

На правах рукописи

Остертак Дмитрий Иванович

**РАЗРАБОТКА ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ОСНОВ И МЕТОДИКИ
ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ МЭМП
МЕХАНИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ**

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2009

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

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Драгунов Валерий Павлович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор, член корр. РАН
Неизвестный Игорь Георгиевич
(ИФП СО РАН, г. Новосибирск)

доктор технических наук, профессор
Чесноков Владимир Владимирович
(ГОУ ВПО «СГГА», г. Новосибирск)

Ведущая организация: ФГУП НПП «Восток», г. Новосибирск

Защита состоится «24» декабря 2009 г. в 13 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.173.03 при Новосибирском государственном техническом университете по адресу: 630092, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, корпус 4, аудитория 305.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке
Новосибирского государственного технического университета

Автореферат разослан «24» ноября 2009 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета:
д.т.н., профессор

Корнилович А.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Потребность в беспроводных сенсорах и автономных информационно-измерительных системах вызвала проблему разработки и создания автономных источников питания. Несмотря на то, что за последние 15 лет ёмкость химических источников возросла примерно в 3 раза, во многих случаях их присутствие существенно увеличивает размеры устройств и их эксплуатационные расходы. В связи с этим, поиск альтернативных батарей и аккумуляторов источников энергии является в настоящее время предметом исследований во всём мире.

Использование возобновляемых источников питания основанных на извлечении энергии из окружающей среды взамен традиционным батареям и аккумуляторам является наиболее подходящим, этому же способствует непрерывное снижение энергопотребления современных интегральных микросхем. Возможными источниками энергии в этом случае могут являться свет, потоки жидкостей и газов, перепады давления и температуры, радиоактивное излучение и механическая энергия колебаний, смещений, вибраций.

Анализ показывает, что вследствие распространённости и доступности источников механической энергии, наиболее подходящим является использование микроэлектромеханических преобразователей (МЭМП) (или генераторов) механической энергии в электрическую энергию. Особым фактором, способствующим их динамичному развитию, стало появление так называемых микроэлектромеханических систем (МЭМС), особенностью которых является формирование электрических и механических узлов из общего основания (например, кремниевой подложки), причём в результате использования технологии микроэлектроники обеспечивается получение МЭМП (генераторов) с высокими технико-экономическими показателями.

Наибольшее развитие получили три основных направления разработки МЭМП энергии – на основе пьезоэлектрических, электромагнитных и электростатических преобразователей. При этом с учётом необходимости изготовления МЭМП методами технологии микроэлектроники, а также получения достаточной для практических задач удельной мощности наиболее перспективными представляются электростатические (ёмкостные) микрогенераторы.

В настоящее время в ряде лабораторий мира активно занимаются разработкой и исследованием ёмкостных МЭМП энергии. Однако в большинстве случаев такие работы показывают только возможность создания генераторов, ведутся попытки рассчитать и создать конкретные, зачастую экзотические, конструкции преобразователей. Остаётся неясным, чего вообще можно достичь, какая конструкция и когда наиболее оптимальна, не в полной мере ясны достоинства и недостатки различных конструкций МЭМП, отсутствуют методики расчёта и оценки предельных параметров МЭМП.

При проектировании и создании электростатических МЭМП необходимо решать целый комплекс проблем, связанных с выбором конструкции преобразователя и схемы включения компонентов, расчётом его характеристик, проектированием и созданием упругих элементов, технологическими сложностями

изготовления (аспектное отношение, вакуумирование, корпусирование). Однако часть этих проблем возникает, и в достаточной степени решена или активно решается при разработке других видов электростатических МЭМС, таких как микроактюаторы, микродвигатели, акселерометры, гироскопы, переключатели оптических микрозеркал и т.д. Прогресс же в области разработки МЭМП в первую очередь сдерживается отсутствием адекватных моделей, методик проектирования и оценки предельных параметров, что и определяет актуальность данной работы.

Целью данной работы является разработка и совершенствование теоретических основ и математических моделей для расчёта характеристик МЭМП, моделирование зависимостей их свойств от параметров компонентов. Создание методики расчёта и оптимизации электростатических МЭМП, оценка их предельных характеристик.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

- 1) провести анализ и выявить преимущества и недостатки МЭМП различных конструкций и схем включения и их моделей;
- 2) исследовать электростатические взаимодействия в МЭМС, получить аналитические выражения для оценки ёмкостей и электростатических сил;
- 3) построить математические модели, разработать алгоритмическое и программное обеспечение для моделирования характеристик преобразователей с различными способами модуляции ёмкостей и схемами включения компонентов, разработать теоретические основы для аналитического расчёта;
- 4) разработать и создать макеты преобразователей, исследовать их характеристики и провести анализ достоверности теоретических моделей;
- 5) оценить предельные характеристики преобразователей, создать методики расчёта и оптимизации их основных параметров.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. проведены экспериментальные и теоретические исследования основных типов МЭМП, позволившие с единых позиций выявить критические параметры, определяющие работоспособность преобразователя;
2. предложены математические модели, позволяющие с учётом краевых эффектов оценить степень влияния геометрических размеров электродов, межэлектродного зазора и взаимного смещения электродов на электростатические взаимодействия;
3. получены аналитические выражения для оценки ёмкостей и электростатических сил с учётом взаимного смещения электродов и краевых эффектов;
4. разработаны модели преобразователей, учитывающие краевые эффекты и взаимное влияние электрических и упругих сил, позволяющие оценивать основные параметры и проводить оптимизацию характеристик МЭМП.

Практическая значимость работы:

- 1) разработаны и предложены новые варианты МЭМП энергии, позволяющие исключить переключатели, избавиться от необходимости синхронизации фаз работы преобразователя с внешними воздействиями, уменьшить количество

циклов заряда-разряда первичного источника, использовать маломощные источники питания;

2) получены выражения для оценки предельно достижимых параметров МЭМП с учётом взаимного влияния электрических и упругих сил, установлены ограничивающие факторы;

3) на основе полученных аналитических выражений создан комплекс программ, позволяющий сделать обоснованный выбор параметров конструкции и проводить оптимизацию на этапе предварительного проектирования;

4) разработаны и созданы действующие макеты преобразователей.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. преобразователи с последовательной схемой включения компонентов позволяют избавиться от использования переключателей и необходимости синхронизации работы ключей с изменениями направления действия внешней силы;

2. использование двухконденсаторных схем позволяет уменьшить количество циклов разряда-заряда первичного источника, а при использовании двух переменных конденсаторов ещё и увеличить выходную мощность;

3. в преобразователях с параллельным включением компонентов и изменением площади перекрытия электродов энергия, накопленная в конденсаторе к концу цикла преобразования, превысит энергию, позаимствованную от внешнего источника, только если $C_0V_0^2/(2kb^2) < 1/5$, а $F_0/kb > 2/15$. Для получения максимального значения накопленной энергии при максимальном отношении энергии, полученной к концу цикла преобразования, к энергии, позаимствованной от внешнего источника, оптимальными являются значения $C_0V_0^2/(2kb^2)$ в интервале от 0.02 до 0.025;

4. в одноконденсаторных преобразователях с параллельным включением компонентов и изменением межэлектродного зазора основным ограничивающим фактором повышения мощности в МЭМП с параллельным расположением электродов является эффект схлопывания, а с гребенчатым расположением электродов и в двухконденсаторных преобразователях с изменяющимся межэлектродным зазором – условие сохранения системой положительной жёсткости;

5. краевые эффекты существенно уменьшают величину отношения выработанной энергии к полученной от внешнего источника. Для $d/b > 0.5$ это отношение может уменьшиться по сравнению со значением, рассчитанным в рамках модели идеального плоского конденсатора (ИПК), более чем в 5 раз;

6. учёт электростатического взаимодействия в рамках модели ИПК при $d/b > 0.05$ приведёт к погрешности в оценке ёмкости более 10% даже в отсутствии взаимного смещения электродов, а при наличии взаимного смещения электродов погрешность возрастает;

7. учёт краевых эффектов существенно меняет вид зависимости нормальной компоненты электростатической силы от величины межэлектродного зазора при постоянном заряде на обкладках конденсатора. В результате, значения нормальной компоненты нормированной силы в точке $d/b = 1$, рассчитанные с учётом и без учёта краевых эффектов, отличаются более чем на 270%.

Личный вклад автора. В диссертационной работе изложены результаты, которые были получены автором самостоятельно и в соавторстве, при этом автор создал и экспериментально исследовал характеристики всех макетов преобразователей, проводил компьютерное моделирование, осуществлял обработку, анализ и обобщение получаемых результатов. Все приведённые в работе результаты получены лично автором, либо при его непосредственном участии.

Достоверность результатов работы подтверждается многократными экспериментами, воспроизводимостью полученных результатов, использованием математических моделей, адекватных рассматриваемым физическим явлениям, соответствием результатов теории и экспериментальными данными не только опытов автора, но также данными, полученными различными исследователями в ведущих лабораториях мира.

Реализация результатов работы. Полученные в ходе выполнения диссертационной работы результаты нашли следующее практическое применение:

1) В ООО НПП «Триада-ТВ» (г. Новосибирск) в проектно-конструкторской деятельности при разработке радиотехнических устройств и печатных плат;

2) В ООО НПО «ЭКБС» (г. Новосибирск) при разработке автоматизированного стенда для диагностики сбалансированности автомобильных колёсных дисков в виде методики оценки параметров колебаний с помощью емкостных преобразователей;

3) В учебном процессе кафедры полупроводниковых приборов и микроэлектроники Новосибирского государственного технического университета при подготовке специалистов по специальностям 210108 – «Микросистемная техника» и 210104 – «Микроэлектроника и твердотельная электроника».

Работы по теме диссертации проводились при поддержке Аналитической ведомственной целевой программы "Развитие научного потенциала высшей школы (2009–2010 г.)" (проект 2.1.2/2115); в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы по темам «Разработка технологии наноэлектрических и наноэлектромеханических систем и методов их измерений» (шифр заявки «2009-1.5-508-008-010») и «Разработка емкостных микроэлектромеханических преобразователей механической энергии в электрическую» (проект НК-392/16).

Апробация результатов работы. Основные положения и результаты, представленные в диссертационной работе, были доложены и обсуждались на следующих конференциях:

1. X конференция студентов, аспирантов и молодых учёных по физике полупроводниковых, диэлектрических и магнитных материалов, Владивосток, апрель, 2006 г.

2. X российская научная студенческая конференция по физике твёрдого тела, Томск, май, 2006 г.

3. Научная сессия Новосибирского государственного технического университета, факультет Радиотехники и электроники, март, 2009 г.

4. 11-я всероссийская научно-техническая конференция молодых учёных и студентов с международным участием «Современные проблемы радиоэлектро-

ники», Красноярск, май, 2009 г.

5. 4-й Международный форум по стратегическим технологиям IFOST 2009, Хошимин, Вьетнам, октябрь, 2009 г.

6. Международная школа-семинар «Современные проблемы наноэлектроники, микро- и наносистемной техники», Новосибирск, октябрь, 2009 г.

7. 9-я научно-техническая конференция по микросистемной технике, микромеханике и микроэлектронике, Хемниц, Германия, ноябрь, 2009 г.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 16 научных работ, в том числе 11 статей (из которых 4 входят в перечень изданий, рекомендованных ВАК РФ) и 5 работ в материалах научно-технических конференций.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, и списка цитируемой литературы из 140 наименований. Содержание диссертации изложено на 209 страницах и включает 130 рисунков, 121 формулу и 11 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении даётся общая характеристика работы, обоснована актуальность диссертационного исследования. Определены цели и основные задачи работы, показана научная новизна и практическая значимость полученных результатов. Описана структура и краткое содержание диссертации, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведён анализ современного состояния и перспектив разработки микроэлектромеханических преобразователей энергии. Проводится анализ потребностей в автономных источниках энергии. Показано, что использование источников питания извлекающих энергию из окружающей среды является наиболее подходящей альтернативой традиционным батареям и аккумуляторам.

