

На правах рукописи



Доржиев Виталий Юрьевич

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ LOW-g ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ
МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ГЕНЕРАТОРОВ**

Специальность 05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Драгунов Валерий Павлович

Официальные оппоненты: Косцов Эдуард Геннадьевич,
доктор физико-математических наук,
Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт автоматизации и электротехники
Сибирского отделения Российской академии наук,
заведующий лабораторией тонкопленочных сегнетоэлектрических структур

Нестеренко Тамара Георгиевна,
кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский Томский политехнический университет",
доцент кафедры точного приборостроения

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», г. Зеленоград

Защита состоится 28 декабря 2016 г. в 09.30 в конференц-зале на заседании диссертационного совета Д.212.173.03 в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» по адресу: 630073, г. Новосибирск, проспект Карла Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета и на сайте www.nstu.ru.

Автореферат разослан «___» ноября 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д.212.173.03
канд. техн. наук, доцент



Д.И. Остертак

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Наука и техника за последние два десятилетия сделали большой скачок в области беспроводных технологий. Наблюдается практически повсеместное замещение ими проводных решений. Так, например, большое развитие в области передачи данных получили беспроводные сети — сети радиосвязи. Это объясняется удобством их использования, дешевизной и приемлемой пропускной способностью. Каждый человек сегодня окружен множеством различных беспроводных устройств, таких как смартфоны, ноутбуки и прочие девайсы. Исходя из текущей динамики развития, можно сделать вывод о том, что по количеству и распространенности беспроводные устройства в скором времени превзойдут проводные. В свою очередь, отказ техники от проводов предъявляет новый уровень требований к источникам питания. Для функционирования всех этих устройств необходимы компактные источники питания, обеспечивающие как можно большее время автономной работы, что обуславливает интенсивные исследования в этой области во всем мире.

На сегодняшний день химические источники тока (гальванические элементы и аккумуляторы) являются доминирующими источниками питания для беспроводных устройств. Однако они требуют периодического обслуживания — замены или подзарядки, что не всегда осуществимо. Поэтому активно ведутся исследования, направленные на разработку источников питания, преобразующих энергию окружающей среды в электрическую энергию непосредственно на месте расположения устройства-потребителя.

В окружающем пространстве существует множество различных источников энергии, таких как солнечный свет, перепады температур и механические колебания (вибрации) и т.д. Однако как показывает анализ, наиболее стабильным и распространенным источником являются механические колебания. Причем большинство из них характеризуется низкими ускорениями, порядка g (g — ускорение свободного падения).

Наибольшее развитие получили преобразователи энергии механических колебаний, основанные на трех принципах: электромагнитном, пьезоэлектрическом и электростатическом. Каждый из них имеет свои достоинства и недостатки, однако с учетом необходимости изготовления преобразователей в рамках технологий микроэлектроники при достаточной для практических применений удельной мощности перспективными представляются электростатические преобразователи.

Одной из проблем, стоящих перед разработчиками электростатических микрогенераторов, является их большое энергопотребление. На практике, потребляемая ими мощность часто сравнима с мощностью, вырабатываемой пре-

образователем. Поэтому требуются исследования, направленные на разработку новых электрических схем микрогенераторов, не потребляющих энергию. Также в настоящее время не существует научно обоснованной методики проектирования электростатических преобразователей, а существующие разработки полагаются, в основном, на численное моделирование и методы аналогии. В связи с чем, важным является исследование характеристик преобразователей, построение математических моделей расчета их характеристик и поиск аналитических выражений, позволяющих существенно упростить начальные этапы проектирования, что и определяет актуальность данной работы.

Цель и задачи

Целью диссертационной работы является разработка и исследование электростатических микроэлектромеханических генераторов с изменением межэлектродного зазора, преобразующих энергию механических колебаний с низким ускорением в электрическую энергию.

Для достижения поставленной цели в работе сформулированы следующие задачи:

1. Провести сравнительный анализ существующих конструкций электростатических микроэлектромеханических преобразователей.
2. Провести анализ аналитических методов расчета электрических емкостей и электростатических сил в двухэлектродных конденсаторах с плоскопараллельными электродами с учетом краевых эффектов.
3. Провести анализ допустимых диапазонов перемещения подвижного электрода электростатических МЭМС с изменением межэлектродного зазора.
4. Провести анализ существующих электрических схем микрогенераторов и определить наиболее рациональные области применения каждой из схем.
5. Разработать и изготовить опытные образцы электростатических преобразователей с изменением межэлектродного зазора, исследовать их характеристики.

Научная новизна

1. Определены пределы применимости существующих и предложены новые аналитические выражения для расчета электрической емкости и электростатической силы с учетом краевых эффектов в 2D-приближении.
2. Разработана методика определения допустимого диапазона перемещений подвижного электрода и напряжений МЭМС с изменением межэлектродного зазора при произвольных начальных условиях.
3. Теоретически установлено и экспериментально подтверждено наличие двух механизмов автостабилизации напряжения в микрогенераторе на основе дубликатора Беннета.

4. Показано, что микрогенератор на основе дубликатора Беннета с источником питания в цепи переменного конденсатора обеспечивает подзаряд накопительного конденсатора при любой глубине модуляции емкости.

Практическая значимость

1. Разработаны конструкции и изготовлены опытные образцы электростатических микроэлектромеханических преобразователей, запущено их мелкосерийное производство.

2. Установлена зависимость напряжения на накопительном конденсаторе в микрогенераторе на основе дубликатора Беннета с источником питания в ветви переменного конденсатора от глубины модуляции емкости.

