

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

Школа Неразрушающего контроля и безопасности  
Направление подготовки 12.04.01 Приборостроение  
Отделение школы Электронной инженерии

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

Тема работы
<b>Микроэлектромеханические сенсоры</b>

УДК 681.586:004.94

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1БМ6В	Шагдыров Батор Ильич		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЭИ ИШНКБ	Нестеренко Тамара Георгиевна	к.т.н., доцент		

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГТ ШБИП	Данков Артем Георгиевич	к.и.н., доцент		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОКД ИШНКБ	Анищенко Юлия Владимировна	к.т.н.		

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЭИ ИШНКБ	Нестеренко Тамара Георгиевна	к.т.н., доцент		

## 12.04.01 ПРИБОРОСТРОЕНИЕ (магистры)

### Планируемые результаты обучения

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
P1	<b>Способность</b> совершенствовать и повышать свой интеллектуальный и общекультурный уровень и специальные знания в области математических, естественных, гуманитарных и экономических наук в комплексной инженерной деятельности на основе целостной системы научных знаний об окружающем мире;
P2	<b>Способность</b> адаптироваться к новым ситуациям, переоценивать накопленный опыт, анализировать свои возможности в понимании сущности и значения информации в развитии современного общества, владение основными методами, способами и средствами получения, хранения, переработки информации; использование для решения коммуникативных задач современных технических средств и информационных технологий в профессиональной области.
P3	<b>Способность</b> использовать на практике умения и навыки в организации исследовательских и проектных работ, в управлении коллективом; эффективно работать индивидуально и в качестве члена команды, демонстрируя навыки руководства отдельными группами исполнителей; в том числе над междисциплинарными проектами, уметь проявлять личную ответственность, приверженность профессиональной этике и нормам ведения профессиональной деятельности.
P4	<b>Способность</b> к самостоятельному обучению новым методам исследования, к изменению научного и научно-производственного профиля своей профессиональной деятельности; разрабатывать самостоятельно техническую документацию; четко излагать и защищать результаты комплексной инженерной деятельности в областях контроля качества продукции предприятий измерительной техники и точного приборостроения; приобретать с помощью информационных технологий и использовать в практической деятельности умения непосредственно не связанных со сферой деятельности.
P5	<b>Умение</b> использовать основные законы естественнонаучных дисциплин, методы математического анализа и моделирования, основы теоретического и экспериментального исследования в комплексной инженерной деятельности при разработке средств измерения и контроля, используя стандартные пакеты и средства автоматизированного проектирования в приборостроении..
P6	<b>Умение</b> профессионально эксплуатировать современное оборудование и приборы в соответствии с целями магистерской программы, организовывать технологическую подготовку производства приборных систем различного назначения и принципа действия, разрабатывать и внедрять новые технологические процессы с использованием гибких САПР и оценивать их экономическую эффективность и инновационные риски при их внедрении.
P7	<b>Способность</b> проектировать приборные системы и технологические процессы с использованием средств САПР и опыта разработки конкурентоспособных изделий; осуществлять проектную деятельность в профессиональной сфере на основе системного подхода.
P8	<b>Умение</b> разрабатывать методики проведения теоретических и экспериментальных исследований по анализу, синтезу и оптимизации методов измерения контроля и диагностики, используемых в приборостроении; способность разработать и проводить оптимизацию натурных экспериментальных исследований приборных систем с учётом критериев надёжности; использовать результаты научно-исследовательской деятельности и пользоваться правами на объекты интеллектуальной собственности.
P9	<b>Умение</b> организовывать современное метрологическое обеспечение технологических процессов производства приборных систем и разрабатывать новые методы контроля качества выпускаемой продукции и технологических процессов; решать экономические и организационные задачи технологической подготовки приборных систем и выбирать системы обеспечения экологической безопасности в производстве и при технологическом контроле.
P10	<b>Способность</b> проектировать математические модели анализа и оптимизации объектов исследования, выбирать численные методы их моделирования или разработать новый алгоритм решения задачи; выбирать оптимальные методы и программы экспериментальных исследований и испытаний, проводить измерения с выбором современных технических средств и обработкой результатов измерений.
P11	<b>Способность</b> формулировать цели, определять задачи, выбирать методы исследования в области приборостроения на основе подбора и изучения литературных и патентных и других источников; разрабатывать методические и нормативные документы, техническую документацию на объекты приборостроения, а также осуществлять системные мероприятия по реализации разработанных проектов и программ; составлять научно-технические отчеты, обзоры, публикации по результатам исследовательской деятельности

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

Школа Неразрушающего контроля и безопасности  
Направление подготовки (специальность) 12.04.01 Приборостроение  
Отделение школы (НОЦ) Электронной инженерии

УТВЕРЖДАЮ:  
Руководитель ООП

\_\_\_\_\_  
(Подпись)      (Дата)      (Ф.И.О.)

**ЗАДАНИЕ**  
**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

Магистерской диссертации
--------------------------

Студенту:

Группа	ФИО
1БМ6В	Шагдырову Батору Ильичу

Тема работы:

Микромеханические сенсоры	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	18.11.2016, 10020/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:

--	--

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

**Исходные данные к работе**

*(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).*

- диапазон измерения угловой скорости:  $\pm 300^\circ/\text{с}$ ;
- диапазон рабочих температур:  $(-40\dots+85)^\circ\text{C}$ ;
- время включения:  $< 0,2$  сек;
- полоса пропускания не менее: 40 Гц;
- напряжение питания:  $\pm 5$  В;
- стойкость к вибрации: 5g в полосе частот (20...2000) Гц.
- габариты ЧЭ ММГ не более: (2x2x2) мм;
- Вес ЧЭ не более: 1 г;
- область применения – беспилотные транспортные средства.

<p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b></p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– анализ литературы по теме работы;</li> <li>– разработка функциональной схемы гироскопа;</li> <li>– разработка конструкции гироскопа;</li> <li>– составление математической модели гироскопа;</li> <li>– математическое моделирование;</li> <li>– расчет собственных частот;</li> <li>– расчет емкостей гребенчатых структур;</li> <li>– финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение;</li> <li>– социальная ответственность.</li> </ul>
<p><b>Перечень графического материала</b></p> <p><i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– чертеж общего вида микромеханического гироскопа;</li> <li>– кинематическая функциональная схема.</li> </ul>
<p><b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b></p> <p><i>(с указанием разделов)</i></p>	
<p style="text-align: center;"><b>Раздел</b></p>	<p style="text-align: center;"><b>Консультант</b></p>
<p>Социальная ответственность</p>	<p>Анищенко Юлия Александровна</p>
<p>Ресурсоэффективность и финансовый менеджмент</p>	<p>Данков Артем Георгиевич</p>
<p>На иностранном языке (Английский язык)</p>	<p>Квашина Ольга Сергеевна</p>
<p><b>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</b></p>	
<p>1. Обзор микроэлектромеханических сенсоров.</p>	

<p><b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b></p>	
--	--

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
<p>Доцент отделения электронной инженерии</p>	<p>Нестеренко Тамара Георгиевна</p>	<p>кандидат технических наук, доцент</p>		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
<p>1БМ6В</p>	<p>Шагдыров Батор Ильич</p>		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И  
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
1БМ6В	Шагдыров Батор Ильич

<b>Школа</b>	<b>Неразрушающего контроля и безопасности</b>	<b>Отделение школы (НОЦ)</b>	<b>Электронной инженерии</b>
<b>Уровень образования</b>	<b>Магистратура</b>	<b>Направление/специальность</b>	<b>Приборостроение</b>

**Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:**

<p>1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i></p>	<p><i>Работа с информацией, представленной в российских и иностранных научных публикациях, аналитических материалах, статистических бюллетенях и изданиях, нормативно-правовых документах.</i></p>
<p>2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i></p>	
<p>3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i></p>	

**Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:**

<p>1. <i>Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ</i></p>	<p><i>Определение потенциальных потребителей, результатов исследования; анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения и SWOT-анализ, проведена оценка готовности проекта к коммерциализации.</i></p>
<p>2. <i>Разработка устава научно-технического проекта</i></p>	<p><i>Определены цели и результат проекта, организационная структура проекта и ограничения и допущения.</i></p>
<p>3. <i>Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок</i></p>	<p><i>Определена иерархическая структура работ проекта, контрольные события и план проекта, диаграмма занятости и диаграмма Ганта, бюджет, матрица ответственности, план управления коммуникациями и реестр рисков проекта.</i></p>
<p>4. <i>Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности</i></p>	<p><i>Проведена оценка социальной и сравнительной эффективности исследования.</i></p>

**Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):**

<p>1. <i>«Портрет» потребителя результатов НТИ</i></p> <p>2. <i>Сегментирование рынка</i></p> <p>3. <i>Оценка конкурентоспособности технических решений</i></p> <p>4. <i>Диаграмма FAST</i></p> <p>5. <i>Матрица SWOT</i></p> <p>6. <i>График проведения и бюджет НТИ</i></p>
---

7. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НТИ

8. Потенциальные риски

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент отделения социально- гуманитарных наук	Данков Артем Георгиевич	Кандидат исторических наук, доцент		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1БМ6В	Шагдыров Батор Ильич		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

**Студенту:**

Группа	ФИО
1БМ6В	Шагдыров Батор Ильич

Школа	ИШНКБ	Отделение школы (НОЦ)	Электронной инженерии
Уровень образования	Магистр	<b>Контроля и диагностики</b>	Приборостроение

<b>Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:</b>	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Объектом исследования является проектирование микромеханического гироскопа с расширенной полосой пропускания, исследования проводились в компьютерной аудитории кафедры точного приборостроения, с использованием лицензионного программного продукта T-Flex CAD 3D и T-Flex Анализ.
<b>Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:</b>	
1. Производственная безопасность 1.1 Анализ выявленных опасных факторов проектируемой произведённой среды в следующей последовательности	<b>Вредные факторы:</b> - повышенная доза электромагнитных излучений; - недостаточная освещенность рабочего места; - отклонения показателей микроклимата от нормы. <b>Опасные факторы:</b> - электрический ток (источник – ПЭВМ).
2. Экологическая безопасность	Возможно воздействие на литосферу в результате образования отходов при поломке предметов вычислительной техники.
3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях	На объекте возможны следующие ЧС: - техногенного характера – пожар; - стихийного характера – землетрясение. Наиболее типичная ЧС – пожар.
4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	Рабочее место при выполнении работ в положении сидя должно соответствовать требованиям ГОСТ 12.2.032-78. Требования к организации оборудования рабочих мест с ПЭВМ регулируется в СанПин 2.2.2/2.4.1340 – 03.

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	
---	--

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень,	Подпись	Дата
Доцент отделения контроля и диагностики	Анищенко Юлия Владимировна	кандидат технических наук		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1БМ6В	Шагдыров Батор Ильич		

## РЕФЕРАТ

Магистерская диссертационная работа 119 страниц, 33 рисунков, 16 - таблиц, 18 - источников, 3 - приложения.

Ключевые слова: микромеханический гироскоп, полоса пропускания, инерционная масса, упругий подвес (торсион), инерционная масса, гребенчатые структуры, МЭМС.

Объектом исследования является микромеханический гироскоп.

Цель работы – разработка микромеханического гироскопа, с расширенной полосой пропускания.

В процессе исследования проводилась разработка функциональной схемы и составление математической модели гироскопа, проводился частотный и статический анализ конструкции, расчет основных параметров, рассмотрены вопросы технологии, социальной ответственности и финансового менеджмента.

В результате исследования разработана конструкция однокомпонентного микромеханического гироскопа, с расширенной полосой пропускания.

Степень внедрения: были проведены теоретические исследования и разработана конструкция микромеханического датчика с увеличением полосы пропускания.

Область применения: автомобильная промышленность.

Значимость работы состоит в том, что данное конструкторское решение, позволит микромеханическому гироскопу более устойчиво работать, на большем диапазоне частот.

В будущем планируется изготовить экспериментальный макет разработки и проверить на практике характеристики полученные теоретическим путем.



## ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ, СОКРАЩЕНИЯ

В данной работе применены следующие сокращения:

МЭМС – микроэлектромеханические системы

ММГ – микромеханический гироскоп

ИТ – инерционное тело

ЧЭ – чувствительный элемент

ПЭВМ – персональная электронно-вычислительная машина

РД – режим движения

РЧ – режим чувствительности

ПП – полоса пропускания

MMG – micromechanical gyroscope

SE - sensing element

## НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ

В настоящей работе использованы ссылки на следующие стандарты:

ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования.

СанПиН 2.2.2/2.4.1340–03. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы».

ГОСТ 12.0.003-74. ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация

СанПиН 2.2.4.1191–03. Электромагнитные поля в производственных условиях.

ГОСТ 12.1.005-88. ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны

## ОГЛАВЛЕНИЕ С.

<b>Введение</b> .....	13
1. Обзор микроэлектромеханических сенсоров. ....	14
1.1. Микромеханические системы .....	14
1.3. Классификация МЭМС датчиков .....	21
1.4 . Основная информация о гироскопах. ....	24
1.5. Микромеханические гироскопы, принцип работы .....	25
1.6. Классификация микромеханических гироскопов. ....	27
1.7. Микромеханические гироскопы LL – типа. ....	30
1.8. Полоса пропускания, способы увеличения. ....	31
<b>2 Математическая модель</b> .....	34
2.1. Функциональная схема .....	34
2.2. Составление математической модели .....	36
<b>3. Разработка конструкции и математическое моделирование</b> .....	41
3.1. Проведение частотного анализа конструкции .....	41
3.2. Определение коэффициентов жесткости упругих подвесов .....	45
3.3. Расчет суммарной ёмкости гребенчатых структур .....	48
3.4 Анализ зависимостей собственных частот ММГ .....	50
4. Вопросы технологии.....	55
4.1. Анализ материала .....	55
4.2. Технологический процесс травления .....	56
4.3. Технологический процесс изготовления МЭМС-датчика.....	59
4.4. Технологический процесс сборки.....	60
5. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение .....	63
5.1. Предпроектный анализ .....	63
5.2. Инициация проекта.....	66

5.3. Планирование управления научно-техническим проектом .....	67
5.4. Определение ресурсной, финансовой эффективности исследования .....	72
6. Социальная ответственность.....	75
6.1. Профессиональная социальная безопасность .....	75
6.2. Экологическая безопасность.....	79
<b>Заключение</b> .....	<b>82</b>
Список публикаций .....	83
Список используемых источников .....	85
Приложение А.....	87
Приложение Б (таблицы).....	107
Приложение В (иерархическая структура проекта).....	119

## **Введение**

Микромеханический гироскоп (ММГ) служит для измерения угловой скорости, представляет собой интегрированное устройство с размерами в несколько миллиметров, как правило состоит из механического чувствительного элемента (ЧЭ) и электронных систем управления. Главными достоинствами такого датчика являются малые массы, малые размеры, и низкая себестоимость при массовом производстве.

МЭМС-датчики, как правило, имеют интегрированную электронику обработки сигнала и не имеют движущихся частей. За счет этого и обеспечивается их высокая надежность и способность обеспечивать стабильные показания в жестких условиях окружающей среды (перепады температур, удары, влажность, вибрация, электромагнитные и высокочастотные помехи).

МЭМС-датчики нашли применение в таких областях как управление движением объектов (автомобили, авиация, ракеты), в системах навигации, в машиностроении и измерительной технике, в геологоразведочной аппаратуре, робототехнике. В процессе расширения областей применения микромеханических датчиков возникали проблемы с их использованием. Это было связано с тем, что при работе в реальных условиях (вибрации, удары, акустические воздействия, изменения температуры) характеристики датчиков существенно изменялись.

В ходе данной работы будет разработана конструкция МЭМС-датчика (гироскопа), посредством которой будет увеличен один из параметров работы микромеханического гироскопа как ширина полосы пропускания.

## 1. Обзор микроэлектромеханических сенсоров.

### 1.1. Микромеханические системы

Микроэлектромеханические системы (МЭМС) – это системы, включающие в себя взаимосвязанные механические и электрические компоненты микронных размеров. С помощью соединения процессов производства интегральной схем (чипа) и процессов микрообработки (micromachining), получаются МЭМС.

Микроэлектромеханические системы состоят из механических элементов, датчиков, электроники, приводов и устройств микроэлектроники, расположенных на общей кремниевой подложке. Общая структурная схема МЭМС приведена на рисунке 1.1.

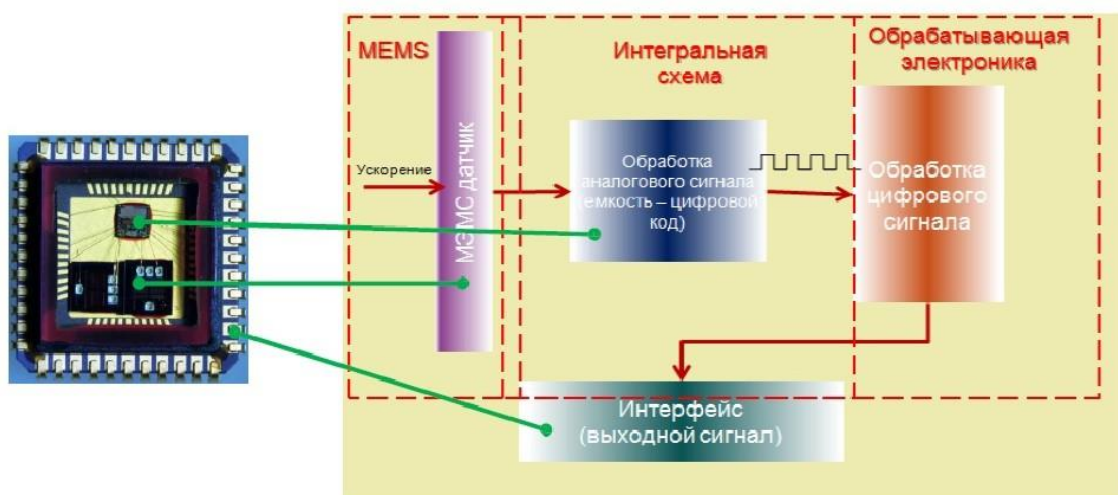


Рисунок 1.1 – Структурная схема МЭМС и приборная реализация МЭМС с указанием ее структурных элементов (чувствительный элемент - датчик МЭМС; операционный усилитель аналогового сигнала и аналого-цифровой преобразователь- интегральная схема; обработка цифрового сигнала- микроконтроллер).

