

Министерство образования Республики Беларусь  
Учреждение образования  
«Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники»

*На правах рукописи*

УДК 621.314.2

ТИТОВ  
Никита Николаевич

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ  
МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ  
МЕХАНИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание степени  
магистра техники и технологий

по специальности 1-39 81 01 – Компьютерные технологии  
проектирования электронных систем

Минск 2016

Работа выполнена на кафедре проектирования информационно-компьютерных систем учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Научный руководитель: **ЦЫРЕЛЬЧУК Игорь Николаевич**,  
заведующий кафедрой, кандидат технических наук,  
доцент кафедры проектирования информационно-  
компьютерных систем учреждения образования «Бе-  
лорусский государственный университет информа-  
тики и радиоэлектроники»

Рецензент: **ПОЛУБОК Владислав Анатольевич**,  
заведующий кафедрой, кандидат технических наук,  
доцент кафедры непрерывного и дистанционного  
обучения учреждения образования «Белорусский  
государственный университет информатики и ра-  
диоэлектроники»

Защита диссертации состоится «24» июня 2016 г. года в 9<sup>00</sup> часов на заседании Государственной комиссии по защите магистерских диссертаций в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, Минск, ул. П.Бровки, 6, копр. 1, ауд. 415, тел. 293-20-80, e-mail: kafpiks@bsuir.by

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

СОГЛАСОВАНО:

\_\_\_\_\_ И.Н. Цырельчук  
« \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2016 г.

## ВВЕДЕНИЕ

Потребность в беспроводных сенсорах и автономных информационно-измерительных системах вызвала проблему разработки и создания автономных источников питания. Несмотря на то, что емкость химических источников возрастает с каждым годом, во многих случаях их присутствие существенно увеличивает размеры устройств и их эксплуатационные расходы, связанные с заменой элементов питания. Использование возобновляемых источников питания, основанные на извлечении энергии из окружающей среды, взамен традиционным батареям и аккумуляторам, является перспективным направлением изучения преобразователей. Анализ показывает, что вследствие распространенности и доступности источников механической энергии, наиболее подходящим является использование микроэлектромеханических преобразователей механической энергии в электрическую.

В настоящее время в ряде лабораторий мира активно занимаются разработкой и исследованием емкостных МЭМП энергии. Заслуживают внимания исследования Косцова, Э.Г., Багинского, И.Л., Драгунова, В.П., Остертака, Д.И. и др. Среди зарубежных авторов стоит выделить множество работ Roundy, S., Mateu, L., Metchenson, P. и др.

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

При проектировании и создании микроэлектромеханических преобразователей необходимо решать целый комплекс проблем, связанных с выбором конструкции преобразователя и схемы включения компонентов, расчетом его характеристик, проектированием и созданием упругих элементов, технологическими сложностями изготовления.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы исследования

Большинство исследований по теме диссертации направлены на получение теоретических данных о возможности создания микроэлектропреобразователей энергии, ведутся попытки рассчитать и создать конкретные конструкции преобразователей. Создание перезаряжаемого источника энергии для использования в автономных системах является актуальным вопросом, однако мало кто уделяет внимание созданию методики проектирования генераторов энергии, исходя из которой

эти преобразователи поступят в массовое производство. До сих пор остается не ясным, чего можно достичь в области преобразования энергии, какая конструкция и когда эта конструкция наиболее оптимальна, не в полной мере ясны достоинства и недостатки различных конструкций МЭМП, отсутствуют методики расчета и оценки предельных параметров МЭМП, что и определяет актуальность данной работы.

### **Степень разработанности проблемы**

В современных исследованиях, представленных в научно-технической литературе, приведены теоретические результаты разработок микроэлектро-преобразователей, подтверждающие актуальность разработок. Заслуживают внимания исследования Косцова, Э.Г., Багинского, И.Л., Драгунова, В.П., Остертака, Д.И. и др. Среди зарубежных авторов стоит выделить множество работ Roundy, S., Mateu, L., Metchenson, P. и др. Однако до сих пор актуальна проблема отсутствия адекватных моделей, методик проектирования и оценки предельных параметров, что сильно останавливает прогресс в области получения электрической энергии из механической.

