

На правах рукописи



Кукаев Александр Сергеевич

**МУЛЬТИФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ
ЭЛЕМЕНТОВ МИКРОГИРОСКОПОВ НА ПОВЕРХНОСТНЫХ
АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ**

Специальность 05.11.03 – Приборы навигации

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2016

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)» на кафедре лазерных измерительных и навигационных систем

Научный руководитель: **Лукьянов Дмитрий Павлович**
доктор технических наук, профессор,
Заслуженный деятель науки России

Официальные оппоненты: **Лестев Александр Михайлович**
доктор физико-математических наук, профессор,
ОАО «Гирооптика»,
ведущий научный сотрудник

Беляев Яков Валерьевич,
кандидат технических наук,
Государственный научный центр Российской Федерации
АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»,
начальник НТЦ «Дизайн-центр»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем точной механики и управления Российской академии наук, (г. Саратов)

Защита состоится «14» декабря 2016 года в 16:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.238.06 на базе Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ «ЛЭТИ») по адресу: 197376, Санкт-Петербург, улица Профессора Попова, д. 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СПбГЭТУ «ЛЭТИ» и на сайте www.eltech.ru.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 197376, Санкт-Петербург, улица Профессора Попова, д. 5.

Автореферат разослан “ ___ ” _____ 2016 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.238.06
кандидат технических наук



А.А. Великосельцев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Современные микромеханические гироскопы (ММГ), построенные по технологии МЭМС (микроэлектромеханических систем), нашли широкое применение в автомобилестроении, навигационных системах военного и гражданского применения, нефтяной и газовой промышленности, спорте, медицине и других областях. Однако существует целый ряд различных применений, например, связанных с высокодинамичными подвижными объектами. Эти области пока недоступны для ММГ, поскольку требуют высокой ударопрочности (до 50 000 g), широкого динамического диапазона и малого размера. Существующие ММГ без использования амортизирующего корпусирования не обладают достаточными показателями вибро- и ударопрочности из-за наличия в их конструкции подвижных инерционных масс и упругих подвесов. Поэтому в последние годы существенно возрос интерес к твердотельным микрогироскопам (ТМГ) на поверхностных акустических волнах (ПАВ). По сравнению с традиционными ММГ, гироскопы на ПАВ обладают рядом существенных преимуществ, таких как высокая стойкость к вибрациям и ударам, простота производства, возможность организации беспроводной работы в пассивном режиме и др.

Для обеспечения требуемых характеристик ТМГ на ПАВ необходимо проведение комплексной оптимизации их конструкции. Обзор современной литературы, посвященной данной тематике, показывает, что основные усилия направлены на повышение чувствительности датчика и улучшение его динамических характеристик. С другой стороны, потребители часто решают целый спектр различных задач и в ряде случаев критическим фактором является не точность и чувствительность, а стоимость и массогабаритные характеристики сенсора. Отдельно встает проблема оценки работоспособности датчиков при сверхвысоких ускорениях и угловых скоростях. Подобные испытания крайне дороги, а иногда и вовсе невыполнимы.

Исходя из перечисленных факторов, актуальной представляется разработка методов компьютерного моделирования чувствительного элемента (ЧЭ) ТМГ на ПАВ.

При этом необходимо учитывать, что исследование процессов, протекающих в акустических датчиках, требует мультифизического (многофакторного) подхода, в котором будут одновременно воспроизводиться эффекты как механической, так и электрической, тепловой природы и др. Реализация такого метода позволит существенно ускорить этап разработки ТМГ на ПАВ, снизить его стоимость, а также оперативно адаптировать конструкцию под требования конкретного потребителя.

Цель работы – разработка метода мультифизического моделирования эффектов, происходящих в ЧЭ ТМГ на ПАВ.

Поставленная цель достигается решением **следующих задач**:

1. Обзор существующих концепций построения ТМГ на ПАВ, анализ их недостатков и направлений развития;
2. Разработка аналитической модели воздействия угловой скорости на частицы звукопровода;
3. Построение конечно-элементной модели чувствительного элемента ТМГ на ПАВ и ее расчет;
4. Оценка адекватности модели сопоставлением результатов моделирования с теоретическими и экспериментальными данными;
5. Оценка возможности применения полученной модели для оптимизации топологии чувствительного элемента ТМГ на ПАВ;
6. Минимизация времени готовности ЧЭ ТМГ на ПАВ.

Методы исследований. Решение поставленных задач основано на использовании основных положений теоретической и аналитической механики, молекулярной кинетики, акустоэлектроники, векторной и матричной алгебры, математического моделирования. Для расчета моделей чувствительных элементов ТМГ на ПАВ применяется метод конечных элементов, а для решения задачи минимизации времени готовности – натурное моделирование.

На защиту выносятся следующие научные положения:

1. Применение низкочастотных ПАВ и концентраторов внутренних напряжений увеличивает чувствительность ТМГ.

2. Полученные аналитические выражения описывают влияние ускорения Кориолиса на траекторию движения частицы звукопровода под действием угловой скорости.
3. Предложенный метод мультифизического моделирования ЧЭ ТМГ на ПАВ позволяет провести оптимизацию его топологии и оценить характеристики ТМГ на стадии проектирования.
4. Время готовности ТМГ на ПАВ определяется температурными процессами, протекающими в электрической схеме, и не зависит от температурного режима чувствительного элемента.

