

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

*На правах рукописи*



**Коледа Алексей Николаевич**

**ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКА МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ  
ГИРОСКОПОВ, УСТОЙЧИВЫХ К ВИБРАЦИИ И УДАРАМ**

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

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
Нестеренко Тамара Георгиевна  
кандидат технических наук, доцент

Томск – 2019

## ОГЛАВЛЕНИЕ

	С.
ВВЕДЕНИЕ .....	5
1 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ ВИБРАЦИОННОЙ И УДАРНОЙ СТОЙКОСТИ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ ГИРОСКОПОВ .....	17
1.1 Механические воздействия .....	17
1.2 Современное состояние разработок микромеханических гироскопов.....	21
Выводы по главе 1 .....	32
2 АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ДВУХКОМПОНЕНТНЫЙ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИЙ ГИРОСКОП .....	33
2.1 Функциональная схема двухкомпонентного микромеханического гироскопа.....	33
2.2 Математическая модель двухкомпонентного гироскопа.....	36
2.3 Динамические характеристики двухкомпонентного микромеханического гироскопа .....	40
2.3.1 Собственные частоты гироскопа .....	40
2.3.2 Характеристики динамической точности .....	45
2.4 Анализ чувствительности микромеханического гироскопа к вибрационным воздействиям .....	51
2.4.1 Аналитические исследования .....	51
2.4.2 Математическое моделирование влияние вибрации.....	54
2.5 Анализ чувствительности микромеханического гироскопа к ударным воздействиям .....	59
2.5.1 Аналитические исследования .....	59
2.5.2 Математическое моделирование влияния вибрации и ударов на сенсор микромеханического гироскопа.....	62
2.5.3 Конечно элементный анализ влияния вибрации и ударов на микромеханический гироскоп .....	63
Выводы по главе 2.....	69

3 ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЕ ИСПЫТАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ ДВУХКОМПОНЕНТНОГО МИКРОМЕХАНИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА.....	71
3.1 Экспериментальный макет микромеханического гироскопа .....	71
3.2 Испытания макета микромеханического гироскопа .....	80
3.2.1 Определение диапазона измерения угловой скорости, динамической погрешности и относительной нелинейности характеристики.....	83
3.2.2 Определение полосы пропускания микромеханического гироскопа .....	89
3.2.3 Определение времени готовности .....	91
3.2.4 Определение диапазона рабочих температур и температурного смещения чувствительности .....	92
3.2.5 Определение собственного шума микромеханического гироскопа .....	94
3.2.6 Испытания на вибростойкость.....	97
3.2.7 Испытания на удар .....	97
Выводы по главе 3.....	98
4 РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЯ ОДНОКОМПОНЕНТНОГО МИКРОМЕХАНИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА, УСТОЙЧИВОГО К ВИБРАЦИИ И УДАРАМ.....	99
4.1 Функциональная схема и математическая модель микромеханического гироскопа.....	99
4.2 Конструкция и модальный анализ сенсора микромеханического гироскопа .....	102
4.3 Математическое моделирование гироскопа.....	104
4.3.1 Моделирование влияния ударного воздействия .....	104
4.3.2 Воздействие вибрации на сенсор микромеханического гироскопа.....	112
4.4 Конечно-элементное моделирование гироскопа .....	113
4.4.1 Оптимизация конечно-элементной модели гироскопа .....	113
4.4.2 Конечно-элементное моделирование ударного воздействия .....	116
4.4.3 Конструктивные решения повышения ударной стойкости микромеханического гироскопа .....	123

4.5 Методика проектирования микромеханического гироскопа, устойчивого к ударам.....	138
Выводы по главе 4.....	141
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	143
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	145
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	146
Приложение А Программа и методика испытаний экспериментальных образцов двухкомпонентного микромеханического гироскопа .....	155
Приложение Б Патент на изобретение. Трёхосевой микромеханический акселерометр.....	172
Приложение В Патент на изобретение. Интегральный микромеханический гироскоп .....	174
Приложение Г Акт внедрения на предприятие.....	176
Приложение Д Акт об использовании в учебном процессе результатов работы .....	177
Приложение Е Акт внедрения в научные работы.....	178



## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время рынок микроэлектромеханических систем (МЭМС) стремительно развивается и является перспективным направлением развития микроэлектроники. Наиболее развитым на сегодня сегментом данного рынка по-прежнему остаются инерциальные датчики (датчики угловой скорости, инклинометры и акселерометры). Это связано с тем, что высокая эффективность обнаружения движения объекта вызывает интерес во многих областях.

Масштабы применения МЭМС датчиков будут увеличиваться постоянно, поэтому обеспечение качества и миниатюризации такой продукции становится все более актуальным и важным.

При работе микроэлектромеханического гироскопа (ММГ) на его точность оказывают влияние внешние и внутренние возмущающие воздействия. К внешним воздействиям можно отнести технологические погрешности изготовления микромеханической части, изменения температуры окружающей среды, а также внешние механические воздействия, такие как вибрации и удары. К внутренним возмущениям относятся паразитные связи в микрогироскопе, которые могут иметь механическую (перекрёстное демпфирование и перекрёстная жёсткость) или электрическую природу (паразитные ёмкости, электростатические связи).

При работе микромеханических датчиков в жестких условиях, под действием механических возмущений могут происходить нежелательные перемещения подвижных элементов, что вызывает появление ложных выходных сигналов. Кроме того, появляются деформации конструкции, увеличиваются напряжения.

Микромеханические гироскопы широко используются в различной аппаратуре гражданской и военной техники. Современные требования к характеристикам и показателям МЭМС датчиков постоянно повышаются в связи с расширением областей применения, в значительной мере отличающихся все более высоким уровнем внешних воздействующих факторов, в частности более

широким диапазоном параметров вибраций и ударов [1, 2, 3]. Потребность в микромеханических приборах, сохраняющих показатели точности и другие эксплуатационные характеристики при расширенных диапазонах параметров воздействий, существует в таких областях, как подземная навигация при проходке скважин, военная техника, строительство, все транспортные средства, железнодорожное и автодорожное хозяйства. [4, 5, 6, 7]. При этом требуется обеспечение устойчивости МЭМС датчиков (сохранение работоспособности и показателей точности во время внешнего воздействия) в особо жестких условиях [8].

Микроэлектромеханические системы сочетают в себе механические и электрические компоненты крайне малых размеров. Для их работы необходима защита от внешних воздействий различного происхождения: физических, химических, механических. Технология МЭМС появилась после освоения технологии интегральной схемотехники и интегральных микросхем. Особенностью МЭМС является то, что в них электрические и механические узлы формируются из общего основания (например, кремниевой пластины) в результате использования технологии формирования объемных структур.

В настоящее время существует достаточно много различных устройств с интегрированными МЭМС датчиками, но существует ряд проблем и недостатков, связанных с работой данных датчиков. Условия эксплуатации подобных систем предполагают наличие вибрации и интенсивных ударов. Микромеханические гироскопы используются для работы не только при нормальных условиях, но и в любых экстремальных условиях, когда необходима информация об угловой скорости объекта. Для использования МЭМС на подвижных объектах со сверхвысокими инерционными нагрузками требуется анализ прочности конструкции прибора и сохранение метрологических характеристик.

Исходя из возможных областей использования ММГ [9], они должны сохранять:

1. Вибростойкость в диапазоне частот (20 – 2000) Гц с амплитудой виброускорения до 10g. Механические колебания могут ухудшить метрологические характеристики МЭМС, которые зависят от механических перемещений и напряжений, возникающих в микроструктуре. ММГ имеют высокую добротность, что является полезным для повышения их чувствительности, но в то же время это приводит к усилению амплитуд колебаний при некоторых частотах вибрации и увеличению искажения сигнала.

Основными критериями вибростойкости является виброустойчивость и вибропрочность. ММГ являются виброустойчивыми, если они сохраняют свои метрологические характеристики до, во время и после вибрационного воздействия. Вибропрочность определяет способность противостоять разрушению под действием вибрации.

В соответствии с принципом работы, микромеханические гироскопы измеряют ускорения, которые могут иметь различную физическую природу. Полезным является ускорение Кориолиса, которое возникает при угловом повороте объекта. Все другие возникающие ускорения вносят ошибки в показания гироскопа. Это может быть постоянное по значению ускорение либо ускорение, обусловленное вибрацией основания. Таким образом, ММГ чувствительны к действию ускорений любой природы (в англоязычной терминологии *g-sensitivity*).

2. Ударопрочность при воздействии ударов с пиковыми значениями ускорений до 20 000g и при длительности импульса порядка 0,1 мс. Ударопрочные датчики не разрушаются во время и после ударного воздействия.

Для решения проблемы повышения точности микромеханических гироскопов необходимо учитывать влияние механических воздействий на их метрологические характеристики.

**Целью диссертационной работы** является разработка принципов построения и анализ характеристик ММГ, устойчивых к ударам и вибрациям.

Для того, чтобы достичь поставленной цели, необходимо решить следующие **задачи**:

1. Провести обзор существующих литературных источников, описывающих микромеханические гироскопы, их функциональные возможности и конструктивные решения, применяемые при проектировании сенсоров, работающих в условиях наличия вибрации и ударов.

2. Разработать конструкции ММГ, обладающие более высокими функциональными характеристиками, чем существующие аналоги, и исследовать их поведение.

3. Разработать математические модели ММГ, учитывающие действия постоянных и вибрационных ускорений. По разработанным математическим моделям произвести аналитический анализ динамических характеристик механической структуры ММГ в условиях вибрационных воздействий.

4. Провести математическое компьютерное моделирование ММГ при наличии вибрации и ударов для первичного подбора параметров гироскопов.

5. Разработать конечно-элементные модели конструкций ММГ. На основе разработанных моделей провести численные исследования влияния конструктивных параметров гироскопов на их устойчивость к ударам и вибрации для определения возникающих напряжений в конструкции и оптимизации ее геометрических параметров.

6. Разработать конечно-элементные модели упоров с целью применения их в ММГ для выработки рекомендаций по повышению ударной стойкости сенсоров.

7. Изготовить и исследовать экспериментальные образцы микромеханических гироскопов для верификации математических и конечно-элементных результатов моделирования.

**Методы исследования** базируются на принципах компьютерного моделирования, методах конечно-элементного анализа, теоретической механике, электротехнике.

**Объектом исследования** являются чувствительные элементы конструкций микромеханических гироскопов.

**Предметом исследования** является повышение ударной и вибрационной стойкости микромеханических гироскопов.

**Научная новизна** результатов диссертационной работы состоит в следующем:

1. Разработаны математические модели механических структур ММГ, учитывающие действие вибрации и ударов, позволяющие провести компьютерное моделирование статических и динамических характеристик гироскопов и определить характер их движения при наличии вибрации и ударов.

2. Разработаны конечно-элементные модели микромеханических гироскопов, позволяющие учитывать контактное взаимодействие между подвижными и неподвижными частями гироскопа, определять локализацию максимальных напряжений в конструкции, а также динамику переходных процессов.

3. Проведены экспериментальные исследования микромеханических гироскопов с развязывающими рамками между осями первичных и вторичных колебаний, подтверждающие адекватность математического и конечно-элементного моделирования с погрешностью не более 5 %.

4. Разработан и оптимизирован двухступенчатый гаситель ударов, интегрированный в конструкцию механической структуры ММГ, применение которого позволяет расширить диапазон ударных воздействий на гироскоп с 10000 g до 30000 g.

5. Получены аналитические выражения передаточных функций синфазной и квадратурной составляющих вторичных колебаний гироскопа, позволяющие определить его динамические погрешности и полосу пропускания.