К МЭМС относят системы, размеры которых лежат в пределах от долей микрометра до одного миллиметра. Важно, что существует совместимость технологии микросистемной техники с технологией микроэлектроники. Для изготовления МЭМС применяются те же технологии, что и для изготовления традиционных интегральных микросхем, дополняя последние механическими элементами, такими как микробалки, шестерни, диафрагмы, пружины. Несмотря на

то, что изначально основным материалом для изготовления МЭМС был кремний, со временем стали использоваться другие полупроводниковые материалы, ферроэлектрики, керамики и полимерные материалы.

На основе МЭМС технологий было сделано большое количество устройств, таких как сопла струйного принтера, акселерометры, магнетометры, гироскопы, микромоторы и микрозахваты, аттенюаторы, микрозеркала, устройства для лаборатории-на-чипе (lab-on-chip), датчики давления и расходомеры [1]. Некоторые из вышеуказанных устройств представлены на рисунке 1.2.

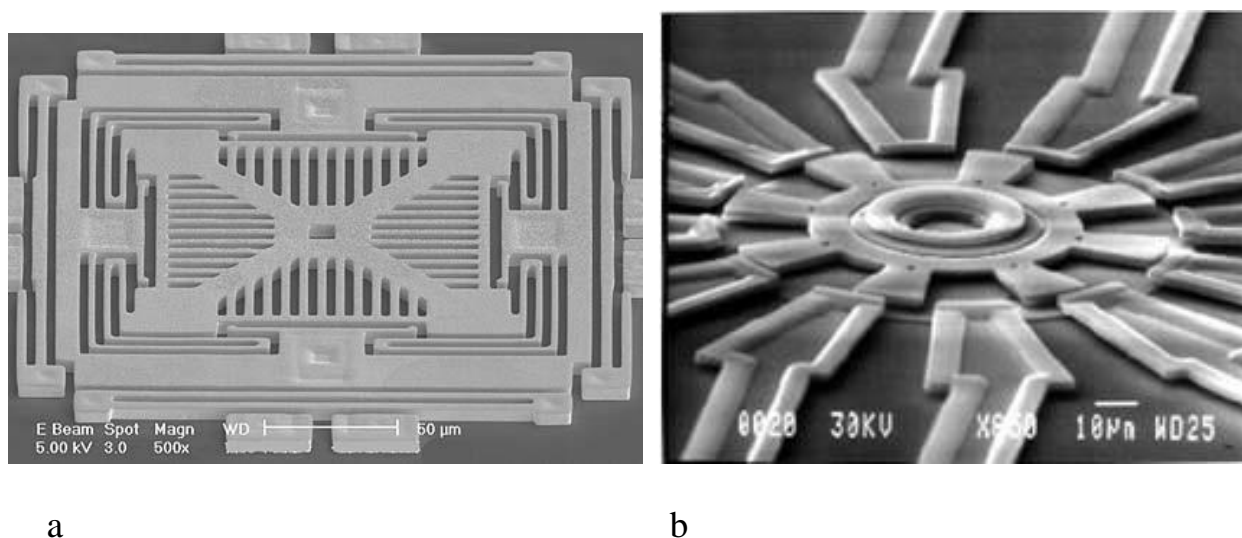


Рисунок 1.2 – Изображение МЭМС-устройств, сделанное с помощью электронного микроскопа: а) трехосевой акселерометр;  
б) электростатический микродвигатель [2]

Данные устройства имеют механические подсистемы, которые либо преобразуют воздействие внешних сил в электрические сигналы (акселерометры, гироскопы, магнетометры, датчики давления или расходомеры), либо сами движутся под действием электрических сигналов (микродвигатели, микрозахваты, микрозеркала) [2]. Комбинируя механические, оптические, электрохимические и электрические подсистемы можно создавать сложные микросистемные устройства в едином корпусе, позволяя тем самым добиться дополнительной миниатюризации и понизить затраты на производство. Технология МЭМС-устройств акцентирует свое внимание не только на изготовлении конкретного устройства, но и на применении новой стратегии интеграции различных классов приборов в одном модуле [2].

## 1.2. Области применения МЭМС

Сложно сказать, когда впервые появились МЭМС-устройства, так как их элементы неразрывно связаны с развитием интегральной электроники. В конце 1958 года были изготовлены первые прототипы интегральных схем (ИС). А в 1960 году Fairchild Semiconductors уже занялись выпуском первых ИС. В том же году были изготовлены тензодатчики на основе кремния, в которых механические напряжения вызывали изменение сопротивления вследствие пьезорезистивного эффекта. Промышленный выпуск подобных датчиков был налажен National Semiconductors к 1974 году. К 1982 году термин микрообработка (micromachining) начал использоваться для обозначения процессов изготовления механических подсистем (диафрагм и микробалок) кремниевых датчиков ускорения и давления. Механические модули изготавливались селективным травлением кремния. В 1986 году в одном из отчетов министерства обороны США был впервые использован термин “микроэлектромеханические системы”, ставший в дальнейшем описанием различных интегральных устройств и технологий их производства.

Рынок МЭМС-устройств непрерывно развивается: объем рынка (на 2014 год) составляет порядка 13 млрд. долларов и будет иметь ежегодный рост порядка 13%, таким образом, прогноз на 2018 год составляет порядка 21 млрд. долларов. Основные производители МЭМС - STMicroelectronics, Texas Instruments, Robert Bosch, Analog Devices, InvenSense, Hewlett Packard, Panasonic, Denso, Avago technologies, Freescale, Canon, Murata. [3].

Микроэлектромеханические системы можно классифицировать в соответствии с областью их применения:

1. МЭМС для высокочастотной электроники (RF MEMS);
2. Оптические МЭМС;
3. Биомедицинские МЭМС;

Размер компонентов МЭМС находится в диапазоне от 1 мкм до 100 мкм, а размер самого устройства МЭМС измеряется в диапазоне от 20 мкм до 1 мм.

К числу достоинств МЭМС-устройств относятся:



1. Малые размеры, масса, объем;
2. Низкое энергопотребление;
3. Относительно низкая стоимость;
4. Простота интеграции в системы;
5. Малая тепловая инерционность;
6. Устойчивость к вибрации, ударам и радиации;
7. Возможность изготовления большого количества (партий);
8. Хорошая переносимость теплового расширения;

МЭМС находят применение в различных областях техники, особенно в таких как автомобильные, авиационные и персональные навигационные устройства; системы мониторинга состояния здоровья и жизнеобеспечения людей. Одним из магистральных направлений применения МЭМС является создание роботизированных систем и киборгов (робот-механизированное устройство с машинным искусственным интеллектом; киборг- биологический организм с человеческим интеллектом, использующий различные дополняющие или заменяющие устройства для расширения функций жизнедеятельности организма). Классическим примером роботизированных систем являются беспилотные наземные и воздушные транспортные средства.

В автомобильной промышленности МЭМС позволяют реализовать различные опции, обеспечивающие роботизированное движение. Первое — создание умных помощников водителя, которые могут затормозить автомобиль в случае опасности и осуществляют адаптивный круиз-контроль. Второе направление — создание машин с дистанционным управлением. Третья система позволяет машине работать в режиме автопилота, когда водитель имеет необходимость отвлечься на некоторое время от управления грузовым автомобилем. На рисунке 1.3. приведена схема реализации беспилотного автомобиля с использованием МЭМС на примере российского КАМАЗа. Пространственное позиционирование автомобиля осуществляется с использованием GPS- ГЛОНАСС систем связи.



Рисунок 1.3 – Элементы МЭМС в реализации беспилотного КАМАЗа

В результате серийный КАМАЗ-5350 получил радары, лидар (то есть активный оптический сенсор, который испускает лазерные лучи в сторону цели во время движения транспорта), а также видеокамеры, системы связи и бортовые компьютеры. КАМАЗ оснащён 4 видеокамерами, по разным сторонам. Две камеры спереди и две сзади. Кроме того, установлено 3 радара. А роль лазерного сенсора выполняет уникальный радар.

Для легковых автомобилей эти системы уже реализованы в различных странах и используют акселерометры для обеспечения большего количества компонентов в пассивной безопасности автомобиля, в том числе развёртывания подушки безопасности при столкновении; гироскопы для обнаружения отклонения от курса; инерционные стоп- сигналы; система автоматического выравнивания фар; активная система защиты при опрокидывании; автоматические дверные замки; активная подвеска.

Аналогичные системы МЭМС используются и в роботизированных беспилотных летательных аппаратах- дронах. На рисунке 1.4. приведен один из вариантов дрона – квадрокоптер.



Рисунок 1.4. Квадрокоптер, оснащенный МЭМС устройствами для беспилотного перемещения.

В медицинской промышленности, здравоохранении, при мониторинге индивидуального состояния человека, в биотехнологиях, в основном используются биомедицинские МЭМС со следующими функциями:

1. Микросистемы для высокопроизводительного скрининга и отбора лекарственных средств;
2. Биочипы для обнаружения опасных химических и биологических агентов;
3. Лаборатория-на-чипе в областях медицины и здравоохранения;
4. Микроинструменты (скальпели и пинцеты для работы с объектами микронных размеров, в том числе для нейрохирургии);
5. Микросистемы полимеризации цепной реакции (ПЦР).

На рисунке 1.5. приведены варианты применения МЭМС при исследовании показателей и поддержке жизнедеятельности человеческого организма.

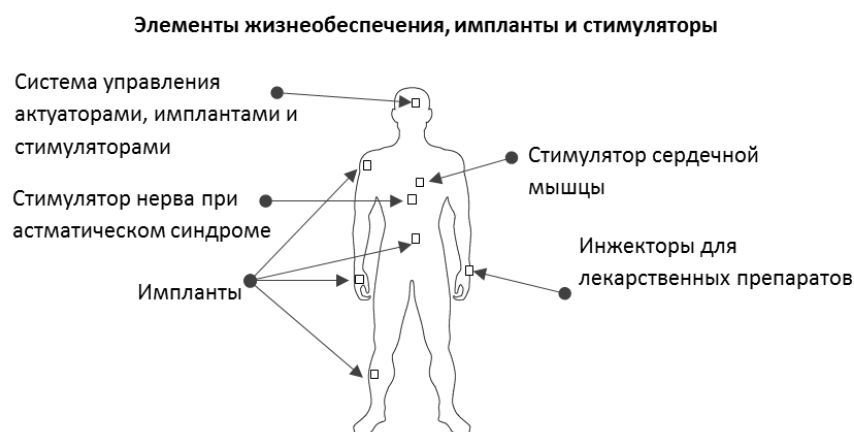
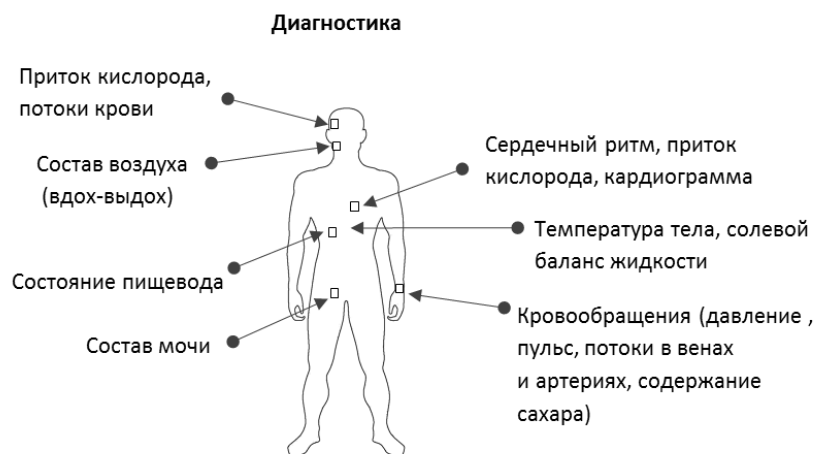


Рисунок 1.5 – Применение биоМЭМС для мониторинга функций человеческого организма и поддержке жизнедеятельности.

Во всех странах развивается применение МЭМС в оборонной промышленности при конструировании и изготовлении военной техники нового поколения. Особое направление

– солдат будущего, когда при экипировке солдата используются системы позиционирования и навигации; сенсоры, позволяющие принимать и анализировать окружающую обстановку; системы обмена данными в режиме реального времени с командными пунктами, силами поддержки (танки, вертолеты); системы жизнеобеспечения, в том числе в критических ситуациях (экзоскелеты, инъекции лекарств). На рисунке 1.6. показана экипировка солдата будущего.



Рисунок 1.6 – МЭМС в экипировке солдата «будущего»

Логичным развитием МЭМС-технологий стали наноэлектромеханические системы, представляя собой пример дальнейшей миниатюризации электроники [4]. Изготовление НЭМС-систем предполагает ряд новых подходов в связи со сложностью изготовления наноразмерных механических структур.

### 1.3. Классификация МЭМС датчиков

При классификации микросистем используются различные подходы. Хотя для всех классификаций используется терминология МЭМС, в этот класс микросистем входят наряду с микромеханическими также оптомеханические и биомеханические системы. Наиболее логически выстроенная система классификации представлена в работе [5].

К классификационным признакам МЭМС принято относить степень функциональности, вид конструктивно-технологического исполнения, вид входного сигнала (физической величины), вид выходного сигнала (воздействия), область применения и назначение.

По степени функциональности МЭМС подразделяют на полные и

неполные микросистемы.

Полные микросистемы, как правило, содержат микроустройства или элементы, выполняющие функции приема, преобразования, хранения и передачи информации, энергии и движения, а также функции выработки управляющего воздействия в требуемых условиях эксплуатации на окружающую среду.

В неполных микросистемах одна из перечисленных функций отсутствует. К неполным микросистемам относятся информационно-управляющие микросистемы и микросистемы исполнения.

По виду конструктивно-технологического исполнения МЭМС подразделяют на интегральные, гибридные и модульные микросистемы.

Интегральные микросистемы представляют собой устройства, элементы которых нераздельно выполнены и соединены в объеме и (или) на поверхности кристалла.

Гибридные микросистемы содержат компоненты, выполненные с использованием различных материалов и технологий и соединенные между собой на единой конструктивной основе.

Модульные микросистемы конструктивно объединяют несколько микроустройств в целях совместного применения для выполнения заданных функций.

По виду входного сигнала МЭМС подразделяют на микросистемы, воспринимающие температуру, давление, скорость, ускорение, силу, электрический сигнал, излучение, состав среды, концентрацию вещества и т.д.

По виду выходного сигнала МЭМС подразделяют на устройства с выходными сигналами: электрическими, оптическими, механическими, тепловыми, химическими (биохимическими) и т.д.

Классификация МЭМС по назначению и примеры представлены в таблице 1.

Таблица 1. Классификация МЭМС по назначению [5]

Назначение	Примеры
Микроэлектромеханические системы и машины	Микромеханизмы, микроприводы, микродвигатели
Оптомеханические микросистемы	Микрооптика, оптомеханические интегральные схемы, микрозеркала
Биотехнические микросистемы	Автономные микросистемы для диагностики и лечения организма и замещения органов
Микросистемы энергообеспечения	Автономные миниатюрные источники энергии, микротурбины, микросистемы рекуперации энергии
Сенсорные микросистемы	Мультисенсоры, интеллектуальные сенсоры с обратной связью
Микроаналитические системы	Миниатюрные аналитические приборы
Технологические микросистемы	Микрореакторы, микроинструменты, микрорегуляторы, микронасосы
Мини- и микроробототехнические системы	Автономные многофункциональные диагностические и технологические мини-системы для специальных условий эксплуатации

#### 1.4. Основная информация о гироскопах.

Гироско́п (от др.-греч. γῦρος — круг + σκοπέω — смотрю) — устройство, способное реагировать на изменение углов ориентации тела, на котором оно установлено, относительно инерциальной системы отсчета[1].

Сейчас этот термин используется для названия устройств содержащих объект, который совершает быстрые периодические движения. В результате этих движений устройство становится чувствительным к вращению в инерциальном пространстве. На рисунке – 1.1 представлена модель традиционного гироскопа с тремя степенями свободы(с двумя рамками карданова подвеса) [2].

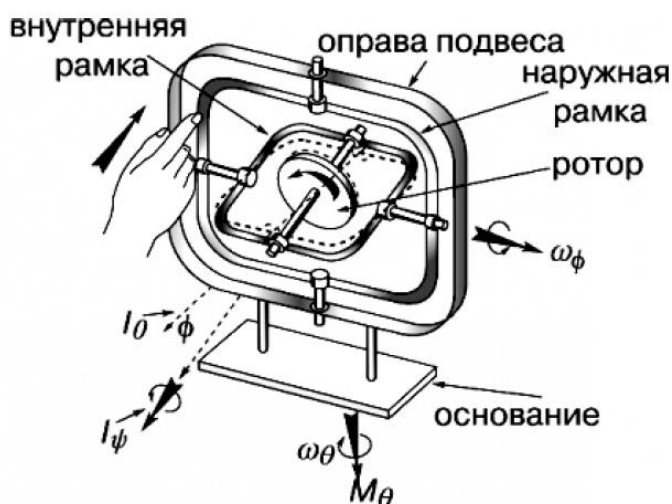


Рисунок 1.1 – Модель традиционного гироскопа.

$I\psi$  – ось собственного вращения ротора;  $I\theta$  – опорное направление кинетического момента;  $\psi$  – угол отклонения внутренней рамки карданова подвеса;  $\omega\psi$  – угловая скорость поворота внутренней рамки подвеса (прецессия);  $M\theta$  – момент возмущающей внешней силы;  $\omega\theta$  – угловая скорость поворота внешней рамки подвеса (нутация)

Гироскопический эффект создается той же самой центробежной силой, которая действует на волчок, вращающийся на столе. В точке опоры волчка о стол возникают сила и момент, под действием которых ось вращения волчка отклоняется от вертикали, а центробежная сила вращающейся массы, препятствуя изменению ориентации плоскости вращения, вынуждает волчок



вращаться и вокруг вертикали, сохраняя тем самым заданную ориентацию в пространстве [3].

### **1.5. Микромеханические гироскопы, принцип работы**

Главное достоинство данного ММГ является его высокая защищенность от линейных перегрузок. Важное достоинство микромеханических гироскопов — расположение сервисной электроники в интегральном исполнении на одной подложке с механической структурой в одном чипе, что существенно снижает уровень паразитных и шумовых сигналов в системе съема. В качестве достоинства ММГ следует также отметить отсутствие необходимости в обеспечении вакуума в корпусе гироскопа. Величина случайного дрейфа составляет  $\sim 0,3$  град/с [2].

