическими и электрическими свойствами.

В результате анализа области применения МЭМС выяснено, что для увеличения промышленного выпуска микроэлектромеханических преобразователей, в том числе с пленочными элементами, необходимы следующие действия:

- разработка специализированного технологического оборудования для выпуска МЭМС;
- увеличение точности микроприводов технологического оборудования для изготовления тонкопленочных элементов преобразователей;
- разработка устройств тестирования промышленных МЭМС и оборудования, имитирующего механические усилия, например, давление, вибрации корпуса технологического объекта и т.д.;
- создание информационной базы современных конструкционных материалов для производства МЭМС.

Емкостные устройства пленочной электромеханики в области малых мощностей имеют огромные перспективы применения. В емкостных структурах с подвижными диэлектрическими пленками, благодаря малым их толщинам, достижимы более высокие электрические поля, чем в классических емкостных машинах. Поэтому энергоемкость пленочных устройств выше, чем классических емкостных и индуктивных машин и может достигать 10 Дж/кг.

К основным конструкциям емкостных электромеханических преобразователей относятся: 1) преобразователь с воздушным зазором; 2) гребневый преобразователь; 3) преобразователь с катящимся ротором; 4) планарный пленочный преобразователь; 5) микроструктурный нитевидный преобразователь.

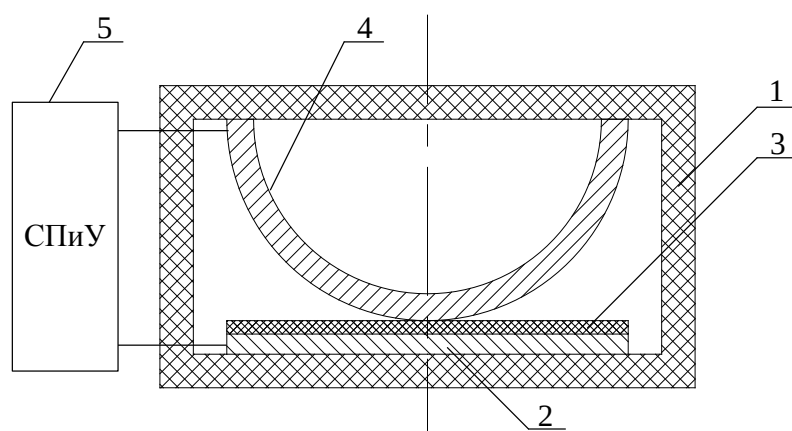


Рис. 1. Конструктивная схема емкостного электро-механизма с обратимым преобразованием энергии (патент РФ на полезную модель №95323)

преобразователь; 3) преобразователь с катящимся ротором; 4) планарный пленочный преобразователь; 5) микроструктурный нитевидный преобразователь.

С целью расширения функциональных возможностей МЭМС за счет совмещения в одном устройстве сенсорных и актюаторных свойств разработана конструкция

емкостного электромеханизма с обратимым преобразованием энергии (рис. 1).

Электромеханизм содержит корпус 1, имеющий форму прямоугольного параллелепипеда, на дне которого закреплена металлическая подложка 2 с тонким слоем диэлектрика 3, обладающий высоким значением относительной диэлектрической проницаемости (например, из керамики на основе титаната бария). Внутри корпуса 1 расположен U-образный электрод 4 в виде изогнутой металлической пластины из упругого материала, обладающего электрической проводимостью (например, из бериллиевой бронзы). Наружная изогнутая поверхность U-образного электрода 4 соприкасается со слоем диэлектрика 3. Прямоугольные поверхности U-образного электрода 4 примыкают к верхней внутренней поверхности корпуса 1 и подключены к системе 5 питания и управления (СПиУ). Металлическая подложка 2 (например, из нержавеющей стали) также подключена к СПиУ. Корпус 1 выполнен из полимерного материала (например, из пластмассы) с определенными диэлектрическими свойствами.

При использовании емкостного электромеханизма в качестве датчика перемещений, верхняя внешняя поверхность корпуса приклеивается к объекту контроля, испытывающего механические колебания, например, к статору электрического двигателя. При работе электрического двигателя возникает силовое механическое воздействие на корпус 1 электромеханизма. За счет деформации корпуса 1 площадь соприкосновения электрода 4 и диэлектрика 3 изменяется, в результате чего изменяется емкость конденсатора, образованного электродом 4, слоем диэлектрика 3 и металлической подложкой 2. Сигнал, соответствующий значению емкости, поступает с измерителя емкости СПиУ 5 на микроконтроллер, который вычисляет вторую производную сигнала емкости по времени, пропорциональную ускорению колебаний корпуса электрического двигателя. Это позволяет судить, например, об уровне вибраций корпуса электрического двигателя для диагностики его механического состояния.

При использовании электромеханизма в режиме двигателя, например, для генерации колебаний кантилевера в системах неразрушающего контроля материалов, верхнюю часть электромеханизма приклеивают на наружную поверхность исследуемого элемента оборудования. С помощью СПиУ 5 между электродом 4 и металлической подложкой 2 прикладывают переменное напряжение прямоугольной формы с частотой до 1 кГц. В результате электрод 4 деформируется под действием электрической силы и приводит в движение корпус 1, который непосредственно связан с кантиливером, передавая ему вибрации. Отраженный сигнал поступает на схему измерения емкости СПиУ 5 и используется далее для последующего анализа.

Таким образом, при определенных условиях эксплуатации, данный преобразователь работает одновременно в двух режимах – микродвигателя и датчика деформации (виброскорости или виброускорения) и может широко использоваться в системах диагностики и контроля механического состояния различных технологических объектов.

Во второй главе приведены характеристики материалов для создания емкостных преобразователей, рассматриваются способы повышения энергоем-

кости, приведенных в первой главе конструкций микроэлектромеханических емкостных преобразователей.

Все три класса материалов – проводники, полупроводники и диэлектрики применяются при изготовлении емкостных преобразователей МЭМС. Большую перспективу при создании емкостных устройств имеют тонкие пленки как металлические, так и диэлектрические, а также созданные на их основе двухслойные структуры (металл – диэлектрик).

В результате исследований предложен следующий перечень способов, которые позволяет увеличить энергоемкость конструкций емкостных преобразователей МЭМС.