#### **Практическая значимость работы:**

1. Предложенная методика проектирования позволяет оценивать воздействие ударов и вибрации на динамические характеристики микромеханических гироскопов.

2. Применение антифазного движения первичных рамок ММГ позволяет компенсировать воздействие ускорения и вибрации на его выходной сигнал.

3. Конструкция двухступенчатого гасителя удара, интегрированного в механическую часть ММГ, позволяет расширить диапазон ударных воздействий на него до 30 000 g.

4. На основе проведённых исследований разработаны и защищены патентами Российской Федерации на изобретения конструкции ММГ, обладающие более высокими функциональными характеристиками по сравнению с аналогами.

5. Изготовлены экспериментальные образцы микромеханических гироскопов с двумя осями чувствительности.

6. Результаты проведённых исследований и предложенные математические модели могут быть использованы как методическая база при проектировании вибро- и ударостойких микроэлектромеханических гироскопов.

#### **Внедрение результатов работы:**

1. Разработанные модели и методы исследования ММГ использованы в учебном процессе при обучении студентов по направлению подготовки «Электроника и нанoeлектроника» для бакалавров и магистров.

2. Модели микромеханических сенсоров и программные средства моделирования применены при разработке средств персонализированной медицины в ООО «Потенциал».

3. Результаты, полученные в диссертации, использованы в ходе выполнения проектов:

- Соглашение о предоставлении субсидии №14.578.21.0232 от 26 сентября 2017 г. «Интеллектуальный инерциальный модуль на основе микроэлектромеханических датчиков с функциями гироскопа, акселерометра и магнитометра для систем ориентации и навигации транспортных средств с автоматизированным управлением», выполняемой в рамках ФЦП

«Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы».

- Соглашение № 17-37-50014 мол\_нр от 09.08.2017 г. «Разработка и исследование конструктивных методов уменьшения влияния вибрации и ударов на микромеханические инерциальные сенсоры LL-типа» в рамках гранта РФФИ на «Конкурс научных проектов, выполняемых молодыми учеными под руководством кандидатов и докторов наук в научных организациях Российской Федерации в 2017 году».

- Соглашение о предоставлении субсидии №14.575.21.0068 от 11августа 2014 г. «Разработка методов проектирования многокомпонентных микроэлектромеханических гироскопов и акселерометров, устойчивых к дестабилизирующим воздействиям», шифр «2014-14-576-0097» в рамках реализации ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы» по приоритетному направлению развития науки, технологий и техники в Российской Федерации «Индустрия наносистем».

- Соглашение о предоставлении субсидии от 14 ноября 2012 г. № 14.В37.21.1951 «Разработка методов высокоуровневого проектирования многокомпонентных микросистем» в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы. Шифр заявки «2012-1.5-14-000-2016-006».

- Соглашение о предоставлении субсидии от 19 апреля 2011 г. № 16.513.11.3056. «Разработка микромеханического инерциального датчика повышенной точности и информативности для систем ориентации и навигации транспортных средств» в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2013 годы».

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Математические модели механических структур ММГ, учитывающие действие вибрации и ударов, позволяющие провести компьютерное моделирование статических и динамических характеристик гироскопов и определить характер их движения при наличии вибрации и ударов.
2. Конечно-элементные модели микромеханических гироскопов, позволяющие учитывать контактное взаимодействие между подвижными и неподвижными частями гироскопа, определять локализацию максимальных напряжений в конструкции, а также динамику переходных процессов.
3. Результаты экспериментальных исследований микромеханических гироскопов с развязывающими рамками между осями первичных и вторичных колебаний, подтверждающие адекватность математического и конечно-элементного моделирования с погрешностью не более 5 %.
4. Двухступенчатый гаситель ударов, интегрированный в конструкцию механической структуры ММГ, применение которого позволяет расширить диапазон ударных воздействий на гироскоп с 10000 g до 30000 g.
5. Аналитические выражения передаточных функций синфазной и квадратурной составляющих вторичных колебаний гироскопа, позволяющие определить его динамические погрешности и полосу пропускания.

**Степень достоверности результатов исследования** обеспечивается строгостью применяемого математического аппарата и современного программного обеспечения на его основе, применением для изготовления кристаллов высоко воспроизводимых производственных технологических процессов, многократным повторением экспериментов, согласованием теоретических и экспериментальных результатов исследования.

**Методы исследования.** Для решения поставленных задач использовались методы теоретической механики, теории упругости и сопротивления материалов, методы конечно-элементного и экспериментального анализа, методы компьютерного моделирования.



**Личный вклад автора.** Поиск, анализ и обобщение литературных данных были проведены автором самостоятельно. Разработка вариантов конструкций проводилась совместно с соавторами. Автором проведено компьютерное моделирование ММГ. Автором изготовлены экспериментальные образцы микроэлектромеханических гироскопов, проведены их исследования и измерения. Постановка цели и задач проводилась совместно с научным руководителем. Обработка экспериментальных результатов, анализ и их интерпретация были проведены автором совместно с научным руководителем и соавторами. Подготовка материалов к публикации проводилась совместно с соавторами.

**Апробация результатов исследования.** Основные результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались на международных и отечественных научно-технических конференциях:

1. 6th International Conference on Modern Technologies for Non-Destructive Testing; Tomsk; Russian Federation; 9 October 2017 to 14 October 2017.
2. IV Форум молодых учёных U-NOVUS 2016, г. Томск, Россия, 17-19 мая 2017 г. Томск.
3. 14th IMECO TC10 Workshop on Technical Diagnostics 2016: New Perspectives in Measurements, Tools and Techniques for Systems Reliability, Maintainability and Safety; Milan; Italy; 27 June 2016 through 28 June 2016.
4. International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2016, 14 June 2016.
5. III Форум молодых учёных U-NOVUS 2016, г. Томск, Россия, 2-13 мая 2016 г. Томск.
6. XXI Международная научная конференция студентов и молодых ученых «Современные техника и технологии» (СТТ-2015), г. Томск, Россия, 5-9 октября 2015 г.
7. V Всероссийский фестиваль науки НАУКА 0+, Красноярск, Россия, 2-4 октября 2015.

8. XXI IMEKO World Congress “Measurement in Research and Industry”. Czech Republic, Prague, 30 August - 4 September 2015.

9. III Всероссийская с международным участием научно-практическая конференция по инновациям в неразрушающем контроле «SibTest», Россия, Горный Алтай, 27–31 июля 2015 г.

10. XXII Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам, МКИНС-2015, Россия, Санкт-Петербург, 25-27 мая 2015 г.

11. Ежегодная открытая выставка научных достижений молодых учёных «РОСТ.УР» – 2015, Россия, Томск, 13-14 ноября 2014 г.

12. XX Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам, МКИНС-2013, Россия, Санкт-Петербург, 27-29 мая 2013 г.

### **Публикации.**

По теме диссертации опубликовано 9 печатных работ в том числе: 3 статьи в журналах, входящих в перечень изданий, рекомендуемых ВАК РФ; 4 – иные публикации и материалы научно–технических конференций; 2 патента на изобретения.

### **Структура и объем диссертации.**

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы из 90 наименований и шести приложений. Диссертация изложена на 179 страницах и включает 129 рисунков, 28 формул и 29 таблиц.

### **Краткое содержание работы.**

**Во введении** обоснована актуальность темы, обозначена цель диссертационного исследования и сформулированы задачи. Изложены научная новизна и практическая значимость работы. Сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** производится обзор и анализ существующих методов повышения устойчивости МЭМС гироскопов к механическим воздействиям.

Приводится классификация механических воздействий и их параметров на различных объектах.

**Во второй главе** производится исследование влияния вибрации и ударов на двухкомпонентный гироскоп. Составлена математическая модель двухкомпонентного гироскопа, учитывающая наличие вибрации основания, аналитически определены его динамические характеристики, к которым относятся резонансные частоты; динамические погрешности; полоса пропускания. При наличии вибрации на информативные колебания инерционных тел, которые происходят с частотой первичных колебаний, накладываются колебания с частотой вибрации и колебания с частотой первичных колебаний, но сдвинутые на  $90^0$  по отношению к информативным колебаниям. Эти колебания представляют собой помеху, которая может быть устранена системой обработки информации. Разработан алгоритм определения угловых скоростей, который позволяет скомпенсировать вибрационные помехи. Проведено математическое компьютерное моделирование динамики ММГ при ударах и вибрации. Собственные частоты гироскопа превышают частотный диапазон вибрационного воздействия, что исключает возможность возникновения резонансов. При ударах перемещения по всем осям превышают имеющиеся зазоры, следовательно, происходит механический контакт и отскок подвижных частей.

Проведён конечно-элементный анализ влияния вибрации и ударов на микрогироскоп, определены места в конструкции, где происходит контакт и возникающие при этом напряжения. Для обеспечения ударной стойкости гироскопа и сохранения его метрологических характеристик необходимо в конструкции предусмотреть наличие упоров, ограничивающих перемещения элементов конструкции.

**В третьей главе** приведены результаты экспериментальных исследований двухкомпонентного ММГ. Приводятся характеристики ММГ, которые определены по экспериментальным графикам функции Аллана.

При испытании на вибростенде все экземпляры объекта испытаний

сохранили работоспособность во всем заданном частотном диапазоне вибраций. Резонансных явлений в диапазоне частот вибрации не обнаружено.

При ударных испытаниях происходит касание подвижных частей гироскопа, разрушения конструкции не происходит, после прекращения удара гироскоп восстанавливает свою работоспособность.

**В четвёртой главе** проведено исследование влияния вибрации и ударов на однокомпонентный гироскоп. Разработана математическая модель, используя которую проведено математическое компьютерное моделирование гироскопа, которое показало возможность возникновения контактов при ударах. Разработаны конечно-элементные модели упоров с целью применения их в ММГ для выработки рекомендаций по устранению нежелательных явлений в динамике гироскопов.

**В заключении** сформулированы основные результаты и выводы по работе.

**В Приложении** представлена программа и методика испытаний экспериментальных образцов двухкомпонентного ММГ, патенты, полученные по результатам диссертационной работы, акты, подтверждающие использование отдельных результатов диссертационной работы в научно-исследовательских работах и в учебном процессе.

# **1 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ ВИБРАЦИОННОЙ И УДАРНОЙ СТОЙКОСТИ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ ГИРОСКОПОВ**

Большими достоинствами микромеханических гироскопов являются простота конструкции, малые габаритные размеры, малый вес, низкое энергопотребление, отсутствие вращающихся частей, что улучшает их эксплуатационные характеристики и уменьшает требования к обслуживанию.

Микромеханические гироскопы имеют очень широкую сферу применения: в медицине в качестве приборов для прецизионного позиционирования микроинструментов в хирургии, в интеллектуальных системах протезирования; в автомобилестроении для создания систем навигации; в оборонной промышленности в системах управления боеприпасами и боевыми роботами, в беспилотных летательных аппаратах; в бытовой технике в мобильных телефонах, игровых консолях и различных тренажерах и др. [10, 11].

В связи с широким применением ММГ при эксплуатации на высокоскоростных и высокоманевренных объектах они работают в условиях наличия интенсивных ударных и вибрационных воздействий, поэтому актуальным является обеспечение стойкости ММГ при механических воздействиях.

## **1.1 Механические воздействия**

Механическими воздействиями являются удар и вибрация.

Ударное воздействие может быть силовым или кинематическим. Силовое возбуждение характеризуется непосредственным воздействием возмущающей силы на микромеханическую систему. При кинематическом возбуждении заданы законы движения отдельных точек микромеханической системы (например, закон движения подложки сенсора).