Микромеханические, или микрогироскопы (МГ), являются электромеханическими системами, в которых энергия вынужденных (первичных) колебаний инерционной массы (ИМ) на упругом подвесе (резонаторе) при появлении переносной угловой скорости преобразуется в энергию вторичных колебаний, который содержат информацию об измеряемой угловой скорости. Это преобразование осуществляется вследствие воздействия на резонатор сил (моментов) инерции Кориолиса при вращении резонатора с переносной угловой скоростью, вектор количества движения, или момента количества движения (кинетического момента), соответственно для поступательных или вращательных первичных колебаний ИМ [2].

По виду движения инерционных масс в режиме возбуждения различают гироскопы L-L типа, R-R типа и L-R, R-L типа.

Как и классический гироскоп, ММГ содержит все основные элементы: инерциальная масса, опоры главной оси и оси прецессии, ось, датчик угла, датчик момента, гироскамеру, двигатель, электронику управления [2]. На примере (рисунок-1.2) ММГ с одной осью чувствительности компании Draper Laboratory.

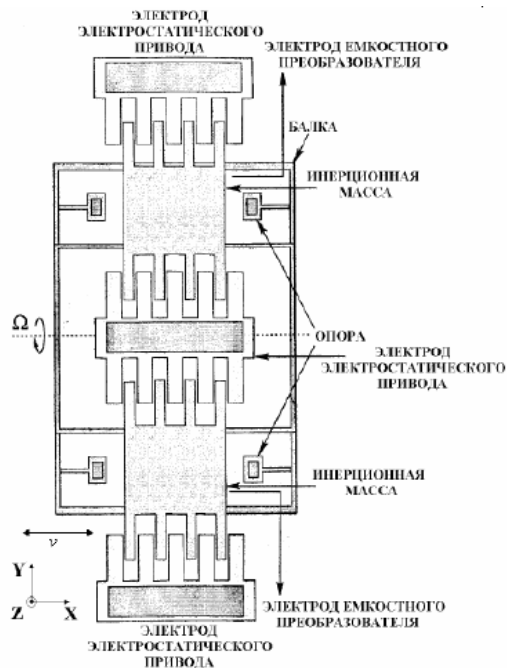


Рисунок 1.2 – Микромеханический гироскоп с одной осью чувствительности компании Draper Laboratory (США).

Принцип работы ММГ заключается в создании относительно корпуса знакопеременного поступательного либо вращательного движения чувствительного элемента по одной из степеней свободы и измерении перемещений по другой степени свободы, возникающих под действием кориолисовых сил или гироскопических моментов при наличии переносной угловой скорости корпуса [3].

На рисунке 1.3 поясняется принцип на примере ММГ с двухступенным упругим подвесом и поступательными перемещениями ЧЭ. При наличии знакопеременной относительной линейной скорости  $V$  вдоль оси  $OX$  и переносной измеряемой угловой скорости  $\Omega$  вокруг оси  $OZ$  появляются знакопеременное ускорение Кориолиса  $W_k$  и соответствующая ему сила  $F_k$  вдоль оси  $OY$  [2].

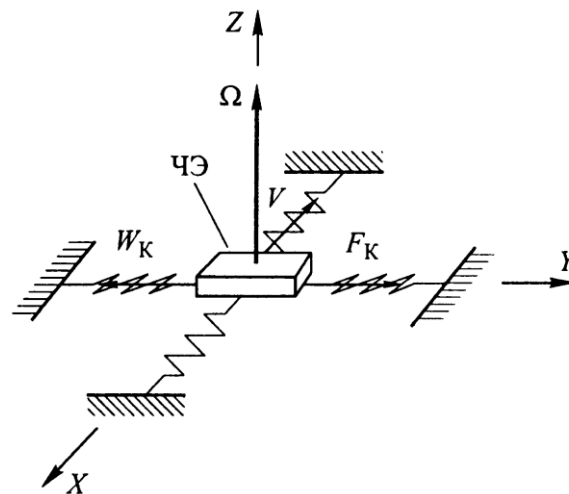


Рисунок 1.3 –Микромеханический гироскоп

Конструктивным узлом, определяющим функциональные возможности микрогироскопа, является чувствительный элемент. Чувствительный элемент микрогироскопа можно назвать инерционной массой в подвесе с приводом, обеспечивающим режим движения, на который при наличии переносной угловой скорости вследствие возникающего ускорения Кориолиса и соответствующих ему сил инерции, генерируются вторичные колебания (режим чувствительности). На этом основании микрогироскопы иногда называют приборами для измерения ускорения Кориолиса. Микромеханические гироскопы по виду движения инерционных масс разделяются на: LL-, LR-, RR- типа[2].

### 1.6. Классификация микромеханических гироскопов.

Основными элементами микромеханических гироскопов являются: инерционная масса (ИМ), упругие элементы подвеса, элементы привода, элементы датчика съема сигнала, анкеры. Дополнительно ММГ может содержать следующие элементы: компенсаторы изменения длины упругих элементов, кинематические связи, обеспечивающие либо синхронизм движения ИМ, либо увеличение масштабного коэффициента. В соответствии с конструктивными различиями микромеханических гироскопов приведём краткую классификацию[2]:

### 1) Количество измерительных осей

ММГ могут осуществлять измерение угловых скоростей относительно одной или двух координатных осей. Следовательно, их можно классифицировать по количеству измерительных осей: однокомпонентные, двухкомпонентные, а также трёхкомпонентные.

### 2) Количество инерционных масс

Важнейшим элементом ММГ является инерционная масса, поступательное движение которой приводит к появлению количества движения, а вращательное – к моменту количества движения. По этому признаку можно различать одномассовые и многомассовые (две и более) ММГ. Признак одинаково справедлив для всех типов ММГ.

### 3) Тип подвеса

Известны два типа подвесов: механические и неконтактные. Механические подвесы реализуются в виде упругих микроструктур различной конфигурации (стержневые, петлевые, спиральные и др.).

Элементы подвеса могут располагаться по периметру инерционных масс, и такой подвес можно называть наружным или внешним. Подвес может располагаться в пространстве самой инерционной массы, либо между инерционными массами в многомассовых ММГ. Такие подвесы можно называть внутренними.

Принципиально возможен любой вид неконтактного подвеса, реализованного на физическом принципе, обеспечивающем левитацию инерционной массы. Неконтактный подвес может быть назван по физическому принципу его работы: электростатический, магнитный и др.

### 4) Наличие кинематических связей

Известно, что для работы ММГ в режиме движения (РД) необходимо поддерживать постоянную частоту и амплитуду колебаний инерционной массы

(или масс). В одномассовых схемах для решения этой задачи используются дополнительные электронные цепи и датчики. В многомассовых схемах обеспечить равенство частот и амплитуд можно применением кинематической связи между инерционными массами. Кинематическая связь является аналогом спарника, применяемого в классических двухгироскопных схемах. Кинематическая связь может быть реализована в режиме движения или в обоих режимах одновременно. Существуют и другие типы кинематических связей между инерционными массами, например, для увеличения масштабного коэффициента.

#### 5) Тип привода (обратные преобразователи)

В ММГ могут быть использованы любые типы обратных преобразователей (актюаторы), обеспечивающих привод инерционных масс в режиме движения с заданными параметрами: магнитоэлектрические, электромагнитные, пьезоэлектрические. В рассматриваемых типах ММГ наиболее распространенным является электростатический привод, выполненный в виде гребенчатых структур.

#### 6) Тип датчика съема сигнала (прямые преобразователи)

В ММГ могут быть использованы любые типы прямых преобразователей (датчики съема сигнала), которые вырабатывают информацию об измеряемых угловых скоростях: электростатические, магнитоэлектрические, пьезорезистивные, оптические и др.

#### 7) Вид перемещения инерционных масс

Возможны два вида взаимного перемещения инерционных масс в режим движения (РД) и режим чувствительности (РЧ). В первом случае в обоих режимах движения инерционные массы (или масса) перемещаются в одной плоскости. Во втором случае инерционные массы в РЧ или РД могут выходить из плоскости их перемещения [2].

### 1.7. Микромеханические гироскопы LL – типа.

Так как в работе используется микромеханический гироскоп LL-типа, данный вид необходимо рассмотреть более подробно.

В основу конструктивной схемы ММГ положен выполненный из поликристаллического кремния упругий подвес ЧЭ с двумя поступательными степенями свободы в плоскости подвеса. В конструкции гироскопа используются два независимых упругих подвеса двух ЧЭ на одной подложке, возбуждаемых с помощью гребенчатого электростатического вибрационного двигателя и объединенных дифференциальной системой емкостного съема, образованной каждым из ЧЭ его системой гребенчатых электродов емкостного датчика и системой электродов, расположенных на подложке. Виды упругих подвесов ММГ LL-типа представлены на рисунке 1.4 [3].

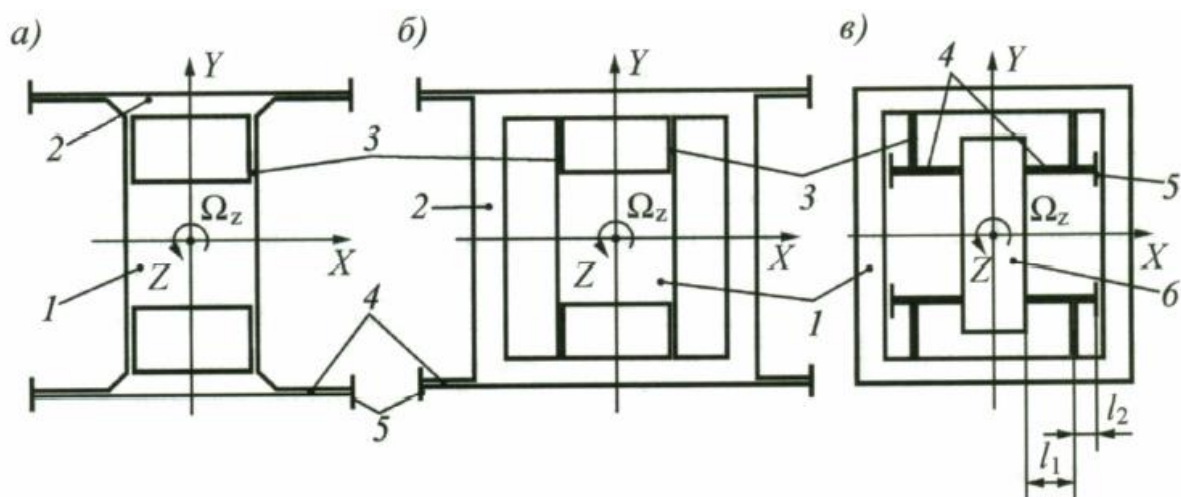


Рисунок 1.4 – Принципиальные схемы одномассовых ЧЭ МГ LL-типа:

- а – ЧЭ со спаренными упругими элементами внешнего подвеса;
  - б – ЧЭ с разделенными упругими элементами внешнего подвеса и промежуточной рамкой;
  - в – ЧЭ с сопряженными упругими элементами внутреннего подвеса с функцией механического усиления выходного сигнала;
- 1 – ИМ; 2 – жесткие элементы подвеса; 3, 4 – упругие элементы подвеса; 5 – основание; 6 – кинематический элемент.

## **1.8. Полоса пропускания, способы увеличения.**

### Характеристики микромеханического гироскопа

Для описания характеристик гироскопов используются различные параметры, которые позволяют определить подходит ли гироскоп для решения задачи. Основные параметры микромеханических гироскопов [4]:

- Разрешение гироскопа – это минимальная угловая скорость, которая может быть определена (выделена) на уровне шумов при известной полосе пропускания гироскопа.
- Масштабный коэффициент гироскопа определяет отношение изменения выходного сигнала гироскопа к изменению измеряемого входного воздействия (угловой скорости).
- Нулевой сигнал гироскопа - это выходной сигнал при отсутствии входного воздействия. Дрейф нулевого сигнала - важная характеристика гироскопа определяющая его долговременную стабильность.
- Полоса пропускания гироскопа - диапазон частот, в котором входной сигнал измеряется системой без искажений.

Основной задачей данной работы, является расширение полосы пропускания, для этого необходимо выяснить, что такое полоса пропускания.

Одна из проблем для ММГ это узкая полоса пропускания, она характерна для гироскопов с высокой добротностью. Так как полоса пропускания обратно пропорциональна добротности, ее увеличение с одной стороны приводит к увеличению механического масштабного коэффициента, уменьшению шумов, и, следовательно, улучшению разрешающей способности, с другой стороны к сужению полосы пропускания гироскопа. На рисунке 1.5 представлена зависимость амплитудного значения напряжения от частоты колебаний, для разных значений добротности.

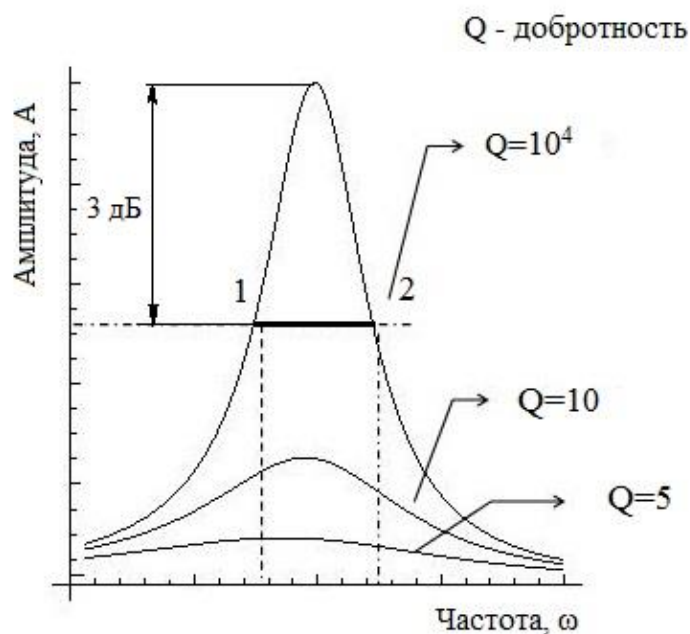


Рисунок 1.5 – Зависимость амплитудного значения напряжения от частоты колебаний, для разных значений добротности.

На данном рисунке полосой пропускания является, выделенное расстояние между точками 1 и 2, то есть полоса пропускания ММГ – это диапазон частот, в котором входной сигнал измеряется системой без искажений.

Полоса пропускания определяется, вычитанием 3 дБ от пика амплитуда колебаний.

Конструктивным способом увеличение полосы пропускания является использование много массовых систем, по оси вторичных колебаний. Массы связаны между собой упругой связью, и соответственно частота информативных колебаний будет иметь два пика, в фазе и антифазе (рисунок 1.6). Между двумя резонансами имеется широкая область с относительно постоянной амплитудой. Частота первичных колебаний настраивается таким образом, что бы она лежала между двумя пиками информативных колебаний. Именно эта плоская область в частотной характеристике в режиме чувствительности, что обеспечивает большую устойчивость и ширину полосы пропускания [5].



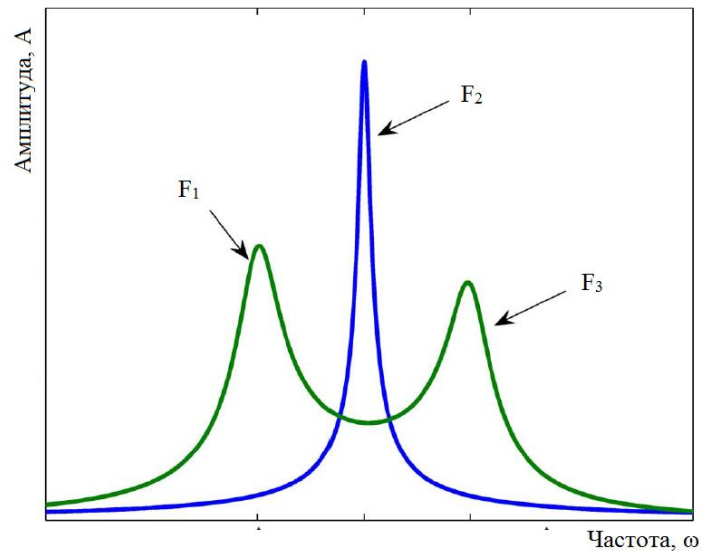


Рисунок 1.6 – Зависимость амплитудного значения напряжения от частоты, для трех форм колебаний.

Где –  $F_1$  – первая форма колебаний (в фазе),  $F_2$  – вторая форма колебаний (частота первичных колебаний),  $F_3$  – третья форма колебаний (в антифазе).

По ходу выполнения задания магистерской диссертации, будет спроектирована конструкция микромеханического гироскопа, которая позволит увеличить широту полосы пропускания.

## 2 Математическая модель

### 2.1. Функциональная схема

Объектом исследования является однокомпонентный микромеханический гироскоп LL-типа.

Основным элементом микромеханического гироскопа является емкостный микромеханический твердотельный кремниевый сенсор.

В основу конструктивной схемы ММГ положен выполненный из поликристаллического кремния упругий подвес ЧЭ, с двумя степенями свободы поступательного движения в плоскости подвеса. Структура чувствительного элемента выполняется из поликристаллического кремния, и имеет очень низкое остаточное напряжение, тем самым снижается возможность изгиба структуры и влияние на параметры измерений [6].

Схема микромеханического гироскопа (рисунок 2.1) содержит наружную раму 3, установленную на основании, при помощи упругих подвесов 9 и анкеров 10. Система упругих подвесов обеспечивает свободу перемещения всех конструкции вдоль осей X и Y. Инерционное тело 1 (внутренняя рамка) имеет возможность перемещаться на упругих подвесах 7 вдоль осей X и Y. Вторая рамка 2 перемещается на упругих подвесах 8 вдоль осей X и Y. Наружная рамка 3 перемещается только вдоль оси Y. Подвижные гребенчатые структуры электродов, образуют единую структуру с основной массой. Гребенчатая структура электродов позволяет обеспечить необходимые значения изменения их емкостей при перемещении инерционной массы.