- 1) Применение в емкостных преобразователях диэлектриков с высоким значением относительной диэлектрической проницаемости ϵ_r (до 2 млн. о. е. и выше).
- 2) Использование энергоемких жидких и газовых сред в качестве рабочего диэлектрика (дистиллированная вода $\epsilon_r = 80$ о. е., элегаз SF_6 и т. д.).
- 3) Уменьшение рабочего зазора за счет использования современных технологий напыления и химического анизотропного травления.
- 4) Создание градиента ϵ_r за счет переменной пористости диэлектрической пленки и переменной толщины.
- 5) Повышение рабочего напряжения за счет использования материалов с повышенной электрической прочностью.
- 6) Использование температурной зависимости ϵ_r сегнетоэлектриков для увеличения энергоемкости преобразователей.
- 7) Совершенствование и создание метаматериалов с определенными свойствами (примеры – материалы с отрицательными значениями ϵ_r , материалы с отрицательным коэффициентом линейного расширения (кевлар) и т. д.).

В третьей главе разработаны математические модели электромеханических характеристик преобразователей с пленочными элементами. На основании теории электромеханического преобразования энергии для емкостных преобразователей, получены статические и динамические электромеханические характеристики.

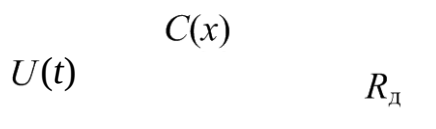


Рис. 2. Схема замещения емкостного преобразователя: $C(x)$ – емкость между подвижными частями преобразователя в функции от обобщенной координаты x , R_d – активное сопротивление диэлектрика

Схема замещения емкостной микромашин в общем случае будет представлять конденсатор с подвижной обкладкой (рис. 2). Процесс электромеханического преобразования энергии в емкостных устройствах будет сопровождаться перезарядом емкости $C(x)$, где x – обобщенная координата, в направлении которой рассматривается изменение емкости системы для данной схемы. При постоянстве разности потенциалов $U(t)$, электрическая сила $F(x)$ в статическом режиме, приложенная к обкладке конденсатора

$$F(x) = \left(\frac{\partial W_3}{\partial x} \right)_{U(t)=U_m \sin \omega t} = \frac{U^2}{2} \frac{\partial C(x)}{\partial x}, \quad (1)$$

где W_3 – энергия электрического поля, сконцентрированная в рабочем зазоре преобразователя; U_m – амплитуда приложенного напряжения; ω – циклическая частота приложенного напряжения; U – действующее значение приложенного напряжения.

При исследовании обобщенной модели емкостного электромеханического преобразователя энергии, представляющего собой конденсатор с подвижной обкладкой, выявлено, что воздушный зазор значительно влияет на его силовые характеристики. При уменьшении рабочего зазора емкость и сила, пропорциональная изменению емкости, значительно возрастают в небольшом диапазоне

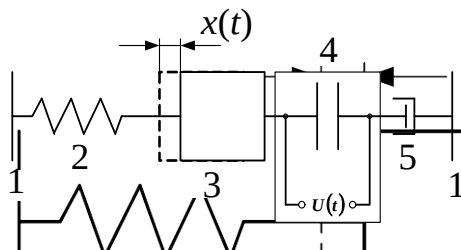


Рис. 3. Структурная схема гребневого преобразователя
1 – неподвижная часть системы;
2 – упругий элемент; 3 – масса;
4 – конденсатор с подвижной обкладкой, 5 – демпфирующий элемент

перемещений, составляющем десятые доли мкм. Однако необходимо учитывать, что величина шероховатостей поверхностей электродов может быть больше рассчитанных зазоров. Поэтому для функциональных элементов микроэлектромеханических систем очень важно обеспечить как можно меньшую шероховатость поверхностей, что осуществимо при помощи тонкопленочных технологий.

Схема преобразования энергии, которая используется при моделировании емкостного гребневого преобразователя, приведена на рис. 3.

Основное уравнение данного электромеханического преобразователя имеет следующий вид:

$$m \frac{d^2 x(t)}{dt^2} = U^2(t) \frac{n \epsilon \epsilon_0 b}{2 \Delta} \dot{v}(t) - k_1(x) x(t), \quad (2)$$

где m – масса ротора, $v(t)$ – скорость перемещения подвижного элемента, n – число пластин подвижного элемента, $k_1(x)$ – жесткость упругого элемента (гибкой подвески), которая нелинейно зависит от перемещения Δ – величина зазора между обкладками в исходном состоянии, b – ширина пластин (размер, перпендикулярный плоскости чертежа), $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная.

В данной модели учитывается экспериментально установленная нелинейная зависимость жесткости упругого элемента $k_1(x)$ от обобщенной координаты $x(t)$. Численное решение уравнения (2) получено при помощи программной среды MathCAD–14. Для сравнения свойств преобразователя данной конструкции приведены динамические характеристики линейной (рис. 4) и нелинейной моделей (рис. 5).