3. Предложена модификация электрической схемы на основе дубликатора Беннета, позволяющая значительно увеличить ток подзаряда источника питания и вырабатываемую мощность без применения дополнительных схем, потребляющих энергию.

4. Предложена методика предварительной оценки параметров преобразователей для последующей их разбраковки и оптимизации.

5. Сформулированы рекомендации по выбору электрической схемы микрогенератора.

6. Обновлено лекционные курсы дисциплины «Микроэлектромеханика».

Положения, выносимые на защиту

1. Результаты экспериментальных и теоретических исследований.

2. Методика определения допустимых диапазонов перемещений подвижного электрода и напряжений первичного источника питания.

3. Методика оптимизации параметров конструкции электростатического МЭМС-преобразователя.

4. Механизмы автостабилизации напряжения в генераторе на основе дубликатора Беннета.

5. Конструкция разработанного преобразователя.

6. Новые электрические схемы микрогенераторов с увеличенным током подзаряда источника питания.

Достоверность результатов обеспечивается строгостью применяемого математического аппарата и подтверждением теоретических выводов положительными результатами апробации и внедрения. Хорошим согласием теоретических и экспериментальных результатов.

Апробация результатов

Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на следующих международных и всероссийских конференциях:

- «Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП–2012)» (2 – 4 октября, 2012, Новосибирск, Россия);
- «Мезоскопические структуры в фундаментальных и прикладных исследованиях (МСФП-2013)» (23 – 29 июня 2013, Бердск, Россия);
- «The 13th International Conference on Micro and Nanotechnology for Power Generation and Energy Conversion Applications» (PowerMEMS 2013) (December 3 – 6, 2013, London, UK);
- «15th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM 2014)» (30 июня – 4 июля, 2014, Алтай, Россия).
- «Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП–2014)» (2 – 4 октября, 2014, Новосибирск, Россия);
- «The 14th International Conference on Micro and Nanotechnology for Power Generation and Energy Conversion Applications (PowerMEMS 2014)» (November 18 – 21, 2014, Awaji Island, Hyogo, JAPAN);
- «1 ежегодная Российская национальная конференция с международным участием по нанотехнологиям, наноматериалам и микросистемной технике (НМСТ–2016)» (26–29 июня 2016, Новосибирск, Россия);
- «Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП–2016)» (3–6 октября, 2016, Новосибирск, Россия);

Публикации результатов исследования. По результатам исследований опубликовано 24 научные работы, из них: 10 статей в изданиях, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК РФ; 9 – в материалах международных и российских конференций; 4 – в других научных изданиях, 1 патент на изобретение.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и приложений. Работа изложена на 184 страницах основного текста, включая 90 рисунков, 6 таблиц и библиографический список из 95 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность диссертационного исследования. Формулируются цель работы и основные задачи, показана научная новизна и практическая значимость полученных результатов. Описана структура и краткое содержание диссертации, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ современного состояния и перспектив разработки микроэлектромеханических генераторов, преобразующих энергию

механических колебаний в электрическую. Проводится анализ потребностей автономных источников энергии. Показано, что наиболее перспективным решением ограниченной энергоемкости применяемых на сегодняшний день автономных источников питания – химических источников тока, является использование источников питания, преобразующих энергию окружающей среды непосредственно на месте расположения устройства-потребителя.

Проведен сравнительный анализ основных источников энергии в окружающей среде (солнечного света, градиентов температур и механических колебаний). Показано, что наиболее стабильным источником энергии при достаточной для практических применений удельной мощности, являются механические колебания.

Представлен принцип работы электростатических генераторов.

Приводится обобщенная архитектура преобразователей энергии окружающей среды (рисунок 1).

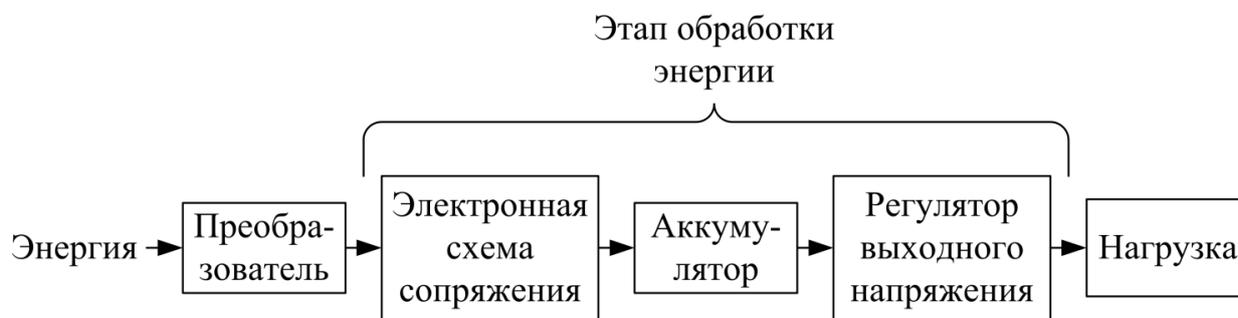


Рисунок 1 – Обобщенная архитектура преобразователя энергии

Проведен анализ наиболее распространенных типов микрогенераторов, преобразующих энергию механических колебаний в электрическую. Обосновываются преимущества электростатических микрогенераторов. Рассматриваются существующие конструкции электростатических преобразователей, выявлены их основные достоинства и недостатки, обосновывается вывод, что наиболее подходящей для отечественных предприятий микроэлектронной промышленности являются преобразователи с изменением межэлектродного зазора.

Проведен обзор литературы по разработке электростатических преобразователей, который показал, что при их проектировании и изготовлении необходимо решать ряд проблем, основными из которых являются отсутствие адекватных моделей, методик проектирования, оценок предельных параметров.