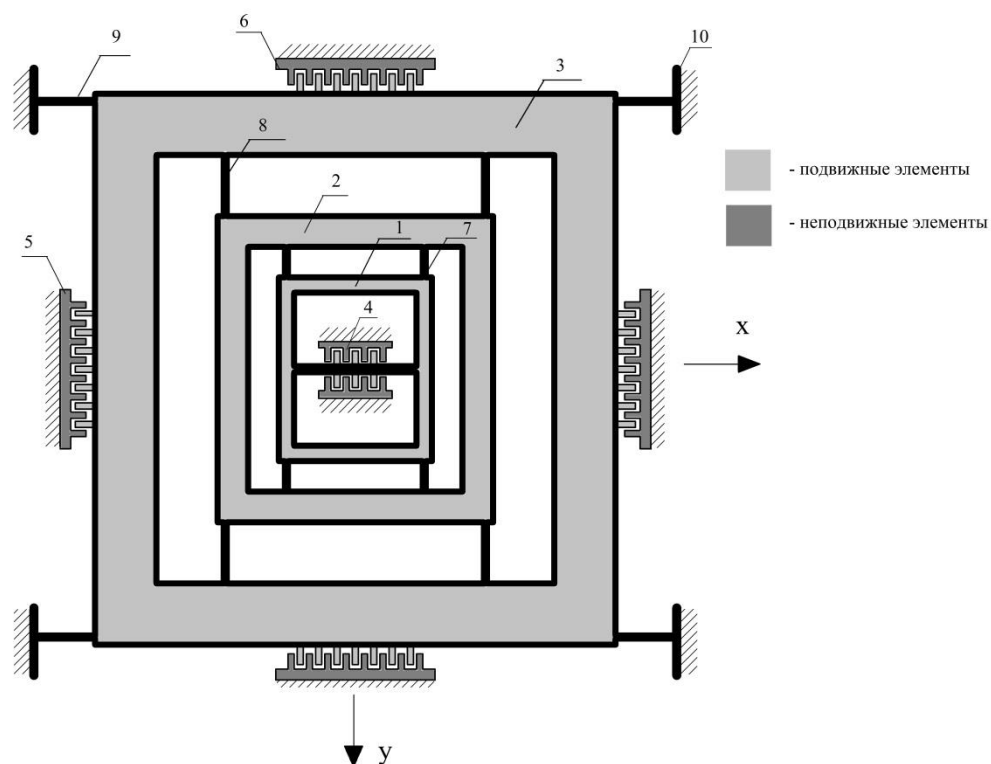


Рисунок 2.1 – Функциональная схема ММГ

Принцип действия микромеханического гироскопа: На гребенчатые электроды 6 которые работают на втягивание, подается переменное напряжение, под действием которых обеспечивается колебательное движение ЧЭ (инерционной массы) вдоль оси Y в упругом подвесе 9, которые закреплены с неподвижными анкерами 10. При наличии угловой скорости  $\Omega_z$ , возникают знакопеременные силы Кориолиса вдоль оси X, которые заставляют колебаться чувствительные элементы 1,2 вдоль этой оси. Значение перемещения инерционной масс по оси X и является мерой измеряемой угловой скорости  $\Omega$ . Амплитуды этих перемещений измеряются с помощью гребенчатых структур 4, за счет изменения размеров зазоров между подвижными и не подвижными электродами. Гребенчатые структуры 5 выполняют роль исполнительных элементов, формирующих корректирующие воздействия и обратную связь.

## 2.2. Составление математической модели

Для составления уравнений движений микромеханического гироскопа воспользуемся эквивалентной схемой сенсора представленной на рисунке 2.2 .

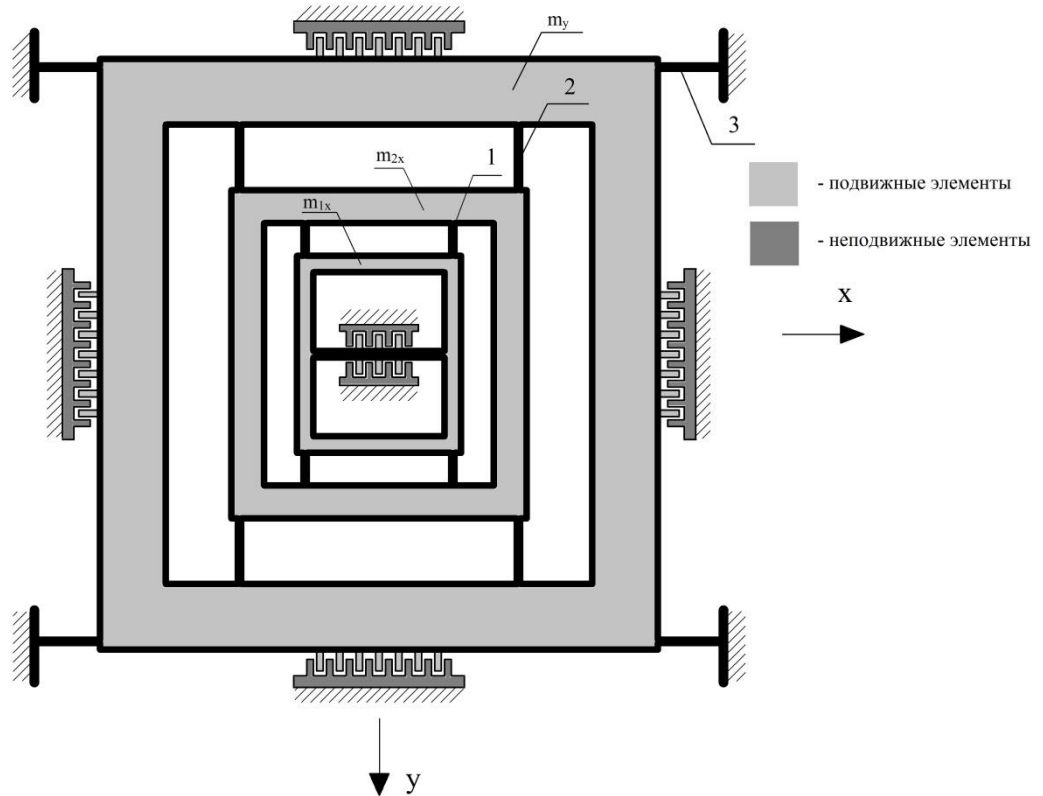


Рисунок 2.2– Эквивалентная схема микромеханического гироскопа

Эквивалентную схему микромеханического гироскопа можно представить как систему сосредоточенных масс, имеющих упругую связь между собой и основанием.

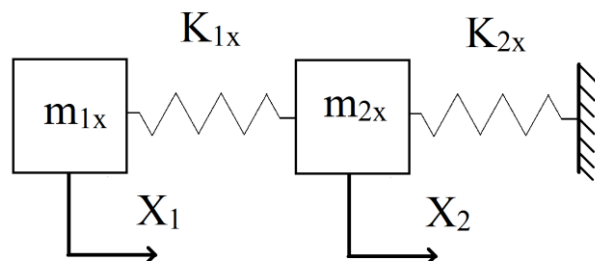


Рисунок 2.3– Эквивалентная схема канала первичных колебаний по оси X

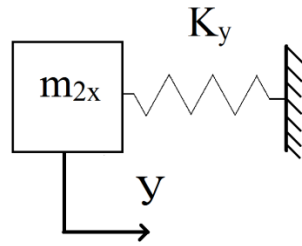


Рисунок 2.4– Эквивалентная схема канала первичных колебаний по оси Y

На рисунках 2.2 – 2.4 обозначено:  $m_y$  – масса совершающая первичные колебания (внешняя рамка),  $m_{1x}$  и  $m_{2x}$  – массы внутренних рамок, совершающих колебания вдоль осей X и Y,  $k_{1x}$ ,  $k_{2x}$ ,  $k_y$  – жесткости упругих подвесов.

Система координат OXYZ (рисунок 3.3) связана с корпусом, который перемещается поступательно с ускорением и вращается с угловыми скоростями  $\Omega_x$ ,  $\Omega_y$ ,  $\Omega_z$ , имеющим проекции на оси XYZ:

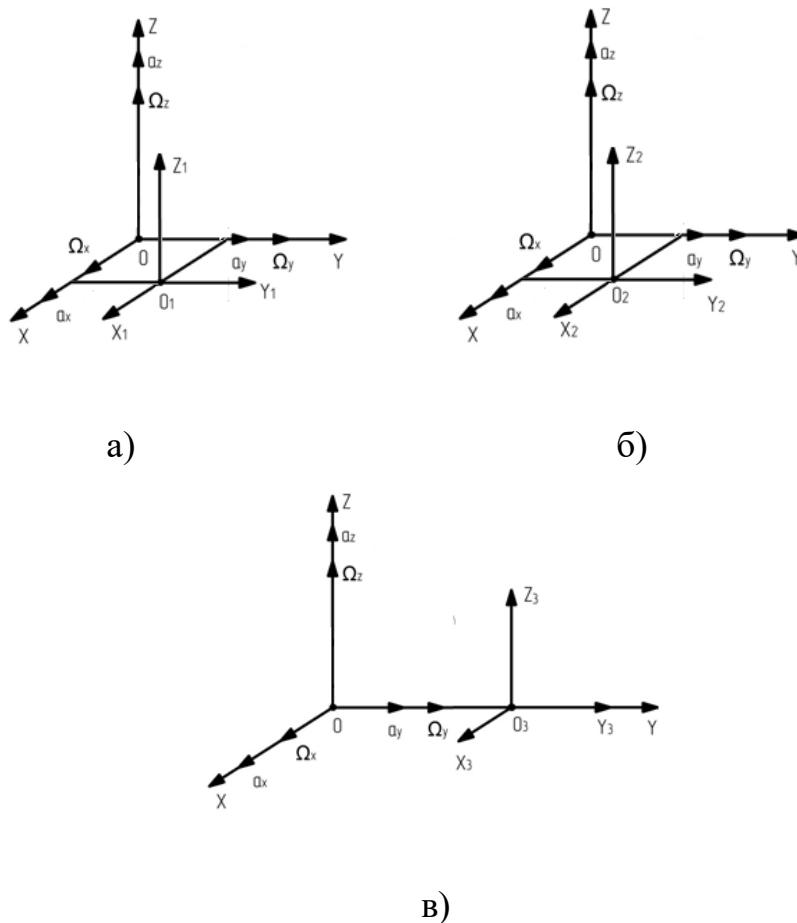


Рисунок 2.5–Системы координат, связанные с ММГ

Система координат  $O_1X_1Y_1Z_1$  связана с инерционным телом  $m_{1x}$ ,  $O_2X_2Y_2Z_2$  – с инерционным телом  $m_{2x}$ ,  $O_3X_3Y_3Z_3$  – с  $m_y$ .

Уравнения движения гироскопа получим на основании уравнений Лагранжа второго рода, которые для рассматриваемой системы имеют вид

- для  $m_{1x}$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{x}_1} \right) - \frac{\partial T}{\partial x_1} = Q_{1xx} = \frac{\partial \Pi}{\partial x_1} - \frac{\partial \varphi}{\partial \dot{x}_1}, \quad (2.1)$$

- для  $m_{2x}$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{x}_2} \right) - \frac{\partial T}{\partial x_2} = Q_{2xx} = \frac{\partial \Pi}{\partial x_2} - \frac{\partial \varphi}{\partial \dot{x}_2}, \quad (2.2)$$

- для  $m_y$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{y}} \right) - \frac{\partial T}{\partial y} = Q_{yy} = \frac{\partial \Pi}{\partial y} - \frac{\partial \varphi}{\partial \dot{y}} - \frac{\partial W}{\partial y}. \quad (2.3)$$

Где,  $T$  – кинетическая энергия системы,  $\Pi$  – кинетическая энергия системы,  $\varphi$  – диссипативные силы,  $W$  – внешняя электростатическая сила.

Обобщёнными координатами системы являются поступательные перемещения  $x$ ,  $y$ ,  $z$ .

Энергия конденсаторов определяется зарядом, накапливаемом на конденсаторах  $C$  гребенчатых электродных структур

$$W = \frac{CU^2}{2}. \quad (2.4)$$

Соответственно электростатическая сила ( $F_{эл}$ ) определяется как производная от энергии  $W$  по перемещению.

Выражение кинетической энергии системы имеет вид

$$T = \frac{1}{2} m_{1x} (V_{x1}^2 + V_{x2}^2 + V_y^2) + \frac{1}{2} m_{2x} (V_{x1}^2 + V_{x2}^2 + V_y^2) + \frac{1}{2} m_y (V_{x1}^2 + V_{x2}^2 + V_y^2), \quad (2.5)$$

где  $V_{1x}$ ,  $V_{2x}$ ,  $V_y$  – проекции линейных скоростей центров масс инерционного тела, внутренней и наружной рамок на соответствующие оси;  $m_{1x}$ ,  $m_{2x}$ ,  $m_y$  – массы микромеханического гироскопа.

Потенциальная энергия системы определяется упругими деформациями элементов подвеса

$$\Pi x = \frac{1}{2} [K_{x3} x_3^2 + K_{x2} (x_3 - x_2)^2 + K_{x1} (x_2 - x_1)^2],$$

$$P_y = \frac{1}{2} [K_{y3}y^3 + K_{y2}(y^3 - y^2)^2 + K_{y1}(y^2 - y^1)^2], \quad (2.6)$$

где  $K_{x1}, K_{x2}, K_{x3}, K_{y1}, K_{y2}, K_{y3}$  – жёсткости подвесов элементов ММГ по соответствующим обобщённым координатам.

Проекции линейных скоростей центров масс элементов системы на соответствующие оси, представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Проекция линейных скоростей

			x	y	z
$m_{1x}$	$V_{1x}$	$\begin{bmatrix} \Omega_x & \Omega_y & \Omega_z \\ x1 & y & 0 \end{bmatrix}$	$\dot{x}_0 + \dot{x}_1 - \Omega_z y$	$\dot{y}_0 + \dot{y}_1 - \Omega_z x1$	$\dot{z}_0 + \Omega_x y - \Omega_z x1$
$m_{2x}$	$V_{2x}$	$\begin{bmatrix} \Omega_x & \Omega_y & \Omega_z \\ x2 & y & 0 \end{bmatrix}$	$\dot{x}_0 + \dot{x}_2 - \Omega_z y$	$\dot{y}_0 + \dot{y}_2 - \Omega_z x2$	$\dot{z}_0 + \Omega_x y - \Omega_z x2$
$m_y$	$V_y$	$\begin{bmatrix} \Omega_x & \Omega_y & \Omega_z \\ 0 & y & 0 \end{bmatrix}$	$\dot{x}_0 - \Omega_z y$	$\dot{y}_0 + \dot{y}_1$	$\dot{z}_0 + \Omega_x y$

Матрица для вычисления линейных скоростей центра масс для  $m_{1x}$  имеет вид

$$\bar{V}_{1x} = \begin{bmatrix} \bar{l}_1 & \bar{j}_1 & \bar{k}_1 \\ \Omega_x & \Omega_y & \Omega_z \\ x1 & y & 0 \end{bmatrix},$$

где  $\bar{l}_1, \bar{j}_1, \bar{k}_1$  – единичные вектора в направлении осей  $O_1X_1Y_1Z_1$ .

Проекция абсолютной линейной скорости центра масс  $m_{1x}$  записываются в виде

$$V_{1x} = \Omega_x x1 + \Omega_y y + \Omega_z 0, \quad (2.7)$$

Матрица для вычисления линейных скоростей центра масс  $m_{2x}$

$$\bar{V}_{2x} = \begin{bmatrix} \bar{l}_2 & \bar{j}_2 & \bar{k}_2 \\ \Omega_x & \Omega_y & \Omega_z \\ x2 & y & 0 \end{bmatrix},$$

где  $\bar{l}_2, \bar{j}_2, \bar{k}_2$  - единичные вектора в направлении осей  $O_2X_2Y_2Z_2$ .

Проекции абсолютной линейной скорости центра масс  $m_{2x}$  записываются в виде

$$V_{2x} = \Omega_x x_2 + \Omega_y y + \Omega_z 0, \quad (2.8)$$

Матрица для вычисления линейных скоростей центра масс  $m_y$

$$\bar{V}_y = \begin{bmatrix} \bar{l}_3 & \bar{j}_3 & \bar{k}_3 \\ \Omega_x & \Omega_y & \Omega_z \\ 0 & y & 0 \end{bmatrix},$$

где  $\bar{l}_3, \bar{j}_3, \bar{k}_3$  - единичные вектора в направлении осей  $O_3X_3Y_3Z_3$ .

Проекции абсолютной линейной скорости центра масс общей рамки записываются в виде

$$V_y = \Omega_x 0 + \Omega_y y + \Omega_z 0, \quad (2.9)$$

Уравнения движения сенсора гироскопа, полученные при помощи уравнений Лагранжа второго рода, имеют вид

$$\ddot{y} - \dot{y} \left[ \frac{\sqrt{\frac{Ky}{m_y}}}{(m_1+m_2+m_3)Q} \right] - \left( \Omega_z^2 + \Omega_x^2 + \frac{Ky}{(m_1+m_2+m_3)} \right) = -\ddot{y}_0 - \Omega_z \dot{x}_0 + \Omega_x \dot{z}_0 - \frac{\Omega_x \Omega_y (m_{1x} + m_{2x} x_2)}{(m_1+m_2+m_3)} + F_{ЭЛ1} + F_{ЭЛ2}, \quad (2.10)$$

$$\ddot{x}_1 - \dot{x}_1 \left[ \frac{\sqrt{\frac{Kx_1}{m_{1x}}}}{(m_{1x})Q} \right] - \left( \Omega_z^2 + \Omega_y^2 + \frac{Kx_1}{(m_{1x})} \right) = -\ddot{x}_0 - \Omega_z \dot{y} + \Omega_y \dot{z} - \Omega_x \Omega_y y - \frac{Kx_1 x_2}{m_{1x}}, \quad (2.11)$$

$$\ddot{x}_2 - \dot{x}_2 \left[ \frac{\sqrt{\frac{Kx_2}{m_{2x}}}}{(m_{2x})Q} \right] - \left( \Omega_z^2 + \Omega_y^2 + \frac{Kx_2}{(m_{2x})} + \frac{Kx_1}{(m_{1x})} \right) = -\ddot{x}_0 - \Omega_z \dot{y} + \Omega_y \dot{z} - \Omega_x \Omega_y y - \frac{Kx_1 x_2}{m_{2x}}. \quad (2.12)$$



### **3. Разработка конструкции и математическое моделирование**

#### **3.1. Проведение частотного анализа конструкции**

Для построения модели ММГ, используется программный продукт T-FLEX CAD 3D и T-FLEX Анализ.

Система T-FLEX Анализ обеспечивает мультизадачный режим конечно-элементного моделирования. Это означает, что для одной и той же трехмерной модели пользователь может осуществить несколько расчетов подобных по типу или различных физических задач [8].