Проведено сравнение основных видов энергии (солнечный свет, электромагнитное излучение, температурные перепады, потоки жидкостей и газов, механическая энергия и энергия, порождаемая в процессе жизнедеятельности человека) с точки зрения перспектив создания преобразователей. Анализ показал, что, наиболее подходящей для преобразования является механическая энергия. Кроме того низкоуровневые механические колебания постоянно присутствуют в окружающей человека среде (в системах вентиляции, окнах, вблизи производственного оборудования, в транспортных системах, бытовых электроприборах и т.д.).

Рассмотрены три основных способа преобразования механической энергии в электрическую, а именно электромагнитный, пьезоэлектрический и электростатический, оценены достоинства и недостатки каждого, обосновываются преимущества электростатических преобразователей.

Представлен принцип работы электростатических генераторов энергии с традиционной схемой включения компонентов, показаны характерные особенности функционирования. Рассмотрены основные виды конструкций преобразователей, отмечены их преимущества и недостатки.

Рассмотрены особенности проектирования упругих элементов и основные

требования, предъявляемые к ним. Представлен вариант технологического маршрута изготовления емкостных микроструктур.

Проведённый обзор литературы по разработке электростатических МЭМП показывает, что при проектировании и создании электростатических МЭМП необходимо решать целый комплекс проблем, связанных с выбором конструкции и схемы включения компонентов, расчётом и моделированием характеристик, проектированием и созданием упругих элементов, разработкой технологического маршрута изготовления. Однако часть этих проблем (создание упругих элементов, технология изготовления) активно решается при разработке и других видов МЭМС, таких как микроактюаторы, микродвигатели, акселерометры, гироскопы, переключатели оптических микрзеркал и т.д. Прогресс же в области разработки МЭМП энергии в первую очередь сдерживается отсутствием адекватных моделей (базирующихся на анализе электромеханических процессов), методик проектирования, а также оценки предельных параметров позволяющих получить набор исходных данных для разработки упругих элементов и технологических маршрутов, что и определяет актуальность данной работы.

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

При проектировании большинства МЭМС возникает необходимость в расчёте ёмкостей и электростатических сил между различными узлами системы, **во второй главе** приводятся результаты теоретических и экспериментальных исследований электростатических взаимодействий в МЭМС с различной конфигурацией электродов.

Проанализировано влияние перераспределения зарядов по площади электродов (рис. 1) на значения ёмкостей и электростатических сил. Разработаны алгоритмы и программное обеспечение для расчёта распределения зарядов (рис. 2), ёмкостей и электростатических сил в МЭМС с учётом краевых эффектов для двух- (рис. 1), трёх- и четырёхэлектродных структур в зависимости от величины межэлектродного зазора d и перекрытия электродов ($b - x$).

Анализ показывает, что в отличие от модели идеального плоского конденсатора (ИПК), при учёте краевых эффектов плотность заряда на краях электродов может более чем на порядок превышать плотность заряда в центре электрода,

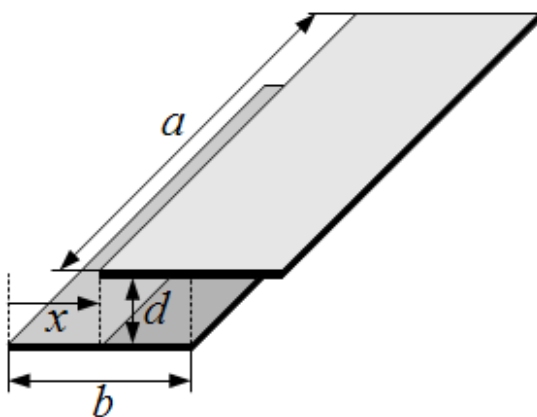


Рис. 1. Двухэлектродная плоскопараллельная структура

причём влияние краевых эффектов возрастает с уменьшением отношения b/d и площади перекрытия электродов. Так для двухэлектродной структуры при $b/d = 100$ и $x/b = 0$ на 94% длины электродов распределение заряда можно принимать неизменным и с погрешностью менее 5% соответствующим модели ИПК, тогда как при $b/d = 20$ заряд можно считать постоянным лишь на 66% длины электродов. В то же время для $x/b = 0.5$ при $b/d = 100$ и $b/d = 20$ это

справедливо только для 88% и 42% длины перекрытия электродов. При $x/b \geq 1$ модель ИПК для расчёта электростатических взаимодействий оказывается вообще неприменимой. Показано, что влияние краевых эффектов уменьшается с увеличением числа электродов.

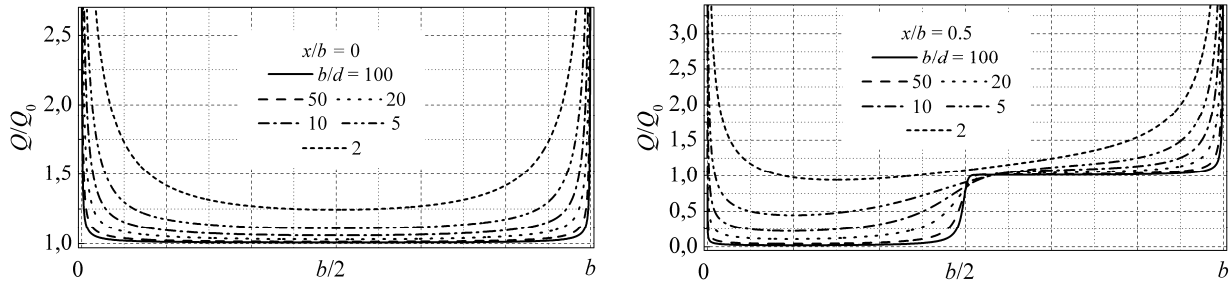


Рис. 2. Распределение зарядов по нижнему электроду (см. рис. 1) при $x/b = 0$ и 0.5.

Q_0 – заряд, рассчитанный в рамках ИПК

Используя результаты расчётов по распределению зарядов были рассчитаны зависимости ёмкости (рис. 3, 4) и электростатических сил (рис. 5) от величины межэлектродного зазора и площади перекрытия электродов. Для оценки адекватности и пределов применимости результатов расчётов было проведено их сопоставление с экспериментальными данными и показано их хорошее совпадение в интервале $0 \leq x/b \leq 1$ и $d/b \leq 1$.

Оценки показывают, что даже в отсутствие смещения лишь для $d/b < 0.02$ и $d/b < 0.05$ значения ёмкостей могут быть найдены по формуле ИПК (без учёта краевых эффектов) с погрешностью менее 5% и 10%, соответственно, а при $d/b = 0.5$ погрешность составит уже около 65%, и для расчёта ёмкости формулу ИПК использовать уже нельзя.

При смещении электродов x влияние краевых эффектов растёт. Так при $x/b = 0.8$ и $d/b = 0.02$ погрешность в оценке значения ёмкости по модели ИПК составит около 35%, а при $d/b = 0.5$ погрешность составит уже около 300%.

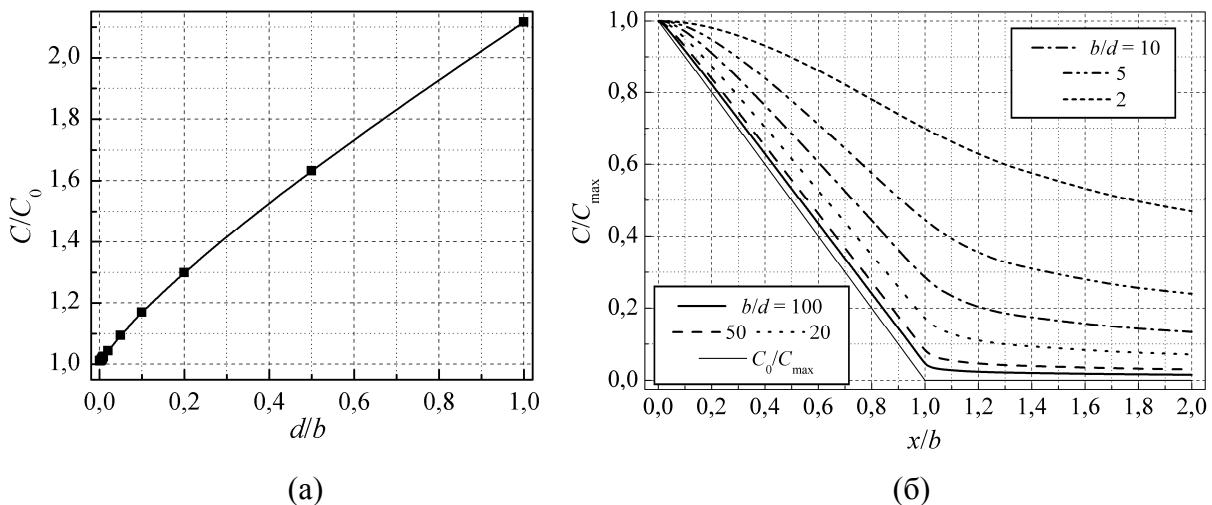


Рис. 3. Зависимости ёмкости от нормированной величины межэлектродного зазора - (а) и относительного смещения электродов - (б) для двухэлектродной МЭМС.

$C_0 = \epsilon_0 \epsilon ab/d$ - расчёт по формуле ИПК

На основании проведённых расчётов было получено аналитическое выра-

жение (1) для расчёта зависимостей ёмкости от величины межэлектродного зазора и площади перекрытия электродов, аппроксимирующее результаты численных расчётов в интервалах $0 < d/b < 1$ и $0 < x/b < 1$ с погрешностью не более 11%.

$$C_{\text{смещ.}} = C_0 \left[1 + \frac{1}{\pi} \frac{d}{b} \left(1 + \ln \left(2\pi \frac{b}{d} \right) \right) \right] \times \left[1 - \theta \left\{ \frac{x}{b} - \frac{d}{b} \left(1 - \exp \left(-\frac{b}{d} \frac{x}{b} \right) \right) \right\} \right], \quad (1)$$

где коэффициент $\theta = 1.0366 - 2.2275 / \left[1 + 2.3467 \times (b/d)^{0.5403} \right]$.

Учёт краевых эффектов сказывается не только на оценках величины ёмкости, но и на электростатической силе.