В процессе исследований получены **новые научные результаты:**

- Математическое описание действия силы Кориолиса на траекторию движения частицы звукопровода под действием угловой скорости;
- Метод аналитического расчета смещений инерционных масс различной формы в чувствительном элементе ТМГ на ПАВ под действием силы Кориолиса;
- Проведена оценка влияния отраженных ПАВ на поле акустической волны в резонаторе.

Практическая ценность работы:

- Построены и верифицированы конечно-элементные модели чувствительного элемента ТМГ на ПАВ, позволяющие проводить оптимизацию его конструкции;
- Проведены экспериментальные исследования, на основе которых разработан ряд рекомендаций по снижению времени готовности ТМГ на ПАВ;
- Предложен метод снижения времени протекания переходных процессов в линиях задержки и резонаторах ПАВ;

Реализация и внедрение результатов работы: Основные теоретические и практические результаты работы внедрены в учебный процесс Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) на кафедре лазерных измерительных и навигационных систем, а также использованы при проведении работ в рамках проектной части государственного задания «Разработка концепций построения микросенсоров для систем диагностики рельсового пути», проект 8.1068.2014/К.

Апробация. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на конференциях и симпозиумах, среди которых:

- Symposium on Inertial Sensors and Systems, Карлсруэ, Германия 2011
- Symposium on Piezoelectricity, Acoustic Waves, and Device Applications, Пекин, Китай, 2014
- NORCHIP, Тампере, Финляндия, 2014
- SPIE Security & Defense, Тулуза, Франция, 2015
- 22 международная конференция по интегрированным навигационным системам, ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, Россия, 2015

Публикации. Основные теоретические и практические результаты диссертации опубликованы в 24 научных работах, среди которых: 8 статей – в изданиях, рекомендованных в действующем перечне ВАК, 12 работ – в материалах и трудах международных и всероссийских научно-технических конференций, 3 патента на изобретение и 1 свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и 1 приложения, изложена на 134 страницах машинописного текста, содержит 74 рисунка и 18 таблиц, список цитированной литературы представлен 84 наименованиями.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, определяется цель и основные задачи исследований. Излагаются научная новизна и практическая значимость представляемой работы вместе с научными положениями, выносимыми на защиту.

В **первой главе** проведен обзор рынка микрогироскопов с точки зрения их применения для высокодинамичных объектов, характеризующихся перегрузками до 50 000 g и угловыми скоростями до 100 000 °/с (1745 рад/с) [1]. Отмечается, что существующие принципы построения микрогироскопов либо не обеспечивают достаточную ударопрочность (вибрационные ММГ), либо слишком велики (микрооптиче-

ские гироскопы, волновой твердотельный гироскоп и др.), либо еще находятся на стадии теоретических исследований (гироскопы на конденсатах Бозе-Эйнштейна и др.). На основе проведенного обзора делается вывод о перспективности разработки ТМГ на ПАВ.

Далее приводится анализ существующих концепций построения ТМГ на ПАВ, отмечаются их недостатки и направления развития, среди которых поиск топологии электродов, оптимальной с т.з. чувствительности датчика; уменьшение рабочей частоты, уменьшение времени готовности. Отмечается, что для повышения эффективности процесса оптимизации целесообразна разработка метода мультифизического компьютерного моделирования ЧЭ ТМГ на ПАВ. При этом формулируются следующие требования к моделям: 1) реализация режимов бегущей и стоячей ПАВ на низких частотах (20 МГц и менее), 2) учет эффекта Кориолиса одновременно с пьезоэлектрическим и другими эффектами, 3) учет анизотропии материала звукопровода, 4) возможность оценки переходных процессов в ЧЭ, 5) учет эффектов затухания ПАВ, 6) возможность оптимизации конструкции ТМГ на ПАВ.

В **Главе 2** приведено теоретическое описание эффекта Кориолиса для стоячих и бегущих ПАВ. В первой части рассматриваются классические уравнения ПАВ, распространяющейся как в неподвижном, так и во вращающемся звукопроводе. В литературе, как правило, встречается описание эффекта Кориолиса для ПАВ через формирование вторичной волны, которая интерферирует с первичной. Такое представление в ряде случаев является удобным, но является математическим приемом и не описывает реально протекающих процессов. Поэтому далее рассматривается природа эффекта Кориолиса на ПАВ с точки зрения законов механики и молекулярной кинетики.

В качестве результата теоретического анализа приводятся графики, иллюстрирующие влияние угловой скорости на траекторию движения частицы звукопровода и на профиль ПАВ для режима бегущей волны (рис. 1).