Анализ существующих электрических схем электростатических микрогенераторов показал, что основной проблемой сдерживающей их применение на практике является повышенное энергопотребление.

На основе проведенного анализа литературных данных были сформулированы основные задачи диссертационной работы.

При проектировании электростатических МЭМС возникает необходимость в расчетах емкостей и электростатических сил между различными узлами системы, **во второй главе** проводится анализ электромеханических взаимодействий в электростатическом МЭМС-преобразователе с двумя плоскопараллельными электродами (рисунок 2) в 2D-приближении.

Проанализировано влияние перераспределения зарядов по площади электродов на значения емкостей и электростатических сил. Разработаны алгоритмы и программное обеспечение для расчета распределения зарядов (рисунок 3), емкостей и электростатических сил в МЭМС с учетом краевых эффектов в 2D-приближении.

Представлены результаты экспериментальных исследований зависимости емкости от величины межэлектродного зазора, проведено сравнение экспериментальных и теоретических данных и показано их хорошее согласие.

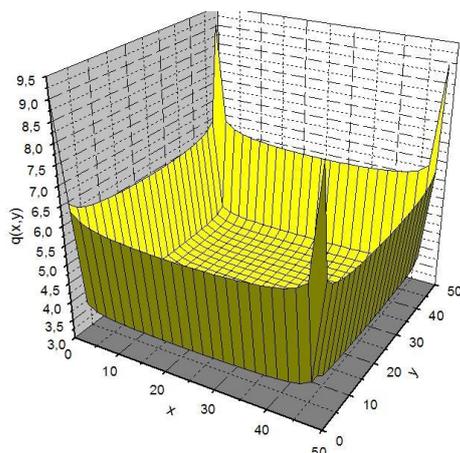


Рисунок 3 – Распределение зарядов по площади электродов

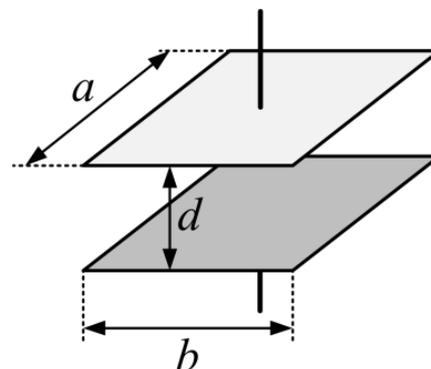


Рисунок 2 – Модель МЭМС

Определяются погрешности и пределы применимости существующих аналитических выражений для расчета электрической емкости и электростатической силы.

Показано, что погрешность расчетов электрической емкости по формуле ИПК при $b/d > 12$ составляет менее 20%, что для оценочных расчетов представляется вполне приемлемым, а при $b/d = 100$ погрешность составляет уже менее 4%.

На основе проведенных расчетов было получено аналитическое выражение, позволяющее рассчитывать зависимость электрической емкости от величины межэлектродного зазора

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon ab}{d} \left[1 + \frac{d}{\pi b} + \frac{d}{\pi b} \ln \left(2\pi \left(\frac{b}{d} + \frac{3b+a}{4a} \right) \right) + \frac{d}{\pi a} + \frac{d}{\pi a} \ln \left(2\pi \left(\frac{a}{d} + \frac{3a+b}{4b} \right) \right) \right]. \quad (1)$$

Показано, что выражение (1) для расчета электрической емкости с учетом краевых эффектов в 2D-приближении позволяет рассчитывать электрическую емкость при $a/b = 1$ в диапазоне $0.4 \leq b/d \leq 10$ с погрешностью не более 5%,

а при $b/d > 10$ она продолжает уменьшаться. В том случае, когда $a \gg b$ при $b/d \geq 0.4$ погрешность составляет уже менее 2%.

Предложены аналитические выражения для расчета электростатической силы в широком диапазоне параметров системы, аппроксимирующие с разной степенью точности соответствующие зависимости в 2D-приближении с учетом краевых эффектов, и позволяющие существенно упростить процесс оптимизации конструкции преобразователя на этапе предварительного проектирования.

Установлено, что погрешность расчетов электростатической силы в приближении ИПК при $b/d = 1$ составляет более 270%, а при $b/d > 43$ и $a/b \geq 20$ уже не более 10%, что вполне приемлемо на этапе предварительного проектирования.

Показано, что значения электростатической силы, полученные с использованием найденного аппроксимационного выражения, отличаются в точке $b/d = 1$ от оценок, полученных в ANSYS, не более чем на 12%.

Приводятся результаты исследования основных характеристик преобразователей и обосновывается выбор окончательного варианта конструкции (рисунок 4).

Описывается методика предварительной оценки параметров конструкции преобразователя для последующей разбраковки и оптимизации. Из анализа экспериментальных данных делается вывод, что конструкция преобразователя с четырьмя z -образными кососимметричными подвесами, закрепленными по внешнему периметру, значительно устойчивее к механическим воздействиям в плоскости подвижного электрода, чем конструкция преобразователя с двумя z -образными кососимметричными подвесами, закрепленными в центре.

В третьей главе приводятся результаты теоретических и экспериментальных исследований (рисунки 5 и 6) одно- и двухконденсаторных электростатических генераторов при силовом возбуждении, проводится сравнительный анализ схем существующих электростатических генераторов, определяются области наиболее рационального применения каждой из схем, предлагаются новые схемы. Показана существенная роль параметров применяемых диодов.