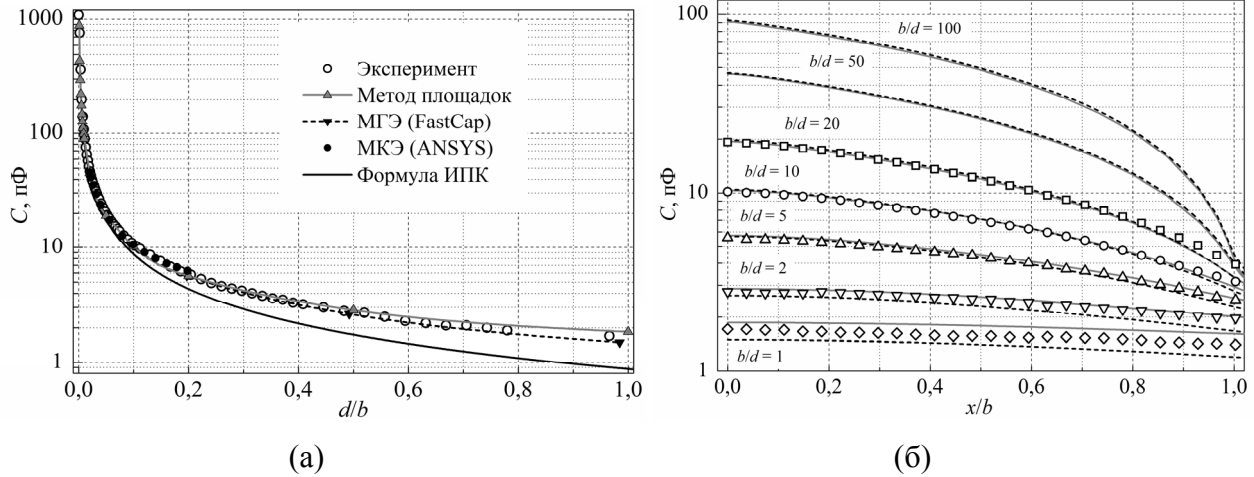


Рис. 4. Зависимости ёмкости от нормированной величины межэлектродного зазора - (а) и относительного смещения электродов - (б) для двухэлектродной МЭМС. ($a = 98.6$ мм, $b = 26.9$ мм и $h = 1.2$ мм). Белые маркеры - экспериментальные результаты, сплошная серая линия - расчёты в рамках метода площадок (МП), чёрная пунктирная линия - расчёты в рамках МГЭ, чёрные маркеры - в рамках МКЭ, сплошная чёрная линия - по формуле ИПК

На рис. 5а приведены зависимости нормальной компоненты электростатической силы от отношения d/b , рассчитанные при постоянном заряде Q на обкладках конденсатора. Значения силы $F_y(Q = \text{const})$ нормировались на значения силы $F_0 = F_y(d/b = 0.001)$. Чёрная сплошная линия - расчёт в рамках модели ИПК; серая сплошная линия - численный расчёт в рамках МП; чёрная пунктирная линия - расчёт с использованием полученной нами формулы

$$F_y(Q = \text{const}) = -\frac{Q^2}{2C_0 d} \frac{1 + d/(\pi b)}{\left[1 + \frac{1}{\pi} \frac{d}{b} \left(1 + \ln \left(2\pi \frac{b}{d} \right) \right) \right]^2}, \quad (2)$$

Видно, что значения электростатической силы, рассчитанные в рамках модели ИПК, существенно отличаются от рассчитанных с использованием МП и выражения (2). В результате, значения нормированной силы в точке $d/b = 1$, рассчитанные в приближении ИПК, отличаются от численно рассчитанных значений более чем на 270%. В то время как значения, полученные с использованием (2), отличаются в точке $d/b = 1$ от оценок, полученных с использованием МП, не более чем на 12%.

Анализ рис. 5б показывает, что по мере увеличения отношения b/d пологая область на зависимости нормированной латеральной силы от относительно-го смещения электродов при постоянном напряжении, характерная для модели ИПК, расширяется, а её наклон уменьшается. В результате, например, при $b/d \geq 100$ изменения латеральной компоненты силы для $0.1 < x/b < 0.98$ не превысят 4%, 3% и 1.5% для двух-, трёх- и четырёхэлектродной структур, соответственно. Также отметим, что для $10 < b/d < 100$ значения нормированной силы F/F_{\max} в точке $x/b = 1$ различаются между собой не более чем на 2%.

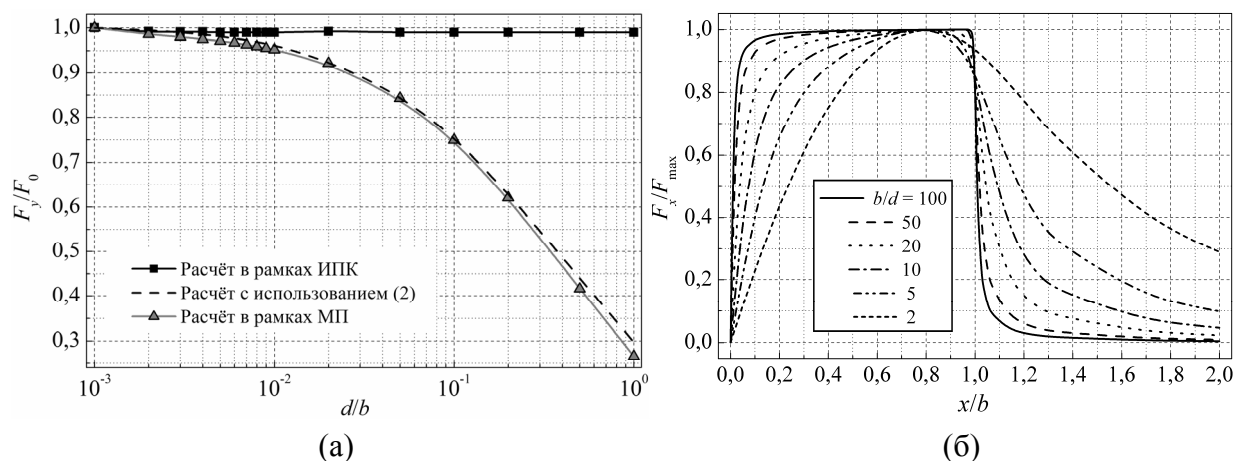


Рис. 5. Зависимости нормальной компоненты электростатической силы от величины межэлектродного зазора при постоянном заряде Q на обкладках конденсатора – (а) и латеральной составляющей электростатической силы от величины относительного смещения электродов при постоянном напряжении V – (б)

Принципиальное отличие зависимостей F_x/F_{\max} , приведённых на рис. 5б, от зависимостей, рассчитанных с использованием модели ИПК, наблюдается при $x/b > 1$, где значение латеральной составляющей силы, найденное в рамках модели ИПК, должно равняться нулю.

На основании проведённых расчётов было получено аналитическое выражение для расчёта зависимостей латеральной составляющей электростатической силы от величины межэлектродного зазора и перекрытия электродов

$$F_x(V = \text{const}) = \text{sgn}(x) \frac{C_0 V^2}{2b} \theta \left[1 + \frac{1}{\pi} \frac{d}{b} \left(1 + \ln \left(2\pi \frac{b}{d} \right) \right) \right] \left[1 - \exp \left(-\frac{b|x|}{d} \right) \right], \quad (3)$$

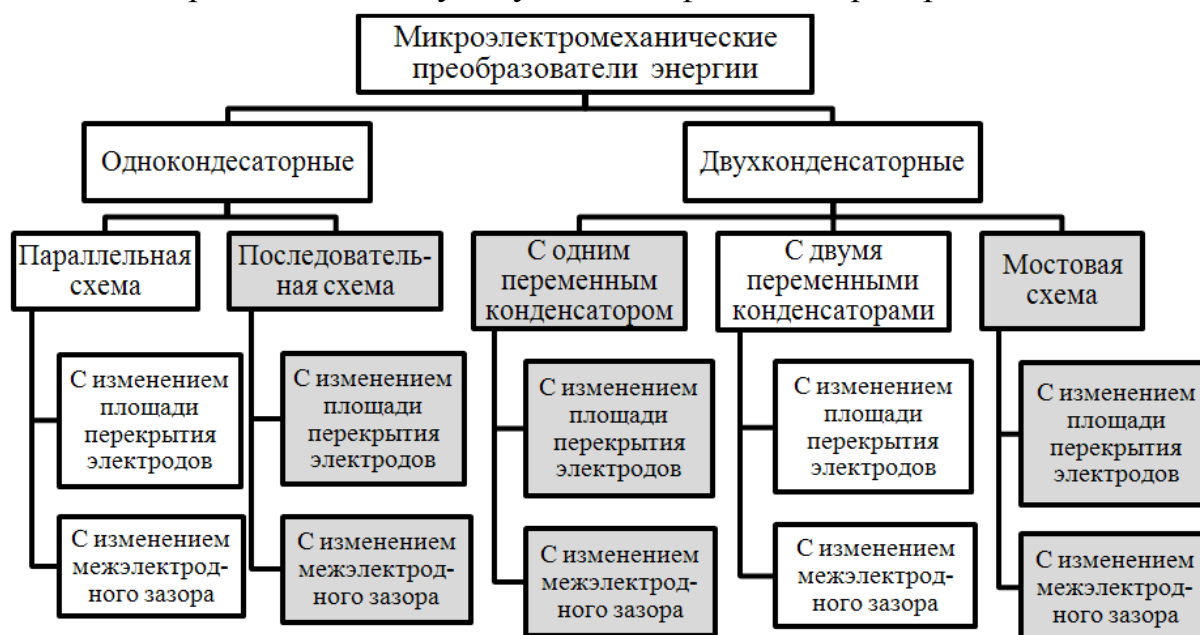
аппроксимирующее результаты численных расчётов в интервале $0.1 < x/b < 0.8$ с погрешностью менее 5%, а в интервале $0.02 < x/b < 0.9$ - менее 10%, что представляется вполне приемлемым для практических применений.

При проектировании МЭМС обычно полагают, что поверхность их электродов идеально ровная. Реальная же поверхность всегда имеет некоторую шероховатость. Если величина этой шероховатости соизмерима с характерными расстояниями в МЭМС (например, с межэлектродным зазором), то она может существенно влиять на электростатические взаимодействия между элементами МЭМС. Для оценки параметров шероховатости поверхности предлагается методика определения параметров, характеризующих морфологию поверхности, с использованием атомно-силовой микроскопии (АСМ).

Оценки показывают, что для величины номинального межэлектродного зазора $d_0 \geq 1$ мкм, отличия между значениями ёмкостей C' и C будут менее 5%, 10% и 20% при $r' \leq 22,46$ и 100 нм, соответственно (C' , C - значения ёмкости с учётом и без учёта шероховатости поверхности, r' - разность между максимальной высотой неровности и высотой средней линии поверхности). Таким образом, при использовании межэлектродных зазоров более 1 мкм и электродов с параметрами шероховатости поверхности $r' \leq 20$ нм, что характерно для современной технологии микроэлектроники, влияние морфологии поверхности на электрическую ёмкость можно не учитывать (погрешность будет менее 5%), а при смене технологии или этапах её отработки, нужно проводить дополнительные исследования (например, АСМ анализ) поверхности элементов МЭМС.

Найденные в главе 2 зависимости силы и ёмкости от межэлектродного зазора и величины перекрытия электродов позволили перейти к исследованию непосредственно преобразователей. Так как вид зависимости электростатической силы от величины взаимного смещения электродов определяется особенностями конкретной конструкции преобразователя, моделирование, расчёт и анализ предельно достижимых характеристик МЭМП энергии далее проводится для каждого типа преобразователя отдельно.

Можно предложить следующую классификацию преобразователей:



На схеме выделены типы преобразователи (с последовательной схемой, двухконденсаторный МЭМП с одним переменным конденсатором и с мостовой схемой включения компонентов), впервые предложенные и исследованные нами.

В третьей главе рассмотрены одноконденсаторные МЭМП. Проанализированы МЭМП с параллельной и последовательной схемами включения компонентов и оценены их предельные параметры и характеристики в рамках базовой модели (без учёта краевых эффектов). Рассмотрены вопросы влияния краевых эффектов и ёмкостной составляющей нагрузки на характеристики преобразователей. Предложен и исследован режим работы без коммутации. Приводятся результаты экспериментальных исследований, и проводится их сопоставление с

результатами моделирования.

Расчёт и сравнительный анализ характеристик одноконденсаторных МЭМП проводился с учётом взаимного влияния электрических и упругих сил. Для этого при моделировании самосогласованно учитывались баланс токов в схеме и баланс сил, действующих на подвижный электрод,

$$m \frac{d^2 r}{dt^2} + B^* \frac{dr}{dt} + kr - F_{эл} = F_0(t), \quad (4)$$

где r – смещение (x или y) подвижного электрода относительно положения равновесия, m – масса подвижного электрода, B^* – коэффициент силы вязкого трения, k – коэффициент упругости подвеса, $F_{эл}$ и $F_0(t)$ – электростатическая и внешняя сила. При этом $F_{эл}$ и баланс токов отражают особенности конкретного преобразователя учитывая взаимное влияние электрических и упругих сил и сопротивление нагрузки R .