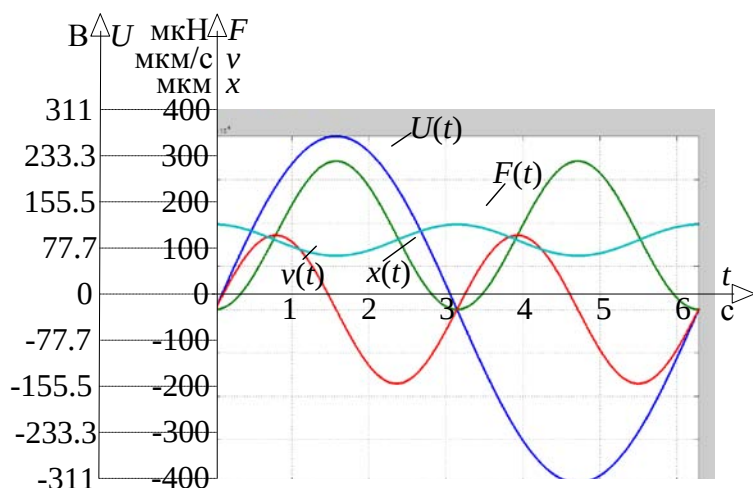


Рис. 4. Динамические характеристики линейной модели гребневого преобразователя

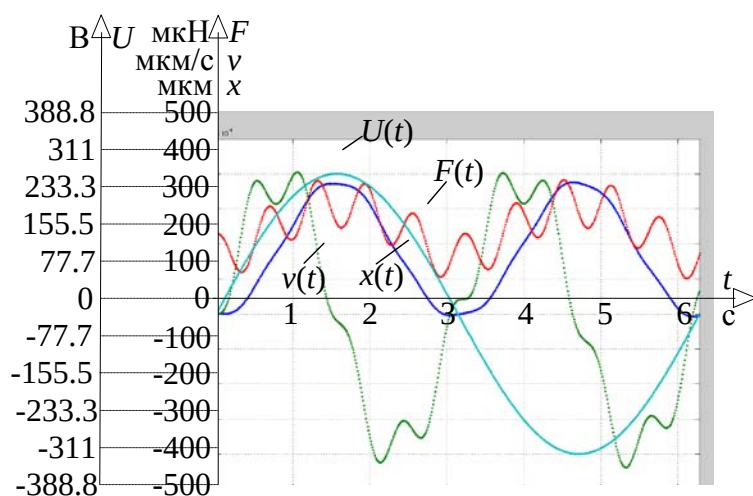


Рис. 5. Динамические характеристики нелинейной модели гребневого преобразователя

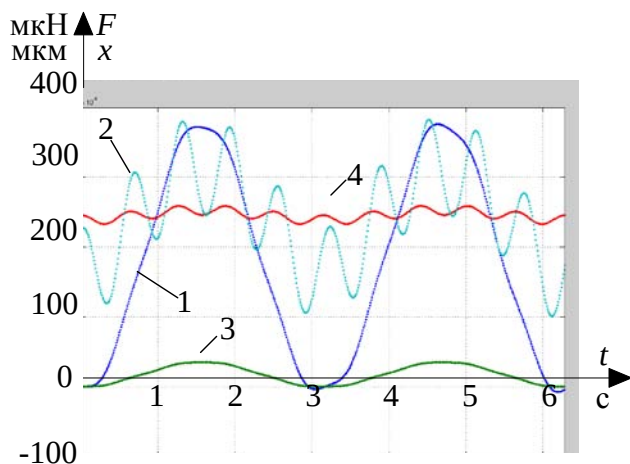


Рис. 6. Сравнение характеристик нелинейных моделей гребневого преобразователя при различных значениях жесткости упругого элемента, 1, 2 – перемещение и сила для $k = 0.01$ Н/м, 3, 4 – перемещение и сила для $k = 0.1$ Н/м

На рис. 4 и 5 отражены зависимости перемещения $x(t)$ ротора микроэлектромеханизма, его скорости перемещения $v(t)$, и приложенной к ротору силы $F(t)$, создаваемой электрическим полем.

Численный эксперимент показал, что в линейной модели при подаче напряжения между подвижным и неподвижным элементами, система совершает колебания с амплитудой 345 мкм, период колебаний которых зависит от жесткости упругого элемента и массы подвижного элемента.

При исследовании нелинейной модели выявлено, что кривая скорости $v(t)$ имеет два характерных пика на временном интервале (рис. 5), равном четверти периода приложенного напряжения. Кроме того, возникают вибрации силы, что приводит к нежелательным колебаниям системы. Нелинейная модель позволяет учесть данный эффект и уменьшить его путем использования соответствующих регуляторов МЭМС и варьирования параметров элементов гребневого преобразователя.

При увеличении жесткости упругого элемента в 10 раз (рис. 6), амплитуда колебаний подвижного элемента уменьшается в обратно пропорциональной зависимости. При этом колебания силы $F(t)$, приложенной к подвижному элементу микроэлектромеханизма, уменьшаются. Таким

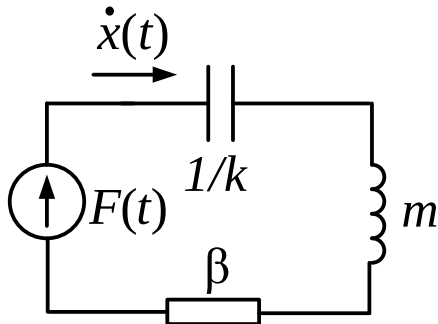


Рис. 7. Эквивалентная схема преобразователя в сенсорном режиме $F(t)$ – внешняя механическая сила, m – пробная масса, k – жесткость упругого элемента, β – коэффициент демпфирования.

В качестве прототипа при моделировании был использован акселерометр фирмы Analog Devices ADXL150, имеющий предел измерений ускорения $50g$, резонансную частоту – 24.7 кГц, максимальное перемещение пробной массы – 0.02 мкм. Его параметры следующие $\beta = 1.004 \cdot 10^{-6} \text{ (м) / с}$, $m = 2.2 \cdot 10^{-10}$, $k = 5.29 \text{ Н / м}$.

Результаты моделирования преобразователя в режиме датчика приведены на рис. 8 и 9.

Аппроксимация дискретных данных численного моделирования для схемы преобразователя (рис. 7) в режиме датчика получена методом наименьших квадратов в программе Excel-2007.

$$t_{\text{пп}}(Q) = 4 \cdot 10^{-9} Q^2 + 4 \cdot 10^{-9} Q + 2 \cdot 10^{-6}, \text{ с}$$

$$\delta(Q) = 3 \cdot 10^{-6} Q^6 + 4 \cdot 10^{-5} Q^5 - 1.75 \cdot 10^{-2} Q^4 + 4.211 \cdot 10^{-1} Q^3 - 5.4303 Q^2 + 36.451 Q - 16.124, \%$$

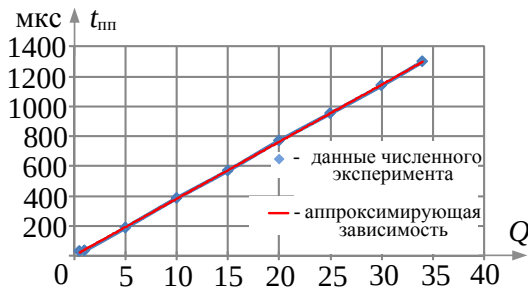


Рис. 8. Время переходного процесса $t_{\text{пп}}$ при варьировании добротности Q

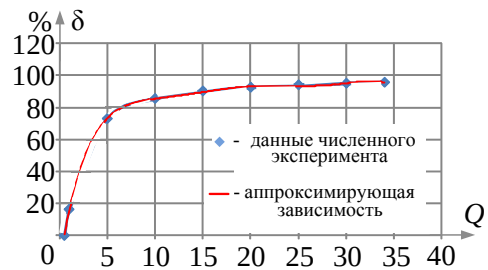


Рис. 9. Перерегулирование δ при варьировании добротности Q

На основании полученных результатов моделирования и сравнения их с данными для акселерометра фирмы Analog Devices ADXL150, показано, что для уменьшения времени переходного процесса, перерегулирования и колеба-

образом, варьированием жесткости можно добиться желаемого вида характеристик системы.