Ударной является нагрузка, которая связана с конечным изменением количества движения в короткий промежуток времени, сопровождающимся возникновением больших ударных сил. Удар представляет собой достаточно сложное физическое явление. Анализ ударного воздействия имеет целью определение деформаций и механических напряжений, возникающих в микромеханических элементах. В результате удара также возникает колебательное движение.

Ударные нагрузки характеризуются величиной ускорения, длительностью удара и формой ударного импульса. Ударный импульс представляет собой меру взаимодействия и равен площади под кривой нагрузки от времени [12].

$$S_{уд} = \int_0^t F \cdot dt,$$

где  $F(t)$  – закон изменения во времени ударной силы. Формой ударного импульса называется зависимость ударного ускорения  $a(t)$  от времени (рисунок 1.1).

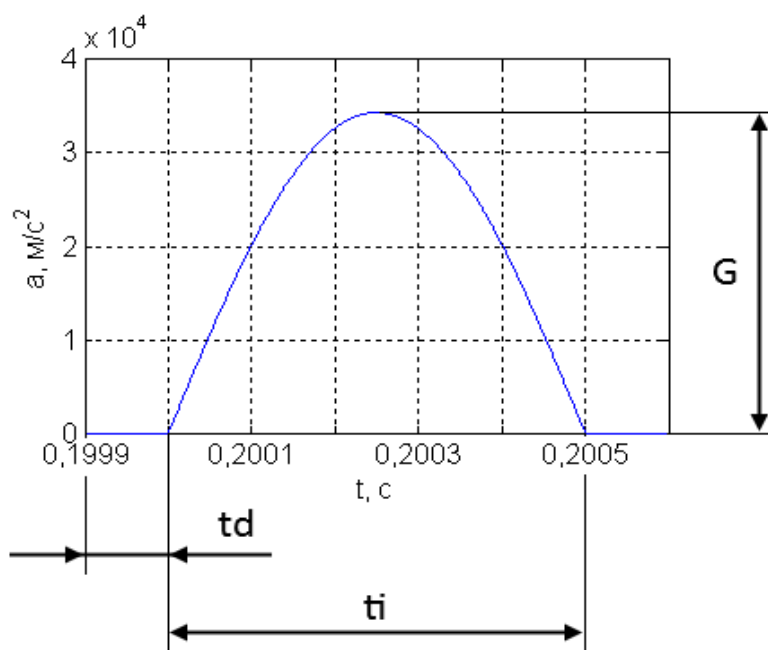


Рисунок 1.1 – Ударный импульс

Амплитудой ударного импульса называют максимальное значение ударного ускорения. Длительностью ударного импульса ( $t_i$ ) называют интервал времени действия импульса.  $G$  – амплитуда ударного импульса,  $t_d$  – задержка перед началом ударного импульса.

В зависимости от скорости приложения контактной силы, ударное нагружение может рассматриваться как квазистатическое или ударное. Реакция системы, то есть ускорение массы при ударном кинематическом воздействии со стороны основания импульсом ускорения может быть различным.

Ударные нагрузки сложно описать количественно из-за широкого диапазона амплитуд (от 20g до 100000g и более) (рисунок 1.2), широкого временного диапазона (от 50 до 6000) мкс [13], а также в значительной степени их непредсказуемой и изменчивой формой (импульс, полуволна и т.д.) [14].

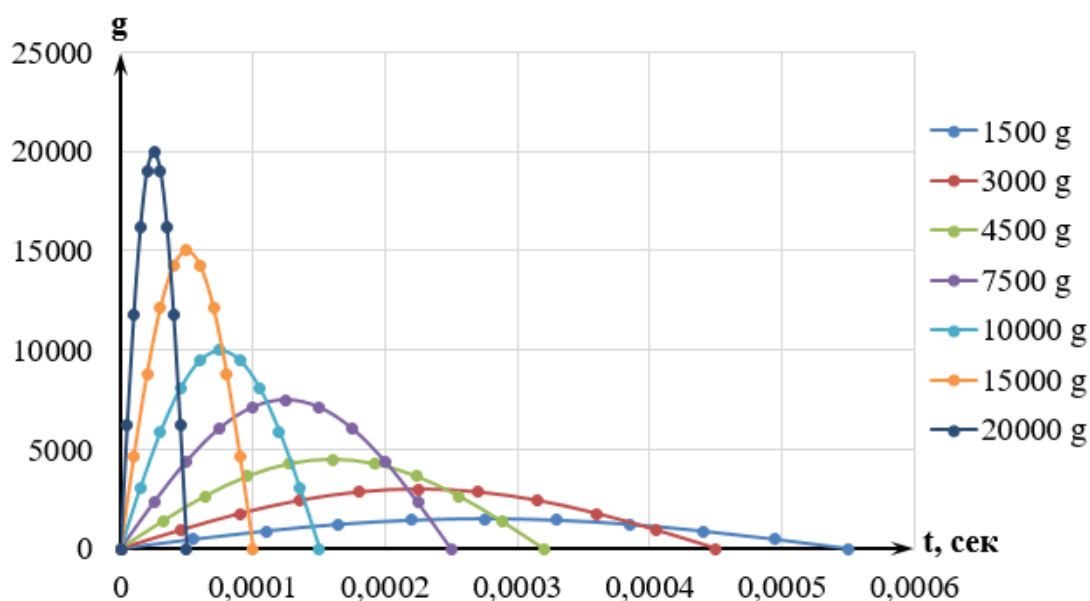


Рисунок 1.2 – Задание удара

В обычных условиях, например, свободное падение, объект испытывает ускорение, равное 1g, пока он не ударится о поверхность. При ударе о твёрдую поверхность, объект может испытывать значительные ударные воздействия. При падении с 1 метра на твёрдую поверхность (~2000g), при падении с 25 метров на твёрдую поверхность (~7000g) [15]. Сенсоры для срабатывания подушек безопасности автомобиля должны работать в диапазоне от 20 до 50g, а датчик детонации топливной смеси в диапазоне ударов до 1000g [16, 17]. Для других автомобильных применений требуется, чтобы сенсоры выдерживали ударные воздействия до 3000g [18]. Датчики, применяемые для разведки нефти и газа должны выдерживать удар в 20000g [19]. В военном применении, во время запуска боеприпасов, генерируются большие ударные амплитуды в диапазоне от

10000 до 100000g [20, 21], в то время, как сам боеприпас испытывает значительно меньшие амплитудные удары во время полёта (до 20 g) [22]. В таблице 1.1 приведены параметры ударов на различных объектах.

Таблица 1.1 – Характеристики ударных воздействий

	Применение	Амплитуда удара
<b>Свободное падение под воздействием гравитации</b>	Свободное падение до соприкосновения с поверхностью	1g
	Падение с 1 метра на твёрдую поверхность	~ 2000g
	Падение с 25 метров на твёрдую поверхность	~7000g
<b>Автотранспорт</b>	Рабочий диапазон акселерометров в подушках безопасности	50g
	Датчик детонации топливной смеси	1000g
	Требования к датчикам для использования в автомобилях	<3000g
<b>Добыча полезных ископаемых</b>	Нефте- и газоразведка	20000g
<b>Военное применение</b>	Орудийный огонь	23000g
	Взрыв боеприпасов от танка, артиллерии и миномёта	10000-100000g
	Полёт боеприпасов после запуска из танков, артиллерии и миномёта	0,5-20g

Механическая вибрация относится к длительному колебательному движению в течение достаточно длительного времени по сравнению со временем переходных процессов устройства.

В повседневной жизни вибрация, производимая наземным транспортом, на предприятиях и испытаниях на вибрацию, обычно лежит в диапазоне от единиц Гц до нескольких кГц [23, 24, 25, 26].

Наибольшие амплитудные колебания возникают в тяжёлых условиях, особенно в космических полётах или в военном применении. Пока космический аппарат находится стационарно на космической орбите, собственные частоты вибраций не превышают 3 Гц [27, 28], но во время запуска возникают большие вибрации с частотами до 10 кГц [29]. Военные самолёты, во время полёта, создают вибрацию не более 2000 гц [30], а частота вибрации в ракетах во время полёта может достигать до 50 кГц [31] (таблица 1.2).



Таблица 1.2 – Доминирующие частоты вибрации в различных средах

Применение		Доминирующий спектр частот
<b>Наземный транспорт</b>	Машина во время движения	0-400 Гц
	Скорая помощь	2-500 Гц
	Поезд	1-1000 Гц
	Требования для некоторых автомобильных сенсоров	100-2000 Гц
<b>Предприятия</b>	Вращающиеся машины (двигатели, вентиляторы)	< 1000 Гц
<b>Вибрационный анализ</b>	Вибрационный стол	10-20000 Гц
<b>Космос</b>	Космический аппарат на орбите	0,1-3 Гц
	Космический корабль во время запуска	Переходные процессы: <60 Гц Случайная вибрация: 20-2000 Гц Пиротехнический удар: 10-10000 Гц
<b>Военное применение</b>	Военный самолёт во время полёта	100-2000 Гц
	Ракета во время полёта	0-50000 Гц

## 1.2 Современное состояние разработок микромеханических гироскопов

Разработчики МЭМС датчиков применяют различные способы обеспечения их вибро- и ударо- стойкости. Это: установка МЭМС датчиков на амортизаторах; использование схем микрогироскопов с угловыми движениями; применение многомассовых систем; использование антифазного движения; конструктивные приёмы (применение упоров и ограничителей); повышение собственных частот; коррекция микрогироскопов по показаниям микроакселерометров.

К сожалению, среди большого количества ММГ на рынке многие производители не указывают их вибрационную и ударную стойкость, в то время как эти показатели в некоторых областях считаются одними из ключевых.

С 2002 года в США разрабатывается программа HERMiT (Harsh Environment Robust Micromechanical Technology), которая первоначально была

ориентирована на создание новой технологии корпусирования и контроля внутренней среды микромеханических приборов в неблагоприятных условиях эксплуатации [32, 33].

По мере выполнения этой программы одним из важных её направлений стало обеспечение работоспособности ММГ при высоких значениях ударов и вибрации.

Микромеханические гироскопы различного типа имеют общие черты в своих конструкциях. Это:

- наличие упругих подвесов, обеспечивающих поступательные перемещения сенсора вдоль трёх взаимно перпендикулярных осей; подвесы должны иметь конечную жесткость на изгиб и бесконечную на кручение;
- использование для изготовления монолитной конструкции сенсоров гироскопа кремния, который имеет малые диссипативные потери, поэтому любая конструкция при вакуумировании обладает ярко выраженными резонансными свойствами, что используется в гироскопе для резонансного усиления колебаний в десятки тысяч раз;
- использование гребенчатых электродных структур в качестве исполнительных и управляющих элементов;
- необходимость высоких перекрёстных жесткостей и отсутствие резонансов в частотных диапазонах вибраций;
- упругие перемещения под действием сил инерции при ударе должны быть пренебрежимо малы и отсутствовать контакты при ударе;
- получение требуемых значений собственных частот конструкции сенсора путем обоснованного выбора длины и ширины упругих элементов подвеса при выбранной толщине, а также изменением их конфигурации и усложнением структуры.

Наиболее распространенной стратегией повышения стойкости ММГ к механическим воздействиям является механическое антивибрационное крепление. Это могут быть простейшие резиновые или пластиковые прокладки

или оболочки, в которых размещаются ММГ [34] (рисунок 1.3.) или специальные микроплатформы с виброизоляторами [35], выполненные на уровне «вафли», или виброударозащитные корпуса для всего инерциального модуля [36].