Из анализа базовой модели МЭМП с параллельным включением компонентов (рис. 6) и изменяющейся площадью перекрытия установлено, что энергия, накопленная в конденсаторе к концу цикла преобразования, превысит энергию, позаимствованную от внешнего источника, только если $C_0 V_0^2 / (2kb^2) < 1/5$, а $F_0 / kb > 2/15$. Показано, что для получения максимального значения накопленной энергии при максимальном отношении энергии, полученной к концу цикла преобразования, к энергии, позаимствованной от внешнего источника, оптимальными являются значения $C_0 V_0^2 / (2kb^2)$ в интервале от 0.02 до 0.025. Полученные в рамках базовой модели соотношения позволяют существенно сузить диапазон поиска значений параметров преобразователя, удовлетворяющих техническому заданию, а при заданных значениях напряжения источника питания V_0 , внешней силы F_0 и максимального смещения электродов получить исходные данные для расчёта упругого подвеса и переменного конденсатора.

Оценив в рамках базовой модели приемлемые параметры конструкции МЭМП затем необходимо провести коррекцию полученных значений используя более адекватные модели. При этом в первую очередь необходимо учесть краевые эффекты и ёмкостную составляющую нагрузки, которая может появляться либо как паразитная ёмкость (например, ёмкость проводников подключающих нагрузку), либо как накопительная ёмкость. Для уточнения необходимой длительности цикла преобразования и потерь желательно также учесть активные сопротивления цепей заряда и разряда переменного конденсатора. Эти сопротивления обычно учитывают внутреннее сопротивление источника питания V_0 , сопротивления подводящих проводников и переходные сопротивления переключателей Sw .

С учётом краевых эффектов при замкнутом переключателе Sw_1 и разомкнутом Sw_2 поведение данного МЭМП на этапе заряда конденсатора будет описываться системой уравнений

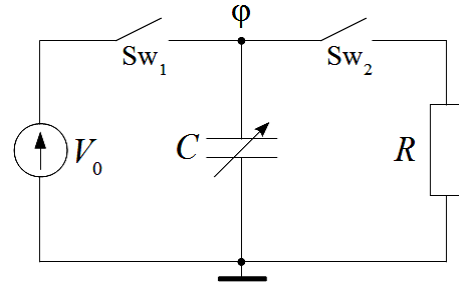


Рис. 6. Электрическая схема МЭМП с параллельным включением компонентов

$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{1}{1 - \frac{\theta}{2} \left[|1+z| - \frac{d}{b} \left(1 - \exp\left(-|1+z|\frac{b}{d}\right) \right) \right]} \left[\frac{V_0 - \varphi}{R_1 C_{\text{Пальм.}}} + \text{sgn}(1+z) \varphi \frac{\theta}{2} \left(1 - \exp\left(-|1+z|\frac{b}{d}\right) \right) \frac{dz}{dt} \right], \quad (5)$$

$$\frac{d^2 z}{dt^2} + \frac{B^*}{m} \frac{dz}{dt} + \frac{k}{m} z + \frac{C_{\text{Пальм.}}}{2mb^2} \varphi^2 \frac{\theta}{2} \text{sgn}(1+z) \left[1 - \exp\left(-|1+z|\frac{b}{d}\right) \right] - \frac{F_0}{mb} = 0, \quad (6)$$

с начальными условиями $\varphi(0) = 0$, $z(0) = 0$ и $dz/dt|_{t=0} = 0$, где $C_{\text{Пальм.}} = C_0 \left[1 + (d/\pi b) (1 + \ln(2\pi b/d)) \right]$.

В свою очередь при двух разомкнутых переключателях Sw_1 и Sw_2 уравнение (5) примет вид

$$\frac{d\varphi}{dt} = \text{sgn}(1+z) \varphi \frac{\theta}{2} \frac{1 - \exp\left(-|1+z|\frac{b}{d}\right)}{1 - \frac{\theta}{2} \left[|1+z| - \frac{d}{b} \left(1 - \exp\left(-|1+z|\frac{b}{d}\right) \right) \right]} \frac{dz}{dt}, \quad (7)$$

а при разомкнутом Sw_1 и замкнутом Sw_2 вместо (5) имеем

$$\tau_1 \frac{d^2 \varphi}{dt^2} + \left(1 + \frac{C}{C_{\text{H}}} + R_2 \frac{dC}{dt} + \frac{\tau_1}{\tau_{\text{H}}} \right) \frac{d\varphi}{dt} + \left(\frac{1}{\tau_{\text{H}}} + R_2 \frac{d^2 C}{dt^2} + \frac{R_2}{\tau_{\text{H}}} \frac{dC}{dt} + \frac{1}{C_{\text{H}}} \frac{dC}{dt} \right) \varphi = 0,$$

где $\tau_1 = R_2 C$, $\tau_{\text{H}} = R_{\text{H}} C_{\text{H}}$.

Начальными условиями во втором случае являются значения φ , z и dz/dt , найденные при решении системы (5), (6), а в третьем – соответствующие значения, найденные при решении (7) и (6).

Анализ показывает, что учёт краевых эффектов может существенно изменить напряжение, устанавливающееся на переменном конденсаторе к моменту подключения нагрузки, т.е. при достижении C_{min} , а также, что соотношение η между энергией U_2 , накопленной в конденсаторе к концу цикла преобразования, и энергией U_1 , переданной в систему от внешнего источника, определяется не только величинами отношений $C_0 V_0^2 / (2kb^2) = -z_1$ и $F_0 / kb = z_1 - z_2$, но и отношением ширины электрода b к межэлектродному зазору d . При этом с уменьшением отношения b/d величина η уменьшается, что связано с уменьшением глубины модуляции ёмкости. С уменьшением b/d также сужается диапазон допустимых значений z_1 и z_2 , при которых энергия U_2 будет больше U_1 . При значениях $b/d \geq 100$ роль краевых эффектов существенно ослабляется, и глубина модуляции ёмкости приближается к теоретически предельно достижимой.

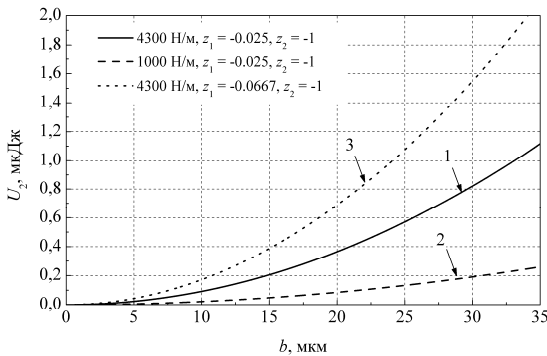


Рис. 7. Зависимость энергии U_2 от ширины электрода b

На рис. 7 показана зависимость энергии U_2 от ширины электрода b , рассчитанная при оптимальных значениях

$z_1 = -0.025$, $z_2 = -1$ и двух значениях коэффициента восстанавливающей силы $k = 4300$ Н/м и 1000 Н/м (кривые 1 и 2, соответственно). На этом же рисунке приведена соответствующая зависимость, рассчитанная при $z_1 = -0.0667$, $z_2 = -1$ и $k = 4300$ Н/м (кривая 3). Видно, что во втором случае (кривая 3) энергия U_2 , накопленная в конденсаторе к концу цикла преобразования, будет почти в два раза превышать энергию U_2 , накопленную в первом случае (кривая 1). Однако при этом в первом случае эта энергия будет в 2.1 раза превышать энергию $2U_1$, позаимствованную от внешнего источника на этапе заряда конденсатора, а во втором – лишь в 1.5 раза. Таким образом, выигрывая в величине вырабатываемой энергии, мы проигрываем в отношении вырабатываемой энергии к потребляемой от внешнего источника.

При расчёте энергии передаваемой в нагрузку необходимо учесть ёмкостную составляющую нагрузки C_H и активные сопротивления цепей заряда и разряда переменного конденсатора. В случае небольших значений z_1 (а именно такие значения представляют интерес для получения максимальных η) выражение для расчёта выходного напряжения V_H с учётом C_H принимает вид

$$V_H = V_0 \frac{C_{\max}}{C_{\min} + C_H} \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_3}\right)\right], \quad (8)$$

где $\tau_2 = R_H(C_{\min} + C_H)$, $\tau_3 = R_2 C_{\min} C_H / (C_{\min} + C_H)$, C_{\max} и C_{\min} максимальное и минимальное значения ёмкости переменного конденсатора, соответственно, а R_2 - сопротивление цепи разряда переменного конденсатора. Анализ показывает, что наличие C_H уменьшает энергию, передаваемую в нагрузку в $(C_{\min} + C_H)/C_{\min}$ раз, что при проектировании существенно ограничивает выбор значения C_{\min} .

На рис. 8 представлены зависимости выходного напряжения преобразователей от времени, рассчитанные с использованием (8), точками показаны соответствующие экспериментальные кривые, полученные на макете преобразователя. Видно, что экспериментальные и теоретические зависимости хорошо совпадают, что подтверждает адекватность модели, используемой в расчётах.

Анализ показал, что в отличие от преобразователя с изменяющейся площадью перекрытия электродов, в преобразователях с изменением межэлектродного зазора основными ограничивающими факторами повышения мощности в МЭМП с параллельным расположением электродов является эффект схлопывания, а в МЭМП с гребенчатым расположением электродов – условие сохра-

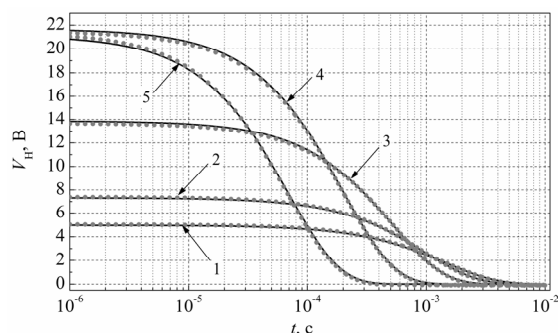


Рис. 8. Зависимости выходного напряжения преобразователей от времени. Точки – эксперимент, сплошные линии – расчёт по (8). Цифры у кривых соответствуют номеру эксперимента в табл. 1

Таблица 1.

№ эксперимента	V_0 , В	C_{\min} , пФ	C_{\max} , пФ
1	5	932	932
2	5	630	932
3	5	328	932
4	3	121	932
5	1	37	932

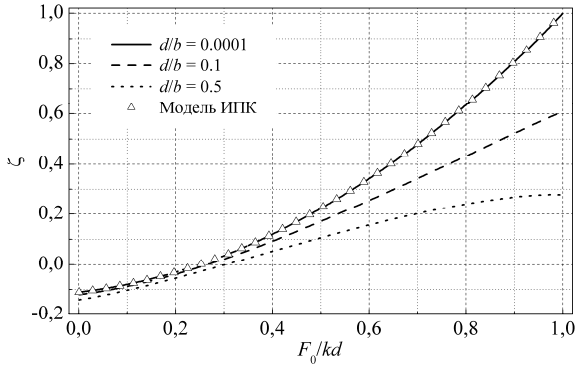


Рис. 9. Зависимость параметра ζ от нормированного значения внешней силы. Линии – расчёт с учётом краевых эффектов, треугольники – без учёта краевых эффектов

не должен превышать значения $\delta d \sqrt{2kC_0}$, в результате максимальная энергия, накопленная в конденсаторе к концу цикла, не превысит $\delta^2 kd^2 / 2$, а максимальное напряжение – значения $\delta \sqrt{kd^2 / 2C_0}$, где $\delta < 1$ – коэффициент запаса жёсткости.

Анализ показывает, что при учёте краевых эффектов величина накопленной энергии U_2 зависит не только от величины приведенной силы F_0/kd , но и от отношения d/b . Кроме того при учёте краевых эффектов максимально достижимая величина параметра $\zeta = U_2(U_2/2U_1 - 1) / kd^2$, характеризующего превышение выработанной энергии по отношению к полученной от внешнего источника, при увеличении отношения d/b существенно уменьшается. Так для $d/b > 0.5$ максимально достижимое значение ζ может уменьшиться более чем в 5 раз (рис. 9). В результате, если в модели, основанной на концепции ИПК, не имело смысла использование данного преобразователя при $F_0/kd \leq 1/4$, то с учётом краевых эффектов это значение может возрасти до $1/3$, что необходимо учитывать при проектировании.