Статический анализ (линейная статика) – позволяет осуществлять расчёт напряжённого состояния конструкций под действием приложенных к системе постоянных во времени сил. С помощью модуля пользователь может оценить прочность разработанной им конструкции по допускаемым напряжениям, определить наиболее слабые места конструкции и внести необходимые изменения (оптимизировать) изделие [9].

Необходимость в расчете собственных частот и соответствующих им форм колебаний нередко возникает при анализе динамического поведения конструкции под действием переменных нагрузок. Частотный анализ позволяет осуществлять расчёт собственных (резонансных) частот конструкции и соответствующих им форм колебаний. Осуществляя проверку наличия резонансных частот в рабочем частотном диапазоне изделия и оптимизируя конструкцию, разработчик может повысить надёжность и работоспособность изделия [8].

Однако в микромеханических гироскопах резонанс является полезным. Резонансный режим используется для увеличения амплитуд первичных и вторичных колебаний. Частоты первичных и вторичных колебаний и собственная частота резонатора близки между собой [10].

Для проведения частотного анализа необходимо наложить конечно-элементную сетку, для этого производится подбор подходящих размеров, данные представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Данные подбора конечно-элементной сетки.

Значение конечно-элементной сетки	Частота 1-ой формы колебаний (в фазе), Гц	Частота 2-ой формы колебаний (в противофазе), Гц
0.1	14785	23625
0.09	14293	19682
0.08	12703	25557
0.07	12854	25787
0.06	14928	18945
0.05	12230	15502
0.04	11777	20826
0.03	9573	12450
0.025	8925	11366
0.02	9061	11273
0.015	8726	11016
0.01	8228	10163
0.009	8081	10006
0.008	7884	9777
0.007	7881	9776

Графически данные подбора конечно-элементной сетки, представлены на рисунке 3.1 (а, б).

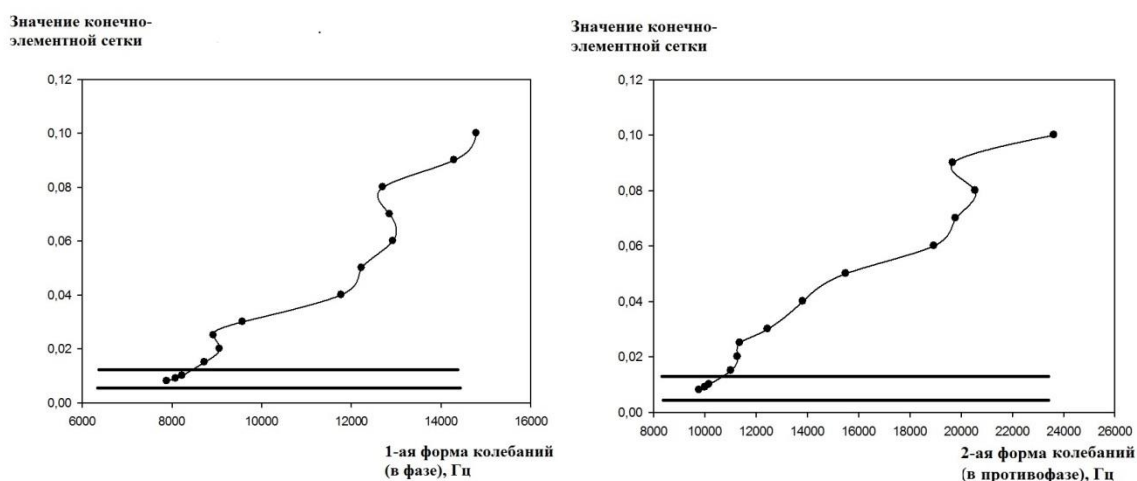


Рисунок 3.1 – Зависимость конечно-элементной сетки, от частоты 1-ой формы колебаний (а) и 2-ой формы колебаний (б) .

Для дальнейшего проведения анализа подобрано значение конечно-элементной сетки – 0,007. Граничные условия – полное закрепление. Данные проведения частотного анализа представлены на рисунках 3.2-3.5.

Задача: "Задача\_1"  
Относительные перемещения, модуль  
Форма 1 - резонансная частота: 7883.567 Гц  
Масштаб перемещений: 0.00

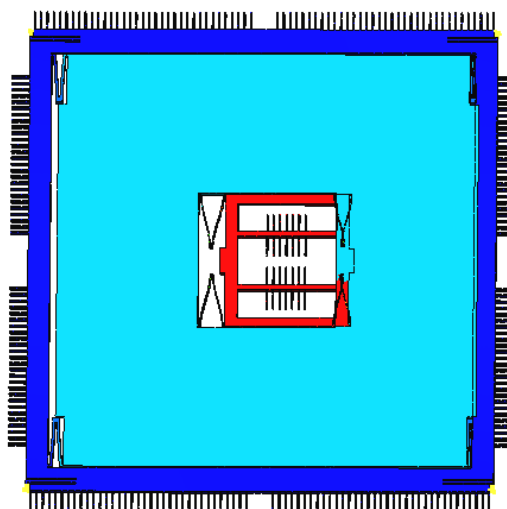


Рисунок 3.2 – Форма колебаний 1 – резонансная частота  $F_1 = 7883.567$  Гц.

Задача: "Задача\_1"  
Относительные перемещения, модуль  
Форма 2 - резонансная частота: 8840.833 Гц  
Масштаб перемещений: 0.00

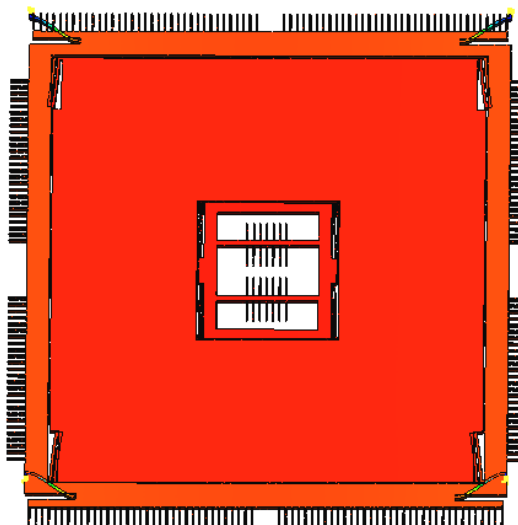


Рисунок 3.3 – Форма колебаний 2 – резонансная частота  $F_2 = 8840.833$  Гц.

Задача: "Задача\_1"  
Относительные перемещения, модуль  
Форма 3 - резонансная частота: 9777.196 Гц  
Масштаб перемещений: 0.00

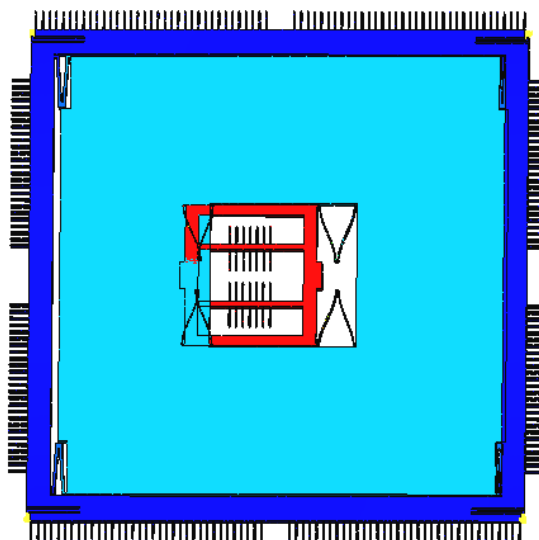


Рисунок 3.4 – Форма колебаний 3 – резонансная частота  $F3 = 9777.196$  Гц.

Задача: "Задача\_1"  
Относительные перемещения, модуль  
Форма 4 - резонансная частота: 15733.262 Гц  
Масштаб перемещений: 0.00

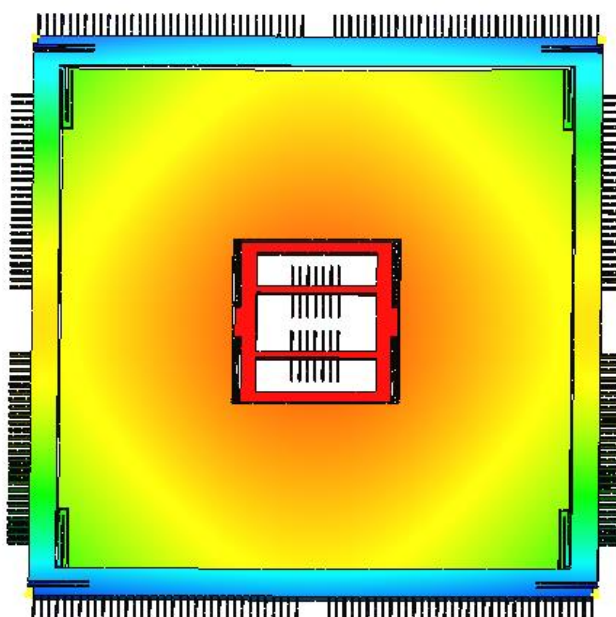


Рисунок 3.5 – Форма колебаний 4 – резонансная частота  $F1 = 15733.262$  Гц.

При разработке конструкции и проведении частотного анализа, стояла основная задача, сблизить собственные частоты в фазе и антифазе. Для

получения необходимой частоты были приняты конструктивные решения, связанные с увеличением массы датчика. Так как частота прямо пропорциональна жесткости упругого подвеса и обратно пропорциональна массе. За счет увеличения толщины активной части сенсора, была увеличена масса, а жесткость увеличена за счет уменьшения длины торсионов и увеличения их ширины.

Полученная конструкция приведена на рисунке 3.6.

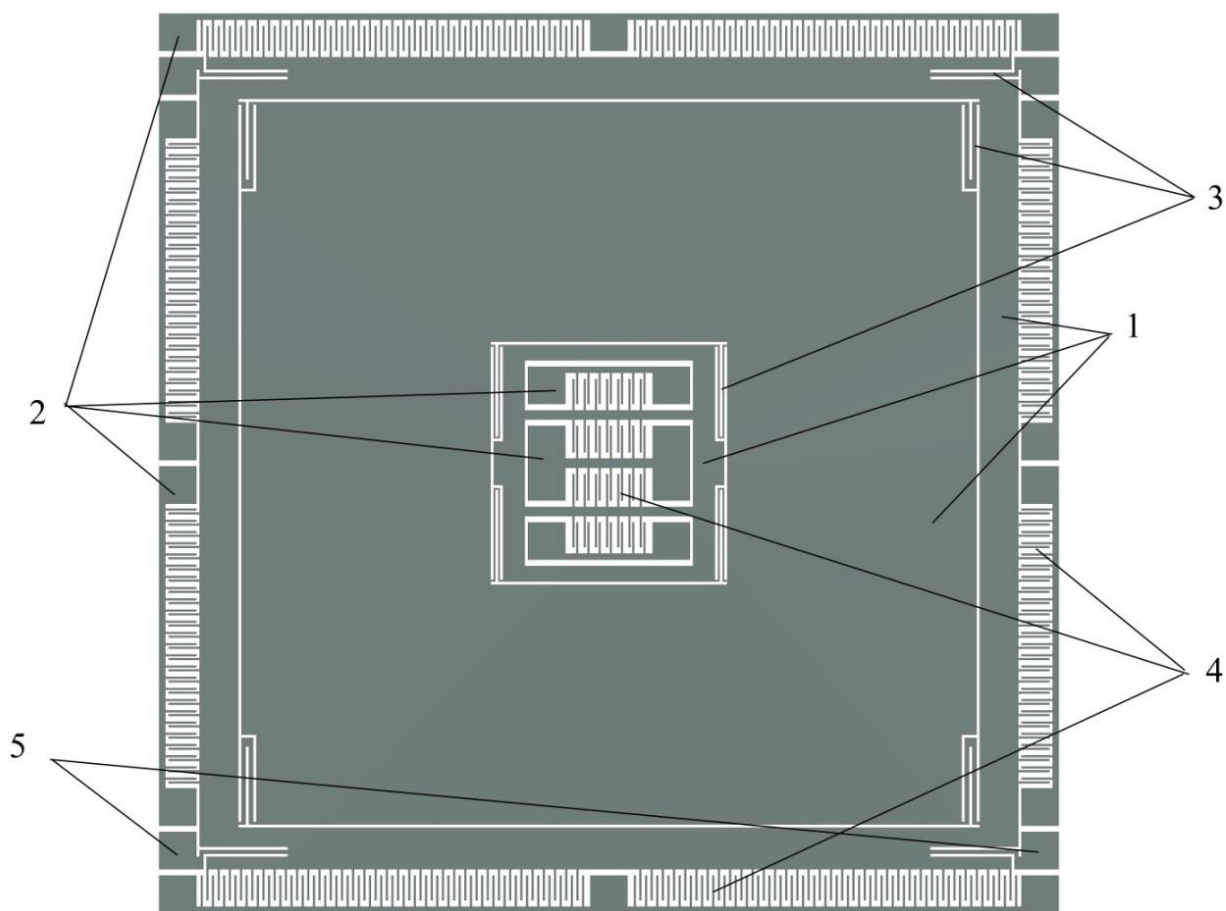


Рисунок 3.6 – Конструкция микромеханического гироскопа.

1 – инерционная масса; 2 – неподвижные элементы; 3 - упругие элементы подвеса; 4 – гребенчатые электроды; 5 – анкеры.

### 3.2. Определение коэффициентов жесткости упругих подвесов

Коэффициенты жесткости определяются с помощью статического анализа. Статический анализ позволяет осуществлять расчёт напряжённого

состояния конструкций под действием, приложенных к системе постоянных во времени сил. Статический анализ также позволяет:

- учитывать геометрическую нелинейность;
- определять напряженно-деформированное состояние с учетом температурных воздействий
- проводить расчеты контактных задач;

Для проведения анализа наложим КЭ сетку, Граничные условия – полное закрепление, приложим нагрузку ( $F=1Н$ ), данные расчета конструкции на прочность представлены на рисунках 3.7 - 3.10.

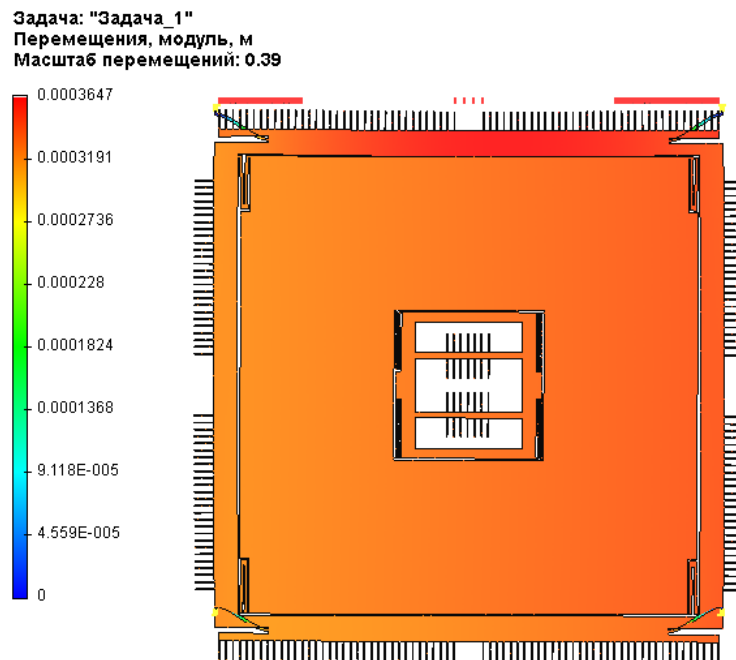


Рисунок 3.8 – Статический анализ модуля перемещения по оси Y, максимально значение перемещения – 0.3647 мм.

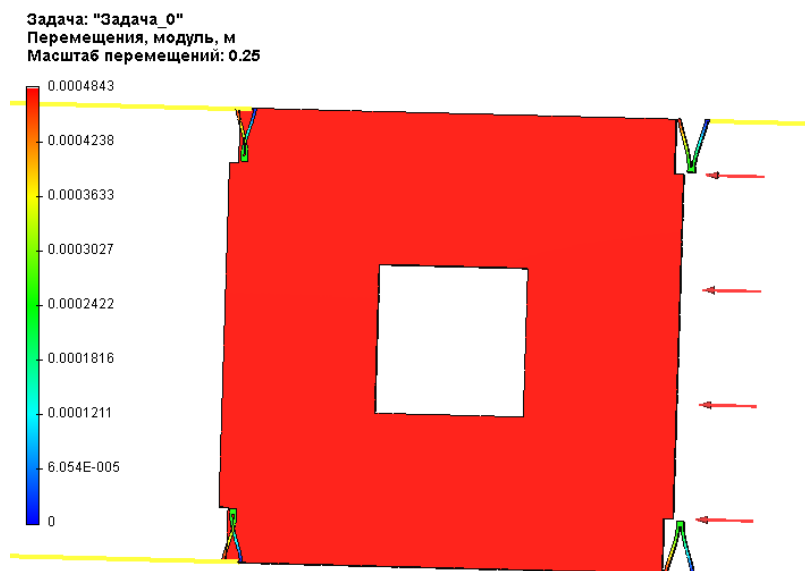


Рисунок 3.9 – Статический анализ модуля перемещения по оси X для второй рамки, максимально значение перемещения – 0.4843 мм.

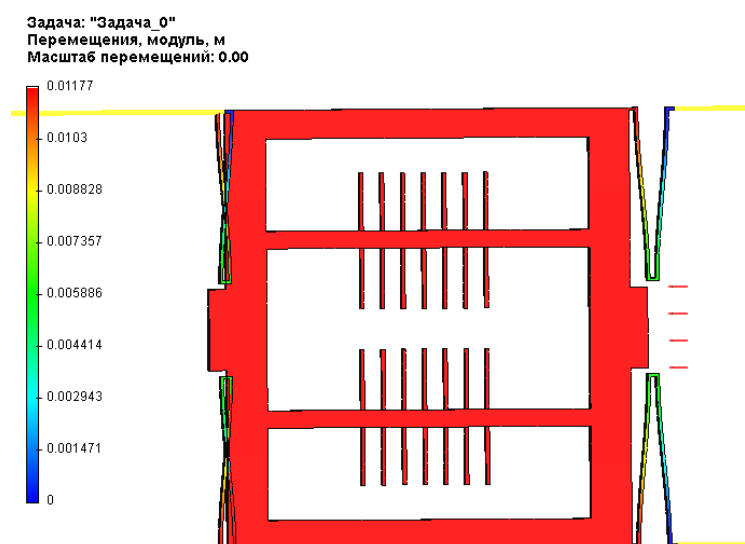


Рисунок 3.10 – Статический анализ модуля перемещения по оси X для первой рамки, максимально значение перемещения – 1.177 мм.