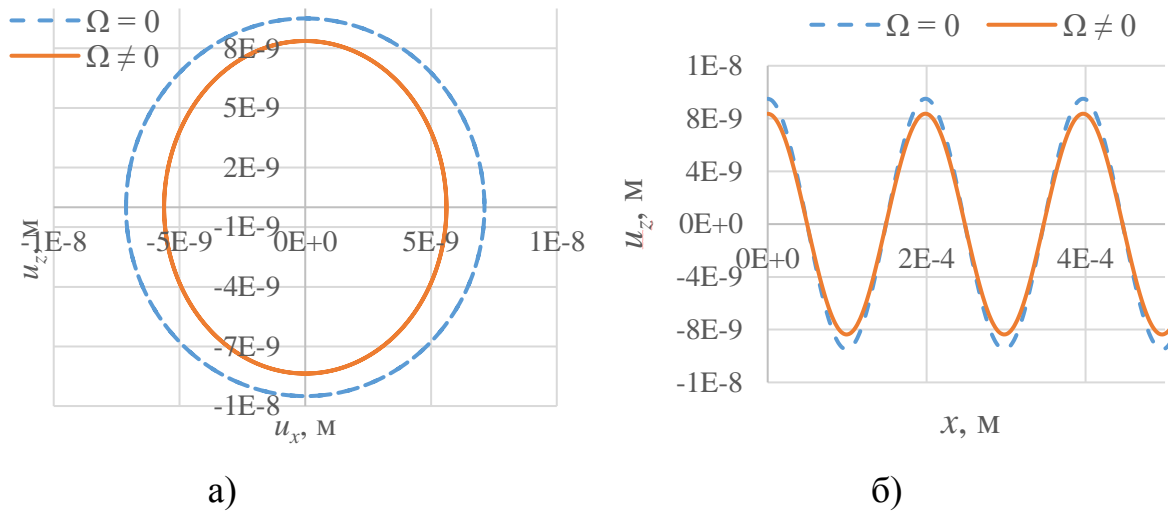


Рис. 1 – Влияние угловой скорости на траекторию движения частицы звукопровода (а) и на профиль ПАВ (б)

Показывается, что наибольшее изменение формы эллиптической траектории достигается при применении более низких частот ПАВ. При этом для частоты 20 МГц коэффициент пропорциональности составляет 10^{-16} м/(рад/с).

Далее приводится описание эффекта Кориолиса для стоячих ПАВ. ТМГ такого типа включают резонатор на ПАВ и матрицу инерционных масс (ИМ), расположенных в пучностях стоячей волны [2]. Поскольку их параметры во многом определяют эксплуатационные характеристики сенсора, в работе приводится теоретическое описание сил Кориолиса, действующих как на сами ИМ, так и на материал подложки, расположенный под ними. Показано, что наиболее выгодными с т.з. возникающих смещений являются ИМ с длиной, приближенной к апертуре ПАВ, и минимальной шириной (рис. 2).

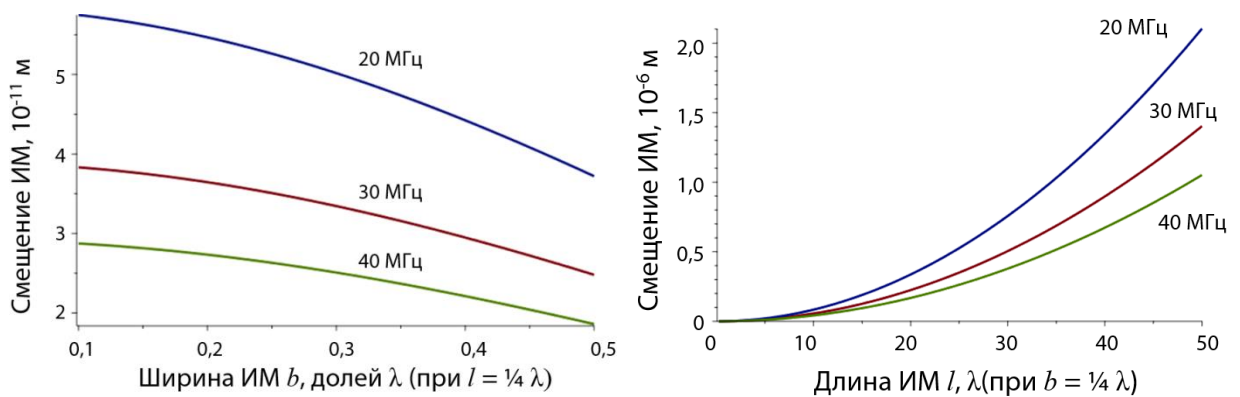


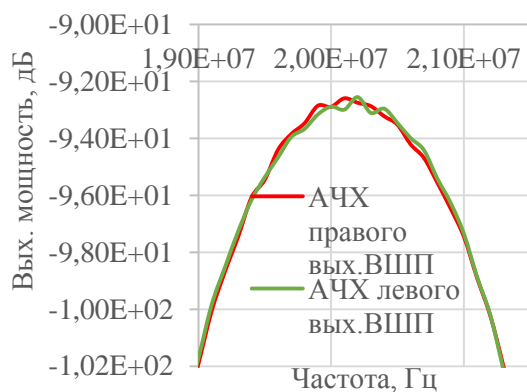
Рис. 2 – Зависимость смещений ИМ от ее геометрических размеров.

При этом, как видно из рисунка, перспективным является применение низкочастотных волн. Кроме того, дополнительно увеличить смещения ИМ можно за счет использования в их конструкции концентраторов внутренних напряжений. Однако, их теоретический расчет затруднителен и легко заменяется компьютерным моделированием, описанным в главе 4.

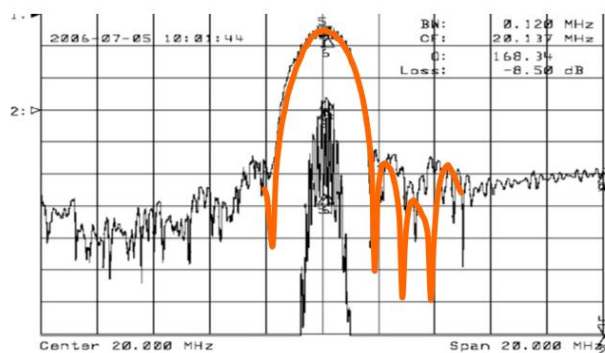
В заключительной части главы 2 рассматривается влияние ПАВ, проходящих резонатор более 1 раза, на суммарное распределение амплитуды смещений частиц. Приводятся результаты расчетов, полученные с помощью специально разработанного скрипта (листинг приводится в приложении к диссертации). Оценивается вклад компонент, прошедших резонатор от 2 до 11 раз при различных значениях коэффициента потерь. Показано, что учет отраженных компонент может представлять интерес только для высокодобротных резонаторов. При этом учет более 3 отражений не эффективен.