### **Цель и задачи исследования**

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

Для выполнения поставленной цели в работе были сформулированы **следующие задачи:**

- провести анализ и выявить преимущества и недостатки МЭМП различных конструкций, схем включения и их моделей;
- исследовать электростатические взаимодействия в МЭМС, получить аналитические выражения для оценки емкостей и электростатических сил;
- построить математические модели для оценки характеристик преобразователей с различными способами модуляции емкостей и схемами включения компонентов, разработать теоретические основы для аналитического расчета;
- разработать и создать макеты преобразователей, исследовать их характеристики и провести анализ достоверности теоретических моделей;
- оценить предельные характеристики преобразователей, создать методики расчета и оптимизации их основных параметров.

## **Область исследования**

Содержание диссертации соответствует образовательному стандарту высшего образования второй ступени (магистратуры) специальности 1-38 81 01 «Компьютерные технологии проектирования электронных систем».

## **Теоретическая и методологическая основа исследования**

В основу диссертации легли работы белорусских и зарубежных ученых по изучению микроэлектромеханических преобразователей механической энергии в электрическую, а также анализ технических нормативных правовых актов по рассматриваемой тематике.

*Информационная база* исследования сформирована на основе литературы, открытой информации, предоставляемой производителями микроэлектропреобразователей, технических нормативно-правовых актов, сведений из ресурсов Интернет, а также материалов научных изданий, конференций и семинаров.

**Научная новизна и значимость полученных результатов** состоит в следующем:

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

## **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. 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  $C_0 V_0^2 / (2kb^2) < 1/5$ , а  $F_0 / kb > 2/15$ . Для получения максималь-

ного значения накопленной энергии при максимальном отношении энергии, полученной к концу цикла преобразования, к энергии, позаимствованной от внешнего источника, оптимальными являются значения  $C_0V_0^2/(2kb^r)$  в интервале от 0,02 до 0,025.

3. 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 в преобразователях с изменяющимся межэлектродным зазором – условие сохранения системой положительной жёсткости.

4. 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.

5. Учет электростатического взаимодействия в рамках модели ИПК при  $d/b > 0,05$  приведет к погрешности в оценке емкости более 10% даже в отсутствии взаимного смещения электродов, а при наличии взаимного смещения электродов погрешность возрастает.

6. Учет 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 в точке  $d/b = 1$ , рассчитанные с учетом и без учета краевых эффектов, отличаются более чем на 270%.

### **Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов**

Результаты исследований, вошедшие в диссертацию, докладывались и обсуждались на 52-ой научно-технической конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР (Минск, Беларусь, 2016 г.).

### **Публикации**

Изложенные в диссертации основные положения и выводы опубликованы в 6 печатных работах. В их числе 2 статьи в сборниках материалов научных конференций и 4 тезиса докладов на научных конференциях.

Общий объем публикаций по теме диссертационной работы составляет 15 авторских страниц.

### **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, двух

глав с краткими выводами по каждой главе, заключения, библиографического списка и приложений.

**В первой главе** проведен анализ современного состояния и перспектив разработки микроэлектромеханических преобразователей энергии. Проводится анализ потребностей в автономных источниках энергии. Рассмотрены способы преобразования механической энергии в электрическую, выявлены преимущества и недостатки этих способов. Произведен обзор литературы по разработке электростатических МЭМП. На основании проведенного анализа литературных данных были сформулированы основные задачи диссертационной работы. **Во второй главе** проводятся результаты теоретических и экспериментальных исследований электростатических взаимодействий в МЭМС с различной конфигурацией электродов. Проанализировано влияние перераспределения зарядов по площади электродов и влияние краевых эффектов на значение емкостей и электростатических сил. На основании проведенных расчетов было получено аналитическое выражение для расчета зависимостей емкости от величины межэлектродного зазора и площади перекрытия электродов. Исследовано влияние шероховатости поверхности на электрическую емкость. Предложена классификация преобразователей. **В приложении** представлены публикации автора и акт внедрения.