К наиболее характерным недостаткам преобразователя с одним переменным конденсатором и параллельным включением компонентов можно отнести необходимость использования двух переключателей и восстановления заряда конденсатора C в каждом цикле преобразования. Необходима также синхронизация работы ключей Sw_1 и Sw_2 с изменениями направления действия внешней силы.

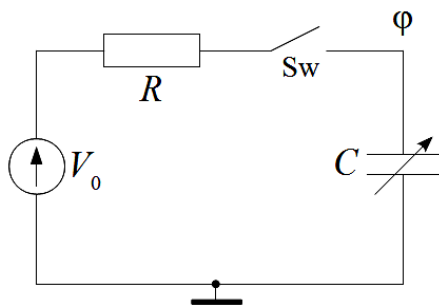


Рис. 10. Электрическая схема МЭМП с последовательным включением компонентов

нения системой положительной жёсткости.

Показано, что в МЭМП с параллельным расположением электродов: максимальный заряд на обкладках переменного конденсатора не должен превышать значения $d \sqrt{2kC_0(1 - F_0/kd)}/3$. При этом максимальная энергия, накопленная в конденсаторе к концу цикла преобразования, не превысит значения $0.25kd^2$, а максимальное напряжение – значения $\sqrt{16kd^2/27C_0}$.

В МЭМП с гребенчатым расположением электродов: максимальный заряд не дол-

Влияние указанных недостатков можно частично уменьшить, изменив схему включения его компонентов с параллельной на последовательную (рис. 10).

Анализ такого преобразователя с изменением площади перекрытия электродов показывает, что начиная со второго цикла преобразования за один цикл, средняя энергия, потребляемая от источника питания равна нулю (преобразователь не разряжает источник), а зави-

симось энергии U_R , отдаваемой в нагрузку, от отношения $C_0 V_0^2 / (2kb^2) = -z_1$ будет иметь вид, показанный на рис. 11. Из зависимостей следует, что при $b/d \geq 100$ значение z_1 необходимо выбирать в диапазоне $(0.1453 + 0.59z_2) < z_1 < 0$. При этом максимум отдаваемой энергии при выбранном z_2 будет достигаться при $z_1 = 0.049 + 0.215z_2$. Для этого, в свою очередь, потребуется приведённая сила $F_0/kb = 0.049 - 0.785z_2$.

Как и в преобразователе с параллельным включением компонентов наличие ёмкостной составляющей в цепи нагрузки в данном случае также может существенно ограничить выбор допустимого значения C_{\min} .

Для оценки адекватности модели преобразователя с последовательной схемой включения компонентов был проведен цикл необходимых экспериментальных исследований. Установлено, что результаты расчёта и эксперимента достаточно хорошо совпадают. Таким образом, предложенную модель преобразователя с одним переменным конденсатором и последовательным включением компонентов, на наш взгляд, также можно использовать при разработке и оптимизации параметров преобразователей данного типа.

Отметим, что в целом, преобразователь с последовательным включением компонентов будет отдавать в нагрузку несколько меньшую энергию, чем преобразователь с параллельным включением компонентов (рис. 6). Однако в преобразователе с последовательным включением компонентов средняя энергия, потребляемая от источника питания, равна нулю.

При необходимости в последовательной схеме можно вообще обойтись без переключателя. При этом даже появляется дополнительная возможность работы в многочастотном режиме.

Зависимость изменения напряжения V_R на резисторе нагрузки R от времени, измеренная при $V_0 = 62$ В, приведена на рис. 12. Переменный конденсатор представлял собой две плоские параллельные пластины, одна из которых смещалась относительно другой. На эти пластины была нанесена металлизация, формирующая «гребёнку» неподвижного и подвижного электродов. В нашем случае закон модуляции ёмкости при смещении электродов был близок к треугольному, а форма сигнала была близка к прямоугольной.

С использованием импульсной характеристики были найдены аналитиче-

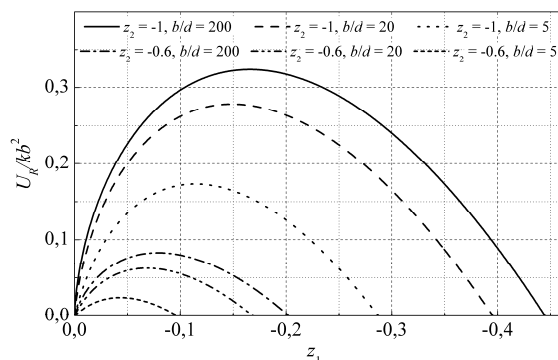


Рис. 11. Зависимости U_R / kb^2 от z_1 , рассчитанные с учётом краевых эффектов

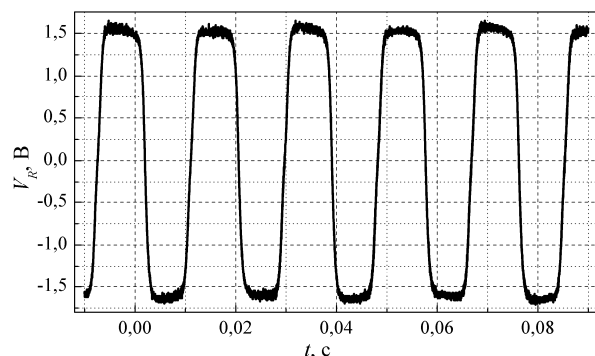


Рис. 12. Зависимость напряжения на резисторе нагрузки от времени, измеренная при $V_0 = 62$ В и $R = 3.32$ МОм

ские выражения, позволяющие моделировать зависимости напряжения на резисторе нагрузки от времени. Полученные аналитические соотношения позволили также провести анализ влияния частоты модуляции ёмкости и сопротивления нагрузки на параметры преобразователя. На рис. 13 показана зависимость выходного напряжения преобразователя V_R от частоты модуляции (сплошные линии). На этом же рисунке приведены экспериментальные результаты (треугольники). Видно, что расчёт достаточно хорошо описывает эксперимент.

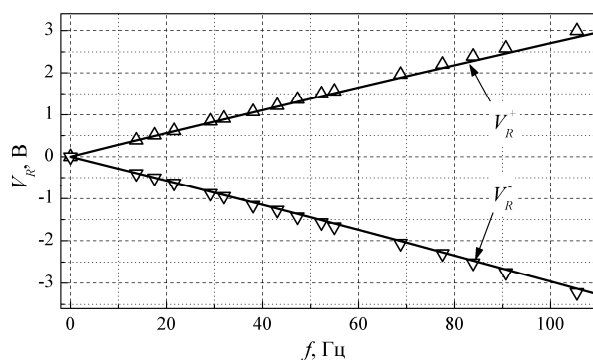


Рис. 13. Зависимости максимальных значений положительного и отрицательного импульсов напряжения на резисторе от частоты модуляции ёмкости. Треугольники – экспериментальные данные, линии – результаты моделирования

Видно, что при сопротивлениях нагрузки $0.1 \dots 100$ МОм и частотах модуляции ёмкости $50 \dots 400$ Гц вырабатываемая мощность может превышать 1 мкВт, а при сопротивлениях нагрузки $1 \dots 100$ МОм – даже 10 мкВт, что уже достаточно для питания ряда автономных микромощных измерительных систем.

Следует отметить, что отсутствие переключателей устраняет необходимость синхронизации их работы с моментами переключения внешней силы. В результате данный преобразователь может работать и в многочастотном режиме.

В ряде случаев длительность работы МЭМП, рассмотренных выше, будет ограничиваться не столько скоростью разряда внешнего (первичного) источника питания V_0 , сколько допустимым количеством циклов разряда-заряда этого источника.

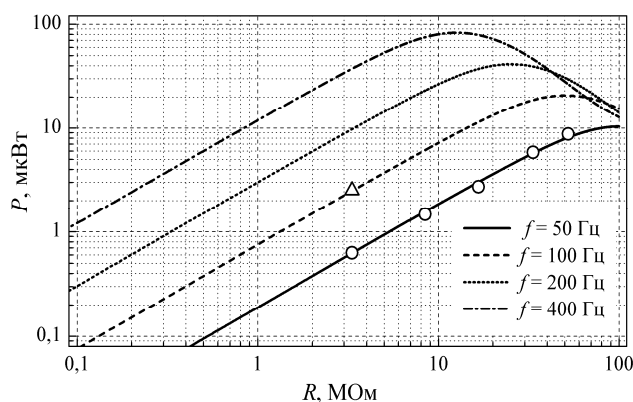


Рис. 14. Зависимость мощности, выделяемой в резисторе нагрузки, от величины сопротивления нагрузки при частоте модуляции ёмкости $f = 50, 100, 200$ и 400 Гц. Линии – расчёт, символы – экспериментальные результаты

но, что расчёт достаточно хорошо описывает эксперимент.

Изменение скорости (при изменении сопротивления нагрузки) и времени (при изменении частоты модуляции ёмкости) заряда-разряда конденсатора влияют и на зависимость средней мощности, выделяемой в резисторе нагрузки. На рис. 14 приведена зависимость средней мощности, выделяемой в резисторе нагрузки, от сопротивления нагрузки, рассчитанная при частоте модуляции ёмкости $50, 100, 200$ и 400 Гц. На этом же рисунке (символами) приведены экспериментальные результаты.

Эту проблему удастся существенно сгладить, используя преобразователи с двумя перезаряжаемыми конденсаторами. Исследованию особенностей их функционирования, моделированию характеристик и оценке предельных параметров и посвящена **четвёртая глава**, где проведён анализ двухконденсаторных МЭМП с одним и двумя переменными конденсаторами, а также с мостовой схемой включения компонентов.

На рис. 15 приведена электрическая схема двухконденсаторного

МЭМП с одним переменным и одним постоянным конденсаторами. По сравнению со схемой на рис. 10, в данном случае появился дополнительный постоянный конденсатор C_1 , резистор R_1 , учитывающий сопротивление цепи, подключающей внешний источник напряжения, и ключ Sw_1 .

Перед началом работы преобразователя переключатели Sw_1 и Sw_2 должны быть замкнуты, при этом оба конденсатора окажутся заряженными до напряжения V_0 . Затем переключатель Sw_1 размыкается, внешний (первичный) источник напряжения V_0 отключается от схемы, а его функции берёт на себя конденсатор C_1 , выступающий в роли аккумулятора малой ёмкости. В результате при действии дополнительной внешней силы $F_0(t)$ и смещении подвижного электрода переменного конденсатора относительно неподвижного, заряд переменного конденсатора будет изменяться за счёт изменения заряда постоянного конденсатора. При этом в отсутствие утечек, полный заряд в системе будет сохраняться и в дальнейшем внешний источник питания потребуется только в случае необходимости скомпенсировать возможную утечку заряда.

Если первоначальный заряд конденсаторов проводить при максимальной площади перекрытия электродов переменного конденсатора (когда $C = C_{\max}$), то от внешнего источника конденсатор C приобретёт энергию $C_{\max}V_0^2/2$, а C_1 энергию $C_1V_0^2/2$. Преобразование механической энергии в электрическую в данном случае будет иметь место при раздвижении электродов конденсатора C (при разомкнутых ключах Sw_1 и Sw_2). Если затем в момент достижения максимального взаимного смещения электродов конденсатор C подключить (замыканием ключа Sw_2) через резистор нагрузки R_H к C_1 , то часть энергии $C_{\min}V_{\max}^2/2$, накопленной в C к концу цикла, может быть передана в нагрузку. Затем цикл преобразования повторяется. Отметим, что в данном преобразователе передача энергии в нагрузку будет происходить как на этапе разряда, так и на этапе заряда переменного конденсатора.