В первой части **Главы 3** приводится обзор существующих методов моделирования устройств на ПАВ. Отмечается, что только метод конечных элементов позволяет одновременно учитывать такие эффекты как влияние угловой скорости, механических деформаций, температуры и др.

Далее приводится описание цифровой модели двухканальной линии задержки (ЛЗ), предложенной в работе [3]. Она состоит из звукопровода, на который нанесены встречно-штыревые преобразователи (ВШП) – один двунаправленный возбуждающий и два приемных (левый и правый). Модель была построена в программе OOFELIE::Multiphysics, для нее задан материал звукопровода (анизотропный 128° YX LiNbO₃), граничные условия (закрепление наружных поверхностей, напряжение на электродах, угловая скорость) и условия моделирования. По итогам расчета получены формы амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) каждого из каналов линии задержки (рис. 3).



а)



б)

Рис. 3 – Сравнение АЧХ двух каналов ЛЗ друг с другом (а) и с экспериментальными результатами (б)

Полученные АЧХ практически совпали с экспериментальными. Как видно из рисунка, центральная частота составила порядка 20,15 МГц, а ширина полосы по уровню -3дБ равна 3,2 МГц. Экспериментальные результаты, приведенные в работе [3], показали значение центральной частоты порядка 20,137 МГц, а ширины полосы 3,3 МГц. Т.о. погрешность определения ширины полосы пропускания составляет порядка 3% и зависит, вероятно, от шага сетки и шага по частоте во время расчета. Погрешность определения центральной частоты не превышает 0,1%.

Далее была проведена оценка влияния угловой скорости на форму АЧХ, а также на траекторию движения частицы звукопровода (рис. 4). Как видно, наличие угловой скорости приводит к изменению уровня потерь в ЛЗ. При этом величина коэффициента пропорциональности крайне мала (менее 10^{-6} дБ/(рад/с)). Следовательно, оценивать угловую скорость по изменению уровня сигнала на выходе ЛЗ нецелесообразно. Оценка же траектории движения показывает, что эффект проявляется сильнее, чем было предсказано в теории (рис. 1(а) и рис. 4(б)). Значение коэффициента пропорциональности оказалось в два раза больше: $2 \cdot 10^{-6}$ м/(рад/с).

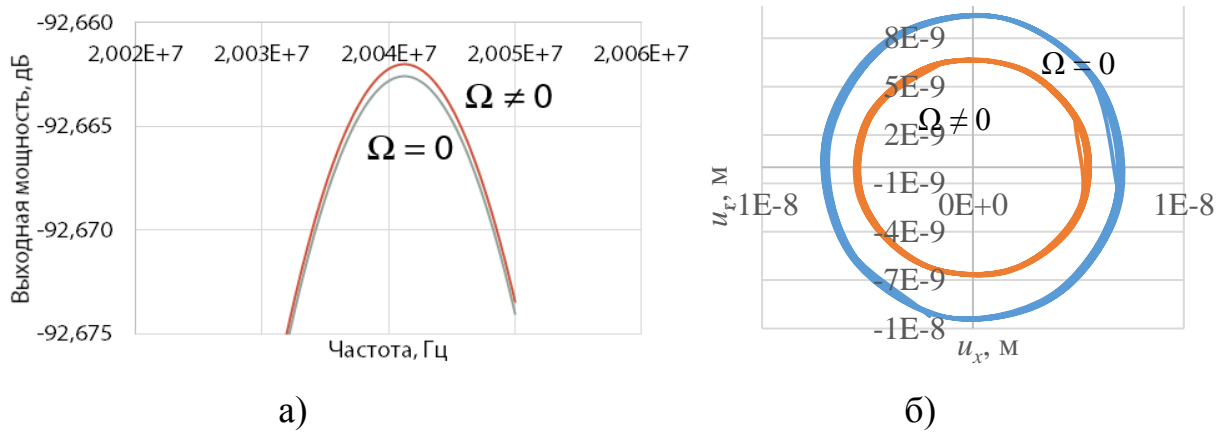


Рис. 4 – Результаты моделирования влияния угловой скорости на АЧХ линии задержки (а) и на траекторию движения частицы звукопровода (б)

Такие различия могут быть связаны с тем, что модель является мультифизической, и в ней учтено большее число одновременно действующих факторов, чем в теории. В частности, одним из таких факторов является центростремительное ускорение. Величина коэффициента пропорциональности является крайне малой, что, с одной стороны, подтверждает теоретически предсказанное изменение амплитуды волны (рис. 1(б)), с другой – показывает, что оно пренебрежимо мало и не пригодно для непосредственного измерения. Более перспективным является включение ЛЗ в контур автогенератора и измерение сдвига частоты, возникающего при нарушении баланса амплитуд и фаз.

Отдельному исследованию подверглись переходные процессы в каждом из каналов ЛЗ. Характер их протекания показан на рис. 5.