Расчет коэффициента жесткости. производится по формуле:

$$K_i = \frac{F}{x}; \quad (3.1)$$

где, F – приложенная сила, равная 1 Н, x – перемещение конструкции по определенной оси.

Расчет коэффициента жесткости для внешней рамки:

$$K_y = \frac{1\text{Н}}{0.0003647\text{ м}} = 2741 \frac{\text{Н}}{\text{м}}; \quad (3.2)$$

Расчет коэффициента жесткости для второй рамки:

$$K_y = \frac{1\text{Н}}{0.0004843\text{ м}} = 2064 \frac{\text{Н}}{\text{м}}; \quad (3.3)$$

Расчет коэффициента жесткости для внешней рамки:

$$K_y = \frac{1\text{Н}}{0.001177\text{ м}} = 849 \frac{\text{Н}}{\text{м}}; \quad (3.4)$$

### 3.3. Расчет суммарной ёмкости гребенчатых структур

Ёмкостной преобразователь представляет собой одну или несколько ёмкостей с изменяющимися параметрами. Работа преобразователей основана на изменении ёмкости между подвижными электродами на пластине чувствительного элемента (ЧЭ) и неподвижными электродами на корпусе прибора (рисунок 3.11)

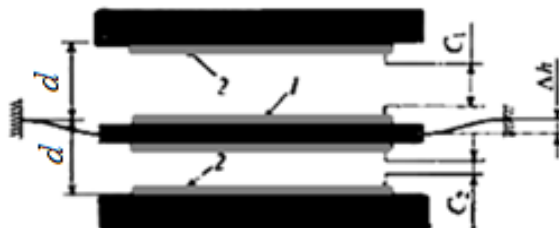


Рисунок 3.11 - Ёмкостной преобразователь перемещений:

1 и 2 – подвижный и неподвижный электроды

Ёмкости между электродами корпуса и ЧЭ определяются зависимостями

$$C_1 = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d \pm \Delta x} \quad (1); \quad (3.5)$$

где  $\epsilon$  – относительная диэлектрическая постоянная среды  $\epsilon = 1,0006$  (для вакуума  $\epsilon = 1$ , для воздуха с влажностью 0%  $\epsilon = 1,0006$ );  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м;  $S$  - площадь взаимного перекрытия электродов  $S = 600 \cdot 10^{-12}$  м<sup>2</sup>;  $d$  – начальный зазор между электродами;  $\Delta x$  - смещение подвижного электрода ЧЭ относительно неподвижного вдоль оси X.

$$C_2 = \frac{\epsilon_0 \epsilon b(a \pm \Delta b)}{d}; \quad (2) \quad (3.6)$$

где  $a = 100 \cdot 10^{-6}$  м – длина электрода;  $b = 60 \cdot 10^{-6}$  м - высота электрода.



$\Delta b$  - смещение подвижного электрода ЧЭ относительно неподвижного вдоль оси Y.

В начальном положении (рисунок 3.12):

$$C_{01} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{d_1} = \frac{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 1,0006 \cdot 6 \cdot 10^{-10}}{6 \cdot 10^{-6}} = 8,85 \cdot 10^{-15} \text{ Ф}$$

$$C_{02} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{d_2} = \frac{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 1,00058 \cdot 6 \cdot 10^{-10}}{9 \cdot 10^{-6}} = 5,9 \cdot 10^{-15} \text{ Ф}$$

где  $d_1 = 6 \cdot 10^{-6}$  м,  $d_2 = 9 \cdot 10^{-6}$  м – начальные зазоры между электродами, работающие в разных направлениях.

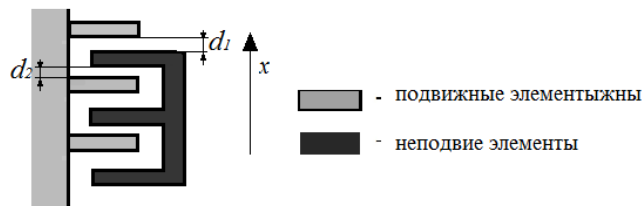


Рисунок 3.12 – Емкости в начальном положении

Емкости гребенчатых структур при движении инерционной массы по оси X, определяются по формуле (3.5). При движении инерционной массы, будет изменяться зазор между подвижными и не подвижными электродами, на рисунке 3.13 представлена зависимость изменения ёмкости  $C_x$  от перемещения пары электродов вдоль оси X.

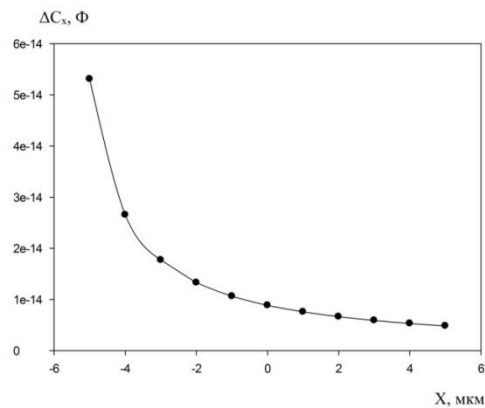


Рисунок 3.13 – Зависимость изменения ёмкости  $C_x$  от перемещения пары электродов вдоль оси X.

Емкости гребенчатых структур при движении инерционной массы по оси Y, рассчитывается по формуле 3.6. При движении инерционной массы, значение зазора между подвижными и не подвижными электродами остается

неизменным, на рисунке 3.14 представлена зависимость изменения ёмкости  $C_y$  от перемещения пары электродов вдоль оси  $Y$ .

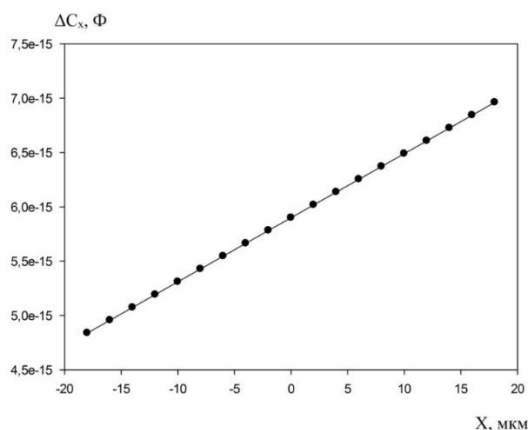


Рисунок 3.14 – Зависимость изменения ёмкости  $C_y$  от перемещения пары электродов вдоль оси  $Y$ .

Суммарные ёмкости по осям  $OX$ ,  $OY$ , в начальный момент времени, определяются по формулам:

$$C_{x \text{ сум}} = n1 \cdot C_{01} = 28 \cdot 8.85 \cdot 10^{-15} = 2.478 \cdot 10^{-13} = 0.248 \text{ пФ}$$

где  $n1$  – количество пар электродов, работающих вдоль оси  $X$ .

$$C_{y \text{ сум}} = n2 \cdot C_{02} = 60 \cdot 5.9 \cdot 10^{-15} = 3.54 \cdot 10^{-13} = 0.354 \text{ пФ}$$

где  $n2$  – количество пар электродов, работающих вдоль оси  $Y$ .

### 3.4 Анализ зависимостей собственных частот ММГ

Анализ конструкции микромеханического гироскопа, по условиям технического задания, необходимо провести с изменением параметров, таких как масса и размеры упругих элементов, и получить зависимость собственных частот гироскопа при их изменении. В таблице 3.2 представлены частоты для четырех форм колебаний и массы ММГ при изменении толщины активной структуры.

Таблица 3.2 – Анализ зависимостей собственных частот ММГ при изменении толщины активной структуры.

	l, мм (толщина)	m, г (масса)	1-ая, Гц форма	2-ая, Гц форма	3-ья, Гц форма	4-ая, Гц форма
1	0.02	$0.31 \times 10^{-5}$	4506.3	5002.3	5575.1	3352.9
2	0.03	$0.46 \times 10^{-5}$	4570.5	5051.4	5657.1	4827.1
3	0.04	$0.62 \times 10^{-5}$	4519.3	4993.1	5609.2	6262.7
4	0.05	$0.79 \times 10^{-5}$	4523.5	4997.8	5598.1	7641.2
5	0.06	$0.93 \times 10^{-5}$	4638.4	5054.8	5729.3	8948.2
6	0.07	$1.09 \times 10^{-5}$	4575.2	5018.4	5677.6	9358.4
7	0.08	$1.24 \times 10^{-5}$	4528.5	5002.7	5639.5	9280.8
8	0.09	$1.4 \times 10^{-5}$	4543.1	5012.2	5629.5	9351.1
9	0.1	$1.55 \times 10^{-5}$	4563.7	5014.6	5649.1	9356.1

Анализы четырех форм колебаний представлены на рисунках 5-8.

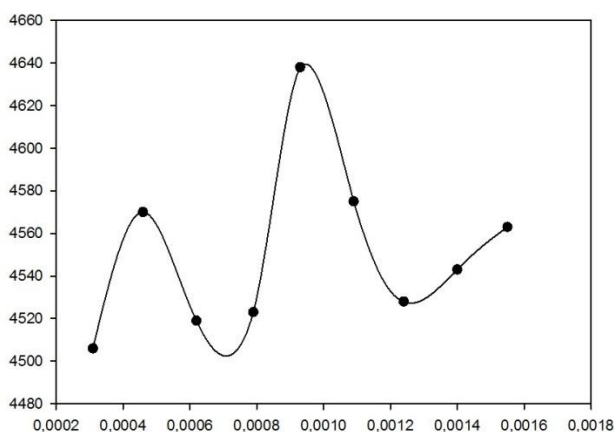


Рисунок 3.15 – Зависимость для первой формы колебаний (в фазе), при изменении массы структуры.

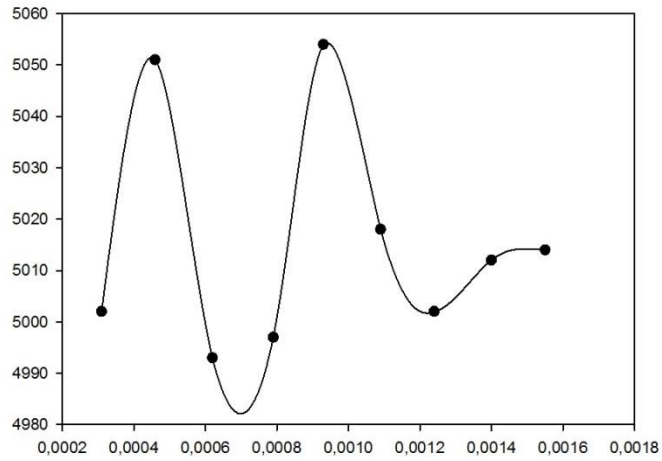


Рисунок 3.16 – Зависимость для второй формы колебаний (первичные), при изменении массы структуры.

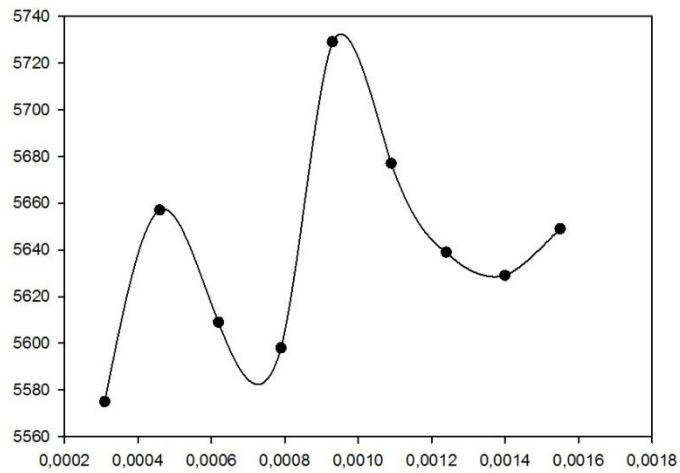


Рисунок 3.17 – Зависимость для третьей формы колебаний (в антифазе), при изменении массы структуры.

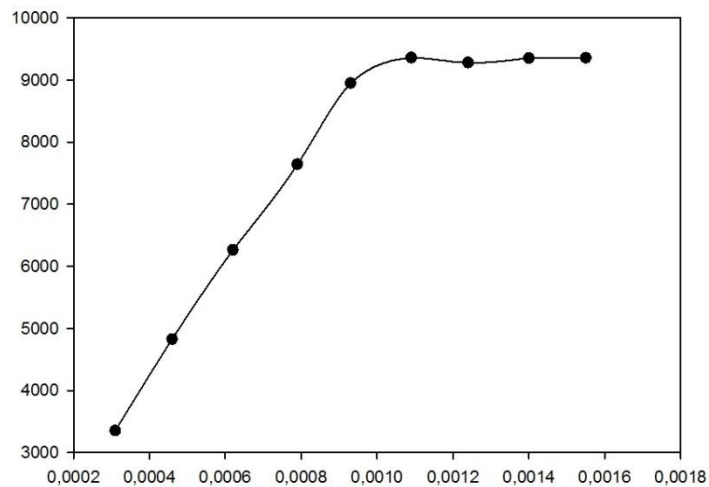


Рисунок 3.18 – Зависимость для четвертой формы колебаний (паразитные), при изменении массы структуры.

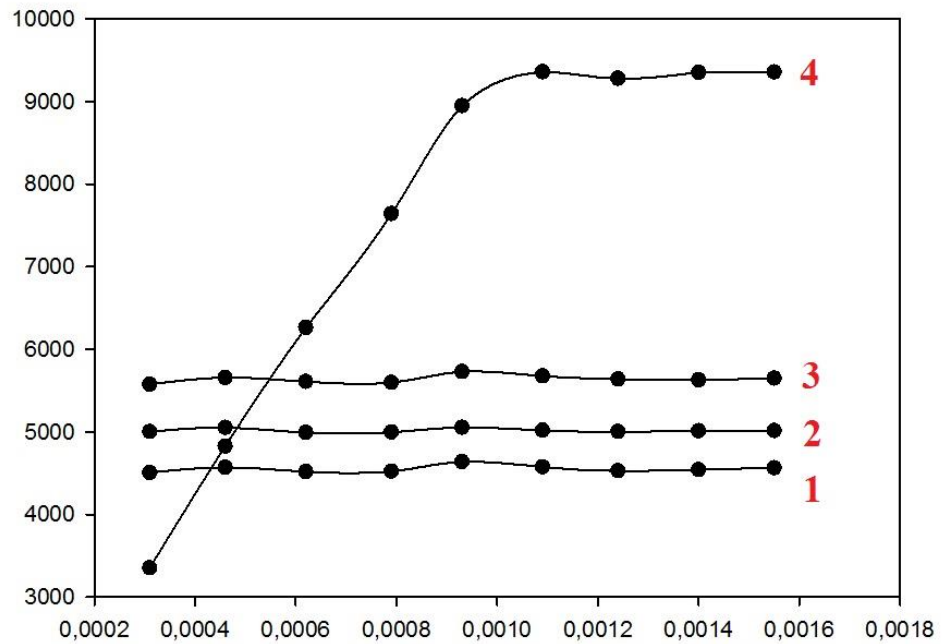


Рисунок 3.19 – Зависимость собственных частот ММГ при изменении толщины активной структуры, где 1 – 1-ая форма, 2 – 2-ая форма, 3 – 3-ья форма, 4 – 4-ая форма.

В таблице 3.3 представлены частоты для четырех форм колебаний и длина упругих элементов.

Таблица 3.3 – Анализ зависимостей собственных частот ММГ при изменении длины упругих элементов.

	l, мм (длина)	1-ая, Гц форма	2-ая, Гц форма	3-ья, Гц форма	4-ая, Гц форма
1	0.17	4638.9	5729.3	8035.6	9458.0
2	0.19	4639.0	5729.8	7011.1	9356.4
3	0.21	4639.1	5729.4	6217.1	9236.2
4	0.23	4638.7	5589.0	5729.3	9098.8
5	0.25	4638.4	5054.8	5729.3	8948.2
6	0.27	4445.4	4490.3	5513.0	8687.7
7	0.29	4149.8	4637.3	5727.8	8566.5
8	0.31	3799.9	4637.6	5728.2	8354.4
9	0.33	3499.6	4634.9	5724.8	8133.6

На рисунке 3.20 графически представлена зависимость собственных частот ММГ при изменении длины упругих элементов для четырех форм колебаний, по вертикальной оси частота колебаний Гц, по горизонтальной оси изменение длины мм.

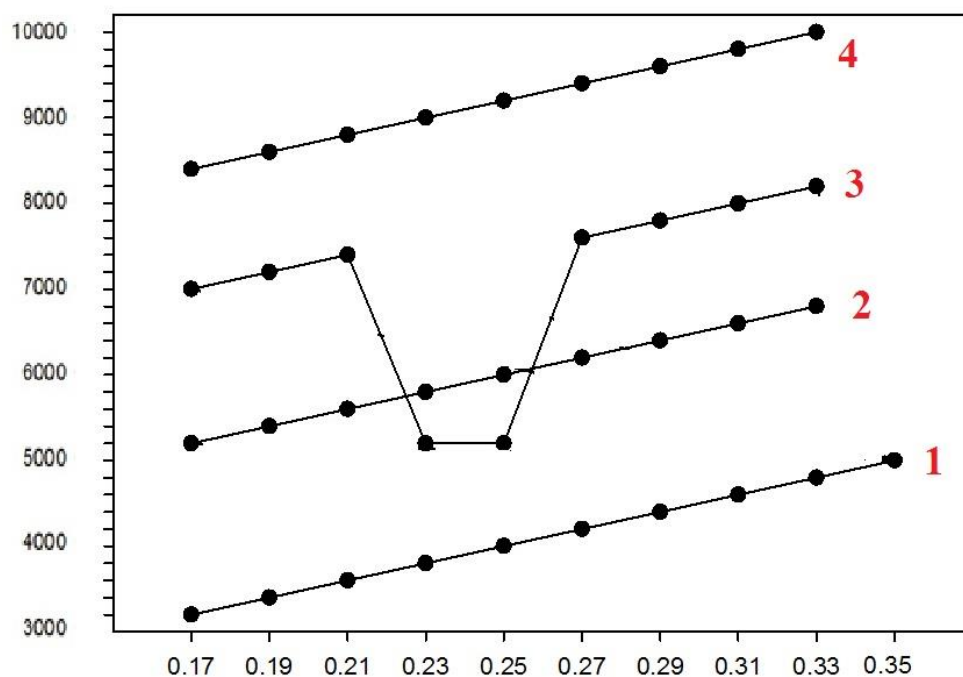


Рисунок 3.20 – Зависимость собственных частот ММГ при изменении длины упругих элементов, где 1 – 1-ая форма (в фазе), 2 – 2-ая форма (первичные колебания), 3 – 3-ья форма (в антифазе), 4 – 4-ая форма (паразитная).