В рамках базовой модели при расчёте латеральной составляющей электростатической силы использовали модель ИПК. В результате преобразователь с изменяющейся площадью перекрытия электродов будет характеризоваться системой уравнений

$$\begin{aligned} \frac{d\varphi_2}{dt} &= \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{R_H C_0 (1 - z)} \Phi(Sw_2) + \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{R_H C_0 (1 - z)} \Phi(Sw_1) + \frac{\varphi_2}{1 - z} \frac{dz}{dt}, \\ \frac{d\varphi_1}{dt} &= \frac{V_0 - \varphi_1}{R_1 C_1} \Phi(Sw_1) - \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{R_H C_1} \Phi(Sw_1) - \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{R_H C_1} \Phi(Sw_2), \\ \frac{d^2 z}{dt^2} + \frac{B^*}{m} \frac{dz}{dt} + \frac{k}{m} z + \frac{C_0}{2mb^2} \varphi_2^2 - \frac{|F_0|}{mb} \operatorname{sgn}(F_0) \Phi_1 &= 0, \end{aligned} \quad (9)$$

где $z = x/b$, $2b$ – ширина неподвижного электрода, $\Phi(Sw_{1,2})$ – единичные функции,

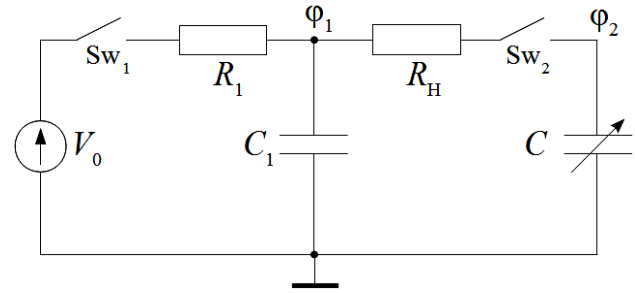


Рис. 15. Электрическая схема МЭМП с одним переменным и одним постоянным конденсаторами

зависящие от момента и длительности включения переключателей Sw, Φ_1 – единичная функция, задающая моменты изменения направления внешней силы F_0 .

Сопоставление работы данного преобразователя с соответствующим одноконденсаторным (рис. 10) показывает, что замена источника V_0 конденсатором C_1 может приводить к появлению изменений напряжения φ_1 при малых значениях ёмкости C_1 , уменьшению энергии, отдаваемой в нагрузку на этапе разряда переменного конденсатора, и увеличению энергии, отдаваемой на этапе заряда. В целом, однако, это мало сказывается на полной энергии, вырабатываемой за цикл преобразования.

В случае же использования больших C_1 ($C_1 \geq 100 C_0$), когда напряжение на конденсаторе C_1 в процессе работы практически не изменяется, различия в функционировании преобразователей (рис. 10 и 15) становятся малозначительными. Таким образом, все выводы, сделанные в главе 3, в том числе о влиянии краевых эффектов и ёмкостной составляющей нагрузки, оказываются применимыми и здесь.

В данном случае можно также обойтись без переключателя Sw₂ замкнув цепь между R_H и конденсатором C .

Полагая, что в отсутствие утечек, после размыкания переключателя Sw₁ (рис. 15) полный заряд Q_{com} в системе сохраняется, при этом изменение заряда на переменном конденсаторе C будет удовлетворять уравнению

$$\frac{dQ_c}{dt} - \frac{C_1 + C(t)}{R_H C_1 C(t)} Q_c = \frac{Q_{com}}{R_H C_1},$$

с использованием импульсной характеристики схемы удаётся получить аналитические выражения для расчёта зависимостей напряжений на конденсаторах и резисторе нагрузки от времени (рис. 16а).

Для проверки правильности расчётов были проведены соответствующие экспериментальные исследования характеристик макета преобразователя с одним постоянным и одним переменным конденсатором с изменяющейся площадью перекрытия электродов (рис. 16б). Видно, что в целом расчётные и экспериментальные зависимости достаточно хорошо совпадают. Наблюдающееся 15–20% отличие в амплитуде сигнала на наш взгляд объясняется не учётом в расчётах ёмкостной составляющей нагрузки, а также аппроксимацией зависимости ёмкости от времени треугольниками.

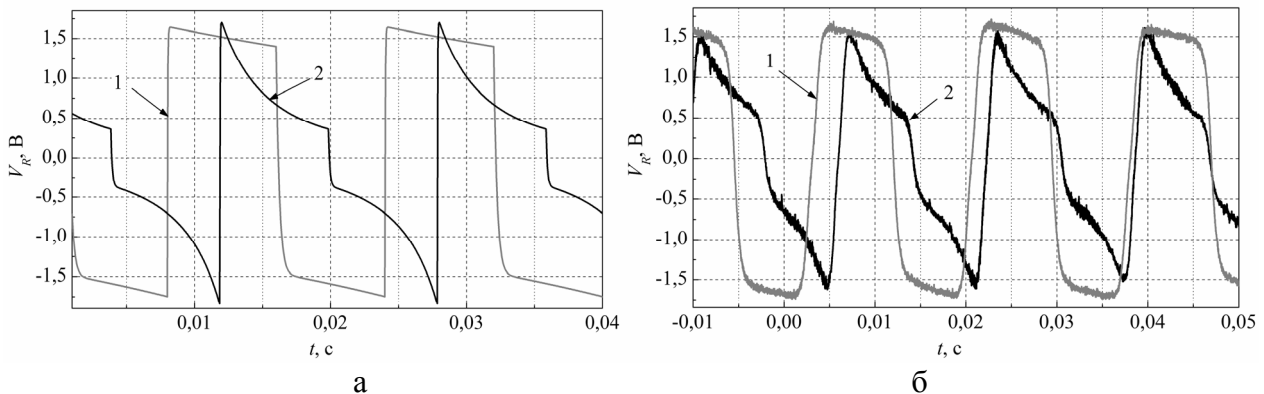


Рис. 16. Зависимости напряжения на $R_H = 3.32$ МОм от времени, рассчитанные (а) и измеренные (б) при $C_1 = 48$ – (1) и 763 – (2) пФ

Отметим, что при использовании постоянного конденсатора ёмкостью 4700 пФ, данный преобразователь выделял в резисторе нагрузки 0.68 мВт.

Кроме значений напряжения и мощности, выделяемых в нагрузке, важной характеристикой преобразователя данного типа является время работы преобразователя без подзарядки от источника V_0 . Необходимость в подзарядке возникает из-за неконтролируемых утечек заряда. Нами были измерены зависимости напряжения на резисторе нагрузки от времени, сразу после отключения источника питания, а также через 30, 50, и 70 секунд при $C_1 = 48$ и 763 пФ. Анализ показал, что сопротивление утечки составляло $3 \cdot 10^{11}$ и $2 \cdot 10^{12}$ Ом. В результате при $C_1 \geq 763$ пФ длительность работы данного преобразователя до подзарядки может составлять более 10 сек, что при частоте модуляции ёмкости 50 Гц соответствует 500 циклам разряда-заряда источника постоянного напряжения преобразователя с одним переменным конденсатором и последовательным включением компонентов.

На рис. 17 приведены зависимости напряжения на R_H рассматриваемого двухконденсаторного преобразователя с диодным мостом от времени, измеренные при различных сопротивлениях нагрузки. Видно, что амплитуда напряжения на сопротивлении нагрузки возрастает при увеличении сопротивления нагрузки, поскольку происходит уменьшение изменений заряда переменного конденсатора на этапах его разряда и заряда. В результате уменьшается величина добавляемого заряда на этапе заряда переменного конденсатора и, как следствие, уменьшается V_{\min} , а также уменьшается величина отдаваемого заряда на этапе разряда переменного конденсатора и, как следствие, увеличивается V_{\max} . Поэтому и происходит увеличение амплитуды и отрицательной и положительной полувольты выходного напряжения.

Увеличить ресурс источника питания можно и при использовании МЭМП с двумя переменными конденсаторами (рис. 18). Анализ показывает, что начиная со второго цикла, за цикл преобразования преобразователь будет отдавать в нагрузку энергию

$$U_R = 2C_0V_0^2(z_2 - z_3)^2 / (1 - z_3^2),$$

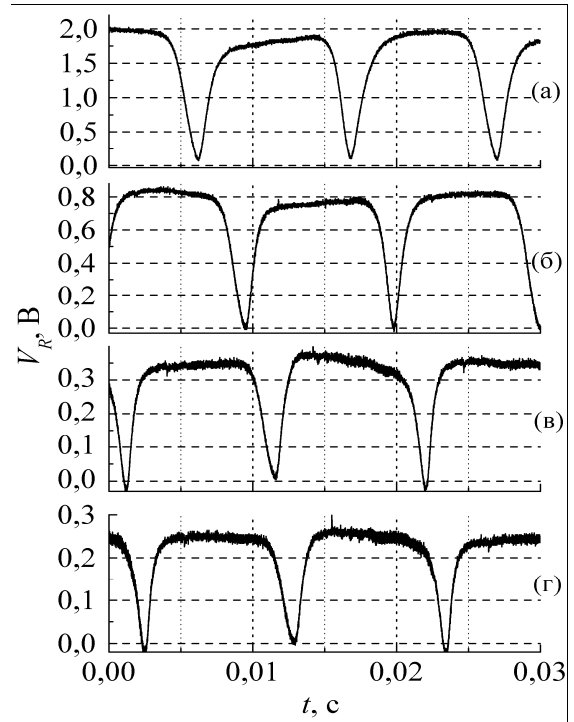


Рис. 17. Экспериментальные зависимости напряжения на R_H двухконденсаторного преобразователя с диодным мостом от времени. $V_0 = 60$ В, $C_1 = 0.25$ мкФ и частоте модуляции ёмкости 48 Гц (а) – $R_H = 5$ МОм, (б) – 2.08 МОм, (в) – 0.91 МОм, (г) – 0.65 МОм

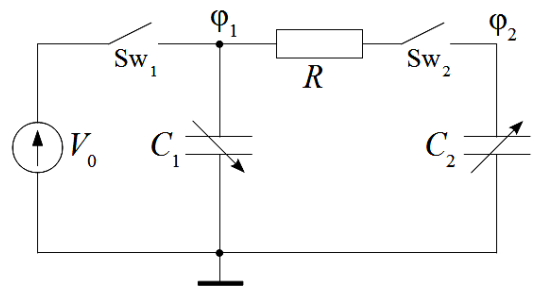


Рис. 18. Электрическая схема двухконденсаторного преобразователя

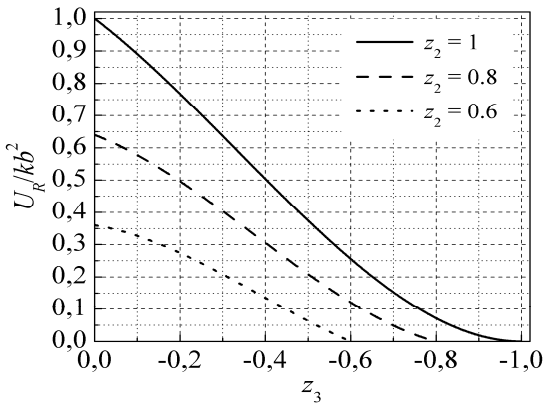


Рис. 19. Зависимости U_R / kb^2 от z_3

что данный преобразователь позволяет отдавать в нагрузку существенно больше энергии, чем ранее рассмотренные преобразователи. Таким образом, достоинством данного преобразователя является не только отсутствие потребления энергии от источника питания в установившемся режиме, но и большая энергия, передаваемая в нагрузку в одном цикле преобразования, а также возможность работы в многочастотном режиме.

Для оценки адекватности развиваемой модели был проведён цикл необходимых экспериментальных исследований. Установлено, что результаты моделирования при учёте ёмкостной составляющей нагрузки и краевых эффектов хорошо описывают эксперимент.