Для моделирования емкостных преобразователей в режиме датчика перемещений используется эквивалентная схема преобразователя, приведенная на рис. 7.

Результирующая передаточная функция емкостного преобразователя в режиме датчика согласно схеме (рис. 7) имеет вид:

$$W(s) = \frac{1/k}{\frac{m}{k}s^2 + \frac{\beta}{k}s + 1}$$

Данная система имеет резонансную частоту $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$ и добротность $Q = \frac{m\omega_0}{\beta}$.

тельности характеристик преобразователя необходимо снижать добротность системы, которая зависит от параметра β . Так, при уменьшении добротности Q с 34 до 0.5, коэффициент демпфирования β изменяется от $1.0042 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Н} \cdot \text{с}}{\text{м}}$ до $68.286 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Н} \cdot \text{с}}{\text{м}}$. При этом, время переходного процесса уменьшается от 1.3 мс до 0.03 мс, перерегулирование - от значения 95.5%, практически, до нуля.

Для моделирования емкостного преобразователя с катящимся элементом используется следующая конструктивная схема (рис. 10). Зависимости силы от обобщенной координаты для данной конструкции преобразователя приведены на рис. 11.

Удельная энергия в рабочем зазоре, образованном воздушным промежутком и диэлектриком, будет определяться выражением:

$$w_3 = W_3 / S \quad (3)$$

где S – площадь внешней поверхности подвижного элемента.

Исследовалось 4 образца преобразователей, которые отличаются относительной ϵ_r диэлектрической проницаемостью.

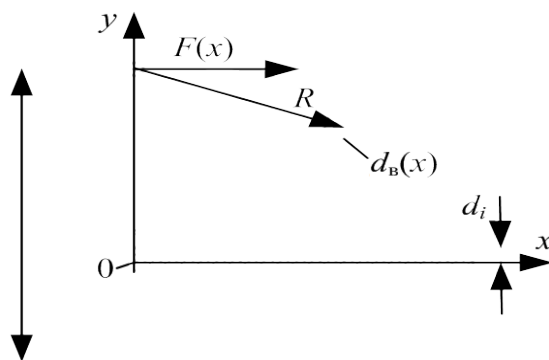


Рис. 10. Модель емкостного преобразователя с катящимся ротором R – радиус кривизны катящегося элемента, d_i – толщина диэлектрической тонкой пленки на поверхности металлической подложки

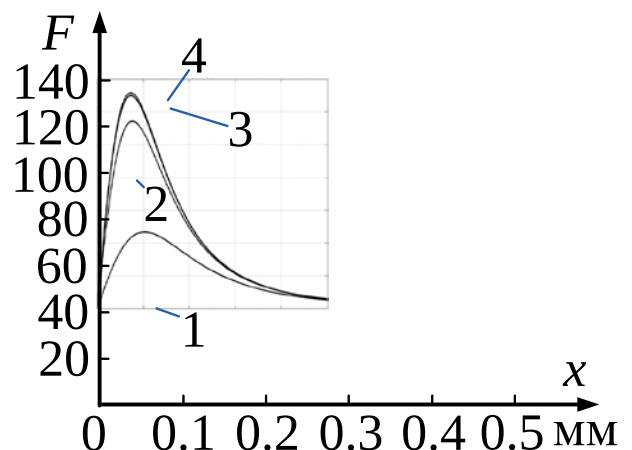


Рис. 11. Зависимости силы от обобщенной координаты для различных диэлектриков: 1 – $\epsilon_r=1$, 2 – $\epsilon_r=10$, 3 – $\epsilon_r=100$, 4 – $\epsilon_r=1000$ при толщине пленки $d_i=10$ мкм.

Анализ показывает, что при повышении ϵ_r электрическая сила, приложенная к подвижному элементу преобразователя, возрастает. Однако данный эффект сохраняется лишь в диапазоне ϵ_r от 1 до 1000. При дальнейшем увеличении ϵ_r зависимости не изменяются (зависимости 3 и 4 практически совпадают). Повышение напряжения питания позволяет получить эффект только до некоторого значения, что связано с явлением пробоя диэлектрика.

Методика выбора оптимальной длины электрода (неподвижный элемент) преобразователя по критерию максимума электромеханической $F(x)$ силы заключается в следующем. На первом этапе производится расчет кривых зависимостей емкости $C(x)$ от обобщенной координаты x перемещения. Далее рассчи-

тываются зависимости силы $F(x)$ от обобщенной координаты. При определенном значении обобщенной координаты x кривая $F(x)$ достигает максимума. Расстояние от начала координат до положения максимума электромеханической силы будет являться эффективной шириной электродов неподвижной части преобразователя. Данное расстояние будет являться также оптимальным расстоянием между электродами, обеспечивающее достаточную электромеханическую силу для эффективного преобразования энергии.

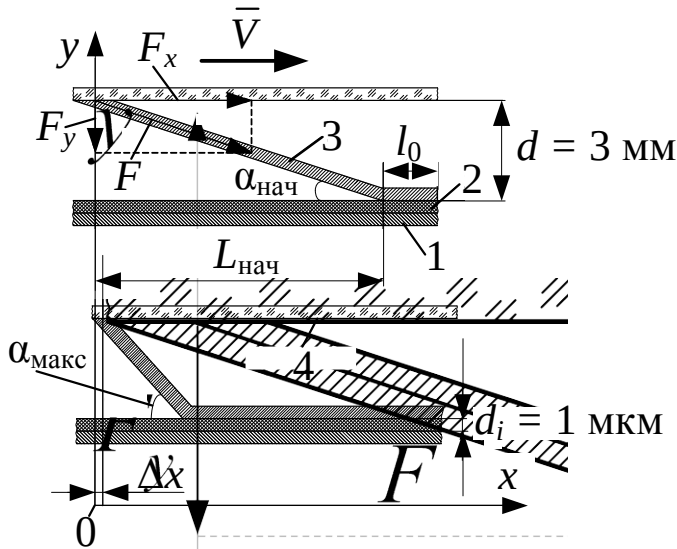


Рис. 12. Модель пленочного емкостного преобразователя

Физическая модель пленочного преобразователя в режиме микродвигателя представлена на рис. 12.