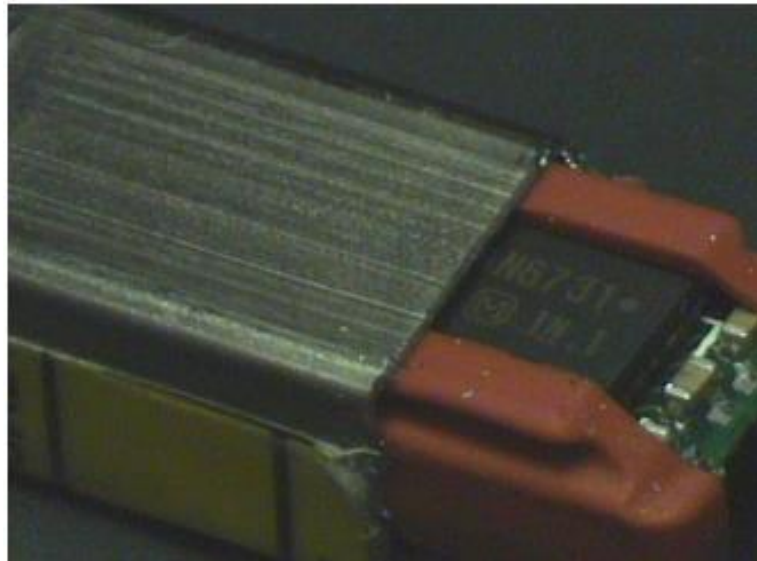


Рисунок 1.3 – Автомобильный гироскоп Panasonic с резиновым антивибрационным креплением

В то же время антивибрационные крепления очень трудно спроектировать, поскольку они не работают в широком диапазоне частот (особенно плохо работают на низких частотах). Антивибрационные крепления могут быть успешно спроектированы для ослабления узкополосных колебаний в известном спектре, и проблематичны для любого универсального применения, где широкополосная вибрация может присутствовать.

Наибольшее распространение получили гироскопы LL-типа, в которых элементы конструкции совершают поступательное движение, гироскопы RR-типа, в которых элементы конструкции совершают угловое движение и гироскопы LR-типа.

Наиболее чувствительными к поступательной вибрации являются гироскопы LL-типа, особенно в диапазонах собственных частот. Поэтому в таких конструкциях для повышения устойчивости к виброускорениям поднимают собственные частоты выше уровня диапазона рабочих частот, однако такой подход снижает чувствительность гироскопа к ускорению Кориолиса, а, следовательно, и угловой скорости.

В идеальном состоянии гироскопы RR-типа нечувствительны к поступательному ускорению и вибрации. Однако, с учетом технологических погрешностей и конечной жесткости торсионных подвесов по осям действия ускорения, в таких типах гироскопов сложнее компенсировать воздействие вибрации на выходной сигнал из-за наличия различного рода нелинейностей, в первую очередь самого подвеса. Гироскопы LR-типа совмещают в себе как достоинства, так и недостатки двух предыдущих схем [37].

Одним из способов повышения виброустойчивости ММГ является применение антифазного движения инерционных тел (ИТ) в канале первичных колебаний, что позволяет использовать дифференциальный режим измерения, при котором компенсируется действие инерционных ускорений [38].

Яркими примерами ММГ с двумя ИТ являются ADXRS150 (LL-тип, Analog Devices) [39], SAR500 (RR-тип, Sensoror) [40] и камертонный гироскоп Draper Laboratory (LR-тип) [41].

В этих ММГ инерционные тела расположены в одной плоскости. При их расположении друг над другом и при использовании обратных электрических связей повышается устойчивость ММГ к линейным ускорениям, например, фирма Robert Bosch GmbH [42].

Для улучшения показателей механической устойчивости используют схемы ММГ с несколькими ИТ [43, 44], имеющими угловые степени свободы. В 2011 году фирма Analog Devices представила разработку ММГ ADXRS646 с пониженной чувствительностью к линейным ускорениям и вибрации, что достигается использованием четырех ИТ с механической связью между ними [37, 45].

Однако при разработке многомассовых систем ММГ возникает необходимость обеспечения равенства собственных частот ИТ с высокой точностью. Выполнение этого условия для несвязанных ИТ ограничено точностью технологии фотолитографии и травления кремния при изготовлении сенсора. При существующей точности изготовления, рассогласование параметров составляет 1%; для достижения более высокой точности требуется

использовать специальные корректирующие средства [46]. При наличии механической связи между инерционными телами в гироскопе камертонного типа, для снижения чувствительности к вибрации и ускорениям, рекомендован метод разнесения частот антифазных и синфазных колебаний ИТ в упругом подвесе [47].

Исходя из принципа работы ММГ эффективным методом повышения вибрационной и ударной стойкости ММГ является повышение его собственных частот. В таблице 1.3 приведены данные по первым (низшим) собственным частотам колебаний ИТ в ММГ некоторых производителей. Повышение собственной частоты ИТ снижает амплитуды первичных и информативных колебаний ММГ [46, 48], что влечёт уменьшение чувствительности гироскопа к измеряемой угловой скорости [37, 49].

Таблица 1.3 – Низшие собственные частоты колебаний ИТ в ММГ различных производителей

Фирма-производитель	Модель ММГ	Низшая собственная частота ММГ, кГц
InvenSense	ISZ-1215	30
Silicon Sensing	CRS09	28
STMicroelectronics	L2G2IS	20
Analog Devices	ADXRS646	17,5
	ADXRS150	14
Kionix	KGF01	10
Sensoror	SAR100 (ButterflyGyro™)	9,4
Melexis	MLX90609	8,2
ЦНИИ «Электроприбор»	ММГ-ЭПТРОН	8
	ММГ-2	3

Для ММГ с первичными угловыми колебаниями вибрационная стойкость увеличивается при уменьшении нелинейности подвеса, которая обусловлена

наличием изгибной жесткости торсионов и их жесткостью на растяжение-сжатие, что вызывает нелинейную восстанавливающую силу. Особенностью таких систем является появление нескольких устойчивых периодических режимов с различными амплитудами автоколебаний или вынужденных колебаний при изменении частоты в определенных пределах. При вибрациях и ударах существенно возрастает возможность появления срывов и скачков амплитуд колебаний ИГ, нелинейного резонанса и вибрационных смещений нуля [50]. Уменьшение нелинейности до 200 раз возможно изменением конфигурации элементов подвеса [51].

Для повышения чувствительности ММГ стремятся повысить его добротность. Это в свою очередь приводит к увеличению чувствительности ММГ к воздействию вибраций и ударов. Для снижения добротности повышают демпфирование, заполняя внутреннюю полость ММГ инертным газом, либо формируют канал демпфирования колебаний за счет внедрения обратной электрической связи [52]. Такие методы снижают время восстановления работоспособности ММГ после окончания удара. Например, прибор KGF01, в котором осуществляется демпфирование, имеет время восстановления 0,25 сек. после удара 500 g, а у «ММГ-2» время восстановления составляет до 5 сек. после удара в 1200 g [37, 53].

В работе [54] рассмотрены вопросы обеспечения стойкости ММГ в условиях наличия линейной, угловой вибрации, ударов. При постоянном ускорении возникает смещение нуля и изменение масштабного коэффициента. При линейной и угловой вибрации могут быть резонансы. В работе проанализированы методы механической стойкости ММГ зарубежных фирм, которые применяют многомассовые сенсоры, гироскопы и акселерометры [55] для компенсации, устанавливают блок гироскопов и акселерометров в antivибрационном и антиударном подвесе. Такие гироскопы, разработанные компанией Colibrus выдерживают удар до 20 000g.

Влияние вибрации на ММГ RR-типа исследовано в работе [56]. В гироскопе учтены нелинейные эффекты и неравенство емкостных характеристик

датчиков угла и моментов. Это приводит к появлению резонансов на субгармониках при вибрации основания. При вибрации изменяются зазоры и изменяются ёмкости. Для создания вибростойких ММГ необходимо на этапе сборки осуществлять выравнивание характеристик датчиков угла и моментов.

Динамика ММГ RR-типа при поступательных и угловых колебаниях основания исследована в работе [57]. Показано, что в гироскопе возможно появление комбинационных резонансов при частоте вибрационных воздействий, равной разности частот первичных и вторичных колебаний, что делает прибор неработоспособным. Понимание этого процесса способствует решению актуальной проблемы повышения вибростойкости ММГ.

В работе [58] авторами предлагается комплексный критерий, на основании которого можно сравнивать различные конструкции ММГ по их механической стойкости. Предлагаемый критерий зависит от геометрических параметров ММГ и определяет его масштабный коэффициент и перегрузочную способность.

В работе [59] сформулированы требования к проведению механических испытаний с учётом динамических свойств ММГ. Определены параметры эквивалентных воздействий. Результаты механических испытаний ММГ отражены в работе [60]. При ударе 200g гироскоп теряет работоспособность, при вибрации и линейных ускорениях изменяется смещение нуля и масштабный коэффициент. Полученные результаты позволяют оценить пути снижения влияния ударов и вибрации [61].

Одним из методов повышения вибрационной и ударной стойкости ММГ является использование упоров, которые ограничивают перемещения ИТ. В результате уменьшается амплитуда колебаний ИТ из-за вибрации и ударов, не происходит электрического замыкания подвижных и неподвижных электродов, уменьшаются значения механических напряжений [46]. Применяются упоры нескольких видов: жесткие (жесткость упоров существенно выше жесткости упругих подвесов ИТ); нелинейные (жесткость нелинейно возрастает в процессе сближения при контакте ИТ с упором) и линейные мягкие (упоры с эластичным покрытием, деформации которых существенно влияют на усилия) [47].

Влияние ударов на микрогироскоп RR-типа рассмотрено в работе [62, 63, 64]. Ударные нагрузки приводят к контактным взаимодействиям элементов конструкции. Рассмотрены упоры перемещений, которые позволяют ограничить перемещение подвижных масс для предотвращения замыкания электродов (рисунок 1.4).

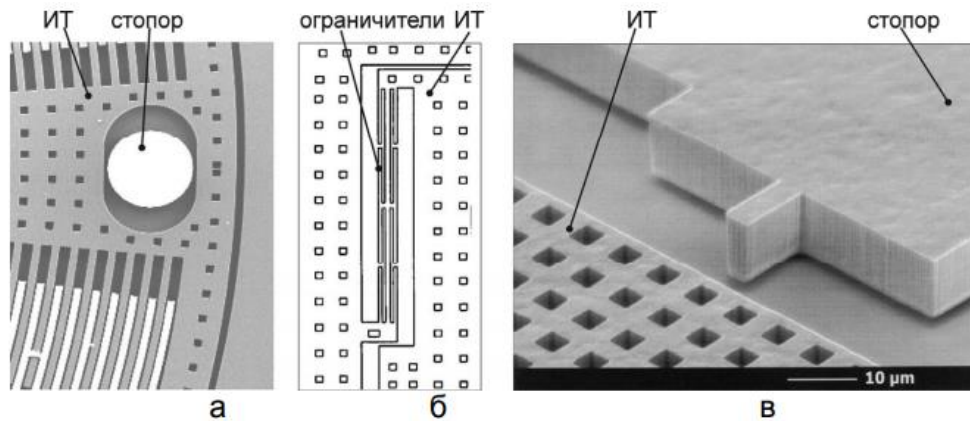


Рисунок 1.4 – Ограничители перемещений: а-ограничитель углового перемещения; б – ограничитель изгиба упругого элемента; в – ограничитель амплитуды первичных колебаний.

В статьях определены конфигурации расположения упоров и упругих элементов подвеса для условия обеспечения прочности подвеса при воздействии удара амплитудой 100 000 g вне плоскости сенсора.

Для повышения ударопрочности конструкции МЭМС требуется применение новых, нестандартных методов. В работе [65] рассматривается применение двухпозиционных упругих стопперов (упоров) (рисунок 1.5) для двухмассового гироскопа.