## 4. Вопросы технологии

### 4.1. Анализ материала

МЭМС-технология может быть реализована с использованием целого ряда различных материалов и технологий производства, выбор которых будет зависеть от создаваемого устройства и рыночного сектора, в котором он должен работать [12]. Основным же материалом в этой области является кремний, он используется для создания большинства интегрированных цепей, используемых в потребительской электронике в современном мире. Распространенность, доступность дешевых высококачественных материалов и способность к применению в электронных схемах делает кремний привлекательным для применения его при изготовлении МЭМС.

Кремний также имеет значительные преимущества перед другими материалами благодаря своим физическим свойствам. Монокристалл кремния почти идеально подчиняется закону Гука. Это означает, что при деформации он не подвержен гистерезису и, следовательно, энергия деформации практически не рассеивается.

Также кремний очень надежен при сверхчастых движениях, так как он обладает очень малой усталостью и может работать в диапазоне от миллиардов до триллионов циклов без разрушения [12].

Монокристаллический кремний наиболее часто используется в МЭМС – устройствах. Монокремний имеет структуру решетки типа алмаз (рисунок 4.1).

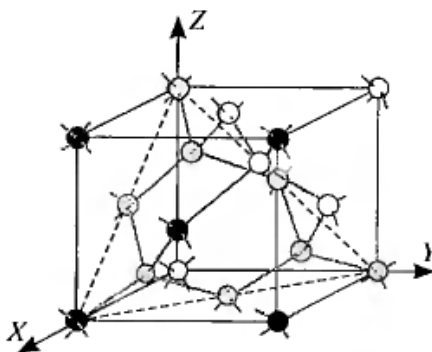


Рисунок 4.1 – Структура кристалла типа алмаза.

Структура характеризуется наличием тетраэдрических связей: у каждого атома есть четыре ближайших соседа, взаимодействующих силами ковалентных связей. Такую же структуру имеет германий.

Физические свойства кремния представлены в таблице 4.1 [12].

Таблица 4.1 – Основные физические свойства кремния

Кристаллическая структура	Алмаз
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	2329
Точка плавления, °С	1412
Удельная теплоемкость, Дж/(кг·°С)	0.7
Количество атомов/см <sup>3</sup>	$5.0 \cdot 10^{22}$
Модуль Юнга, ГПа	169
Коэффициент Пуассона	0.066
Предел прочности при растяжении, МПа	3790
Теплопроводность, Вт/(см·°С)	1,5
Коэффициент теплового расширения, °С <sup>-1</sup>	$4.2 \cdot 10^{-6}$
Удельное сопротивление, Ом·см	$2.3 \cdot 10^5$
Диэлектрическая проницаемость	11.7

#### 4.2. Технологический процесс травления

На разброс рабочих характеристик прибора кроме обычных технологических факторов влияет ряд дополнительных, например разброс геометрических размеров чувствительного элемента преобразователя. Этот разброс определяется точностью процесса фотолитографии. Фотолитография – самая важная часть, все технологические погрешности, передаются на все последующие циклы [9].



Травление это важный этап при производстве МЭМС-датчиков, самым распространенным видом травления является так называемый Bosch процесс, и имеет следующий механизм: газы пассивации и травления подаются отдельно и попеременно в технологическую камеру и подложка травится в плазме высокой плотности, в ходе циклов пассивации и травления. В каждом цикле пассивации, тонкая тефлоновая пленка осаждается на боковых стенках структур травления из частиц  $C_4F_8$ . На рисунке 4.2 схематично представлена схема Bosch-процесса. [9]

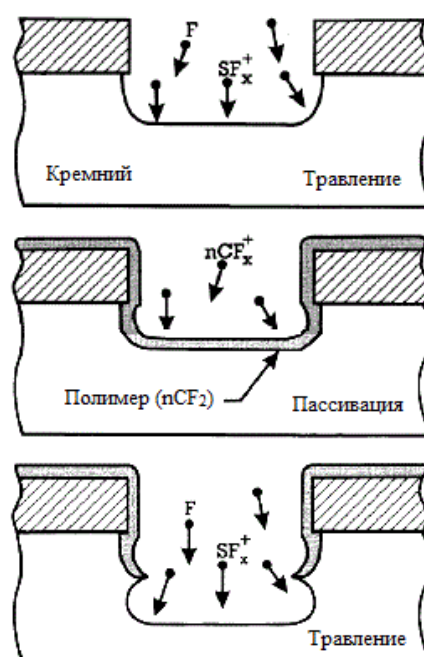


Рисунок 4.2 – Схема Bosch-процесса.

Также может произойти некоторая очистка от оксидов на дне травления кремния во время или после стадии осаждения тефлона. В течение последующего цикла травления, часть этой пленки удаляется с боковой стенки, защищенной от удара вертикальными ионами. В то же время дно траншеи свободно от фторуглеродного полимера и травится радикалами фтора, полученными из плазмы  $SF_6$ . Обычно переключение между шагами происходит в пределах от нескольких секунд до 1 мин, в зависимости от требуемой шероховатости боковой стенки. Поскольку пассивирующая полимерная пленка может быть удалена с помощью небольшого ударного ионного воздействия,

селективность к маске достигает очень высокого значения, например, 150:1 для фоторезиста и  $\gg 300:1$  для маски SiO<sub>2</sub>. Если использованы трудно удаляемые пассивирующие полимеры, необходимо более агрессивное воздействие ионами и как следствие, селективность по отношению к маскирующим материалам будет ниже.

Типичные структуры, формы профиля и характерные боковые «скалопы», вытекающие из особенностей Bosch процесса представлены на рисунке 2.

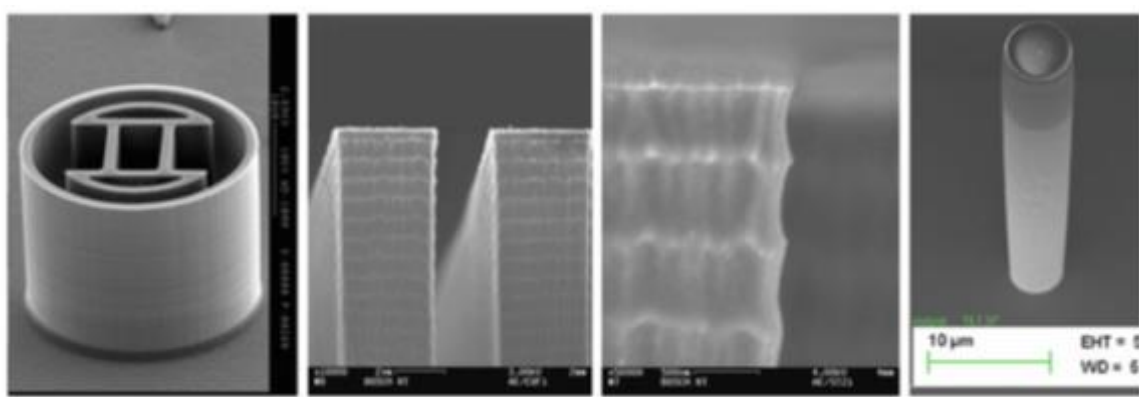


Рисунок 4.3 – Типичные структуры, получаемые с помощью Bosch-процесса.

Циклический характер процесса преодолевает ряд проблем, связанных с анизотропным травлением.

Во-первых, разделение активных частиц во временной области, исключает их потерю при рекомбинации в газофазных реакциях, так же частицы пассивации и травления разграничены в ограниченном объеме возбуждения плазмы высокой плотности, но могут перекрывать друг друга на своем пути от источника до подложки. Это так называемое "состояние сверхбыстрого переключения газа" дает очень гладкие стенки с малыми боковыми гребешками («скалопами»).







Во-вторых, процесс вертикального травления, имеющий высокую селективность к маске, имеет риск микромаскировки дна канавки. Даже

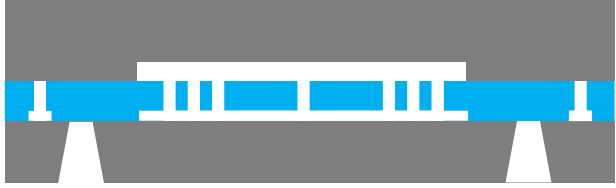

незначительные загрязнения на поверхности травления могут привести к образованию остатков, микрошероховатости, и даже микроигл [9] .

### 4.3. Технологический процесс изготовления МЭМС-датчика

Эскизно-операционная карта изготовления МЭМС-датчиков, технологией анодного соединения и глубокого реактивно-ионного травления представлена в таблице 4.2 [12].

Таблица 4.2 – Эскизно-операционная карта.

Операция технологического процесса	Иллюстрация операции
Стекло (толщина 400 мкм) с отверстиями.	
Кремний, 300 мкм, с вытравленными углублениями на нижней стороне	
Анодное соединение	
Уменьшение толщины активной кремниевой пластины (шлифованием и полировкой)	
Сухое (плазмохимическое) травление кремния	
Стекло (толщина: 400 мкм) Жидкостное травление углублений	

Анодное соединение с активной пластиной	
Осаждение металла для сквозного соединения	
Тестирование пластин	
Резка пластин на кристаллы (скрайбирование)	
Упаковка	

На рисунке 4.4 представлено сечение варианта «стекло-кремний-стекло»

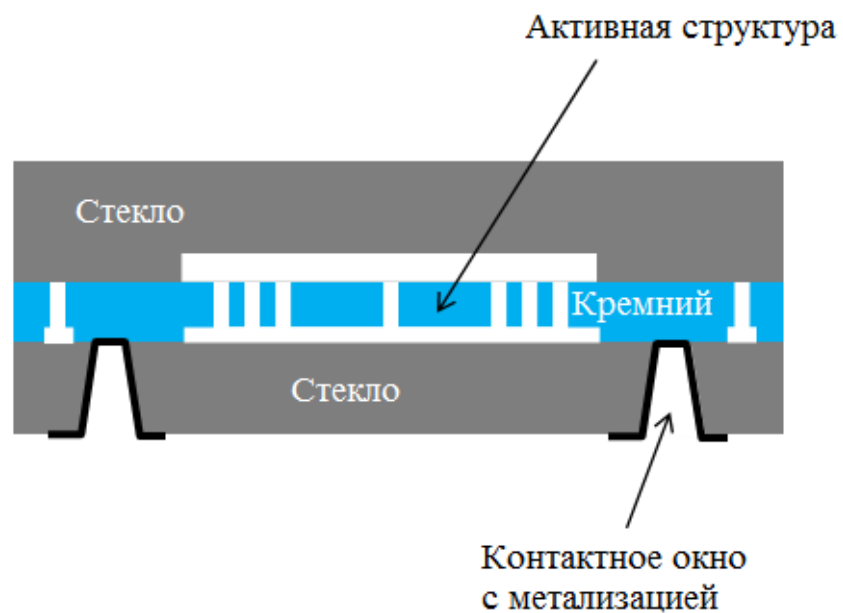


Рисунок 4.4 – Структуры, получаемые с помощью Bosch-процесса.

#### 4.4. Технологический процесс сборки

Технологический процесс сборки микромеханического сенсора представлен в таблице 4.3 [13].

Таблица 4.3 - Технологический процесс сборки микромеханического сенсора.

Операция сборки	Описание операции
<b>Монтаж</b>	<p>Монтаж может осуществляться двумя способами: приклеивание кристаллов к корпусу с помощью эпоксидного клея либо технология эвтектической пайки.</p> <p>Монтаж чипов в корпус происходит посредством системы и полуавтоматического монтажа кристаллов, которая позиционирует кристалл относительно корпуса и создает рабочее давление. Время полимеризации клеевого соединения зависит от температуры.</p>
<b>Сварка (разварка) проволочных проводов</b>	<p>Работы происходят на автоматической установке шариковой сварки проволочных проводов</p> <p>При работе на данной установке необходимо использование специальной программы, которая учитывает все особенности формы и размеры подложки, геометрические параметры проволоки, проволочной петли, сварочного шарика, параметры позиционирования точек сварки, регулировка фокуса, параметры проведения самого процесса сварки и т.д.</p> <p>Размеры пазов и контактных площадок обуславливают применение золотой проволоки определенным диаметром.</p>
<b>Контроль качества соединений</b>	<p>Оборудование (специализированная установка) позволяет провести контроль на сдвиг кристалла в корпусе и проверить распайку путем натяжения проволочных проводов на отрыв.</p>
	<p>Присоединения крышки к корпусу. Первоначально на</p>

<p><b>Герметизация корпуса</b></p>	<p>крышке формируется рамка из эвтектического сплава. Крышки совмещаются с корпусами с помощью специального вакуумного подсоса и пинцета для выравнивания. Давление для эвтектической пайки крышек к корпусам при герметизации осуществляется посредством зажимов, создающих усилие, затем на специальной керамической подставке (для позиционирования) корпуса с крышками помещаются в керамическую печь с резистивным нагревом.</p>
<p><b>Функциональный контроль</b></p>	<p>Контроль производится посредством контрольной платы, которая подключаются к компьютеру, после чего гироскопы проходят череду определенных тестов и испытаний, на основании которых проводится регулировка параметров гироскопов, контроль работоспособности гироскопов и их отбраковка. Тестовые воздействия задаются при помощи специализированной программы. Программа автоматически проводит испытания совместной работы электронных узлов микросхемы с МЭМС ЧЭ и сигнализирует об отказах, возникающих на различных этапах регулировки, испытаний и контроля.</p>
<p><b>Поставка заказчику</b></p>	

## 5. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

### 5.1. Предпроектный анализ

#### 5.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Совокупность данных преимуществ побуждает производителей систем для различных сфер применения (от авиа - и автомобилестроения до бытовой техники) использовать в своих разработках те или иные МЭМС-датчики.

Рассмотрим компании занимающиеся разработкой Микромеханических гироскопов [5].

Исследования рынка показали, что число фирм выпускающих гироскопы с диапазоном измерения более  $\pm 2000^\circ/\text{с}$  не велико. Это такие фирмы как: Analog Devices (США), InvenSense (США), STMicroelectronics (Франция),

Гироскопия (Санкт-Петербург) и Лаборатория Микроприборов (Санкт-Петербург).

Фирмой Analog Devices разработана базовая конструкция четырёхмассового чувствительного элемента (ЧЭ) с электроникой на одном кристалле. Наличие четырех однотипных структур позволяет избежать появления ошибок измерения в выходном сигнале гироскопа при вибрациях и ускорениях. Гироскоп представляет собой датчик прямого преобразования без обратной связи.

Фирма InvenSense в 2015 году выпустила трехосный гироскоп ITG-3701 с диапазоном измерения до  $4000^\circ/\text{с}$ . Диапазон измерения определяется коэффициентом усиления встроенного АЦП (ADC), который может быть изменен по интерфейсу SPI.

Двухосный гироскоп фирмы STMicroelectronics LY5150AL позволяет измерять угловые скорости до  $6000^\circ/\text{с}$  и имеет два аналоговых выхода. Один выход обеспечивает измерение в диапазоне  $6000^\circ/\text{с}$ , второй – за счет усилителя с коэффициентом усиления равным 4 в диапазоне  $1500^\circ/\text{с}$ . Гироскоп также представляет собой датчик прямого преобразования.

В России разработкой гироскопов с широким диапазоном измерения занимаются фирмы “Лаборатория Микроприборов” (г.Зеленоград) и фирма “Гирооптика”(Санкт-Петербург).

Гироскоп ММГК-10000 фирмы “Лаборатория Микроприборов” выполнен на основе чувствительного элемента кольцевого типа, реализация асимметричной схемы требует точной настройки и достаточно сложна, однако позволяет добиться требуемых параметров, исключить влияние многих технологических погрешностей и значительно расширить диапазон измеряемых скоростей [5].

Проведем сегментирование рынка услуг микромеханических гироскопов. Карта сегментирования представлена на рисунке 5.1.

Датчик	Analog Devices ADXRS649	InvenSense ITG3701	Лаборатория Микро- приборов ММГК-10000	STMicro- electronics LY5150AL
Диапазон измерения, °/с	50000	4000	10000	6000
Нелинейность МК, %	0.1	0.3	0.3	1
Резонансная частота ИМ, Гц	17500	27000	-	-
Спектральная плотность шума, °/с/√Гц	0.25	0.02	0.1445	0.175
Полоса пропускания, Гц	2000	1,8,32	80	140
Смещение нуля от температуры	-	15%	-	0.25°/с /°C
Изменение МК от температуры	2%	4%	-	0.05°/с /°C
Температурный диапазон, °C	-40+105	-10+75	-40+80	-40+85

Рисунок 5.1 – Таблица сегментирования рынка услуг.

Исходя из проведенного анализа, следует, что на рынке микромеханических гироскопов перспективными будут разработки для



компактных, и обладающих лучшими характеристиками, а главной характеристикой является ширина полосы пропускания в диапазоне 1000 Гц.

### **5.1.2 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения**

Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения позволяет провести оценку сравнительной эффективности научной разработки и определить направления для ее будущего повышения (рисунок 5.1).

Оценка сравнительной эффективности научной разработки приведена в приложении А (таблица А.1).

Исходя из произведенного анализа, представленного в таблице, конкурентоспособность данного научно-исследовательского проекта немного ниже конкурентного аппарата, так как он является ещё не доработанным [15].

### **5.1.3 SWOT-анализ**

SWOT – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) [15].

Составлена итоговая матрица SWOT-анализа, которая приводится в приложении А (таблица А.2).

Результаты SWOT-анализа учитываются при разработке структуры работ, выполняемых в рамках научно-исследовательского проекта [15].

### **5.1.4 Оценка готовности проекта к коммерциализации**

На какой бы стадии жизненного цикла не находилась научная разработка полезно оценить степень ее готовности к коммерциализации и выяснить уровень собственных знаний для ее проведения (или завершения). Бланк оценки степени

готовности научного проекта к коммерциализации представлен в приложении А (таблице А.3).