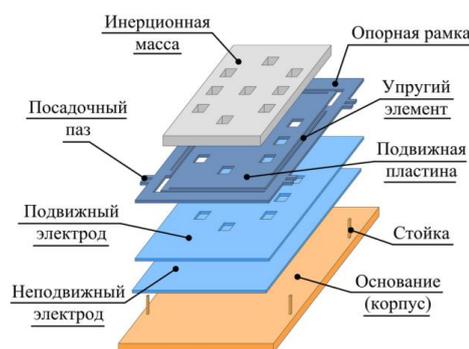


Рисунок 4 – Конструкция преобразователя

Создаются модели, разрабатываются алгоритмы и программное обеспечение для расчета основных характеристик электростатических генераторов с учетом параметров диодов. Проводится сравнение результатов расчета с экспериментом и показано их хорошее совпадение.

Рассчитываются зависимости мощности, выделяемой в цепи нагрузки, от сопротивления нагрузки. Выводятся аналитические выражения, позволяющие оценить оптимальную величину сопротивления нагрузки, при которой мощность, выделяемая в цепи нагрузки, будет максимальна.

Показано, что в генераторах с последовательным включением элементов заряд, запасенный в первичном источнике питания, в среднем остается постоянным, что позволяет значительно увеличить время автономной работы.

Проводится анализ работы микроэлектромеханического генератора на основе одно- и двухконденсаторного дубликатора Беннета. Показано, что при его анализе необходимо учитывать обратные токи диодов.

Получены аналитические выражения, позволяющие оценить средний ток подзаряда источника с учетом обратных токов диодов. Показано, что отключением одного из диодов через некоторое время после начала работы генератора можно существенно увеличить результирующий ток подзаряда первичного источника питания.

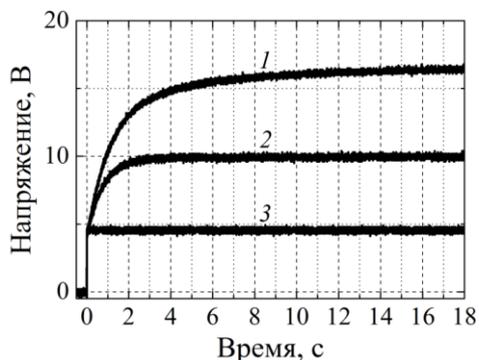


Рисунок 6 – Экспериментальные зависимости напряжения на накопительном конденсаторе от времени в двухконденсаторном генераторе с параллельным включением элементов, полученные с использованием диодов PAD5

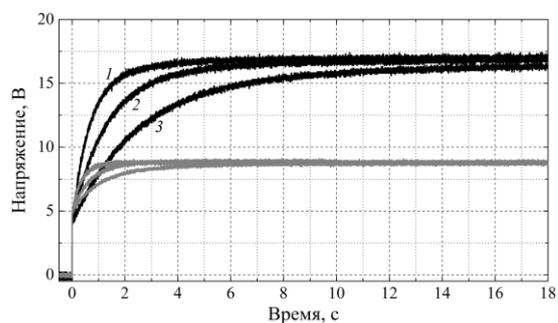


Рисунок 5 – Экспериментальные зависимости напряжения на накопительном конденсаторе от времени в генераторе с параллельным включением элементов и одним переменным конденсатором при различных значениях емкости накопительного конденсатора: 1 – $C_s = 0.5$ нФ, 2 – $C_s = 1$ нФ, 3 – $C_s = 2$ нФ. Черные линии – диоды PAD5, серые линии – диоды 1N4004.

Оцениваются критические значения основных характеристик компонентов генератора, при которых он будет работать в режиме подзаряда.

Предлагается схема генератора с вольтодобавкой, обладающая повышенным током подзаряда и не содержащая ключей, щих применения схем управления (рисунок 7). Проводится ее моделирование. Установлено, что у данной схемы нет схемотехнического ограничения на ток подзаряда. Использование в генераторах на основе дубликатора Беннета вольтодобавки позволяет увеличить ток

заряда первичного источника.

На основании проведенных исследований предлагается классификация генераторов. Показывается, что электростатические генераторы подразделяются на три типа: с уменьшением заряда, с сохранением заряда и с увеличением заряда первичного источника. К первому типу относятся генераторы с параллельным включением элементов, ко второму – с последовательным включением элементов и резистивной обратной связью, к третьему – генераторы на основе дубликатора Беннета.

Показано, что при анализе работы электростатических генераторов для получения количественного согласия расчетов и результатов эксперимента кроме учета паразитных емкостей необходимо учитывать и обратные токи диодов.

Хорошее совпадение результатов моделирования и экспериментов позволяют использовать разработанные модели при проектировании и оптимизации параметров создаваемых генераторов.

Полученные аналитические выражения позволяют значительно сузить диапазон поиска необходимых параметров системы на этапе предварительного проектирования.

В четвертой главе приводятся результаты исследований особенностей работы микроэлектромеханических генераторов при кинематическом возбуждении. Анализируются влияния начальных условий на допустимые диапазоны перемещений подвижного электрода и напряжений первичного источника питания. Приводятся результаты экспериментальных исследований работы изготовленных опытных образцов электростатических микрогенераторов в режиме с кинематическим возбуждением.

Проводится анализ влияния силы веса подвижного электрода на поведение двухэлектродных МЭМС с плоскопараллельной конструкцией электродов с учетом электромеханических взаимодействий в линейном и нелинейном приближениях для возвращающей силы и влияния начальных условий на поведение на поведение двухэлектродных МЭМС с плоскопараллельной конструкцией электродов с учетом электромеханических взаимодействий в линейном и нелинейном для возвращающей силы приближениях.