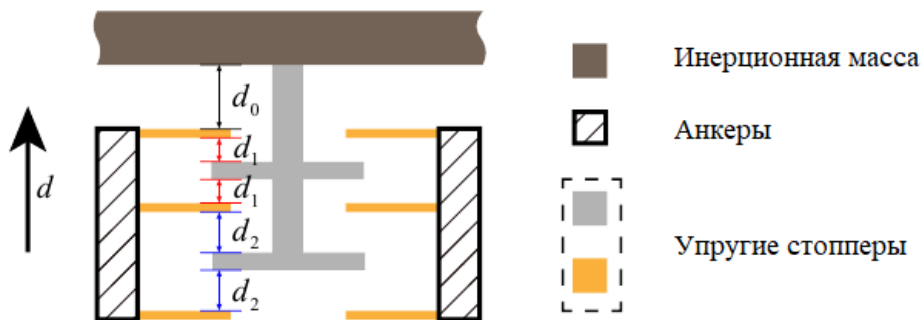


Рисунок 1.5 – Двухпозиционные стопперы



При воздействии ударных нагрузок величиной 10 000 g конструкция не испытывает жёстких ударных воздействий и возвращается в рабочее состояние в течение 2 с. Уменьшение влияния вибрационных воздействий на выходные характеристики ММГ позволяет использовать двухмассовые системы с антифазным движением первичных рамок (рисунок 1.6).

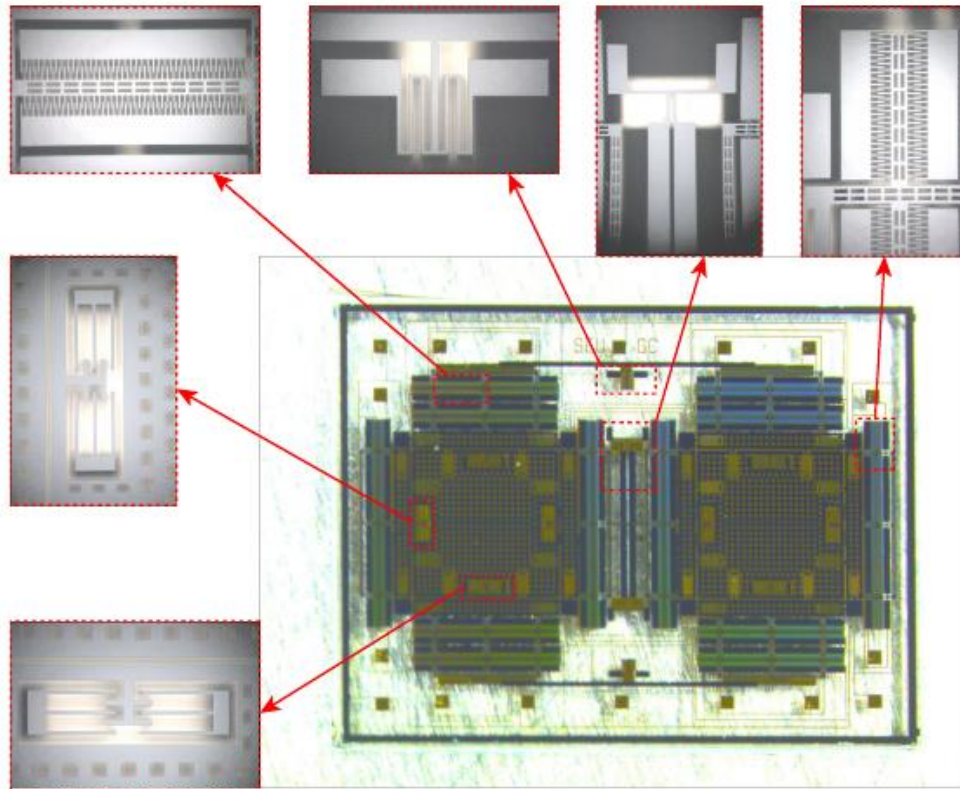


Рисунок 1.6 – Гироскоп с антифазным движением первичных рамок

Существует большое разнообразие схемных решений и реализованных конструкций. Каждая организация развивает своё направление. Повышение точности ММГ до тактического уровня требует тщательного анализа их чувствительности к вибрационным, ударным воздействиям и выработки мер по их снижению для конкретных конструкций.

Среди серийно выпускаемых МЭМС-гироскопов и акселерометров в России можно выделить разработки ЦНИИ «Электроприбор» (г. Санкт-Петербург), который применил схему RR-типа, однако данных по ударным нагрузкам в характеристиках гироскопа и акселерометра не представлено [66, 67].

Зеленоградский кластер по МЭМС (НИУ «МИЭТ», ОАО «ЗИТЦ» и др.) в России является одним из лидеров по количеству реализованных разработок и имеющий одну из лучших технологических баз для изготовления и испытания инерциальных МЭМС. В своих ранних разработках в характеристиках указано ударное воздействие до 1000g [68], для более поздних данных нет.

Другие производители, такие как АО «Инерциальные технологии Технокомплекса» (г. Раменское), ОАО «Гирооптика» (г. Санкт-Петербург), ПАО АНПП «ТЕМП-АВИА» (г. Арзамас) и ООО «Совтест АТЕ» (г. Курск) не указали характеристики своих датчиков по ударным воздействиям [69, 70, 71].

По данным компании Yole Development, STMicroelectronics являются мировым лидером по производству инерциальных микроэлектромеханических сенсоров, занимая 41 % от рынка. АКМ, InvenSense, Bosch Sensortec имеют доли в 13%, 12%, 10%, соответственно, оставшаяся часть приходится на других производителей [72]. Компания *Colibrys* производит современные МЭМС датчики, которые используются для работы в жестких условиях окружающей среды: в условиях сильных ударов и вибраций, в условиях экстремальных температур, в условиях сильных электромагнитных полей [73].

Характеристики зарубежных МЭМС гироскопов по ударным воздействиям представлены в Таблице 1.4

Таблица 1.4 – Устойчивость МЭМС гироскопов и акселерометров к механическим воздействиям

	Оси измерения	Диапазон измерений	Максимальный удар.
STMicroelectronics			
AIS1120SX	X	120 g	2000 g
AIS1200PS	X	200 g	2000 g
AIS2120SX	X, Y	120 g	2000 g
AIS3624DQ	X, Y, Z	12-24 g	3000 g при 0,5 мс 10000 g при 0,1 мс

Продолжение таблицы 1.4

	Оси измерения	Диапазон измерений	Максимальный удар.
H3LIS331DL	X, Y, Z	100-400 g	3000 g при 0,5 мс 10000 g при 0,1 мс
IIS328DQ	X, Y, Z	2-8 g	3000 g при 0,5 мс 10000 g при 0,1 мс
A3G4250D	X, Y, Z	245 °/с	10000 g при 0,1 мс
I3G4250D	X, Y, Z	2000 °/с	10000 g при 0,1 мс
L20G20IS	X, Y	200 °/с	10000 g при 0,2 мс
L2G2IS	X, Y	200 °/с	10000 g при 0,2 мс
L3GD20H	X, Y, Z	2000 °/с	10000 g при 0,1 мс
Invensense			
IAM-20381	X, Y, Z	2-16 g	10000 g
IAM-20380	X, Y, Z	250-2000 °/с	10000 g
ITG-1010	X, Y, Z	250-2000 °/с	10000 g
ICG-20330	X, Y, Z	31,25-250 °/с	10000 g
Bosch Sensortec			
BMG250	X, Y, Z	125-2000 °/с	10000 g при 0,2 мс
BMA400	X,Y,Z	2-16 g	2000 g при 1 мс 10000 g при 0,2 мс
Analog Devices			
ADIS16209	X, Y	1,7 g	3500 g
ADIS16240	X	19 g	4000 g
ADXRS645	X	2000 °/с	10000 g
ADIS16137	X	1000 °/с	2000 g
ADIS16135	X	300 °/с	2000 g

Из представленных на рынке микромеханических гироскопов и акселерометров у каждого производителя имеется гироскоп или акселерометр, способный выдержать ударное воздействие амплитудой 10 000 g, длительность удара при этом может достигать 0,2 мс в нерабочем режиме. Другой тип МЭМС преобразователей – пьезоэлектрический, способен выдерживать ударные нагрузки до 20000 g, в частности акселерометры от Colybris и Endveco [73, 74].

### **Выводы по главе 1**

1) Анализ литературы показывает, что среди большого количества ММГ на рынке многие производители не указывают их вибрационную и ударную стойкость, в то время как эти показатели в некоторых областях считаются одними из ключевых.

2) Для повышения механической стойкости ММГ необходимо предусмотреть меры, которые заключаются в следующем:

- повышение резонансных частот сенсоров;
- применение ударопрочного упругого подвеса;
- рациональное расположение упругих элементов и их мест крепления;
- установка ограничителей перемещений элементов сенсора;
- применение ударопрочного корпуса прибора;
- применение демпферов.

3) В настоящей работе для снижения влияния механических воздействий будут предложены оригинальные конструкции ММГ, обоснование которых приводится в последующих главах.

## **2 АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ДВУХКОМПОНЕНТНЫЙ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИЙ ГИРОСКОП**

Проведённый литературный обзор микромеханических гироскопов показал, что их вибрационная и ударная стойкости в значительной мере определяются кинематикой движений элементов. Поэтому, в качестве основного метода повышения устойчивости ММГ к механическим воздействиям можно назвать правильный выбор кинематической схемы.

В настоящее время большинство зарубежных фирм производят ММГ LL-типа. Однако эти гироскопы чувствительны к внешним инерционным силам [75] различного происхождения (в том числе при вибрации и ударах). Для устранения этого влияния в канале первичных колебаний ММГ применяют анти-фазные системы [76, 77, 78, 79]. Перспективным решением также является применение многомассовых систем в LL-гироскопах [80, 81, 82]. Кроме того, большим спросом пользуются микромеханические сенсоры, измеряющие угловую скорость по двум, трём осям чувствительности.

На основании вышесказанного для повышения механической стойкости ММГ разработана и исследована схема многомассового микромеханического гироскопа LL-типа, который измеряет две составляющие угловой скорости объекта.

### **2.1 Функциональная схема двухкомпонентного микромеханического гироскопа**

Микромеханический гироскоп состоит из механического сенсора, который преобразует измеряемую угловую скорость в перемещения его элементов, и электронного модуля, который формирует выходной сигнал. Конструктивная схема сенсора двухкомпонентного ММГ поясняется рисунком 2.1 [83]. Измерительными осями гироскопа являются оси X и Z.