Приняты следующие обозначения: 1 – слой металла, 2 – тонкая сегнетоэлектрическая пленка титаната бария, 3 – металлическая пленка из бериллиевой бронзы, 4 – платформа (направляющие не показаны), $\alpha_{\text{нач}}$, $\alpha_{\text{макс}}$ – начальный и максимальный углы наката, которые определяются параметрами пленки и приложенным напряжением питания, Δx – шаг перемещения платформы 4 двигателя,

$L_{\text{нач}} = L(t)|_{t=0}$, где $L(t)$ – функция, описывающая проекцию на ось x длины пленки, которая не участвует в накате, l_0 – начальная длина наката, $d = 3$ мм – расстояние от поверхности статора до платформы, совершающей микроперемещение.

Работа $A_{\text{н}}$ электростатического наката определяется суммой трех составляющих – кинетической энергии электромеханической системы, работой сил трения направляющих о платформу и энергией деформации металлической пленки A_d :

$$A_{\text{н}} = \frac{m}{2} \left(\frac{dx}{dt} \right)^2 + \int_0^{\Delta x} F_{\text{н}}(x) dx + A_d, \quad (4)$$

где m – масса платформы, $F_{\text{н}}(x)$ – сила нагрузки (в т.ч. трения).

Уравнение (4) является уравнением энергетического баланса.

Электростатическая сила, приводящая в движение платформу 4, будет пропорциональна работе наката

$$F(x, t) = k_0 \frac{CU^2}{2T_{\text{и}} x(t)}, \quad (5)$$

где $k_0 = 0.8$ – коэффициент, учитывающий потерю контакта между пленкой и сегнетоэлектрической поверхностью, $T_n = 20\text{мкс}$ – время импульса приложенного напряжения, C – емкость между слоем металла 1 и металлической пленкой 3 (рис. 12).

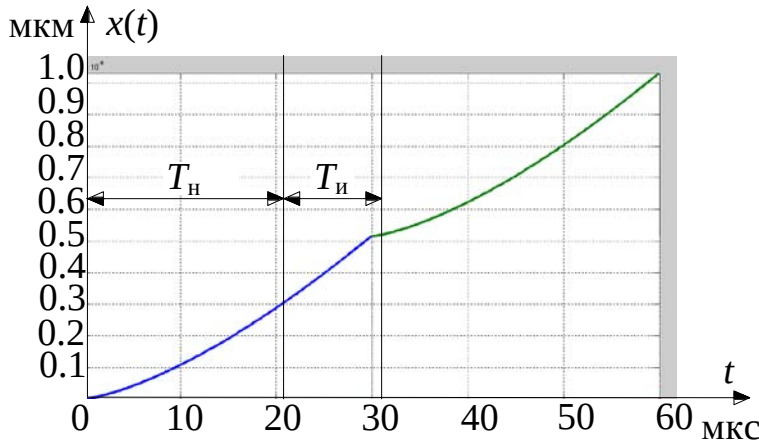


Рис. 13. Зависимость перемещения платформы преобразователя от времени

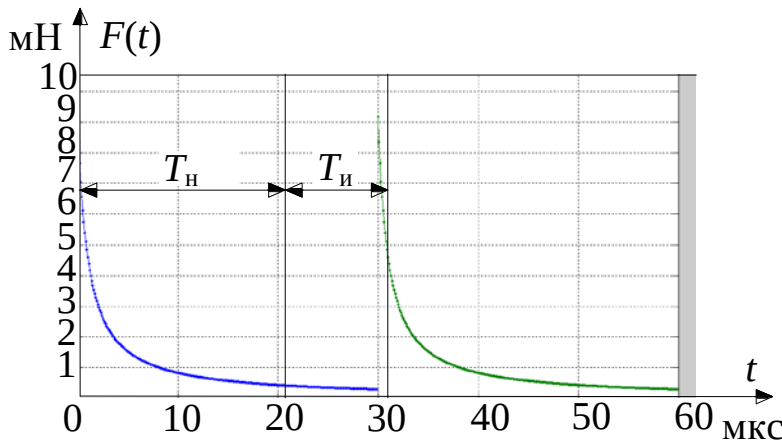


Рис. 14. Зависимость электростатической силы, приложенной к платформе преобразователя от времени

начальный момент действия импульса напряжения (рис. 14). После его окончания платформа будет двигаться по инерции.

Амплитуда импульса приложенного напряжения, поданного от системы питания, определяется электрическими параметрами тонкопленочного диэлектрика (напряжением пробоя) на поверхности статора, время импульса – требуемой точностью перемещения.

Функция зависимости емкости от обобщенной координаты x записывается следующим выражением:

$$C(x) = \frac{\varepsilon_0 S(x)}{d_b(x) + \frac{d_i}{\varepsilon_r}}, \quad (6)$$

где $S(x)$ – функция зависимости площади взаимодействия между U-образным

Численные решения уравнений (4) и (5) дают следующие результаты (рис. 13 и 14). Шаг перемещения платформы зависит от длительности импульса приложенного напряжения (рис. 13). После окончания времени $T_n = 20\text{мкс}$ импульса приложенного напряжения платформа будет двигаться по инерции в течение времени $T_{и} = 10\text{мкс}$. Общий путь перемещения платформы зависит от количества импульсов и ограничивается геометрическими размерами статора преобразователя. Линейная скорость перемещения платформы изменяется и зависит от частоты подачи импульсов. Электростатическая сила $F(x, t)$ (5), приложенная к платформе, будет иметь максимальное значение в

электродом и металлической подложкой, $d_b(x)$ – функция зависимости размера воздушного зазора от обобщенной координаты.

Для моделирования универсального емкостного электромеханизма (рис. 1) с обратимым преобразованием энергии была создана программа расчета, использующая уравнения (1), (6).

Проинтегрировав выражение (6) по координате x с учетом коэффициента кажущегося контакта $k_0 = 0.6$, получаем интегральное значение емкости конденсатора, образованного металлической подложкой 2, U-образным электродом 4, и тонким слоем диэлектрика 3 (рис. 1):

$$C = \epsilon k_0 x \int_0^R dx () , \quad (7)$$

где R – радиус кривизны U-образного электрода.

Вычисление силы, приложенной к U-образному электроду производится по формуле (1).

Блок-схема алгоритма расчета характеристик емкостного электромеханизма с обратимым преобразованием энергии приведена на рис. 15. Результаты моделирования в среде MathCAD-14 представлены на рис. 16.