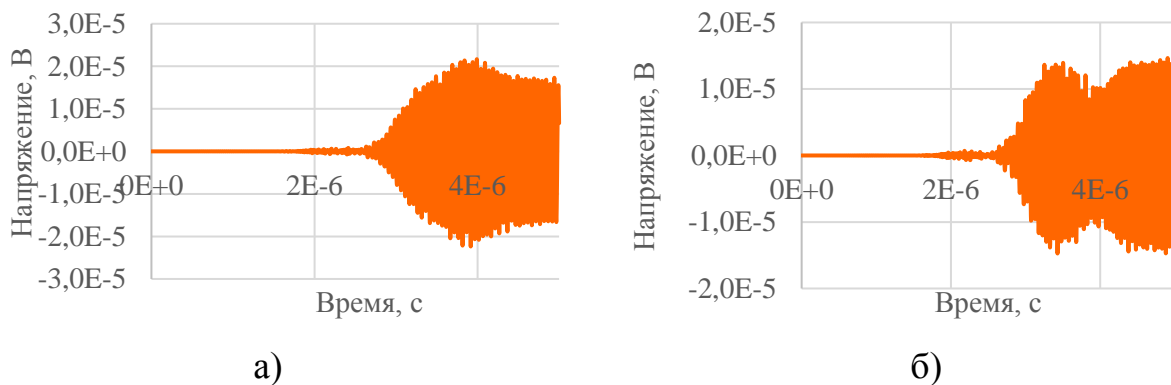


Рис. 5 – Переходные процессы в двухканальной ЛЗ для левого ВШП (а) и для правого ВШП (б).

Как видно, для обоих каналов величина времени задержки составила порядка 2,5 мкс, что совпадает с теоретическим значением. Время протекания переходного процесса составляет порядка 1 мкс, что в сумме определяет время готовности такой ЛЗ как 3,5 мкс. Различия в форме наблюдаемых характеристик вызваны наличием отражений от границ звукопровода, расположенных непосредственно за приемным ВШП, и последующей интерференцией отраженных компонент с первичной волной.

Последующая часть главы 3 посвящена моделированию процессов, происходящих в ЧЭ ТМГ на стоячих ПАВ. Большой интерес представляет расчет концентраторов внутренних напряжений. В работе приводятся результаты оценки эффективности их применения в конструкции ИМ. В частности, рассматривается возможность изменения углов φ и θ (рис. 6(а, б)) и их влияние на величину смещений ИМ (рис. 6(в, г)).

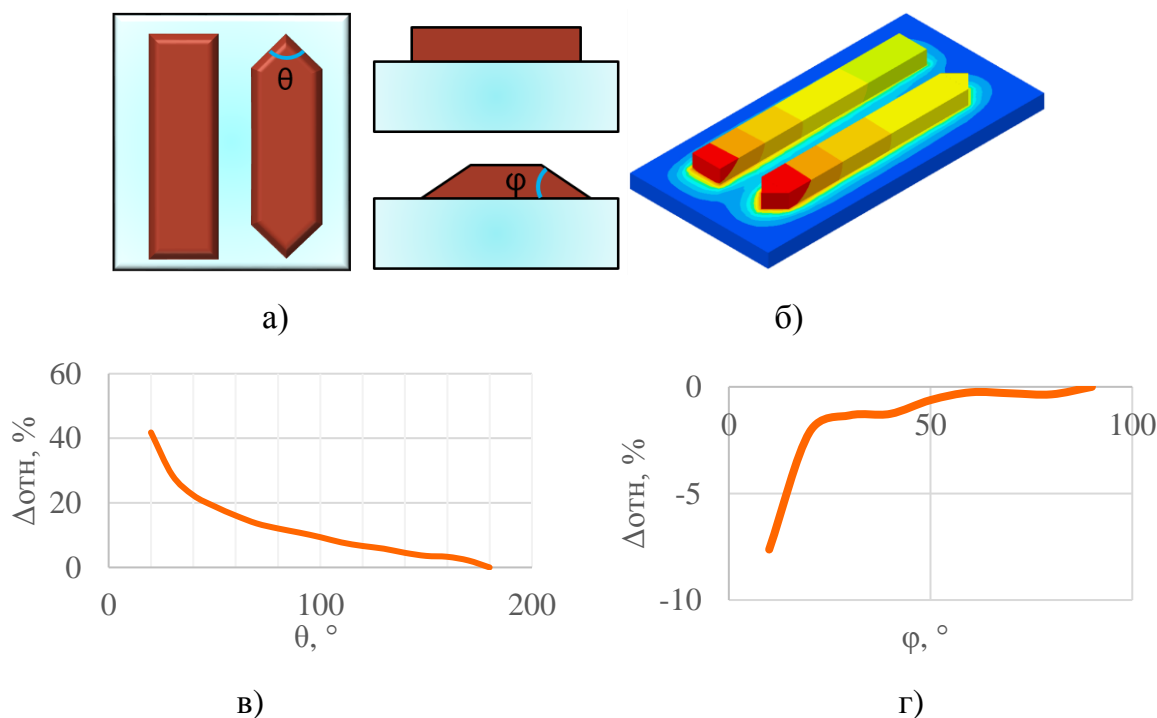


Рис. 6 – Варианты концентраторов напряжений (а), пример их модели (б), и зависимость смещений ИМ от углов φ и θ (в, г).

Приведенные кривые показывают, что уменьшение угла θ приведет к увеличению смещений на 40–45 %. Уменьшение угла φ приводит к незначительному отрицательному эффекту. Последнее, вероятно, связано с уменьшением массы, которое недостаточно компенсируется концентрацией напряжений.