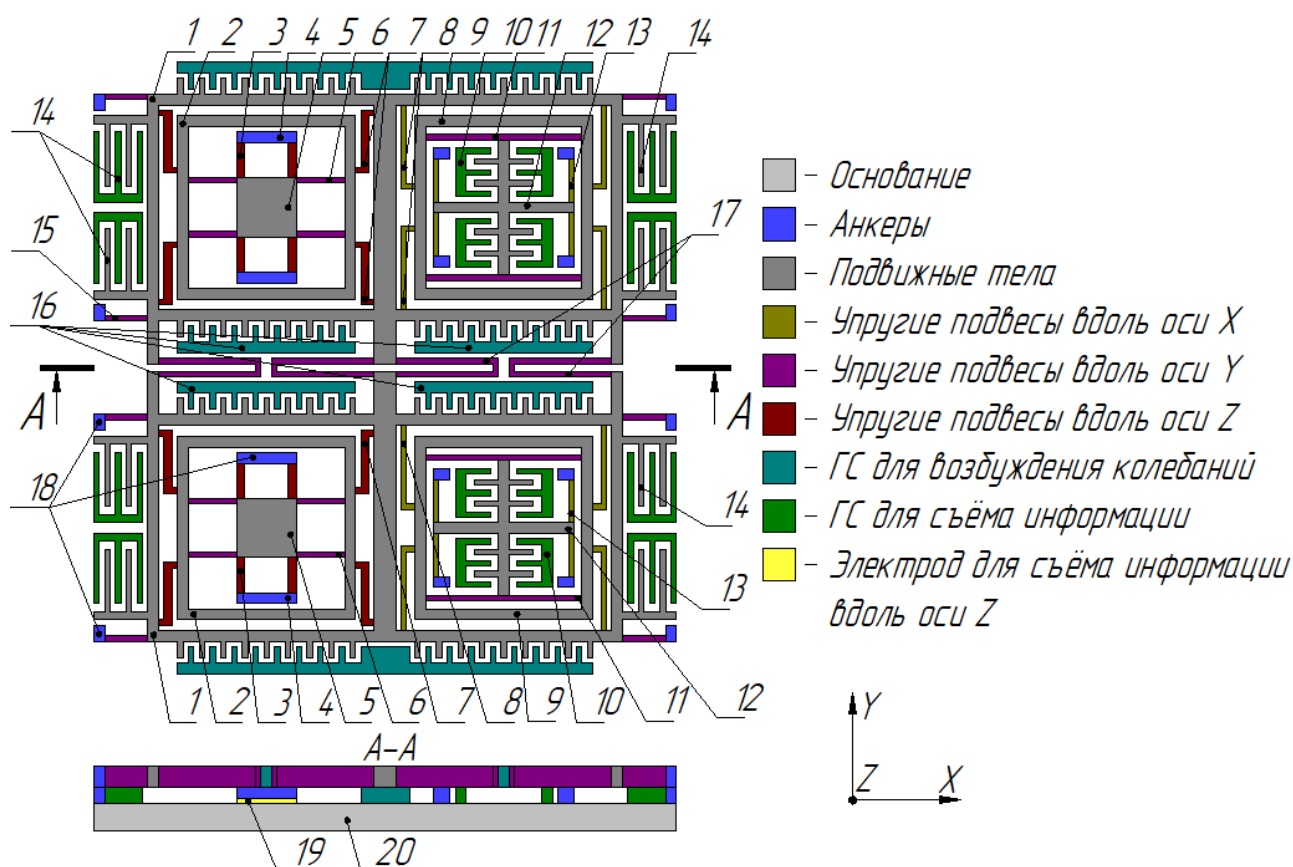


Рисунок 2.1 – Схема сенсора двухкомпонентного ММГ

Сенсор ММГ содержит два одинаковых электромеханических модуля, каждый из которых содержит наружную рамку 1, которая через упругие подвесы 15 и анкеры 18, крепятся к основанию 20. В наружной рамке 1 на упругих опорах 7 и 8 установлены промежуточные рамки 2 и 9. В рамке 2 на упругих опорах 6 установлено инерционное тело 5, которое связано с анкерами 4 упругим подвесом 3. В рамке 9 на упругих опорах 11 установлено инерционное тело 12, которое связано с анкерами упругим подвесом 13.

Вибропривод в виде гребенчатых структур (ГС) 16 возбуждает вдоль оси  $Y$  первичные противофазные гармонические колебания рамок 1, которые связаны между собой упругим элементом 17, что позволяет совершать им первичные противофазные колебания с одинаковой частотой.

Так как жёсткость упругих подвесов 8 вдоль осей  $Y$  и  $Z$  намного больше их жёсткости вдоль оси  $X$  и жёсткость упругих подвесов 7 вдоль осей  $X$  и  $Y$  намного больше их жёсткости вдоль оси  $Z$ , то промежуточные рамки 2 и 9 совершают движение совместно с рамками 1 вдоль оси  $Y$ .

Инерционные тела 12 соединены с промежуточными рамками 9 посредством упругих подвесов 11, жёсткость которых вдоль оси  $X$  намного больше их жёсткости вдоль оси  $Y$ . С основанием инерционные тела 12 соединены с помощью упругих подвесов 13, жёсткость которых вдоль оси  $X$  намного меньше их жёсткости вдоль оси  $Y$ . Таким образом инерционные тела 12 не участвуют в первичных противофазных гармонических колебаниях рамок 1 вдоль оси  $Y$ .

Инерционные тела 5 соединены с промежуточными рамками 2 с помощью упругих подвесов 6, жёсткость которых вдоль оси  $X$  намного больше их жёсткости вдоль оси  $Y$ . С основанием инерционные тела 5 соединены с помощью упругих подвесов 3, жёсткость которых вдоль оси  $Z$  намного меньше их жёсткости вдоль оси  $Y$ . Поэтому, инерционные тела 5 не участвуют в первичных колебаниях с рамками 1 вдоль оси  $Y$ .

При возникновении угловой скорости  $\Omega_x$  появляются силы Кориолиса, направленные вдоль оси  $Z$ , которые через промежуточные тела 2 и упругие элементы 6 возбуждают вторичные (информативные) колебания инерционных тел 5 на упругих подвесах 3 вдоль оси  $Z$ . Данные колебания пропорциональны скорости  $\Omega_x$  и вызывают изменения емкостей, образованных электродами 19, которые входят в преобразователи ёмкость-напряжение.

При возникновении угловой скорости  $\Omega_z$  появляются силы Кориолиса, направленные вдоль оси  $X$ , которые через промежуточные тела 9 и упругие элементы 11 и 13, возбуждают вторичные (информативные) колебания инерционных тел 12 вдоль оси  $X$ , что приводит к изменению емкостей гребенчатых структур 10. Таким образом, применение промежуточных рамок позволяет изолировать вторичное информативное движение от первичного. Устраняется движение сенсорных гребенчатых структур в направлении первичных колебаний и изменение емкостей сенсорных гребенчатых структур зависит только от их перемещения вдоль осей информативных колебаний.

## 2.2 Математическая модель двухкомпонентного гироскопа

В соответствии с приведённой функциональной схемой (рисунок 2.1) эквивалентную схему двухкомпонентного ММГ можно представить в виде системы сосредоточенных масс, имеющих упругую связь между собой и с основанием (рисунки 2.2, 2.3, 2.4).

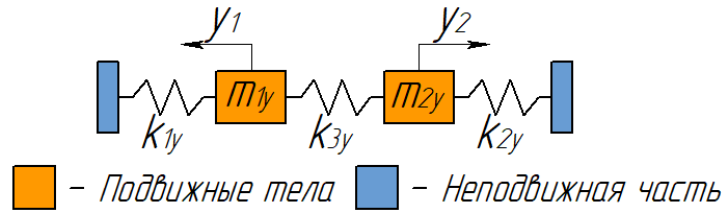


Рисунок 2.2 – Эквивалентная схема канала первичных колебаний (ось Y)

$m_{1y}, m_{2y}$  – массы тел, совершающих первичные колебания (рамки 1 с промежуточными рамками);  $k_{1y}, k_{2y}$  – жёсткости упругих подвесов рамок 1;  $k_{3y}$  – жёсткость упругой связи 17 между рамками 1 (рисунок 2.1).

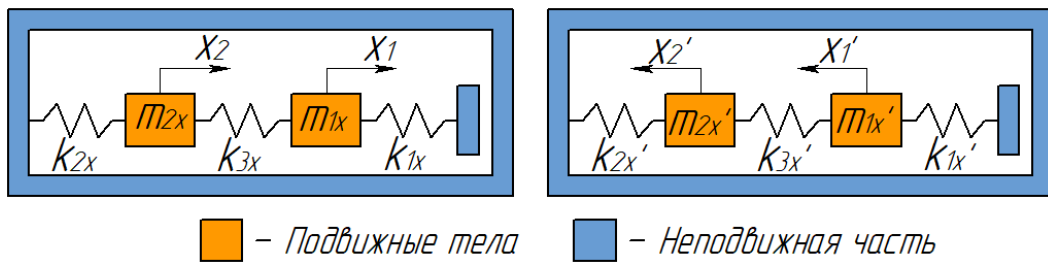


Рисунок 2.3 – Эквивалентные схемы каналов вторичных колебаний (ось X)

$m_{2x}, m_{2x}', m_{1x}, m_{1x}'$  – массы промежуточных и инерционных тел, совершающих вторичные колебания вдоль оси X;  $k_{1x}, k_{1x}', k_{2x}, k_{2x}'$  – жёсткости упругих подвесов инерционных и промежуточных тел по оси X;  $k_{3x}, k_{3x}'$  – жёсткости упругой связи между промежуточными и инерционными телами.

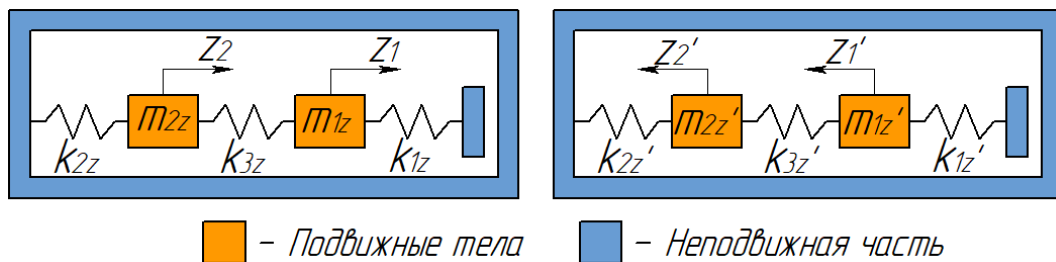


Рисунок 2.4 – Эквивалентные схемы каналов вторичных колебаний (ось Z)



$m_{2z}, m'_{2z}, m_{1z}, m'_{1z}$  – массы промежуточных и инерционных тел, совершающих вторичные колебания вдоль оси Z;  $k_{1z}, k'_{1z}, k_{2z}, k'_{2z}$  – жёсткости упругих подвесов инерционных и промежуточных тел по оси Z;  $k_{3z}, k'_{3z}$  – жёсткости упругой связи между промежуточными и инерционными телами.

При выводе математической модели сделаны следующие допущения: основание, с которым жёстко связан корпус гироскопа, перемещается поступательно с ускорением, проекции которого  $a_x, a_y, a_z$ ; совершает поступательную вибрацию и вращается в пространстве с угловыми скоростями  $\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z$ . Уравнения движения гироскопа составлены на основании уравнений Лагранжа второго рода, которые для рассматриваемой системы имеют вид

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{x}} \right) - \frac{\partial T}{\partial x} &= Q_x, \\ \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{y}} \right) - \frac{\partial T}{\partial y} &= Q_y, \\ \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{z}} \right) - \frac{\partial T}{\partial z} &= Q_z. \end{aligned} \quad (2.1)$$

Общая кинетическая энергия T сенсора гироскопа состоит из кинетических энергий всех тел, приведённых на рисунках 2.2, 2.3, 2.4.  $Q_x, Q_y, Q_z$  – обобщённые силы по осям подвеса сенсора ММГ определяются упругими деформациями элементов подвеса, рассеиванием энергии и энергией конденсаторов сенсора гироскопа.