Обосновывается, что при проектировании преобразователей диапазона low-g необходимо учитывать взаимную ориентацию механических сил и силы тяжести.

Показывается, что в переходном режиме эффект схлопывания может наблюдаться в данных МЭМС и при напряжениях источника питания меньших

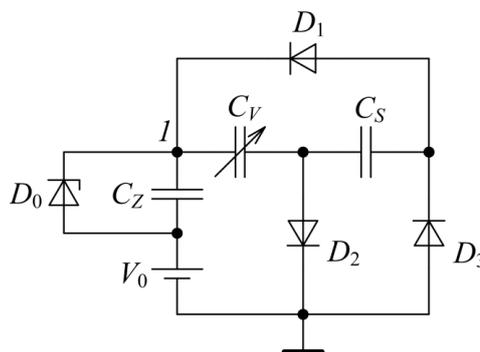


Рисунок 7 – Электрическая схема на основе дубликатора Беннета с повышенным током подзаряда

$V_{0,кр}$, которые определяются из условий статического равновесия. Получены выражения, позволяющие определить область начальных условий (смещений и скоростей) при которых эффект схлопывания электродов еще не проявляется, оценить критическое смещение подвижного электрода и диапазоны настройки емкости.

Показано, что при определении допустимых напряжений первичного источника питания и диапазонов смещения подвижного электрода необходимо учитывать начальные условия и динамические характеристики электростатического преобразователя.

На основе анализа установлено, что у симметричной трехэлектродной системы при одном управляющем напряжении в области положительных смещений для $2\sqrt{3}/9 \leq U_1 \leq 0.5$ появляются критические состояния. В результате максимальный диапазон контролируемых перемещений подвижного электрода при изменении одного напряжения U_1 достигается при $U_2 = 2\sqrt{3}/9$ и может составить примерно $0.56d_0$ (от $z = -1/3$ до $z \approx 0.225$), что в 1.68 раза больше, чем в двухэлектродной системе, где оно составляет лишь $d_0/3$. Настройка емкости конденсатора также будет максимальна при $U_2 = 2\sqrt{3}/9$ и равна ≈ 1.72 , в отличие от двухэлектродной системы, где она не превышает 1.5.

Показано, что у симметричной трехэлектродной МЭМС диапазон управляемого перемещения подвижного электрода можно увеличить, если одновременно изменять оба управляющих напряжения оставляя неизменной их сумму. В этом случае диапазон контролируемого смещения подвижного электрода будет простирается от $-d_0/3$ до $d_0/3$, т.е. составит уже $2d_0/3$ при суммарном напряжении $2\sqrt{3}/9$. При этом диапазон изменения емкости конденсатора C_1 будет простирается от $0.75C_0$ до $1.5C_0$, т.е. составит уже $2C_0$.

Проводится анализ влияния начальных условий на поведение двухэлектродных МЭМС с гребенчатой конструкцией электродов с учетом электромеханических взаимодействий в линейном и нелинейном для возвращающей силы приближениях.

Показано, что в переходном режиме эффект схлопывания может наблюдаться в данных МЭМС и при напряжениях источника питания меньших $V_{0,крит}$, которые определяются из условия статического равновесия.

Получены выражения, позволяющие в линейном и нелинейном для силы упругости приближении определить область начальных условий (смещений и скоростей) при которых эффект схлопывания электродов еще не проявляется.

Установлено, что возможно разбиение сепаратрисы на две односвязные области (рисунок 8), ограничивающие области периодических колебаний, у которых смещение подвижного электрода не меняет знак. Найдено условие разбиения сепаратрисы на две области.

Рассчитаны зависимости достижимой глубины модуляции емкости от приложенного напряжения.

Исследуются особенности работы электростатических генераторов на основе дубликатора Беннета при кинематическом возбуждении.

Показана возможность работы генератора на основе дубликатора Беннета в импульсном режиме. Применение импульсного режима работы микроэлектромеханического генератора с предварительным накоплением энергии позволяет кратковременно развивать мощность порядка нескольких сотен микроватт.

Обнаружен эффект насыщения напряжения в генераторе на основе дубликатора Беннета, вызванный проявлением электромеханических взаимодействий, вызывающий сдвиг резонансной частоты.

Показана возможность работы электростатического генератора на основе дубликатора Беннета с первичным источником питания в цепи переменного конденсатора при любой глубине модуляции емкости.

Обнаружен эффект насыщения напряжения в генераторе на основе дубликатора Беннета не связанный с проявлением электромеханических взаимодействий.

Показано, что в электростатических генераторах на основе дубликатора Беннета могут быть реализованы эти два механизма автостабилизации одновременно.

В целом, полученные аналитические выражения позволяют существенно ускорить этап предварительного проектирования и эффективнее проводить оптимизацию генераторов.

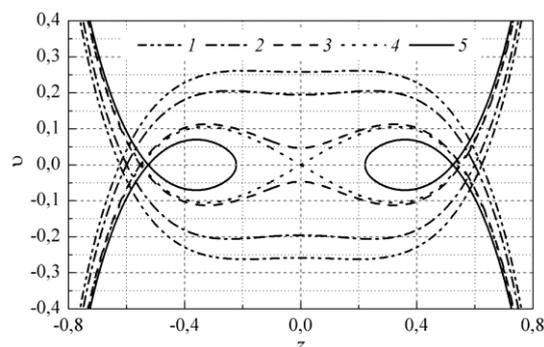


Рисунок 8 – Сепаратрисы для МЭМС с гребенчатыми электродами, рассчитанные при $\beta = 5$ и λ : 1 – 0.275, 2 – 0.287, 3 – 0.305, 4 – 0.3062 и 5 – 0.312