Общий объем диссертационной работы составляет 111 страниц. Из них 84 страницы основного текста, 42 иллюстрации, 6 таблиц, библиографический список из 116 наименований, список собственных публикаций соискателя из 6 наименований, 3 приложения.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** дается 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 общей характеристике работы** показана актуальность проводимых исследований, степень разработанности проблемы, сформулированы цель и задачи диссертации, обозначена область исследований, научная (теоретическая и практическая) значимость исследований, а также апробация работы.

**В первой главе** проведен 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, электро-магнитное 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 электро-статический, 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.

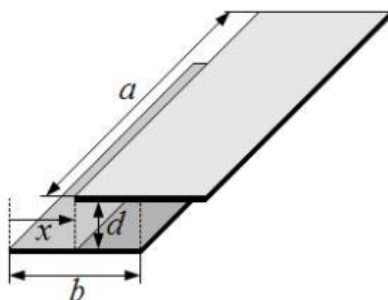
Рассмотрены особенности проектирования упругих элементов и основные требования, предъявляемые к ним. Представлен вариант технологического маршрута изготовления емкостных микроструктур.

Проведенный 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, расчетом 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 микрозеркал 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.



Во второй главе приводятся результаты теоретических и экспериментальных исследований электростатических взаимодействий в МЭМС с различной



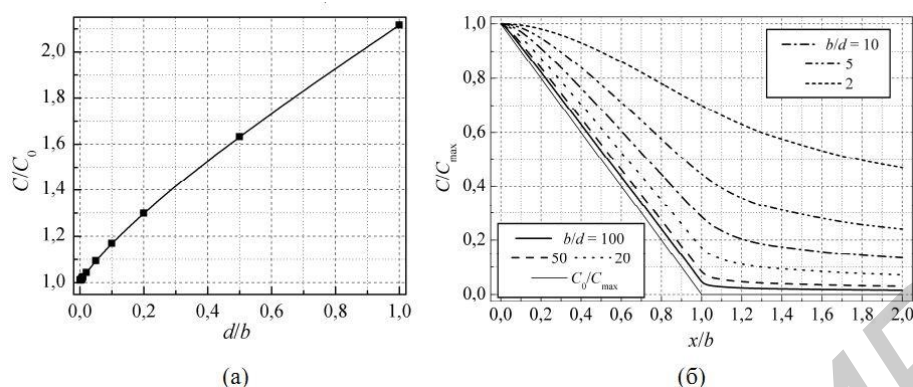
конфигурацией электродов. конфигурацией электродов.

Рисунок 1 – Двухэлектродная плоскопараллельная структура

Проанализировано влияние перераспределения зарядов по площади электродов (рисунок 1) на значения емкостей и электростатических сил. Разработаны алгоритмы и программное обеспечение для расчёта распределения зарядов емкостей и электростатических сил в МЭМС с учётом краевых эффектов для двух- (рисунок 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 учете краевых эффектов плотность заряда на краях электродов может более чем на порядок превышать плотность заряда в центре электрода, причем 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  $x \geq 1$  модель ИПК для расчета электростатических взаимодействий оказывается неприменимой. Показано, что влияние краевых эффектов уменьшается с увеличением числа электродов.

Используя результаты расчетов по распределению зарядов были рассчитаны зависимости емкости (рисунок 2, а) и электростатических сил (рисунок 2, б) от величины межэлектродного зазора и площади перекрытия электродов. Для оценки адекватности и пределов применимости результатов расчетов 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 емкостей могут быть найдены по формуле ИПК (без учета краевых эффектов) с погрешностью менее

5% и 10%, соответственно, а при  $d/b = 0,5$  погрешность составит уже около 65%,



и для расчета емкости формулу ИПК использовать уже нельзя.

**Рисунок 2 – Зависимости емкости от нормированной величины межэлектродного зазора – а) и относительного смещения электродов – б) для двухэлектродной МЭМС**

$$C_0 = \epsilon_0 \epsilon ab/d - \text{расчет по формуле ИПК}$$

При смещении электродов  $x$  влияние краевых эффектов растет. Так при  $x/b = 0,8$  и  $d/b = 0,02$  погрешность в оценке значения емкости по модели ИПК составит около 35%, а при  $d/b = 0,5$  погрешность составит уже около 300%.

На основании проведенных расчетов было получено аналитическое выражение для расчета зависимостей емкости от величины межэлектродного зазора и площади перекрытия электродов, аппроксимирующее результаты численных расчетов.