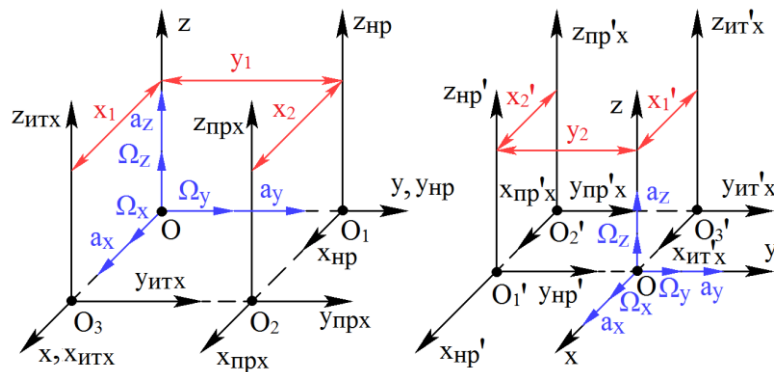


Рисунок 2.5 – Обобщённые координаты сенсора ММГ вдоль оси X

Обобщёнными координатами сенсора ММГ являются поступательные перемещения тел вдоль осей X, Y, Z (рисунки 2.5, 2.6).

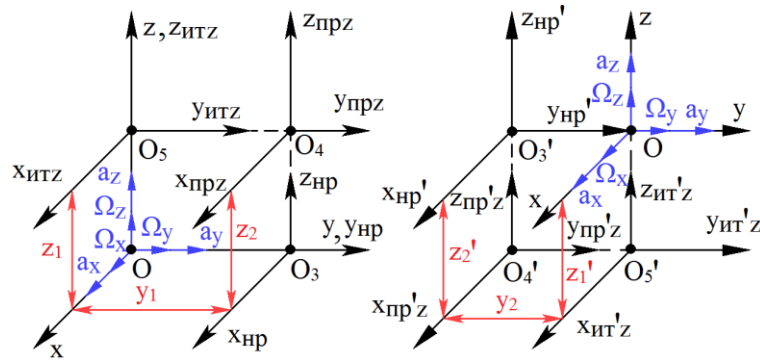


Рисунок 2.6 – Обобщённые координаты сенсора вдоль оси Z

Координаты  $y_1, y_2$  – перемещения рамок 1, создаваемые виброприводом.

Координаты  $x_1, x_1'$  определяют перемещения инерционных тел вдоль оси X;  $x_2, x_2'$  – перемещения промежуточных тел вдоль оси X.

Координаты  $z_1, z_1'$  определяют перемещения инерционных тел вдоль оси Z;  $z_2, z_2'$  – перемещения промежуточных тел вдоль оси Z. Используя уравнение Лагранжа, получим уравнения сенсора ММГ в виде

- первичные колебания по оси Y

$$\ddot{y}_1 + \frac{\omega_{y1}}{Q_{y1}} \dot{y}_1 + y_1 \left[ \omega_{y1}^2 - (\Omega_z^2 + \Omega_x^2) \right] = \frac{1}{m_{1y}} F_{y1} + \frac{k_{3y}}{m_{1y}} (y_2 - y_1) - \ddot{y}_0 - a_y - \dot{x}_0 \Omega_z + \dot{z}_0 \Omega_x - \frac{2m_{2x}}{m_{1y}} \dot{x}_2 \Omega_z - \frac{m_{2x}}{m_{1y}} x_2 \Omega_y \Omega_x, \quad (2.2)$$

$$\ddot{y}_2 + \frac{\omega_{y2}}{Q_{y2}} \dot{y}_2 + y_2 \left[ \omega_{y2}^2 - (\Omega_z^2 + \Omega_x^2) \right] = \frac{1}{m_{2y}} F_{y2} + \frac{k'_{3y}}{m_{2y}} (y_1 - y_2) - \ddot{y}_0 - a_y - \dot{x}_0 \Omega_z + \dot{z}_0 \Omega_x - \frac{2m'_{2x}}{m_{2y}} \dot{x}'_2 \Omega_z - \frac{m'_{2x}}{m_{2y}} x'_2 \Omega_y \Omega_x.$$

- вторичные колебания по оси X

$$\ddot{x}_2 + \frac{\omega_{x2}}{Q_{x2}} \dot{x}_2 + x_2 \left[ \omega_{x2}^2 - (\Omega_z^2 + \Omega_y^2) \right] = 2\Omega_z \dot{y}_1 - \ddot{x}_0 - a_x - \dot{z}_0 \Omega_y + \dot{y}_0 \Omega_z + \frac{k_{3x}}{m_{2x}} (x_1 - x_2) - \Omega_x \Omega_y y_1 + \frac{k_{xy}}{m_{2x}} y_1, \quad (2.3)$$

$$\ddot{x}_1 + \frac{\omega_{x1}}{Q_{x1}} \dot{x}_1 + x_1 \left[ \omega_{x1}^2 - (\Omega_z^2 + \Omega_y^2) \right] = -\ddot{x}_0 - a_x - \dot{z}_0 \Omega_y + \dot{y}_0 \Omega_z + \frac{k_{3x}}{m_{1x}} (x_2 - x_1),$$

$$\begin{aligned} \ddot{x}'_2 + \frac{\omega'_{x2}}{Q_{x2}} \dot{x}'_2 + x_2 \left[ (\omega'_{x2})^2 - (\Omega_z^2 + \Omega_y^2) \right] = & -2\Omega_z \dot{y}_2 - \ddot{x}_0 - a_x - \dot{z}_0 \Omega_y + \dot{y}_0 \Omega_z + \\ & + \frac{k'_{3x}}{m'_{2x}} (x'_1 - x'_2) - \Omega_x \Omega_y y_2 - \frac{k'_{xy}}{m'_{2x}} y_2, \end{aligned}$$

$$\ddot{x}'_1 + \frac{\omega'_{x1}}{Q_{x1}} \dot{x}'_1 + x'_1 \left[ (\omega'_{x1})^2 - (\Omega_z^2 + \Omega_y^2) \right] = -\ddot{x}_0 - a_x - \dot{z}_0 \Omega_y + \dot{y}_0 \Omega_z + \frac{k'_{3x}}{m'_{1x}} (x'_2 - x'_1).$$

- вторичные колебания по оси Z

$$\begin{aligned} \ddot{z}_2 + \frac{\omega_{z2}}{Q_{z2}} \dot{z}_2 + z_2 \left[ \omega_{z2}^2 - (\Omega_x^2 + \Omega_y^2) \right] = & 2\Omega_x \dot{y}_1 - \ddot{z}_0 - a_z - \dot{x}_0 \Omega_y + \dot{y}_0 \Omega_x + \\ & + \frac{k_{3z}}{m_{2z}} (z_1 - z_2) - \Omega_x \Omega_y y_1 + \frac{k_{yz}}{m_{2z}} y_1, \end{aligned} \quad (2.4)$$

$$\ddot{z}_1 + \frac{\omega_{z1}}{Q_{z1}} \dot{z}_1 + z_1 \left[ \omega_{z1}^2 - (\Omega_x^2 + \Omega_y^2) \right] = -\ddot{z}_0 - a_z - \dot{x}_0 \Omega_y + \dot{y}_0 \Omega_x + \frac{k_{3z}}{m_{1z}} (z_2 - z_1),$$

$$\begin{aligned} \ddot{z}'_2 + \frac{\omega'_{z2}}{Q_{z2}} \dot{z}'_2 + z_2 \left[ (\omega'_{z2})^2 - (\Omega_x^2 + \Omega_y^2) \right] = & -2\Omega_x \dot{y}_2 - \ddot{z}_0 - a_z - \dot{x}_0 \Omega_y + \dot{y}_0 \Omega_x + \\ & + \frac{k'_{3z}}{m'_{2z}} (z'_1 - z'_2) - \Omega_x \Omega_y y_2 - \frac{k'_{yz}}{m'_{2z}} y_2, \end{aligned}$$

$$\ddot{z}'_1 + \frac{\omega'_{z1}}{Q_{z1}} \dot{z}'_1 + z'_1 \left[ (\omega'_{z1})^2 - (\Omega_x^2 + \Omega_y^2) \right] = -\ddot{z}_0 - a_z - \dot{x}_0 \Omega_y + \dot{y}_0 \Omega_x + \frac{k'_{3z}}{m'_{1z}} (z'_2 - z'_1).$$

где  $Q$  – добротность ММГ по соответствующему направлению (x, y, z);

$\ddot{z}_0, \dot{y}_0, \ddot{x}_0, \dot{x}_0, \dot{y}_0, \dot{z}_0$  – ускорения и скорости поступательной вибрации;  $F_{zi}$  – сила,

возбуждающая первичные колебания гироскопа; парциальные частоты

гироскопа:  $\omega_{yi}^2 = \frac{k_{iy}}{m_{iy}}; \omega_{xi}^2 = \frac{k_{ix}}{m_{ix}}; \omega_{zi}^2 = \frac{k_{iz}}{m_{iz}}; (\omega'_{xi})^2 = \frac{k'_{ix}}{m'_{ix}}; (\omega'_{zi})^2 = \frac{k'_{iz}}{m'_{iz}}; i = 1, 2.$

## 2.3 Динамические характеристики двухкомпонентного микромеханического гироскопа

Свойства гироскопа определяют его динамические характеристики, к которым относятся:

- резонансные частоты;
- динамические погрешности;
- полоса пропускания.

### 2.3.1 Собственные частоты гироскопа

Резонансные частоты представляют одну из важнейших характеристик любой вибрационной систем, которой также является и рассматриваемый ММГ. Для проведения анализа влияния вибраций и ударов на ММГ, необходимо определить его резонансные частоты. Тем более, что в гироскопе необходимо поддерживать постоянное соотношение между частотами первичных и вторичных колебаний.

#### 2.3.1.1 Канал первичных колебаний

Для определения собственных частот канала первичных колебаний микрогироскопа решим уравнения

$$\begin{aligned} \ddot{y}_1 + \frac{\omega_{y1}}{Q_{y1}} \dot{y}_1 + y_1 [\omega_{y1}^2 - (\Omega_z^2 + \Omega_x^2)] &= \frac{k_{3y}}{m_{1y}} (y_2 - y_1) - \frac{2m_{2x}}{m_{1y}} \dot{x}_2 \Omega_z - \frac{m_{2x}}{m_{1y}} x_2 \Omega_y \Omega_x, \\ \ddot{y}_2 + \frac{\omega_{y2}}{Q_{y2}} \dot{y}_2 + y_2 [\omega_{y2}^2 - (\Omega_z^2 + \Omega_x^2)] &= \frac{k'_{3y}}{m_{2y}} (y_1 - y_2) + \frac{2m'_{2x}}{m_{2y}} \dot{x}'_2 \Omega_z + \frac{m'_{2x}}{m_{2y}} x'_2 \Omega_y \Omega_x. \end{aligned} \quad (2.5)$$

В заданном диапазоне частот и достижимых величинах сенсорных перемещений  $x_2; x'_2; \dot{x}_2; \dot{x}'_2$  влиянием угловых скоростей основания на

резонансные частоты гироскопа можно пренебречь, тогда получим уравнения собственного первичного движения гироскопа

$$\ddot{y}_1 + \frac{\omega_{y1}}{Q_{y1}} \dot{y}_1 + y_1 [\omega_{y1}^2] = \frac{k_{3y}}{m_{1y}} (y_2 - y_1), \quad (2.6)$$

$$\ddot{y}_2 + \frac{\omega_{y2}}{Q_{y2}} \dot{y}_2 + y_2 [\omega_{y2}^2] = \frac{k'_{3y}}{m_{2y}} (y_1 - y_2)$$

Решение уравнений (2.6) ищем в виде

$$y_1(t) = A_1 e^{st}; \quad y_2(t) = A_2 e^{st}. \quad (2.7)$$

Подстановка (2.7) в уравнения (2.6) даёт следующее уравнение

$$\left[ s^2 + s \frac{\omega_{y1}}{Q_{y1}} + \omega_{m1}^2 \right] A_1 - \alpha_1 \cdot A_2 = 0, \quad (2.8)$$

$$\left[ s^2 + s \frac{\omega_{y2}}{Q_{y2}} + \omega_{m2}^2 \right] A_2 - \beta_1 \cdot A_1 = 0,$$

где  $\omega_{m1}^2 = \frac{k_{1y} + k_{3y}}{m_{1y}}$ ;  $\omega_{m2}^2 = \frac{k_{2y} + k_{3y}}{m_{2y}}$ ;  $\alpha_1 = \frac{k_{3y}}{m_{1y}}$ ;  $\beta_1 = \frac{k_{3y}}{m_{2y}}$ .