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В результате проделанной работы было получено следующее:

1. Выявлены преимущества и недостатки различных конструкций и схем электростатических микроэлектромеханических генераторов:

- разработаны конструкции и изготовлены образцы микроэлектромеханических электростатических преобразователей;

- проведены исследования основных характеристик преобразователей и обоснован выбор окончательного варианта конструкции;
- показано, что конструкция преобразователя с четырьмя z-образными кососимметричными подвесами, закрепленными по внешнему периметру, значительно устойчивее к механическим воздействиям в плоскости подвижного электрода, чем конструкция преобразователя с двумя z-образными кососимметричными подвесами, закрепленными в центре;
- предложена методика предварительной оценки параметров конструкции преобразователя для последующей разбраковки и оптимизации, позволяющая существенно уменьшить разброс параметров изготовленных преобразователей, связанный с погрешностями технологического процесса изготовления и сборки преобразователей;
- предложена классификация электростатических микроэлектро-механических генераторов.

2. Разработаны алгоритмы и программное обеспечение для расчета электрической емкости и электростатической силы между электродами МЭМС с учетом краевых эффектов в 2D-приближении, позволившие рассчитать зависимости емкости и электростатической силы от величины межэлектродного зазора.

3. Определены погрешности и пределы применимости существующих аналитических выражений для расчета электрической емкости и электростатической силы:

- измерены зависимости емкости от величины межэлектродного зазора, проведено сравнение экспериментальных и теоретических данных и показано их хорошее согласие;
- показано, что погрешность расчетов по формуле ИПК при $b/d > 12$ составляет менее 20%, что для оценочных расчетов представляется вполне приемлемым, а при $b > 100$ погрешность составляет уже менее 4%;
- показано, что погрешность расчетов электростатической силы в приближении ИПК при $b/d = 1$ составляет более 270%, а при $b/d > 43$ и $a/b > 20$ уже не более 10%, что вполне приемлемо на этапе предварительного проектирования.

4. Предложены аналитические выражения для расчета электрической емкости и электростатической силы в широком диапазоне параметров системы, аппроксимирующие с разной степенью точности соответствующие теоретические зависимости в 2D-приближении с учетом краевых эффектов, и позволяющие существенно упростить процесс оптимизации конструкции преобразователя на этапе предварительного проектирования:

- показано, что найденное аналитическое выражение для расчета электрической емкости с учетом краевых эффектов в 2D-приближении позволяет рассчитывать электрическую емкость при $a/b=1$ в диапазоне $0.4 \leq b/d \leq 10$ с погрешностью не превышающей 5%, а при $b/d > 1$ погрешность еще больше уменьшается. В том случае, $a \gg b$ при $b/d > 0.4$ погрешность составляет уже менее 2%;

- установлено, что значения электростатической силы, полученные с использованием найденного аппроксимационного выражения, отличаются в точке $b/d = 1$ от оценок, полученных в ANSYS, не более, чем на 12%.

5. Проведено исследование работы электростатических генераторов при силовом возбуждении:

- построены модели, разработаны алгоритмы и программное обеспечение для расчета основных характеристик электростатических генераторов с одним и двумя переменными конденсаторами при силовом возбуждении. Проведено сравнение результатов расчета с экспериментом и показано их хорошее совпадение;

- получены аналитические выражения позволяющие оценить оптимальную величину сопротивления нагрузки, при которой мощность, выделяемая в цепи нагрузки генератора, будет максимальна;

- обнаружено существенное влияние параметров диодов на характеристики генераторов;

- показано, что применение электростатического генератора с параллельным включением элементов при относительно малых сопротивлениях нагрузки нецелесообразно;

- показано, что при одинаковых номиналах элементов выделяемая мощность у генератора с резистивной обратной связью будет несколько меньше, чем у генератора с параллельным включением элементов. При этом в генераторах с резистивной обратной связью в отличие от генератора с параллельным включением элементов заряд, запасенный в первичном источнике питания, в среднем остается постоянным, что позволяет значительно увеличить время автономной работы.

- проведен анализ работы микроэлектромеханического генератора на основе одно- и двухконденсаторного дубликатора Беннета. Показано, что при анализе необходимо учитывать обратные токи диодов. Получены аналитические выражения, позволяющие оценить средний ток подзаряда источника с учетом обратных токов диодов. Установлено, что отключением диода D_2 через некоторое время после начала работы генератора можно существенно увеличить результирующий ток подзаряда первичного источника питания. Показано, что при работе генератора на основе дубликатора Беннета первичный источник

питания подзаряжается. Оценены критические значения основных характеристик компонентов генератора, при которых он будет работать в режиме подзаряда;

- предложена схема генератора с вольтодобавкой, обладающая повышенным током подзаряда первичного источника и не содержащая ключей, требующих применения схем управления. Проведено ее моделирование и экспериментально показана ее работоспособность. Установлено, что у данной схемы нет схемотехнического ограничения на ток подзаряда.

6. Выявлены особенности функционирования электростатических микроэлектромеханических генераторов с изменением межэлектродного зазора при кинематическом возбуждении:

- проведен анализ влияния силы веса подвижного электрода и начальных условий на поведение двухэлектродных электростатических МЭМС с плоскопараллельной конструкцией электродов с учетом электромеханических взаимодействий в линейном и нелинейном приближениях для возвращающей силы; Установлено, что при проектировании преобразователей диапазона low-g необходимо учитывать взаимную ориентацию механических сил и силы тяжести;

- показано, что в переходном режиме эффект схлопывания может наблюдаться в данных МЭМС и при напряжениях источника питания меньших $V_{0,кр}$, которые определяются из условий статического равновесия;

- получены выражения, позволяющие определить область начальных условий (смещений и скоростей) при которых эффект схлопывания электродов еще не проявляется.