Учет краевых эффектов сказывается не только на оценках величины емкости, но и на электростатической силе.

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 при использовании межэлектродных зазоров более 1 мкм и электродов с параметрами шероховатости  $r' \leq 20$  нм, что характерно для современной технологии микроэлектроники, влияние морфологии поверхности на электрическую емкость можно не учитывать (погрешность меньше 5%).

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.



Рисунок 3 – Классификация преобразователей

Была предложена классификация преобразователей (рисунок 3). На рисунке выделены типы преобразователи (с последовательной схемой, двухконденсаторный МЭМП с одним переменным конденсатором и с мостовой схемой включения компонентов), которым уделяется наибольшее внимание со стороны исследователей на данном этапе развития области микроэлектромеханических преобразователей механической энергии в электрическую.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные научные результаты диссертации

1. Предложена классификация микроэлектромеханических преобразователей механической энергии в электрическую, позволившая предложить новые типы преобразователей.

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.

3. Установлено, что даже в отсутствие взаимного смещения лишь для  $d/b < 0,02$  и  $d/b < 0,05$ , значения емкостей могут быть найдены по формуле ИПК (без учета 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 емкости по модели ИПК увеличится до 35%, а при  $d/b=0,5$  – до 300%.

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

### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

Полученные результаты внедрены в учебный процесс на кафедре проектирования информационно-компьютерных систем учреждения образования “Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники в учебный курс “Датчики электронных систем безопасности”.

## **СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ**

1. Титов, Н.Н. Способы преобразования механической энергии в электрическую / Титов, Н.Н. // материалы 52-ой науч. конф. аспирантов, магистрантов и студентов «Проектирование информационно-компьютерных систем», Минск, Респ. Беларусь, 25–30 апреля 2016 г. / УО «БГУИР». – Минск, 2016. – В печати.

2. Титов, Н.Н. Анализ влияния числа электродов на емкость в микроэлектромеханических преобразователях / Титов, Н.Н. // материалы 52-ой науч. конф. аспирантов, магистрантов и студентов «Проектирование информационно-компьютерных систем», Минск, Респ. Беларусь, 25–30 апреля 2016 г. / УО «БГУИР». – Минск, 2016. – В печати

3. Титов, Н.Н. Влияние шероховатости поверхности микроэлектромеханических преобразователей на электрическую емкость / Титов, Н.Н. // материалы 52-ой науч. конф. аспирантов, магистрантов и студентов «Проектирование информационно-компьютерных систем», Минск, Респ. Беларусь, 25–30 апреля 2016 г. / УО «БГУИР». – Минск, 2016. – В печати

4. Титов, Н.Н. Этапы развития электростатических преобразователей / Титов, Н.Н. // материалы 52–ой науч. конф. аспирантов, магистрантов и студентов «Проектирование информационно–компьютерных систем», Минск, Респ. Беларусь, 25–30 апреля 2016 г. / УО «БГУИР». – Минск, 2016. – В печати

5. Титов, Н.Н. Анализ источников механических колебаний и их использование в микроэлектромеханических преобразователях / Н.Н. Титов // Научно-практический журнал «Научный обозреватель», №7 (67) – 2016 – Уфа: Инфинити, 2016 – В печати.

6. Титов, Н.Н. Анализ технологии изготовления электростатического преобразователя энергии / Н.Н. Титов // Научно-практический журнал «Научный обозреватель», №7 (67) – 2016 – Уфа: Инфинити, 2016 – В печати.

Библиотека БГУИР

**РЭЗІЮМЭ**  
**Цітоў Мікіта Мікалаевіч**  
**Распрацоўка методыкі праектавання мікраэлектрамеханічных**  
**пераўтваральнікаў механічнай энергіі ў электрычную**

**Ключавыя словы:** мікраэлектрамеханічны пераўтваральнік, генератар.

**Мэта працы:** распрацоўка і ўдасканаленне тэрэтычных асноў і матэматычных мадэляў для разліку характарыстык МЭМП, мадэляванне залежнасцяў, іх уласцівасцяў ад параметраў кампанентаў. Стварэнне методыкі разліку і аптымізацыі электростатычных МЭМП, ацэнка іх гранічных характарыстык.