В рассматриваемой схеме двухконденсаторного преобразователя также можно обойтись без ключа Sw_2 (см. рис. 18). В этом случае после первоначального заряда конденсаторов C_1 и C_2 и размыкании переключателя Sw_1 , при циклической модуляции ёмкостей конденсаторов C_1 и C_2 запасённый заряд будет периодически перетекать из одного конденсатора в другой, выделяя в нагрузку мощность V_R^2 / R . Длительность работы преобразователя

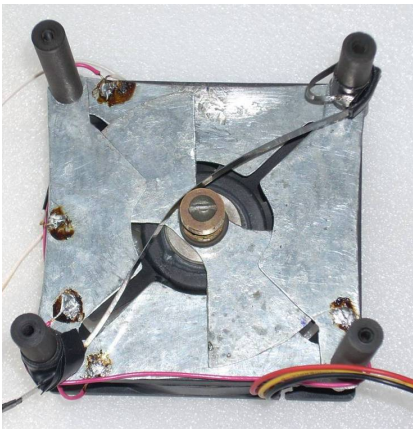


Рис. 21. Фотография макета двухконденсаторного преобразователя

где z_3 – нормированное значение смещения подвижного электрода непосредственно перед передачей запасённой энергии в нагрузку. При этом в установившемся режиме потребления энергии от источника питания не будет.

Анализ показал, что для преобразователей данного типа допустимое значение $C_0 V_0^2 / 2kb^2$ может быть только меньше 0.25.

На рис. 19 приведены зависимости U_R / kb^2 от z_3 при $z_2 = 1, 0.8, 0.6$. Видно,

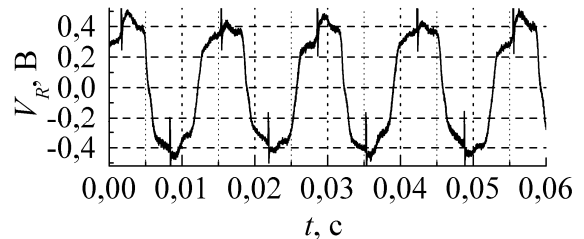


Рис. 20. Зависимость изменения напряжения на нагрузке макета двухконденсаторного преобразователя от времени при частоте модуляции ёмкости 74.6 Гц

в этом случае будет определяться лишь величиной токов утечки.

На рис. 20 приведены зависимости изменения напряжения на нагрузке от времени, измеренные на макете (рис. 21) двухконденсаторного преобразователя при двух значениях частоты модуляции ёмкостей, $V_0 = 60$ В и $R_H = 2$ МОм. В эксперименте ёмкость первого конденсатора изменялась от 14 до 24 пФ, а второго – от 12 до 25 пФ. Установлено, что результаты расчёта хорошо согласуются с экспериментом.

Анализ аналогичной системы, но с изме-

няющимся межэлектродным зазором, показал, что в нём основным ограничивающим фактором повышения мощности является условие сохранения системой положительной жесткости. Установлено, что в данном случае максимальный заряд на обкладках переменного конденсатора не должен превышать значения $d\sqrt{kC_0/2}$, а максимальное напряжение – значения $\delta d\sqrt{k/2C_0}$. При этом полезная энергия, отдаваемая в нагрузку, будет определяться выражением $2r F_0^2 / (k(1-r))$, где $r = 2Q_0^2 / (C_0kd^2)$.

Для оценки влияния возможных утечек заряда был проведён анализ эффективности двухконденсаторного преобразователя энергии с модуляцией межэлектродного зазора при наличии утечек (рис. 22).

Система дифференциальных уравнений описывающих работу такого двухконденсаторного преобразователя энергии с учетом утечек имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{d\varphi_1}{dt} &= \frac{(\varphi_2 - \varphi_1)}{RC_1} - \frac{\varphi_1}{C_1} \frac{dC_1}{dt} - \frac{\varphi_1}{R_{ym}C_1} + F_{\text{подзаряда}}(t), \\ \frac{d\varphi_2}{dt} &= -\frac{(\varphi_2 - \varphi_1)}{RC_2} + \frac{\varphi_2}{C_2} \frac{dC_2}{dt} - \frac{\varphi_2}{R_{ym}C_2} + F_{\text{подзаряда}}(t), \\ m \frac{d^2y}{dt^2} + B \frac{dy}{dt} + Gy - F_{эл} &= -ma(t), \end{aligned} \quad (10)$$

где $y(t)$ - смещение подвижной обкладки, $a(t)$ - ускорение движения корпуса, G – коэффициент восстанавливающей силы, $F_{\text{подзаряда}}(t)$ – функция реализующая алгоритм работы схемы подзаряда.

Анализ системы (10) показал, что для симметричной конструкции преобразователя при гармоническом возбуждении в установившемся режиме при схемах подзарядки полностью компенсирующих заряд, утекающий через оба R_{ym} , удаётся найти аналитическое решение системы (10).

Используя полученное решение (10) выражение для активной мощности, выделяемой в R нагрузки, можно представить в виде

$$P_{акт} = \delta^2 d^2 \frac{G}{C_0 R} z_0^2.$$

Для совместимых с кремниевой интегральной технологией значений параметров преобразователя: $G = 29.2$ Н/м; $R = 10^6$ Ом; $d = 2 \cdot 10^{-6}$ м; $C_0 = 10^{-11}$ Ф; $z_0 = 1$; $\delta = 0.9$ – получается, что $P_{акт} = 9.7$ мкВт. Что вполне приемлемо для многих автономных информационно-измерительных систем.

В тех случаях, когда по каким-либо причинам исключена возможность использования внешнего источника постоянного напряжения достаточной мощ-

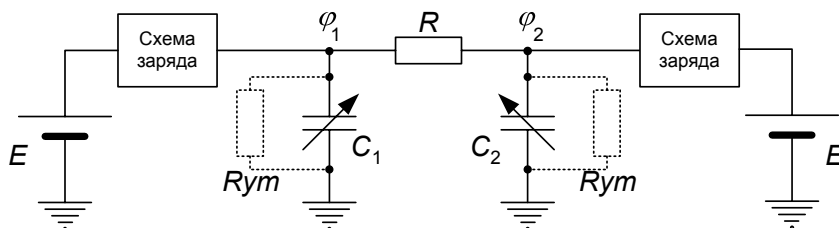


Рис. 22. Электрическая схема двухконденсаторного преобразователя

ности или ёмкости, можно использовать два менее мощных источника включив их в мостовую схему (рис. 23). Система уравнений, описывающая поведение данного преобразователя, может быть представлена в виде:

$$\begin{cases} C_1 \frac{dV_1}{dt} + V_1 \frac{dC_1}{dt} = C_2 \frac{dV_2}{dt} + V_2 \frac{dC_2}{dt} + \frac{\varphi_1}{R} \\ m \frac{d^2x}{dt^2} + B^* \frac{dx}{dt} + Gx - F_{эл} = -F(t) \end{cases}, \quad (11)$$

где x – смещение подвижного электрода от положения равновесия, $F(t)$ – действующая сила, первое уравнение системы (11) отражает баланс токов ($I_1 = I_2 + I_3$), а второе – баланс сил, действующих на подвижный электрод.

В общем случае решение системы (11) находится только численно, однако, в установившемся режиме для симметричной схемы при воздействии вынуждающей силы, изменяющейся по гармоническому закону $F(\tau) = -mA_0\omega^2 \sin \tau$, решение удалось представить в аналитическом виде.

Анализ полученного решения показал, что в данной электромеханической системе электрическое поле влияет на смещение подвижного электрода за счёт изменения коэффициента силы вязкого трения B^* и коэффициента восстанавливающей силы G . В данном случае увеличение

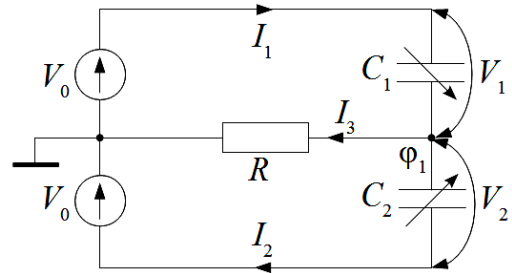


Рис. 23. Электрическая схема двухконденсаторного преобразователя энергии мостового типа

приложенного напряжения будет приводить к увеличению эффективной жёсткости системы и, как следствие, к увеличению резонансной частоты преобразователя. В результате, если до приложения электрического напряжения собственная частота колебаний МЭМП была ниже частоты вынуждающей силы, то, подавая напряжение, мы можем настроить параметры системы в резонанс с внешней силой и добиться максимальной амплитуды колебаний.

На рис. 24 приведены зависимости напряжения, выделяемого на резисторе нагрузки, от времени, измеренные на макете двухконденсаторного преобразователя мостового типа при различных значениях сопротивления нагрузки. В эксперименте ис-

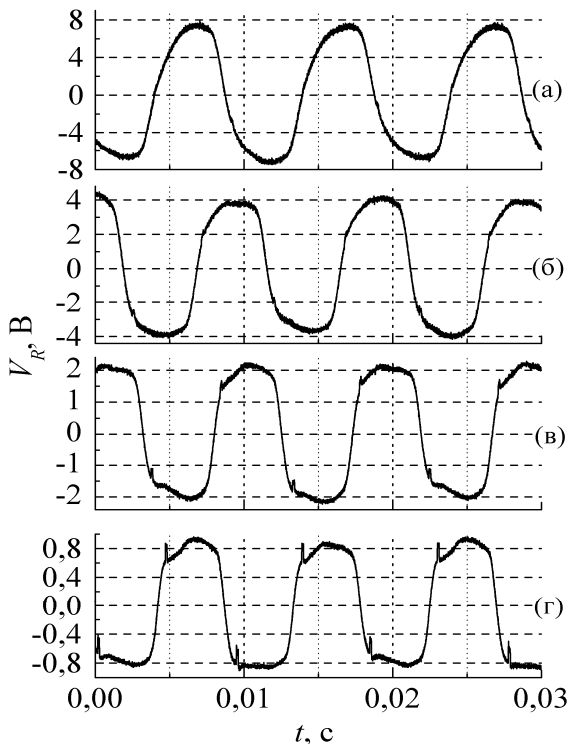


Рис. 24. Зависимости выходного напряжения двухконденсаторного преобразователя мостового типа от времени. а) – $R_H = 32.1 \text{ МОм}$, б) – 16.38 МОм , в) – 8.38 МОм , г) – 3.38 МОм

пользовался источник постоянного напряжения $V_0=2 \times 30$ В, а частота модуляции ёмкости составляла 105 Гц. При этом ёмкость конденсатора C_1 изменялась от 9 до 21 пФ, а конденсатора C_2 – от 10 до 21 пФ.

Согласно экспериментальным данным мощность, выделяемая в резисторе нагрузки, у данного преобразователя составила 1 мкВт при сопротивлении нагрузки $R_H = 32.1$ МОм и 0.095 мкВт при $R_H = 3.38$ МОм, когда частота модуляции ёмкостей была 105 Гц.

В целом экспериментальные зависимости хорошо согласуются с соответствующими расчётными кривыми. Некоторое различие в форме выходного напряжения объясняется пренебрежением в расчётах краевыми эффектами, хотя отношение ширины электродов к межэлектродному зазору в этом случае составляло всего около 10.

Используя полученные аналитические выражения, выражение для активной мощности, выделяемой в резисторе R , можно представить в виде $P_{акт} = V_0^2 z_0^2 / [2R(1 + b_1^2)]$, где $b_1 = \sqrt{(Q-1)/Q}$, $z_0 = A_0 Q^2 / [b(\sqrt{Q(Q-1)} + Q - 1)]$, а Q – добротность механической системы в отсутствие электрического напряжения. Анализ выражения для $P_{акт}$ показывает, что активная мощность, выделяемая в нагрузке, достигает абсолютного максимума, если G , R и V_0 выбрать в соответствии с выражениями $V_{омм} = \sqrt{(m\omega^2 b^2 (2Q-1)) / (2Q^2 C_0)}$, $G_{омм} = m\omega^2 (1 - 1/Q)$, $R_{омм} = 1 / (2\omega C_0 b_1)$. При этом средняя энергия, потребляемая от источников питания, в установившемся режиме будет равна 0.