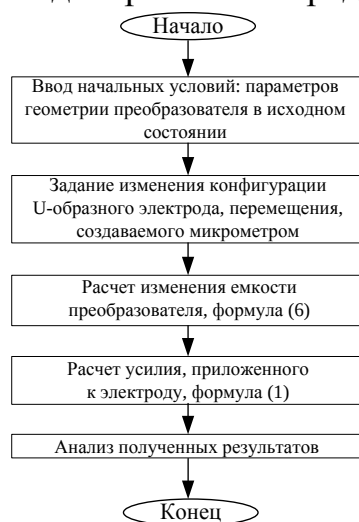


Рис. 15. Алгоритм расчета характеристик электромеханизма

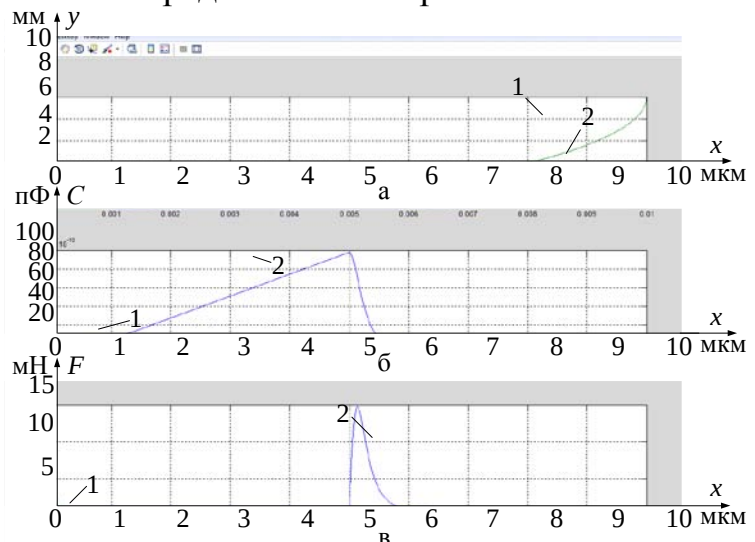


Рис. 16. Характеристики электромеханизма с обратимым преобразованием энергии: а) конфигурация верхнего электрода электромеханизма, б) зависимость емкости, в) зависимость усилия от координаты x . 1 – характеристики электромеханизма до деформации, 2 – после деформации

В результате исследований установлено следующее:

1. На примере конденсатора с подвижной обкладкой показано, что энергоэффективность емкостных преобразователей в режиме микродвигателя имеет нелинейный характер для малых перемещений его подвижного элемента. Величина перемещения подвижного элемента, при котором сила имеет высокоэффективное значение, составляет единицы мкм.

2. Учет нелинейных свойств гребневого преобразователя позволяет выявить и устранить нежелательные вибрации конструкции преобразователя.

3. Разработанная математическая модель универсального преобразователя с обратимым преобразованием энергии позволяет рассчитывать усилия, приложенные к U-образному электроду, что расширяет функциональные возможности преобразователя – одновременное создание усилий и измерение микроперемещений.

В четвертой главе представлены результаты экспериментальных исследований микроэлектромеханического емкостного преобразователя, подтверждена адекватность математической модели преобразователя в режиме датчика.

На рис. 17 изображена измерительная ячейка для снятия характеристик емкостного преобразователя. При помощи микрометра к верхней обкладке преобразователя прикладывалось усилие и вращением винта микрометра совершались линейные перемещения с дискретностью 100 мкм.

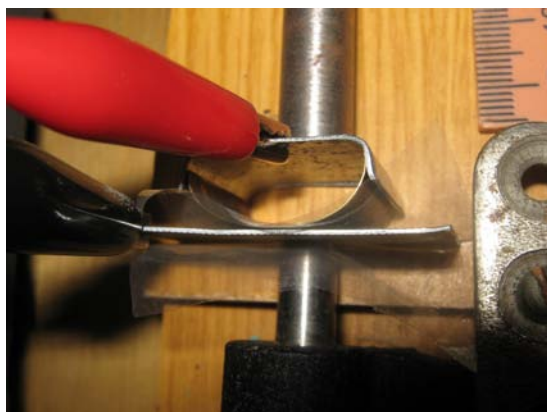


Рис. 17. Измерительная ячейка преобразователя в режиме датчика

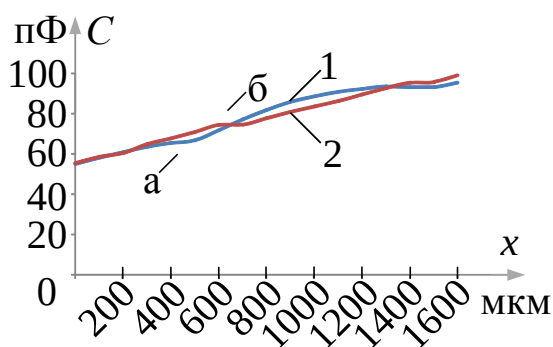


Рис. 18. Данные эксперимента (кривая 1, а – точка излома) и моделирования (кривая 2, б – точка излома)

накапливаются остаточные деформации, влияющие на точность датчика. Установлено, что максимальное отклонение экспериментальной характеристики $C(x)$ от теоретической не превышает 6%.

Изменение емкости между металлической подложкой 2 и U-образным электродом 4 (рис. 1) фиксировалось при помощи R-L-C-метра E7-22 с разрешением 0,1 пФ. Вид экспериментальной и теоретических кривых изменения емкости $C(x)$ приведен на рис. 18.

Следует отметить, что в экспериментальной и теоретической зависимостях $C(x)$ имеются точки излома «а» и «б», соответственно, обусловленные геометрией U-образного электрода преобразователя.

Данная измерительная ячейка позволяет измерять перемещения с точностью до 4 мкм. При этом емкость между металлической подложкой и U-образным электродом линейно зависит от перемещения в диапазоне от 0 до 1600 мкм.

Дальнейшие эксперименты показали, что в гибком элементе

Для проведения эксперимента по испытанию планарной физической модели пленочного емкостного преобразователя была создана установка, схема которой приведена на рис. 19.