7. Проведен анализ функционирования трехэлектродных МЭМС при воздействии двух управляющих напряжений:

- получены аналитические выражения, позволяющие оценить критическое смещение подвижного электрода и диапазоны настройки емкости;

- установлено, что у симметричной системы при одном управляющем напряжении в области положительных смещений для $2\sqrt{3}/9 \leq U_1 \leq 0.5$ появляются критические состояния. В результате максимальный диапазон контролируемых перемещений подвижного электрода при изменении одного напряжения U_1 достигается при $U_2 = 2\sqrt{3}/9$, что в 1.68 раза больше, чем в двухэлектродной системе, где оно составляет лишь $d_0/3$. Настройка емкости конденсатора также будет

максимальна при $U_2 = 2\sqrt{3}/9$ и равна ≈ 1.72 , в отличие от двухэлектродной системы, где она не превышает 1.5;

- показано, что у симметричной трехэлектродной МЭМС можно увеличить диапазон управляемого перемещения подвижного электрода, если одновременно изменять оба управляющих напряжения оставляя неизменной их сумму. В этом случае диапазон контролируемого смещения подвижного электрода будет простираться от $-d_0/3$ до $d_0/3$, т.е. составит уже $2d_0/3$ при суммарном напряжении $2\sqrt{3}/9$. При этом диапазон изменения емкости конденсатора C_1 будет простираться от $0.75C_0$ до $1.5C_0$, т.е. составит уже $2C_0$.

8. Проведен анализ влияния начальных условий на поведение двухэлектродных МЭМС с гребенчатой конструкцией электродов с учетом электромеханических взаимодействий в линейном и нелинейном для возвращающей силы приближениях:

- показано, что в переходном режиме эффект схлопывания может наблюдаться в данных МЭМС и при напряжениях источника питания меньших $V_{0,крит}$, которые определяются из условия статического равновесия;

- получены выражения, позволяющие в линейном и нелинейном для силы упругости приближении определить область начальных условий (смещений и скоростей) при которых эффект схлопывания электродов еще не проявляется;

- установлено, что при $\beta > 2$ возможно разбиение сепаратрисы на две односвязные области, ограничивающие области периодических колебаний, у которых смещение подвижного электрода не меняет знак. Найдено условие разбиения сепаратрисы на две области.

9. Исследованы особенности работы электростатических генераторов на основе дубликатора Беннета:

- показана возможность работы генератора на основе дубликатора Беннета в импульсном режиме. Установлено, что применение импульсного режима работы микроэлектромеханического генератора с предварительным накоплением энергии позволяет кратковременно развивать мощность порядка нескольких сотен микроватт;

- обнаружено два механизма автостабилизации напряжения в генераторе на основе дубликатора Беннета. Один – связанный с проявлением электромеханических взаимодействий, вызывающих сдвиг резонансной частоты, другой – не связанный с проявлением электромеханических взаимодействий;

- показана возможность работы электростатического генератора на основе дубликатора Беннета с первичным источником питания в цепи переменного конденсатора при любой глубине модуляции емкости.

10. Разработаны и созданы преобразователи механической энергии в электрическую, на которых проведены комплексные исследования и показано хорошее согласие результатов расчета и эксперимента.

11. Создан научно-технический задел, необходимый для научно обоснованного проектирования электростатических микроэлектромеханических преобразователей.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, входящих в Перечень ВАК:

1. Драгунов, В. П. МЭМ рекуператоры без разрыва цепи, содержащей индуктивный элемент [Текст] / В. П. Драгунов, В. Ю. Доржиев // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2011. – № 2. – С. 92–101.

2. Драгунов, В. П. Микроэлектромеханический генератор на основе дубликатора Беннета [Текст] / В. П. Драгунов, В. Ю. Доржиев // Нано- и микросистемная техника. – 2012. – № 11. – С. 39–42.

3. Драгунов, В. П. Анализ влияния pull-in эффекта на параметры трехэлектродных МЭМС [Текст] / В. П. Драгунов, В. Ю. Доржиев // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2013. – № 2. – С. 87–97.

4. Драгунов, В. П. Трехэлектродная двухконденсаторная МЭМС со встроенным зарядом [Текст] / В. П. Драгунов, В. Ю. Доржиев // Нано- и микросистемная техника. – 2014. – № 2. – С. 33–38.

5. Драгунов, В. П. Микроэлектромеханический преобразователь на основе дубликатора Беннета с одним переменным конденсатором [Текст] / В. П. Драгунов, Д. Ю. Галайко, В. Ю. Доржиев, Ф. Бассэ // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2014. – № 2–3. – С. 67–80.

6. Dorzhiev, V. Electret-free micromachined silicon electrostatic vibration energy harvester with the Bennet's doubler as conditioning circuit [Text] / V. Dorzhiev, A. Karami, P. Basset, F. Marty, V. Dragunov, D. Galayko // IEEE Electron Device Letters. – 2015. – Vol. 36. – No. 2. – P. 183–185.

7. Драгунов, В. П. Влияние параметров диодов на работу схемы ЭМГ на основе дубликатора Беннета [Текст] / В. П. Драгунов, В. Ю. Доржиев // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2015. – № 2. – С. 57–68.

8. Драгунов, В. П. Начальные условия и динамический pull-in эффект в МЭМС с изменяющимся межэлектродным зазором [Текст] / В. П. Драгунов, В. Ю. Доржиев // Нано- и микросистемная техника. – 2015. – № 10. – С. 31–41.