**Атрыманыя вынікі і іх навізна:** праведзены эксперыментальныя і тэрэтычныя даследаванні асноўных тыпаў МЭМП, якія дазволілі выявіць крытычныя параметры, якія вызначаюць працаздольнасць пераўтваральніка; прапанаваны матэматычныя мадэлі, якія дазваляюць з улікам краявых эфектаў ацаніць ступень уплыву геаметрычных памераў электродаў, межэлектроднага зазору і ўзаемнага зрушэння электродаў на электростатычныя ўзаемадзеяння; атрыманы аналітычныя выразы для ацэнкі ёмістасцяў і электростатычных сіл з улікам ўзаемнага зрушэння электродаў і краявых эфектаў; распрацаваны мадэлі пераўтваральнікаў, якія ўлічваюць краёвыя эфекты і ўзаемнае ўплыў электрычных і пругкіх сіл, якія дазваляюць ацэньваць асноўныя параметры і праводзіць аптымізацыю характарыстык МЭМП.

**Ступень выкарыстання:** вынікі ўкаранёны ў навучальны працэс на кафедры праектавання інфармацыйна-камп'ютэрных сістэм ўстанова адукацыі "Беларускі дзяржаўны ўніверсітэт інфарматыкі і радыёэлектронікі ў навучальны курс "Датчыкі электронных сістэм бяспекі".

**Вобласць ужывання:** бесправадныя сэнсары, аўтаномна-вымяральныя сістэмы.

## РЕЗЮМЕ

Титов Никита Николаевич

### Разработка методики проектирования микроэлектромеханических преобразователей механической энергии в электрическую

**Ключевые слова:** микроэлектромеханический преобразователь, генератор.

**Цель работы:** разработка и совершенствование теоретических основ и математических моделей для расчета характеристик МЭМП, моделирование зависимостей, их свойств от параметров компонентов. Создание методики расчета и оптимизации электростатических МЭМП, оценка их предельных характеристик.

**Полученные результаты и их новизна:** проведены экспериментальные и теоретические исследования основных типов МЭМП, позволившие выявить критические параметры, определяющие работоспособность преобразователя; предложены математические модели, позволяющие с учетом краевых эффектов оценить степень влияния геометрических размеров электродов, межэлектродного зазора и взаимного смещения электродов на электростатические взаимодействия; получены аналитические выражения для оценки емкостей и электростатических сил с учетом взаимного смещения электродов и краевых эффектов; разработаны модели преобразователей, учитывающие краевые эффекты и взаимное влияние электрических и упругих сил, позволяющие оценивать основные параметры и проводить оптимизацию характеристик МЭМП.

**Степень использования:** результаты внедрены в учебный процесс на кафедре проектирования информационно-компьютерных систем учреждения образования “Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники в учебный курс “Датчики электронных систем безопасности”.

**Область применения:** беспроводные сенсоры, автономно-измерительные системы.

## SUMMARY

**Titov Nikita Nikolaevich**

### **Development of a technique of designing MEMS transducer of mechanical energy into electrical**

**Keywords:** MEMS transducer generator.

**Objective:** To develop and improve the theoretical foundations and mathematical models to calculate mempo characteristics, modeling dependencies of their properties from the component parameters. Creating a method of calculation and optimization of electrostatic mempo, evaluation of their performance limit.

**The results and their novelty:** Experimental and theoretical studies of the main types of mempo, allowed to identify the critical parameters that determine the performance of the converter; The mathematical models that allow a view of edge effects to assess the degree of influence of geometrical dimensions of the electrodes, electrode gap and the relative displacement of the electrodes in the electrostatic interactions; analytical expressions to evaluate the capacities and electrostatic forces, taking into account the mutual displacement of the electrodes and edge effects; developed models of converters that take into account edge effects and the mutual influence of electric and elastic forces by which to measure the main parameters and optimize mempo characteristics.

**Use level:** the results implemented in the educational process at the department of design information and computer systems educational institution "Belarusian State University of Informatics and Radio Electronics in the training course" Sensors electronic security systems "

**Scope:** wireless sensors, autonomous measuring systems.