Принцип работы данной установки следующий. При подаче напряжения от системы питания 1 через подводящие контакты 2 на подложку 7 и металлическое покрытие пленки 3 происходят микроперемещения груза 5. Одновременно

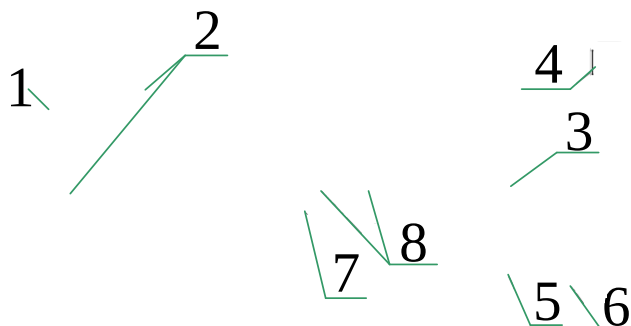


Рис. 19. Схема экспериментальной установки, где 1 – источник питания; 2 – контакты; 3 – пленка с металлизацией; 4 – компьютер; 5 – нагрузка; 6 – датчик перемещения; 7 – подложка; 8 – цилиндры

менно происходит электростатический накат пленки 3 на цилиндры 8. Микроперемещения фиксируются вихретоковым датчиком 6, выходной сигнал с которого передается на компьютер 4.

В результате экспериментальных исследований была снята статическая характеристика преобразователя при постоянной нагрузке в 10 г (рис. 20). Теоретическая зависимость была получена для конструкции преобразователя (рис. 19) в программе Elcut-5.7. Максимальное отличие экспериментальных данных от расчетных значений не превышает 20%. В результате проведения экспериментов выявлена нелинейная зависимость перемещения от напряжения. При напряжении свыше 100 В наблюдались частичные пробои (точка «а» на рис. 20) применяемой тонкой пленки (полиэтилентерефталат), которые приводят к невозможности выполнения преобразователем его функциональных свойств.

В заключении изложены основные результаты исследований, представленных в диссертационной работе.

В приложении приведены акты внедрения результатов исследований в промышленность и учебный процесс, копия патента на полезную модель, листинги программ.

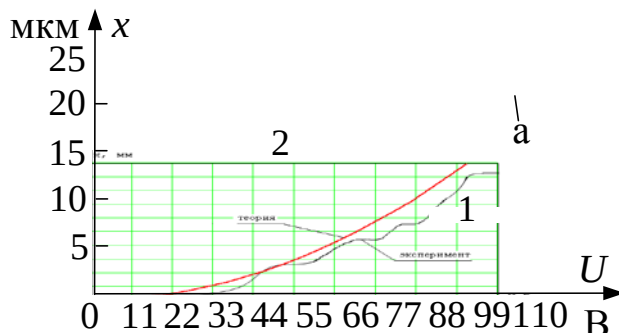


Рис. 20. Сравнение экспериментальной 1 и теоретической 2 статических характеристик, а – явление пробоя

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработана модель механической характеристики емкостного гребневого преобразователя с учетом нелинейной зависимости жесткости упругого элемента его подвижной части от перемещения, позволяющая учитывать связанные с этим особенности для проектирования конструкции. Сходимость вычислительной процедуры обеспечивается корректным выбором начальных условий

и применением процедуры Балирша-Штера для решения системы дифференциальных уравнений 2-го порядка.

2. Исследована модель емкостного преобразователя в режиме датчика перемещений. Показано, что при варьировании параметра добротности Q возможно улучшить показатели качества переходного процесса – время переходного процесса и перерегулирование. Найдены аппроксимирующие зависимости $t_{\text{ин}}(Q)$ и $\delta(Q)$, позволяющие оптимизировать конструкции акселерометров по критерию максимального быстрого действия.

3. Разработана методика оптимизации размеров электродов неподвижной части емкостного преобразователя с катящимся ротором и их взаимного пространственного положения по критерию максимальной силы, приложенной к ротору. На основании методики определен эффективный диапазон изменения относительной диэлектрической проницаемости тонкопленочного диэлектрика для получения конструкций преобразователей с высокой энергоемкостью.

4. На основе уравнения энергетического баланса (4) создана модель пленочного емкостного преобразователя, позволяющая исследовать динамические характеристики – зависимости перемещения и силы, приложенной к платформе от времени. При исследовании полученных характеристик установлено, что при окончании действия импульса напряжения, платформа движется по инерции, что необходимо учитывать при проектировании систем питания и управления данным преобразователем. Преобразователь обеспечивает шаг перемещения 0.515 мкм, максимальное усилие, приводящее платформу в движение, составляет 9.2 мН.

5. Разработана конструкция емкостного преобразователя с обратимым преобразованием энергии, позволяющая одновременно получить сенсорные и актюаторные свойства микроэлектромеханического устройства. На основе экспериментальных исследований подтверждена адекватность модели преобразователя в режиме датчика, максимальная отклонение теоретической зависимости от экспериментальной не превышает 6%.

6. Создана экспериментальная установка планарной физической модели пленочного емкостного преобразователя. Исследована статическая характеристика – зависимость перемещения платформы от приложенного напряжения. Максимальное отклонение экспериментальных данных от теоретических значений не превышает 20%.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

1. Бекишев Р. Ф., Семенова Л. Н., Ляпунов Д. Ю. Емкостные микродвигатели с катящимся ротором // Известия Томского политехнического университета. – 2004. – Т. 307. – № 1. – С. 137–139.
2. Бекишев Р. Ф., Ляпунов Д. Ю. Перспективы создания емкостных высокоэнергоемких микродвигателей // Известия вузов. Электромеханика. – 2006. - №3. – С. 26-30.
3. Бекишев Р. Ф., Ляпунов Д. Ю. Математическое моделирование емкостного пленочного микродвигателя // Известия Томского политехнического университета. – 2006. – Т. 309. – № 1. – С. 157–159.
4. Бекишев Р. Ф., Ляпунов Д. Ю. Преобразование энергии в микроэлектромеханических системах // Известия ВУЗов. Проблемы энергетики. – 2008. – № 9-10/1. – С. 156–161.
5. Ляпунов Д. Ю. Выбор конструкции емкостного микродвигателя // Современная техника и технологии: Материалы X международной научно-практической кон-