Дополнительно приводятся результаты, демонстрирующие возможность реализации в моделях режима стоячей ПАВ, а также эффектов затухания волн за счет материального демпфирования. Таким образом, построенные модели в полной мере удовлетворяют перечню требований, сформулированному в Главе 1. Нерешенным остается вопрос оценки времени готовности ТМГ в целом. Это связано с тем, что протекание переходных процессов зависит от изменения температуры как ЧЭ, так и элементов окружающей его электрической схемы. Поэтому для решения поставленной задачи выбрано натурное моделирование, результаты которого описываются далее.

В **Главе 4** исследовались автогенераторы с ЛЗ в цепи положительной обратной связи. Было изготовлено 2 макета: на основе открытой ЛЗ с потерями порядка 40 дБ, и с корпусированной ЛЗ с потерями менее 8 дБ. Низкий уровень потерь во второй ЛЗ позволил использовать меньшее питающее напряжение и величину токов по сравнению с макетом с открытой ЛЗ. Для обоих макетов с помощью тепловизора было получено пространственно-временное распределение температур элементов электрической схемы (рис. 7).

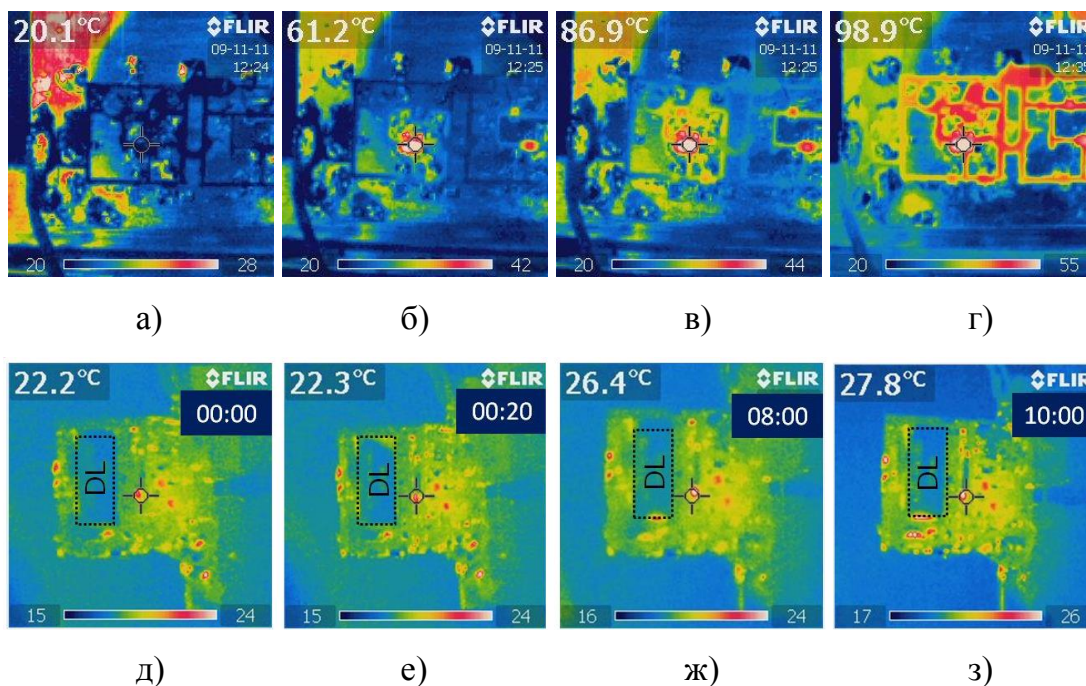


Рис. 7 – Распределение температур элементов электрической схемы макета с открытой (а–г) и корпусированной ЛЗ (д–з)

Наиболее термоактивным элементом в обоих случаях оказался транзистор усилительного каскада. Его температура отмечена в левом верхнем углу каждой термограммы. Как видно, макет с открытой ЛЗ испытывает значительно больший нагрев (на 80 °С), чем макет с корпусированной ЛЗ (около 6 °С).

Данные об изменении температуры транзистора в макете с открытой ЛЗ представлены на рис. 8(а) совместно с зависимостью частоты выходного сигнала от времени.

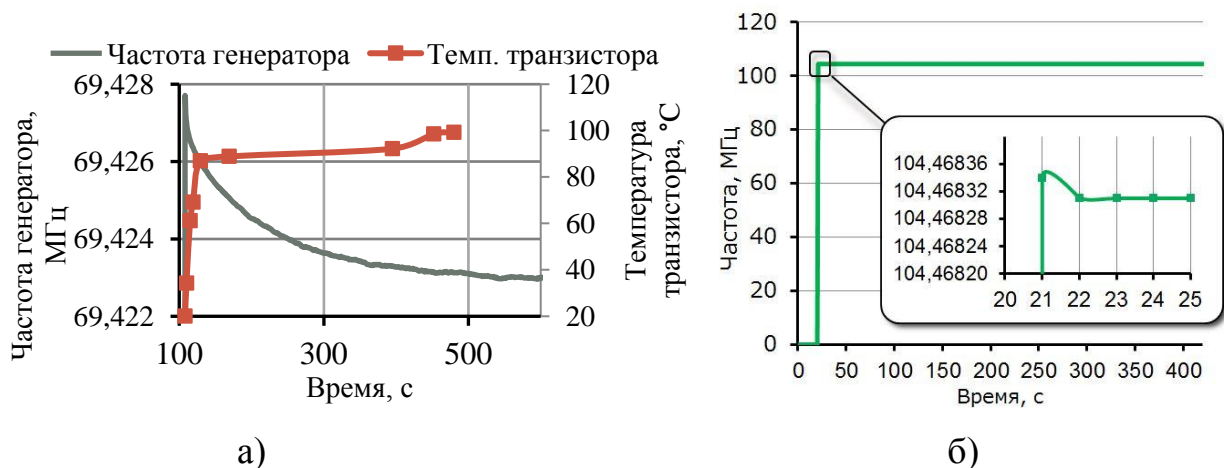


Рис. 8 – Характер выхода на рабочий режим макета ТМГ на ПАВ с открытой (а) и корпусированной (б) линиями задержки