Анализ также показывает, что кроме оптимального выбора параметров системы добиться увеличения мощности, выделяемой в нагрузке, при данной конструкции преобразователя можно, используя многочастотный режим.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Предложена классификация микроэлектромеханических преобразователей механической энергии в электрическую, позволившая предложить новые типы преобразователей (с последовательной схемой, двухконденсаторный МЭМП с одним переменным конденсатором и с мостовой схемой включения компонентов).

2. Выявлены преимущества и недостатки различных конструкций и схем включения МЭМП:

- показано, что преобразователи с последовательной схемой включения компонентов позволяют избавиться от использования переключателей и необходимости синхронизации работы ключей с изменениями направления действия внешней силы, а также использовать многочастотный режим, при этом средняя энергия, потребляемая ими от источника питания, равна нулю;
- при использовании двухконденсаторных схем удаётся существенно уменьшить количество циклов разряда-заряда первичного источника, а при использовании двух переменных конденсаторов ещё и увеличить выходную мощность;
- мостовая схема включения позволяет использовать менее мощные первичные источники.

3. Разработаны алгоритмы и программное обеспечение для расчёта ёмкостей и электростатических сил в МЭМС, позволившие рассчитать с учётом краевых эффектов зависимости ёмкостей и электростатических сил от величины межэлектродного зазора и площади перекрытия электродов и найти аналитические выражения, позволяющие рассчитывать данные зависимости в интервалах $0 < d/b < 1$ и $0 < x/b < 1$ с погрешностью не более 12%.

4. Установлено, что даже в отсутствие взаимного смещения лишь для $d/b < 0.02$ и $d/b < 0.05$ значения ёмкостей могут быть найдены по формуле ИПК (без учёта краевых эффектов) с погрешностью менее 5% и 10%, соответственно, а при $d/b = 0.5$ погрешность составит уже около 65%.

При увеличении взаимного смещения электродов x влияние краевых эффектов возрастает. Так при $x/b = 0.8$ и $d/b = 0.02$ погрешность в оценке значения ёмкости по модели ИПК увеличится до 35%, а при $d/b = 0.5$ - до 300%.

5. Показано, что значения электростатических сил, рассчитанные с использованием выражений, полученных в рамках модели ИПК, существенно отличаются от значений, рассчитанных с учётом краевых эффектов. В результате, например, при постоянном заряде значения нормальной компоненты нормированной силы в точке $d/b = 1$, рассчитанные в приближении ИПК и с учётом краевых эффектов, отличаются более чем на 270%.

6. Разработаны модели, алгоритмы и программное обеспечение для моделирования характеристик преобразователей энергии, позволившие существенно сузить диапазон поиска значений параметров преобразователя, удовлетворяющих техническому заданию, а при заданных значениях напряжения источника питания V_0 , внешней силы F_0 и максимального смещения электродов получить исходные данные для расчёта упругого подвеса и переменного конденсатора:

- для преобразователя с параллельным включением компонентов и изменяющейся площадью перекрытия установлено, что энергия, накопленная в конденсаторе к концу цикла преобразования, превысит энергию, позаимствованную от внешнего источника, только если $C_0 V_0^2 / (2kb^2) < 1/5$, а $F_0 / kb > 2/15$. Показано, что для получения максимального значения накопленной энергии при максимальном отношении энергии, полученной к концу цикла преобразования, к энергии, позаимствованной от внешнего источника, оптимальными являются значения $C_0 V_0^2 / (2kb^2)$ в интервале от 0.02 до 0.025;

- для преобразователей с параллельным включением компонентов и изменением межэлектродного зазора установлено, что основным ограничивающим фактором повышения мощности в МЭМП с параллельным расположением электродов является эффект схлопывания, а с гребенчатым расположением электродов – условие сохранения системой положительной жёсткости. В результате для МЭМП с параллельным расположением электродов максимальный заряд на обкладках переменного конденсатора не должен превышать значения $d\sqrt{2kC_0(1-F_0/kd)}/3$, а с гребенчатым расположением электродов – $\delta d\sqrt{2kC_0}$. При этом максимальная энергия, накопленная в конденсаторе, и максимальное

напряжение к концу цикла преобразования в первом случае не превысят значений $0.25kd^2$ и $\sqrt{16kd^2/27C_0}$, а во втором - $\delta^2kd^2/2$ и $\delta\sqrt{kd^2/2C_0}$. Показано, что при учёте краевых эффектов величина параметра ζ , характеризующего превышение выработанной энергии по отношению к полученной от внешнего источника, при увеличении отношения d/b существенно уменьшается. Так для $d/b > 0.5$ максимально достижимое значение ζ может уменьшиться по сравнению со значением, рассчитанным в рамках модели ИПК, более чем в 5 раз. Кроме того, если в модели, основанной на концепции ИПК, не имело смысла использование данного преобразователя при $F_0/kd \leq 1/4$, то с учётом краевых эффектов это значение может возрасти до $1/3$, что необходимо учитывать при проектировании;

- для одноконденсаторных преобразователей с последовательным включением компонентов и изменяющейся площадью перекрытия установлено, что при $b/d \geq 100$ значение z_1 необходимо выбирать в диапазоне $(0.1453 + 0.59z_2) < z_1 < 0$. При этом максимум отдаваемой энергии при выбранном z_2 будет достигаться при $z_1 = 0.049 + 0.215z_2$. Для этого, в свою очередь, потребуется приведённая сила $F_0/kb = 0.049 - 0.785z_2$;

- для преобразователей с двумя переменными конденсаторами и изменением площади перекрытия максимально допустимое значение $C_0V_0^2/2kb^2$ не может превышать 0.25, а с изменением межэлектродного зазора: максимальный заряд на обкладках переменного конденсатора не должен превышать значения $d\sqrt{kC_0/2}$, а максимальное напряжение – значения $\delta d\sqrt{k/2C_0}$, при этом полезная энергия, отдаваемая в нагрузку, будет определяться выражением $2rF_0^2/(k(1-r))$, где $r = 2Q_0^2/(C_0kd^2)$;

- для двухконденсаторных МЭМП мостового типа найдены выражения, позволяющие рассчитать оптимальные параметры электромеханической системы, при которых достигается максимальная мощность, выделяемая в резисторе нагрузки. Показано, что максимальная мощность определяется массой подвижного электрода m , частотой вынуждающей силы f , ёмкостью C_0 и добротностью Q системы. Установлено, что увеличение приложенного напряжения в МЭМП мостового типа с изменяющейся площадью перекрытия электродов приводит к увеличению резонансной частоты системы в отличие от двухконденсаторных систем с изменением межэлектродного зазора. Добиться увеличения мощности, выделяемой в нагрузке, при данной конструкции преобразователя можно также, используя многочастотный режим.

7. Разработаны и созданы макеты одно- и двухконденсаторных преобразователей механической энергии в электрическую, на которых проведены исследования работы различных конструкций и схем включения компонентов, показано хорошее согласие результатов экспериментов с рассчитанными характеристиками.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Драгунов, В.П. Предельные характеристики микроэлектромеханических преобразователей энергии / В.П. Драгунов, Д.И. Остертак // **Научный вестник НГТУ**. – 2009. – №1 (34). – С. 129–141.
2. Драгунов, В.П. Расчёт латеральной составляющей электростатической силы в МЭМС / В.П. Драгунов, Д.И. Остертак // **Научный вестник НГТУ**. – 2009. – №1 (34). – С. 229–232.
3. Драгунов, В.П. Анализ электромеханических процессов в МЭМП с изменяющейся площадью перекрытия электродов / В.П. Драгунов, Д.И. Остертак // **Научный вестник НГТУ**. – 2009. – №2 (35). – С. 115–127.
4. Ostertak, D. Investigations of the structural, optical, and electrical properties of $Pb_{0.8}Sn_{0.2}Te$ layers grown on Si(100) using BaF_2/CaF_2 buffer / D. Ostertak, M. Friedrich, A. Velichko, V. Ilyushin, and D.R.T. Zahn // **Thin Solid Films**. – 2009. – Vol. 517. – P. 4599–4604.
5. Драгунов, В.П. Взаимосвязь электромеханических параметров МЭМП мостового типа / В.П. Драгунов, Д.И. Остертак // Доклады АН ВШ РФ. – 2009. – №1 (12). – С. 88–98.
6. Драгунов, В.П. Электростатические взаимодействия в МЭМС со встречно-штыревой структурой / В.П. Драгунов, Д.И. Остертак // Доклады АН ВШ РФ. – 2009. – №1 (12). – С. 99–106.
7. Драгунов, В.П. Емкостной МЭМП с последовательной схемой включения компонентов / В.П. Драгунов, Д.И. Остертак // Доклады АН ВШ РФ. – 2009. – №2 (13). – С. 106–116.
8. Драгунов, В.П. Влияние краевых эффектов на электрическую ёмкость в МЭМС / В.П. Драгунов, В.А. Колчужин, Д.И. Остертак // Доклады АН ВШ РФ. – 2009. – №2 (13). – С. 97–105.
9. Драгунов, В.П. Расчёт нормальной составляющей электростатической силы в МЭМС / В.П. Драгунов, Д.И. Остертак // Сборник научных трудов НГТУ. – 2009. – №1 (55). – С. 40–45.
10. Остертак, Д.И. Анализ параметров латеральных микроэлектромеханических преобразователей с электродами из различных материалов / Д.И. Остертак, М.Н. Лютаева, В.П. Драгунов // Сборник научных трудов НГТУ. – 2009. – №2 (56). – С. 47–52.
11. Остертак, Д.И. Экспериментальное определение параметров емкостных МЭМП / Д.И. Остертак // Сборник научных трудов НГТУ. – 2009. – №3 (57). – С. 65–74.
12. Остертак, Д.И. Электростатические взаимодействия в МЭМС с изменением межэлектродного зазора / Д.И. Остертак, В.П. Драгунов // Сборник трудов одиннадцатой всероссийской научно-технической конференции «Современные проблемы радиоэлектроники» / Под ред. А.И. Громько, А.В. Сарафанова, А.А. Левицкого. – Красноярск: ИПК СФУ, 2009. – С. 267–269.
13. Dragunov, V.P. A novel capacitive vibration-to-electrical energy converter with bridge circuit / V.P. Dragunov, D.I. Ostertak // Proceedings of the 2009 International forum on strategic technologies, Session 3 – Microelectronics and Microsys-

tems, October 21-23, Vietnam National University, Ho Chi Minh City. – P. 142–146.

14. Ostertak, D. Experimental Evaluation of Parameters of the Capacitive MEMS Converters / D. Ostertak // International school and seminar Internano'2009, Session IV, October 28-31, NSTU, Novosibirsk. – 2009. – P. 97–102.

15. Ostertak, D. The limiting parameters of the micro electrostatic vibration-to-electricity energy converters / D. Ostertak, V. Dragunov // 9. Chemnitzer Fachtagung Mikrosystemtechnik, Mikromechanik & Mikroelektronik, November 5-6, Chemnitz. – 2009. P. 118–119.

16. Kolchuzhin, V. On the numerical capacitance evaluation of BDRIE structures / V. Kolchuzhin, R. Forke, W. Dötzel, J. Mehner, D. Ostertak, V. Dragunov // 9. Chemnitzer Fachtagung Mikrosystemtechnik, Mikromechanik & Mikroelektronik, November 5-6, Chemnitz. – 2009. P. 128–130.

Отпечатано в типографии

Новосибирского государственного

Технического университета

630092, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,

тел./факс: (383) 346-08-57

формат 60×84 1\16, объем 2,0 п.л., тираж 100 экз.

заказ № 1669 подписано в печать 23.11.09 г.