- ференции студентов, аспирантов и молодых ученых : в 2 т. – Томск: Изд-во ТПУ, 2004. – Т. 1. – С. 257-258.
6. Danil Yu. Lyapunov The Constructions of the Capacitance Motors // KORUS-2004 : Proceedings of 8th Korea - Russia International Symposium on Science and Technology, – Tomsk: P.H. TPU, 2004. – P. 254-256.
 7. Ляпунов Д. Ю. Моделирование емкостного двигателя // Материалы всероссийской научной конференции молодых ученых в 6 частях. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. – Ч. 1. – С. 105-107.
 8. Danil Yu. Lyapunov, Liliya N. Semenova, Rudolf F. Bekishev Capacity Electro-mechanical Systems [Текст] // Proceedings of the twelfth International Scientific and Practical Conference of Students, Post-graduates and Young Scientists «Modern Techniques and Technologies», – Tomsk: P.H. TPU, 2005. – P. 83-85.
 9. Ляпунов Д. Ю. Применение емкостных устройств для контроля и измерения параметров тонкопленочных структур в микроэлектронике и медицине // Измерение. Контроль. Информатизация: Материалы VI международной научно-технической конференции: Барнаул: Изд-во АГТУ, 2005. – С. 69-74.
 10. Ляпунов Д. Ю. Электропривод с емкостным микродвигателем // Электротехника. Электромеханика. Электротехнологии: Материалы V региональной научно-практической студенческой конференции. – Томск: Изд-во ТПУ, 2005. – С. 113-115.
 11. Бекишев Р. Ф., Ляпунов Д. Ю. Перспективы и проблемы создания емкостных устройств //Оборудование. Регион. – 2005. – № 2(10).–С. 12–14.
 12. Ляпунов Д. Ю. Динамические характеристики пленочного емкостного микро-двигателя // Наука. Технологии. Инновации : Материалы всероссийской научной конференции молодых ученых в 7-ми частях. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. Ч. 7. – С. 181-183.
 13. Danil Yu. Lyapunov, Anna I. Putilova Mathematical Model of the Capacitor Electromechanical Energy Converter // Proceedings of the twelfth International Scientific and Practical Conference of Students, Post-graduates and Young Scientists «Modern Techniques and Technologies», – Tomsk: P.H. TPU, 2006. – P. 20-22.
 14. Ляпунов Д. Ю., Путилова А. И. Разработка микроэлектромеханической системы с тонкопленочными элементами // Труды Всероссийской конференции – конкурса инновационных проектов студентов и аспирантов по приоритетному направлению Программы «Энергетика и энергосбережение». – Томск: Изд-во ТПУ, 2006. – С. 230-233.
 15. Бекишев Р. Ф., Ляпунов Д. Ю., Семенова Л. Н. Моделирование процессов преобразования энергии в емкостном микродвигателе // Электромеханические преобразователи энергии : Материалы международной научно-технической конференции. – Томск: Изд-во ТПУ, 2005. – С. 53-57.
 16. Danil Yu. Lyapunov. Simulation of Thin Film Microelectromechanical System // Proceedings of the thirteenth International Scientific and Practical Conference of Students, Post-graduates and Young Scientists «Modern Techniques and Technologies», – Tomsk: P.H. TPU, 2007. – P. 71-73.
 17. Ляпунов Д. Ю. Многофункциональные емкостные микросистемы // Труды V международной (XVI Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу. - Санкт-Петербург: Изд. «Новэкс», 2007. – С. 209-210.
 18. Бекишев Р. Ф., Ляпунов Д. Ю., Особенности проектирования емкостных мик-

родвигателей // Электромеханические преобразователи энергии : Материалы международной научно-технической конференции. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – С. 87-89.

19. Бекишев Р. Ф., Ляпунов Д. Ю. Анализ энергоэффективности диэлектрических материалов емкостных микроэлектромеханических систем // Электроэнергия: от получения и распределения до эффективного использования: Материалы Всероссийской научно-технической конференции. – Томск: Изд-во ТПУ, 2008. – С. 263-265.

20. Ляпунов Д. Ю. Емкостные элементы микроэлектромеханических структур // Современные техника и технологии: Материалы XIV международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых : в 2 т. – Томск: Изд-во ТПУ, 2008. – Т. 1. – С. 391-392.

21. Danil Yu. Lyapunov. Capacity electromechanical systems // european journal of natural history, №2, 2008/ - P. 86-87.

22. Ляпунов Д. Ю. Современные методы проектирования емкостных микроэлектромеханических систем // Электромеханические преобразователи энергии : Материалы международной научно-технической конференции. – Томск: Изд-во ТПУ, 2009. – С. 150-153.

23. Анненков Ю. М., Бекишев Р. Ф., Ивашутенко А. С., Кабышев А. В., Ляпунов Д. Ю. Емкостные электромеханические преобразователи энергии на основе диоксида циркония // Электромеханические преобразователи энергии : Материалы международной научно-технической конференции. – Томск: Изд-во ТПУ, 2009. – С. 463-468.

24. Danil Yu. Lyapunov. MEMS – Accelerometer for Automotive control and safety // IFOST 2009 // Proceedings of International Conference. – Ho Chi Minh City University of Technology, 2009. – P. 234-235.

25. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2008611928. Программа расчета характеристик емкостного микродвигателя с катящимся ротором; автор: Ляпунов Д. Ю., правообладатель: ГОУ ВПО Томский политехнический университет, заявл. 26.02.2008, зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 18.04.2008.

26. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010613695 Программа расчета характеристик электромеханизма в режиме датчика; автор: Ляпунов Д. Ю., правообладатель: ГОУ ВПО Томский политехнический университет, заявл. 09.04.2010, зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 04.06.2010.

27. Патент на полезную модель 95323, Российская Федерация, МПК В81 В3/00. Электромеханизм [Текст] / Автор Ляпунов Д. Ю., патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Томский политехнический университет». – № 2010108272/22; заявл. 05.03.2010; опубл. 27.06.2010, Бюл. № 18. – 2 с.: ил.

Личный вклад автора. Публикации [5]-[7], [9]-[10], [12], [20]-[22], [24]-[27] выполнены без соавторов. В публикации [1] автору принадлежит обоснование применения высокоэнергоемких материалов в конструкциях микродвигателей с катящимся ротором (30%), в публикациях [2]-[4], [11], [13] – [17], [23] – разработка математических моделей емкостных микродвигателей (50%). В публикации [8] – анализ перспективных конструкций емкостных микродвигателей (50%), в публикации [18] – анализ методов проектирования емкостных микродвигателей, в публикации [19] – разработка программы, позволяющей выбирать наиболее подходящие диэлектрические материалы для изготовления емкостных микродвигателей с катящимся ротором.