В результате время готовности макета с открытой ЛЗ составило порядка 500 с, в то время как для макета с корпусированной ЛЗ эта величина составила менее 1 с (рис. 8(б)), что на 2 порядка меньше, чем в зарубежных источниках [4]. При этом нагрев подложки открытой ЛЗ оказался незначительным. Полученные данные позволяют сформулировать требования, которые следует предъявлять к датчикам на ПАВ на этапе их разработки с целью минимизации времени готовности: 1) изготовление ЛЗ из термостабильных материалов, 2) минимальный уровень собственных потерь в ЛЗ, 3) применение слаботочных элементов в электрической схеме датчика, 4) обеспечение эффективного отвода тепла от элементов схемы.

В последнем разделе Главы 4 приводятся рассуждения о возможности достижения предельного времени готовности за счет организации связанных колебательных контуров. Сделать это возможно за счет нанесения дополнительной металлизации на

обратную сторону звукопровода. Приводятся расчеты, демонстрирующие возможность снижения времени готовности ТМГ на ПАВ на 30 % благодаря применению предложенного метода.

В заключении приведены основные результаты работы:

1. На сегодняшний день актуальной является разработка ТМГ на ПАВ для систем навигации, ориентации и стабилизации высокодинамичных объектов, испытывающих перегрузки до 50 000 g и обладающих угловыми скоростями до 100 000 °/с. При этом основными тенденциями развития ТМГ на ПАВ являются повышение чувствительности, снижение рабочей частоты, уменьшение времени готовности.

2. Влияние силы Кориолиса приводит к расширению эллиптической траектории движения частиц звукопровода. Возникающее при этом изменение амплитуды волны является слишком малым для непосредственного использования в качестве информативного сигнала.

3. Выработаны критерии оптимизации формы и материала ИМ, применяемых в ТМГ на стоячих ПАВ. Рассчитаны оптимальные формы концентраторов внутренних напряжений, применение которых позволит увеличить чувствительность ТМГ на стоячих ПАВ. Показана перспективность снижения рабочей частоты датчиков как на стоячих, так и на бегущих ПАВ.

4. Проведена оценка влияния ПАВ, проходящих резонатор более 1 раза на результирующее поле стоячей волны. Показано, что даже при высоких показателях добротности учет более чем 3–4 проходов нецелесообразен.

5. Построена и исследована конечно-элементная модель двухканальной линии задержки на ПАВ в качестве ЧЭ микрогироскопа. Полученные результаты согласуются как с теоретическими, так и экспериментальными данными и позволяют проводить оптимизацию конструкции ТМГ по различным критериям (увеличение чувствительности, снижение габаритов и стоимости, и т.п.). Показана возможность оценки переходных процессов, а также затухания ПАВ за счет материального демпфирования в разработанной модели.

6. Основным фактором, определяющим время готовности ТМГ на ПАВ, является разогрев элементов электрической схемы. Нагрев линии задержки носит второстепенный характер.

7. Применение схем со связанными колебательными контурами позволит достичь минимального времени протекания переходных процессов в ЧЭ ТМГ.

Цитируемая литература

1. Precise Robust Inertial Guidance for Munitions (PRIGM): Advanced Inertial Micro Sensors (AIMS), Microsystems Technology Office, DARPA-BAA-15-38, May 29, 2015
2. Kurosawa M. et al. A surface acoustic wave gyro // *Transducers* (1997), pp. 863-866;
3. Xu F. et al. Optimization of Surface Acoustic Wave-Based Rate Sensors // *Sensors*. – 2015. – Т. 15. – №. 10. – С. 25761-25773.
4. A micro rate gyroscope based on the SAW gyroscopic effect. S. W. Lee, J. W. Rhim, S. W. Park, S. S. Yang // *J. Micromech. Microeng.* 2007. № 17. P 2272–2279;

ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в изданиях, включенных в перечень ВАК:

- 1) Lukyanov D. et al. State of the art and prospects for the development of SAW-based solid-state gyros // *Gyroscopy and Navigation*. – 2011. – Т. 2. – №. 4. – С. 214-221.
- 2) Лукьянов Д.П., Шевченко С.Ю., Кукаев А.С., Сафронов Д.В. Анализ концепций построения твердотельных микрогироскопов на поверхностных акустических волнах // *Нано- и микросистемная техника* №7, 2011 с. 24-28;
- 3) Лукьянов Д.П. и др. Современное состояние и перспективы развития твердотельных микрогироскопов на поверхностных акустических волнах // *Гироскопия и навигация*. – 2011. – №. 3. – С. 75-87.
- 4) Лукьянов Д.П. и др. Микрогироскопы для высокодинамичных объектов // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. – 2012. – №. 6.
- 5) Lukyanov D. et al. Comment on «Wireless and Passive Gyroscope based on Surface Acoustic Wave Gyroscopic Effect» // *Applied Physics Express*. – 2012. – Т. 5. – №. 10. – С. 109101.