9. Драгунов, В. П. Моделирование характеристик одноконденсаторного МЭМС-преобразователя с плоскопараллельными электродами [Текст] / В. П. Драгунов, В. Н. Васюков, В. Ю. Доржиев // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2015. – № 4. – С. 59–70.

10. Драгунов, В. П. Влияние краевых эффектов на функционирование МЭМС [Текст] / В. П. Драгунов, В. Ю. Доржиев // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2016. – № 1. – С. 48–61.

Публикации в изданиях, входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования:

11. Dragunov, V. Electrostatic vibration energy harvester with increased charging current [Text] / V. Dragunov, V. Dorzhiev // Journal of Physics: Conference Series. – 2013. – Vol. 476. – P. 1–5.

12. Dorzhiev, V. MEMS electrostatic vibration energy harvester without switches and inductive elements [Text] / V. Dorzhiev, A. Karami, P. Basset, V. Dragunov, D. Galayko // Journal of Physics: Conference Series. – 2014. – Vol. 557. – P. 1–5.

13. Development and manufacture of electrostatic capacitive energy harvesting device [Text] / I. V. Knyazev, V. Y. Dorzhiev, A. V. Gluhov, A. A. Panova // The 15 international conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices (EDM 2014): proc., Altai, Erlagol, 30 June – 4 July 2014. – Novosibirsk: IEEE, 2014. – P. 51–53.

14. The Effect of Electrodes Non-Parallelism on Micromechanical Capacitors Parameters / V. P. Dragunov, D. I. Loyko, I. V. Knyazev, V. Y. Dorzhiev // 2016 13th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE) – 39281 Proceedings. In 12 vol., Novosibirsk, October 3–6, 2016. – Novosibirsk: IEEE, 2016. – V. 1 – Part 1. – P. 19–23.

Публикации в других научных изданиях:

15. Доржиев, В. Ю. Расчёт емкости МЭМС в 2D-приближении [Текст] / В. Ю. Доржиев, В. П. Драгунов, Д. И. Остертак // Сборник научных трудов НГТУ. – 2010. – №4. – С. 73–80.

16. Доржиев, В. Ю. Расчет емкости при латеральном смещении электродов в 2D-приближении [Текст] / В. Ю. Доржиев, В. П. Драгунов, Д. И. Остертак // Сборник научных трудов НГТУ. – 2010. – №4. – С. 81–86.

17. Драгунов, В. П. Разработка методики проектирования МЭМ генератора с удвоением заряда [Текст] / В. П. Драгунов, В. Ю. Доржиев // Материалы 11 международной конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения». АПЭП–2012, Новосибирск, 2–4 окт., 2012 г.: в 7 т. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2012. – Т. 2. – С. 65–68.

18. Драгунов, В. П. Оптимизация микроэлектромеханического генератора с параллельным включением элементов [Текст] / В. П. Драгунов, В. Ю. Доржиев // Сборник научных трудов Новосибирского государственного технического университета. – 2013. – № 1. – С. 46–51.

19. Драгунов, В. П. Трехэлектродные электростатические НЭМС: оценка параметров [Текст] / В. П. Драгунов, В. Ю. Доржиев // Мезоскопические структуры в фундаментальных и прикладных исследованиях: 2 междунар. конф.: сб.

докл., Бердск, 23–29 июня 2013 г. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2013. – С. 85–90.

20. Доржиев, В. Ю. Сравнительный анализ электростатических одноконденсаторных МЭМП [Текст] / В. Ю. Доржиев // Сборник научных трудов Новосибирского государственного технического университета. – 2013. – № 4. – С. 82–91.

21. Особенности pull-in эффекта в одноконденсаторных МЭМС [Текст] / А. В. Глухов, В. П. Драгунов, В. Ю. Доржиев, И. В. Князев // Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП–2014): тр. 12 междунар. конф., Новосибирск, 2–4 окт. 2014 г.: в 7 т. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2014. – Т. 2. – С. 19–23.

22. Доржиев, В. Ю. Исследование работы электростатического микрогенератора в импульсном режиме [Текст] / В. Ю. Доржиев, И. В. Князев, Д. И. Лойко // 1 ежегодная Российская национальная конференция с международным участием по нанотехнологиям, наноматериалам и микросистемной технике, НМСТ–2016, 26–29 Июня 2016. –Новосибирск: НГТУ, 2016. – Р. 177–180.

23. Влияние непараллельности электродов на характеристики микромеханических конденсаторов [Текст] / В. П. Драгунов, Д. И. Лойко, И. В. Князев, В. Ю. Доржиев // Материалы XIII международной научно-технической конференции "Актуальные проблемы электронного приборостроения" (АПЭП-2016). В 12 т., Новосибирск, 3–6 окт. 2016 г. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. – Т. 2. – С. 19–23.

Патент на изобретение:

24. Электростатический микроэлектромеханический генератор для подзаряда химического источника тока [Текст]: пат. 2528430 С2 Рос. Федерация: МПК H02N 1/00 / Драгунов В. П., Доржиев В. Ю.; заявитель и патентообладатель Новосибирск. гос. техн. унив. – № 2013101854/07; заявл. 15.01.13 ; опубл. 20.09.14, Бюл. № 26. – 5 с.: ил.

Подписано в печать 28.10.2016. Формат 60x80/16

Бумага офсетная. Тираж 100 экз. Печ. л. 1,25

Заказ № 1518

Отпечатано в типографии

Новосибирского государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К.Маркса, 20.