При проведении анализа по таблице А.3, приведенной выше, по каждому показателю ставится оценка по пятибалльной шкале. При этом система измерения по каждому направлению (степень проработанности научного проекта, уровень имеющихся знаний у разработчика) отличается. Так, при оценке степени проработанности научного проекта 1 балл означает не проработанность проекта, 2 балла – слабую проработанность, 3 балла – выполнено, но в качестве не уверен, 4 балла – выполнено качественно, 5 баллов – имеется положительное заключение независимого эксперта. Для оценки уровня имеющихся знаний у разработчика система баллов принимает следующий вид: 1 означает не знаком или мало знаю, 2 – в объеме теоретических знаний, 3 – знаю теорию и практические примеры применения, 4 – знаю теорию и самостоятельно выполняю, 5 – знаю теорию, выполняю и могу консультировать.

Из проведенного анализа можно сделать вывод, что перспективность научной разработки на данном этапе ниже среднего [2].

## **5.2. Инициация проекта**

### **5.2.1 Цели и результат проекта**

В данном разделе приведена информация о заинтересованных сторонах проекта, иерархии целей проекта и критериях достижения целей [2].

Заинтересованные стороны проекта представлены в приложении А (таблица А.4).

В таблице А.5, приложения А представлены цели и результаты проекта.

## **5.2.2 Организационная структура проекта**

Организационная структура проекта включает в себя рабочую группу данного проекта, роль каждого участника, а также функции, выполняемые каждым из участников и их трудозатраты в проекте [2]. Все это представлено в приложении А (таблица А.6) .

## **5.2.3 Ограничения и допущения**

Ограничения проекта – это все факторы, которые могут послужить ограничением степени свободы участников команды проекта, а так же «границы проекта» - параметры проекта или его продукта, которые не будут реализованных в рамках данного проекта [2]. Данный анализ представлен в таблице А.7, приложения А.

В данном пункте была определена цель проекта, его участники и срок выполнения проекта, а также ожидаемые результаты.

## **5.3. Планирование управления научно-техническим проектом**

### **5.3.1. Иерархическая структура работ проекта**

*Иерархическая структура работ* (ИСР) – детализация укрупненной структуры работ. В процессе создания ИСР структурируется и определяется содержание всего проекта. В приложении Б (рисунок Б.1) представлена иерархическая структура проекта по разработке микромеханического гироскопа [2].

### **5.3.2. Контрольные события проекта**

В рамках данного раздела определены ключевые события проекта, определены их даты и результаты, которые должны быть получены по

состоянию на эти даты. Эта информацию приведена в приложении (таблица А.8).

Ключевыми событиями проекта является постановка цели и задач, аналитический обзор литературы по теме проекта, разработка конструкции сенсора, математическое моделирование, проведение частотного анализа а также оценка и анализ полученных результатов, оформление проекта [2].

### 5.3.3 План проекта

План проекта заключается в составлении перечня работ, которые необходимы для достижения поставленных задач; в определении исполнителей каждой работы; в установлении продолжительности работ в рабочих днях. Каждый этап разработки требует определённых затрат труда и времени на его выполнение. Перечень и продолжительность работ, а также участники каждой работы приведены в таблице А.9, приложения А.

Трудоемкость разработки у исполнителя составила 146 человеко-дней, у руководителя – 42 человеко-дней. Затем была построена диаграмма занятости (рисунок 5.2).

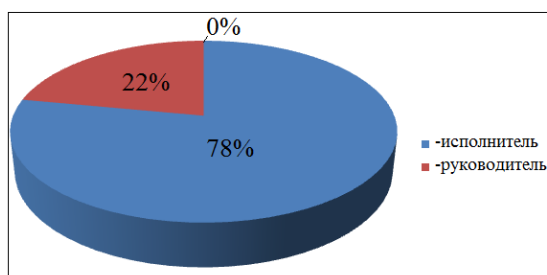


Рисунок 5.2 – Диаграмма занятости.

Далее требуется построить диаграмму Ганта. Диаграмма Ганта – это тип столбчатых диаграмм (гистограмм), который используется для иллюстрации календарного плана проекта. Диаграмма представлена в приложении А (таблица А.15).

### 5.3.4 Бюджет научного исследования

При планировании бюджета научного исследования был составлен перечень всех видов осуществленных расходов, которые были произведены в процессе его выполнения.

#### 5.3.4.1 Сырье, материалы, покупные изделия и полуфабрикаты (за вычетом отходов)

В приложении А (таблица А.10) представлен перечень всех видов материалов, необходимых для проведения исследований с указанием потребного количества, цены за единицу и общей суммы [2].

#### 5.3.4.2 Специальное оборудование для экспериментальных работ

Статья «Оборудование» включает в себя затраты на приобретение, изготовление, аренду или амортизационные отчисления специальных приборов, устройств и т.д. Расчет затрат по статье «Спецоборудование» приведен в таблице 5.1.

Таблица 5.1. Расчёт затрат на оборудование

№	Наименование оборудования	Кол-во единиц оборудования	Цена единицы оборудования, руб	Общая стоимость оборудования, тыс.руб
1	Компьютер	1	40 000	40 000
Норма амортизации, 15%				6 000
Итого				46 000

### 5.3.4.3 Основная заработная плата

Величина расходов по заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы оплаты труда представлена в таблицах 5.2-5.3, приложения А.

### 5.3.4.4 Дополнительная заработная плата

Коэффициент дополнительной заработной платы  $k_{\text{доп}} = 0,15$ , который исходит из 15% от основной заработной платы. В таблице 5.4 приведена форма расчёта основной и дополнительной заработной платы.

Таблица 5.4 - Заработная плата исполнителей

Заработная плата	Руководитель	Исполнитель
Основная зарплата, руб.	81 895,8	64 108,6
Дополнительная зарплата, руб.	12 284,4	9 616,3
Зарплата, руб.	94 180,2	73 724,9
Итого по статье $C_{\text{зп}}$	167 905,1	

### 5.3.4.6 Накладные расходы

Расчет накладных расходов ведется по следующей формуле 5.8:

$$C_{\text{накл}} = k_{\text{накл}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}), \quad (5.8)$$

где  $k_{\text{накл}}$  – коэффициент накладных расходов.

$$C_{\text{накл}} = 0,9 \cdot 167 905,1 = 151 114,6 \text{ руб.}$$

### 5.3.5. Матрица ответственности

Для распределения ответственности между участниками проекта формируется матрица ответственности (таблица 5.6)

Таблица 5.6 - Матрица ответственности

Этапы проекта	Научный руководитель / аспирант ТПС	Учебно-вспомогательный персонал / 4 курс кафедры ТПС	Заведующий кафедрой ТПС
Подготовительный этап.	О	И	
Основной этап.	О	И	
Заключительный этап.	У О	О И	С

### 5.3.6. План управления коммуникациями проекта

План управления коммуникациями отражает требования к коммуникациям со стороны участников проекта. План управления коммуникациями представлен в таблице 6.7.

Таблица 6.7 - План управления коммуникациями

№ п/п	Какая информация передается	Кто передает информацию	Кому передается информация	Когда передается информация
1	Требования к проекту	Руководитель	Исполнителю	При получении технического задания
2	Обмен информацией о текущем состоянии проекта	Исполнитель	Руководителю	Еженедельно
3	Информация по проекту	Исполнитель	Руководителю	Ежедневно

4	О выполнении контрольной точки (отчет по НИР)	Исполнитель	Руководителю	За 4 дня до контрольной точки
---	---	-------------	--------------	-------------------------------

### 5.3.7. Реестр рисков проекта

Идентифицированные риски проекта включают в себя возможные неопределенные события, которые могут возникнуть в проекте и вызвать последствия, которые повлекут за собой нежелательные эффекты. Информацию по данному разделу сведена в приложении А (таблица А.12).

\* Уровень риска оценивается как: высокий, средний или низкий в зависимости от вероятности наступления и степени влияния риска. Риски с наибольшей вероятностью наступления и высокой степенью влияния будут иметь высокий уровень, риски же с наименьшей вероятностью наступления и низкой степенью влияния соответственно низкий уровень [2].

## 5.4. Определение ресурсной, финансовой эффективности исследования

Эффективность научного ресурсосберегающего проекта включает в себя социальную эффективность, экономическую и бюджетную эффективность.

### 5.4.1 Оценка социальной эффективности исследования

Социальная эффективность научного проекта учитывает социально-экономические последствия осуществления научного проекта для общества в целом или отдельных категорий населений, в том числе как непосредственные результаты проекта, так и «внешние» результаты в смежных секторах экономики: социальные, экологические и иные внеэкономические эффекты. В



таблице 2.0 приводится оценка социальной эффективности проекта разработки микромеханического слухового сенсора [2].

Таблица 5.8 - Критерии социальной эффективности

ДО	ПОСЛЕ
Использование двухкомпонентного ММГ.	Использование однокомпонентного ММГ.
Большие размеры ММГ.	Использование системы с одним чувствительным элементом, малые размеры и вес.
Невозможность работы при перегрузках.	Устойчив к внешним факторам и удобен в эксплуатации .

#### 5.4.2 Оценка сравнительной эффективности исследования

Вариант № 1. Микромеханический гироскоп – 254 268 руб.

Вариант № 2. ММГ STMicroelectronics – 351 789 руб.

Вариант № 3. ММГ Analog Devices – 51 980 руб.

$$I_{\Phi B1}^p = \frac{254\,268}{351\,789} = 0,72, \quad I_{\Phi B2}^p = \frac{351\,789}{351\,789} = 1, \quad I_{\Phi B3}^p = \frac{51\,980}{351\,789} = 0,147$$

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения объекта исследования можно определить следующим образом:

$$I_m^a = \sum_{i=1}^n a_i b_i^a, \quad I_m^p = \sum_{i=1}^n a_i b_i^p \quad (5.11)$$

где  $I_m^a$  – интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов;

$a_i$  – весовой коэффициент  $i$ -го параметра;

$b_i^a, b_i^p$  – бальная оценка  $i$ -го параметра для аналога и разработки,

устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания;

$n$  – число параметров сравнения.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности рекомендуется проводить в форме приложения А (таблицы А.13), пример которой приведен ниже.

$$I_{\text{тп}} = 5 \times 0,1 + 4 \times 0,1 + 4 \times 0,1 + 5 \times 0,1 + 5 \times 0,1 + 5 \times 0,1 + 3 \times 0,1 + 4 \times 0,1 + 4 \times 0,05 + 3 \times 0,05 + 4 \times 0,1 = 4,25$$

$$A1 = 5 \times 0,1 + 4 \times 0,1 + 5 \times 0,1 + 4 \times 0,1 + 4 \times 0,1 + 5 \times 0,1 + 4 \times 0,1 + 4 \times 0,1 + 4 \times 0,05 + 4 \times 0,05 + 4 \times 0,1 = 4,3$$

$$I_m^p = \frac{46}{47} = 0,98; I_m^{a1} = \frac{47}{47} = 1; I_m^{a2} = \frac{36}{47} = 0,76$$

**Интегральный показатель эффективности разработки ( $I_{\text{финр}}^p$ ) и налога ( $I_{\text{финр}}^a$ ):**

$$I_{\text{финр}}^p = \frac{I_m^p}{I_{\text{ф}}^p}, I_{\text{финр}}^a = \frac{I_m^a}{I_{\text{ф}}^a}, \quad (5.12)$$

$$I_{\text{финр}}^p = \frac{0,98}{0,72} = 1,36; I_{\text{финр}}^{a1} = \frac{1}{1} = 1; I_{\text{финр}}^{a2} = \frac{0,76}{0,147} = 5,17$$

$$\mathcal{E}_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{ф}}^p}{I_m^a} \quad (5.13)$$

где  $\mathcal{E}_{\text{ср}}$  – сравнительная эффективность проекта;  $I_{\text{ф}}^p$  – интегральный финансовый показатель разработки;  $I_m^a$  – интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов.

$$\mathcal{E}_{\text{ср}}^p = \frac{0,72}{0,98} = 0,73; \mathcal{E}_{\text{ср}}^{a1} = \frac{1}{1} = 1; \mathcal{E}_{\text{ср}}^{a2} = \frac{0,147}{0,76} = 0,19$$

В приложении А (таблица А.14) представлена сравнительная эффективность разработки.

Сравнение значений интегральных показателей эффективности позволяет понять и выбрать более эффективный вариант решения поставленной в технической задачи с позиции финансовой и ресурсной эффективности [2].

## **Заключение**

В ходе выполнения магистерской диссертационной работы был разработан микромеханический гироскоп с расширенной полосой пропускания.

В процессе был выполнен следующий комплекс работ:

- анализ отечественной и зарубежной литературы по теме работы;
- выбор расчетной схемы микромеханического гироскопа;
- разработка функциональной схемы гироскопа;
- составление математической модели гироскопа;
- выбор материала изготовления, описание технологического процесса изготовления МЭМС сенсора и технологического процесса сборки;
- расчет собственных частот;
- расчет емкостей гребенчатых структур;
- организация, планирование и оценка научной эффективности научно-исследовательской работы;
- анализ опасных и вредных производственных факторов и разработка комплекса защитных мероприятий.

Результаты теоретических исследований и расчетов показали, что разработанный микромеханический гироскоп является надежным и удовлетворяет требованиям технического задания.

Полученные результаты планируется в дальнейшем использовать для изготовления экспериментального макета разработки и проверки на практике характеристик, полученных теоретическим путем.

## Список публикаций

1. Ковалева Ю. Ю. , Фролов Р. А. , Шагдыров Б. И. Развитие иноязычной коммуникативно-культурной компетенции студентов технического вуза в рамках проектной работы по дисциплине "Иностранный язык" // Филологические науки. Вопросы теории и практики . - 2014 - №. 7-1. - С. 88-92

2. Ковалева Ю. Ю. , Фролов Р. А. , Шагдыров Б. И. Развитие иноязычной коммуникативно-культурной компетенции студентов технического вуза в рамках проектной работы по дисциплине "Иностранный язык" // Лингвистика и межкультурная коммуникация: теоретические и методологические проблемы современного образования: сборник трудов I Российской научно-практической конференции с международным участием для студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 15-17 Мая 2013. - Томск: ТПУ, 2013 - С. 43-49

3. Иванова В. С., Мертинс (Линейцева) К. В., Шагдыров Б. И. Развитие языковой компетентности в техническом вузе // Functions of upbringing and education in conditions of the accelerated socialization of the personality in the modern society : Peer-reviewed materials digest (collective monograph) published following the results of the CIII International Research and Practice Conference and II stage of the Championship in Psychology and Educational sciences. - London : IASHE. - 2015. - С. 49-52

4. Шагдыров И.Б., Балсанов М.Б., Петина Н.Р., Шагдыров Б.И. Исследование процесса разрушенных фуражных культур в трехступенчатом измельчителе., Сборник научных трудов, Серия: технологии и технические средства в АПК, Выпуск 11. Издательство ВСГУТУ, Улан-Удэ, 2015. С 102-105.

5. Шагдыров И.Б. Анализ влияния конструктивно-режимных параметров на процесс измельчения фуражного зерна в многоступенчатом измельчителе / И.Б.Шагдыров, В.И.Коновалов, Б.И.Шагдыров, А.И.Пунько // Механизация и электрификация сельского хозяйства: межвед. тематич. сб.: в 2т.

/ РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства».- Минск,2014.  
–Вып.48.-Т.2.-С.-104-110.

6. И.Б. Шагдыров, И.Я. Федоренко, В.В. Садов, Б.М. Балданов, Н.Р. Петина, Б.И. Шагдыров. Теоретическое обоснование технологической схемы и оптимизация фракционного состава зерновой дерти, образуемой при измельчении фуражного зерна в многоступенчатом измельчителе. *Mongolian journal of agricultural sciences*.Vol.2 . Ulaanbaatar 2015. С 71-75.

## Список используемых источников

- 1 Запевалин А.И. Обзор высоко-аспектных процессов травления кремния // Современная техника и технологии. 2014. № 6 [Электронный ресурс]. URL: <http://technology.snauka.ru/2014/06/3970>
- 2 Гироскоп/ Википедия. [2013-2013]. Дата обновления: 13 мая 2016.. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/>
- 3 Расчёт надёжности упругих элементов микромеханических гироскопов: учебное пособие, [Электронный ресурс] – URL: <http://window.edu.ru/resource/673/78673/files/itmo908.pdf#1>
- 4 Распопов В.Я. Микромеханические приборы. - М.: Машиностроение, 2007г. - 397с.
- 5 Chinwuba D.E. Readout Techniques for High-Q Micromachined Vibratory Rate Gyroscopes/ Chinwuba David Ezekwe // University of California at Berkeley Ph.D. Dissertation. – 2007.
- 6 Козорез Д.И. Современные информационные технологии в задачах навигации и наведения беспилотных маневренных летательных аппаратов, [Электронный ресурс] – URL: <https://books.google.ru/>, свободный
- 7 Костюченко Т.Г. T-Flex Анализ. Расчет собственных частот и форм колебаний конструкций. Методические указания по выполнению лабораторного практикума. – Томск: Изд. ТПУ, 2005. - 21 с.
- 8 Расчетная программа T-FLEX Анализ, [Электронный ресурс] – URL: <http://www.tflex.ru/products/raschet/analiz/>, свободный
- 9 Разработка микромеханических гироскопов, имеющих более широкий диапазон измерений [Электронный ресурс] – URL: <http://knowledge.allbest.ru/>, свободный
- 10 Микромеханический гироскоп компенсационного типа с расширенным диапазоном измерения, [Электронный ресурс] – URL: <http://www.eltech.ru/assets/files/nauka/>, свободный
- 11 Микроэлектромеханические системы, [Электронный ресурс] – URL: <http://ru.wikipedia.org/wiki>, свободный

12 Учебное пособие “Расчет надежности упругих элементов микромеханических гироскопов” – Санкт-Петербург, 1999 г. 128с.

13 Пешехонов, В. Г. Микромеханический гироскоп, разрабатываемый в ЦНИИ «Электроприбор» / В. Г. Пешехонов [и др.] // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2008. – № 2. – С.29-31.

14 Реактивное ионное травление, [Электронный ресурс] – URL: <http://ru.wikipedia.org/wiki>, свободный

15 Видяев И.Г. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение: учебно-методическое пособие / Н.А. Гаврикова, Л.Р. Тухватулина, И.Г. Видяев. – Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2014. – 73 с.

16 ГОСТ 12.0.003-74. ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация

17 ГОСТ 12.1.005-88. ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны

18 СанПиН 2.2.4.1191–03. Электромагнитные поля в производственных условиях.