- 6) Лукьянов Д.П., Шевченко С.Ю., Кукаев А.С., Филиппова Е.П. Оценка возможностей пакета OOFELIE::Multiphysics для моделирования инерциальных датчиков на поверхностных акустических волнах // Известия «ЛЭТИ» №4, 2014, с.62–67.
- 7) Lukyanov D., Shevchenko S., Kukaev A. Micro rate gyros for highly dynamic objects //Microsystem Technologies. – 2014. – Т. 20. – №. 12. – С. 2137-2146.
- 8) Д.П. Лукьянов, С.Ю. Шевченко, А.С. Кукаев, Р.К. Теличкин. О возможности построения пассивного беспроводного микрогироскопа // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ» №9, 2015, с.80–84.

Патенты, свидетельство о регистрации программы:

- 9) Патент РФ на изобретение № 119468 "Микрогироскоп на поверхностных акустических волнах"/ А.С. Кукаев, Д.П. Лукьянов, А.Н. Перегудов, С.Ю. Шевченко, М.М. Шевелько. Бюл. № 23 от 20.08.2012.
- 10) Патент РФ на изобретение № 127474 "Микрогироскоп на поверхностных акустических волнах"/ Д.П. Лукьянов, А.Н. Перегудов, А.С. Кукаев, С.Ю. Шевченко, М.М. Шевелько. Бюл. № 12 от 27.04.2013.
- 11) Патент РФ на изобретение № 137098 "Микрогироскоп на поверхностных акустических волнах"/ Д.П. Лукьянов, А.Н. Перегудов, А.С. Кукаев, С.Ю. Шевченко, М.М. Шевелько. Бюл. № 3 от 27.01.2014.
- 12) Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015613224 «Сбор и обработка данных с мультиметра GDM-8246 (GDM8246-Lab)» от 10.03.2015.

Публикации в других изданиях:

- 13) Лукьянов Д.П., Шевченко С.Ю., Кукаев А.С., Сафронов Д.В. Анализ возможностей повышения температурной стабильности дифференциальных частотных преобразователей // Известия «ЛЭТИ», №7 2009, СПб.: Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2009 С.51–62;
- 14) Кукаев А.С., Сафронов Д.В., Шевченко С.Ю. Разработка и исследование твердотельного микрогироскопа на линии задержки ПАВ // 63я научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава университета: сборник докладов студентов, аспирантов и молодых ученых, СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2010. С.207–214.
- 15) Кукаев А.С., Сафронов Д.В., Шевченко С.Ю. Уменьшение времени готовности молекулярных твердотельных микрогироскопов на поверхностных акустических волнах // Навигация и управление движением: Материалы докладов XII конференции молодых

- ученых «Навигация и управление движением»/ под ред. В.Г. Пешехонова. – СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн ЦНИИ Электроприбор», 2010. С.385–392;
- 16) Лукьянов Д.П. и др. Современное состояние и перспективы развития твердотельных микрогироскопов на ПАВ // Материалы докладов 18 МКИНС – СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн ЦНИИ Электроприбор», 2011. С.31–40;
 - 17) Lukyanov D. et al. State of the Art and Prospects for the Development of SAW-based Solid-State Gyros, Proc. of Inertial Sensors and Systems – 2011, Karlsruhe, Germany pp. 5.1 – 5.20.
 - 18) Лукьянов Д.П. и др. Моделирование чувствительных элементов ММА и ММГ на ПАВ в программе ANSYS // 65я научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава университета: сборник докладов студентов, аспирантов и молодых ученых, СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2012. С.192–195.
 - 19) Кукаев А.С., Лукьянов Д.П., Филиппова Е.П., Шевченко С.Ю. Твердотельные микрогироскопы на поверхностных акустических волнах // Сборник докладов VI Научно-технической конференции молодых специалистов по радиоэлектронике. ОАО «Авангард» – СПб.: «Аграф +», 2013. С.54-63.
 - 20) Шевченко С.Ю., Кукаев А.С., Сафронов Д.В., Филиппова Е.П. Пассивный беспроводной микрогироскоп на поверхностных акустических волнах за рубежом и в России // Навигация и управление движением. Материалы XV конференции молодых ученых «Навигация и управление движением» / под общ. ред. Академика РАН В.Г. Пешехонова. – СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн ЦНИИ Электроприбор», 2013 с.416–421;
 - 21) Lukyanov D., Shevchenko S., Kukaev A. Micro rate gyroscopes based on surface acoustic waves // Piezoelectricity, Acoustic Waves, and Device Applications (SPAWDA), 2014 Symposium on. – IEEE, 2014. – С. 14-17.
 - 22) Lukyanov D. et al. Micro rate gyroscopes based on surface acoustic waves // NORCHIP, 2014. – IEEE, 2014. – С. 1-4.
 - 23) Lukyanov D., Shevchenko S., Kukaev A. Multiphysical simulation of a surface acoustic wave gyroscope // Proc. of 22nd ICINS, 2015. p. 283 – 286.
 - 24) Lukyanov D. et al. Unattended and remote inertial sensors on surface acoustic waves // SPIE Security+ Defence. – International Society for Optics and Photonics, 2015. – С. 96470A-96470A-8.