Чтобы иметь ненулевое решение уравнений (2.8) ( $A_1 \neq 0$ ,  $A_2 \neq 0$ ), должно выполняться условие

$$\begin{vmatrix} (s^2 + s \frac{\omega_{y1}}{Q_{y1}} + \omega_{m1}^2) & -\alpha_1 \\ -\beta_1 & (s^2 + s \frac{\omega_{y2}}{Q_{y2}} + \omega_{m2}^2) \end{vmatrix} = 0.$$

Откуда получим уравнение для определения собственных частот незатухающих колебаний сенсора ММГ при демпфировании равном нулю

$$\omega^4 - \omega^2(\omega_{m1}^2 + \omega_{m2}^2) + \omega_{m2}^2 \cdot \omega_{m1}^2 - \alpha_1 \cdot \beta_1 = 0. \quad (2.9)$$

Из уравнения (2.9) получим собственные частоты первичного канала в виде

$$\omega_{1,2} = \sqrt{\frac{(\omega_{m1}^2 + \omega_{m2}^2)}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{(\omega_{m1}^2 - \omega_{m2}^2)^2 + \alpha_1 \cdot \beta_1}} \quad (2.10)$$

Таким образом, первичный канал ММГ имеет две резонансные частоты  $f_2 = 10645,08$  Гц и  $f_1 = 9723,7$  Гц (рисунок 2.7), что соответствует ММГ с параметрами, указанными в таблицах 2.1, 2.2. Номера в таблицах соответствуют схеме ММГ описанной на рисунке 2.1

Таблица 2.1 – Массы подвижных частей гироскопа

№ массы	1	2	5	9	12
Масса, $10^{-8}$ кг	5,18944	1,58325	3,45258	1,37227	2,08562

Таблица 2.2 – Жёсткости упругих подвесов гироскопа

№ УП	$k_x$ , Н/м	$k_y$ , Н/м	$k_z$ , Н/м
3	1520	1,3	12
6	390	10	234
7	1536	1,4	12,8
8	6,4	410	138
11	293	7,5	122
13	13	493	241
15	1899	29,8	387
17	2152	4,9	119

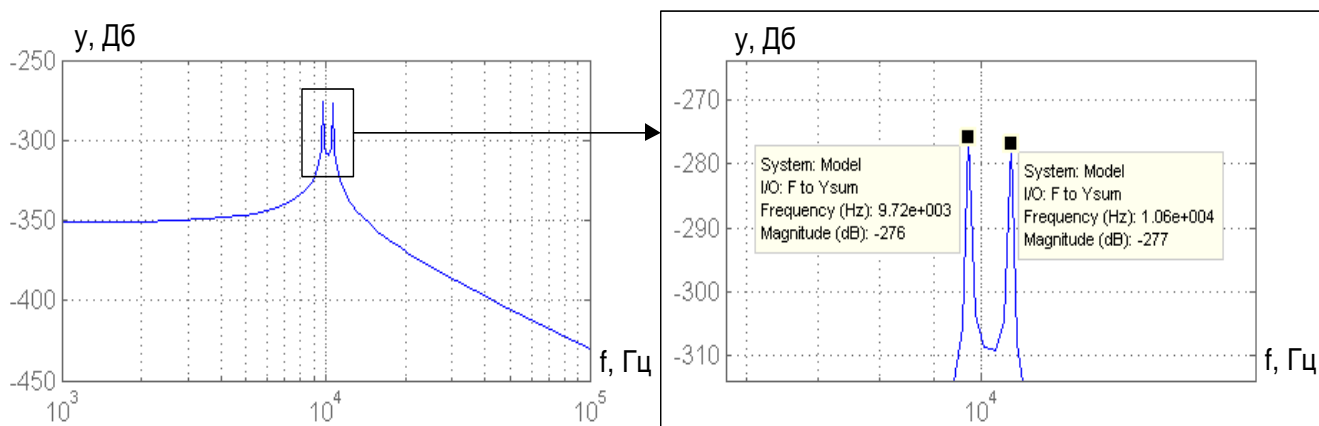


Рисунок 2.7 – Амплитудно-частотная характеристика первичного канала ММГ

В схеме возбуждения первичных колебаний используются антифазные колебания, которые происходят на частоте  $f_2$ . При частоте  $f_1$  первичные колебания являются синфазными.

### 2.3.1.2 Канал вторичных колебаний

Уравнения, описывающие собственное вторичное (информативное) движение сенсора ММГ, имеют вид

$$\begin{aligned} \ddot{x}_2 + \frac{\omega_{x2}}{Q_{x2}} \dot{x}_2 + x_2[\omega_{x2}^2] - \frac{k_{3x}}{m_{2x}}(x_1 - x_2) &= 0, \\ \ddot{x}_1 + \frac{\omega_{x1}}{Q_{x1}} \dot{x}_1 + x_1[\omega_{x1}^2] - \frac{k_{3x}}{m_{1x}}(x_2 - x_1) &= 0, \\ \ddot{z}_2 + \frac{\omega_{z2}}{Q_{z2}} \dot{z}_2 + z_2[\omega_{z2}^2] - \frac{k_{3z}}{m_{2z}}(z_1 - z_2) &= 0, \\ \ddot{z}_1 + \frac{\omega_{z1}}{Q_{z1}} \dot{z}_1 + z_1[\omega_{z1}^2] - \frac{k_{3z}}{m_{1z}}(z_2 - z_1) &= 0, \end{aligned}$$

из которых определяются собственные частоты вторичных каналов

- по оси X

$$\omega_{3,4} = \sqrt{\frac{(\omega_{m3}^2 + \omega_{m4}^2)}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{(\omega_{m3}^2 - \omega_{m4}^2)^2 + \alpha_2 \cdot \beta_2}} \quad (2.11)$$

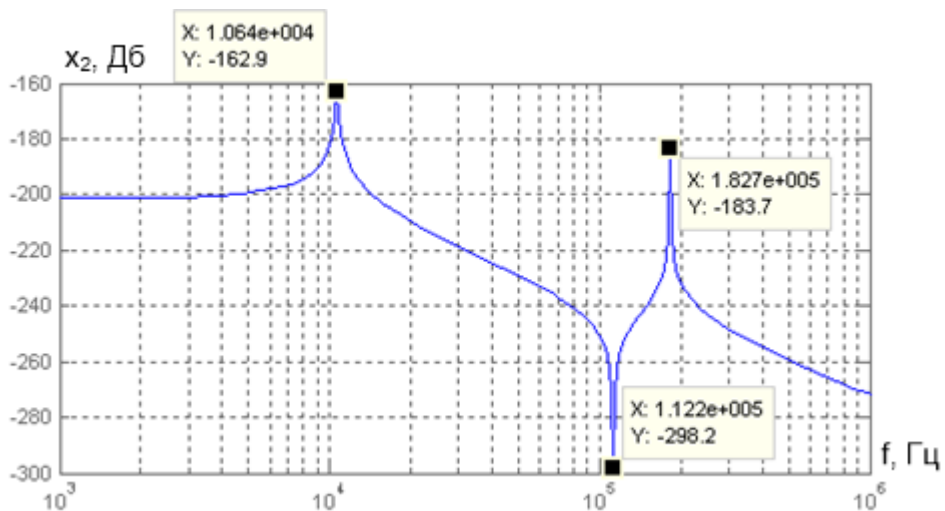
где  $\omega_{m3}^2 = \frac{k_{1x} + k_{3x}}{m_{x1}}$ ;  $\omega_{m4}^2 = \frac{k_{2x} + k_{3x}}{m_{x2}}$ ;  $\alpha_2 = \frac{k_{3x}}{m_{1x}}$ ;  $\beta_2 = \frac{k_{3x}}{m_{2x}}$ .

- по оси Z

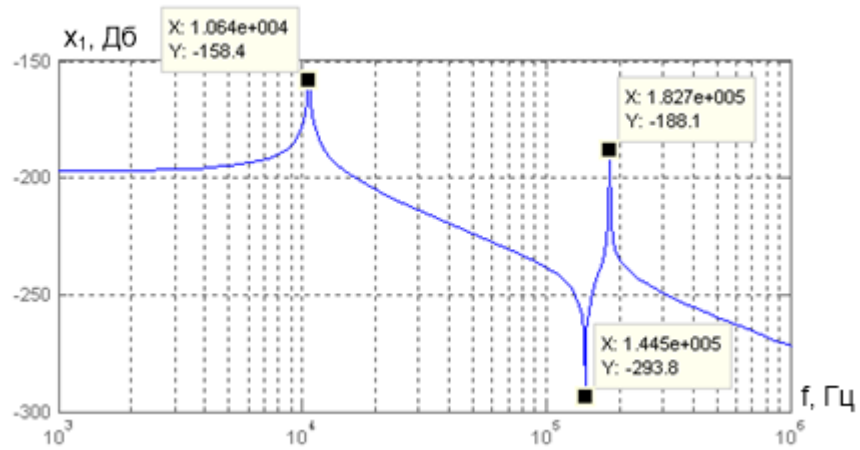
$$\omega_{5,6} = \sqrt{\frac{(\omega_{m5}^2 + \omega_{m6}^2)}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{(\omega_{m5}^2 - \omega_{m6}^2)^2 + \alpha_3 \cdot \beta_3}} \quad (2.12)$$

где  $\omega_{m5}^2 = \frac{k_{1z} + k_{3z}}{m_{z1}}$ ;  $\omega_{m6}^2 = \frac{k_{2z} + k_{3z}}{m_{z2}}$ ;  $\alpha_3 = \frac{k_{3z}}{m_{1z}}$ ;  $\beta_3 = \frac{k_{3z}}{m_{2z}}$ .

АЧХ вторичного канала по осям X и Z представлены на рисунках 2.8 и 2.9.

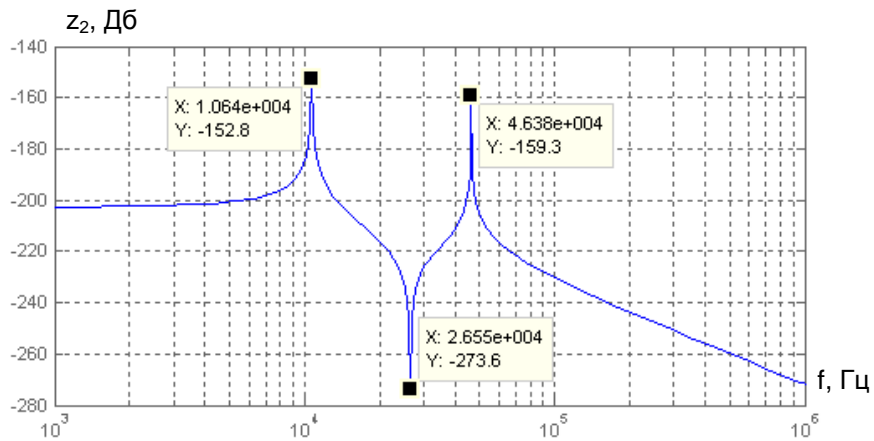


а)

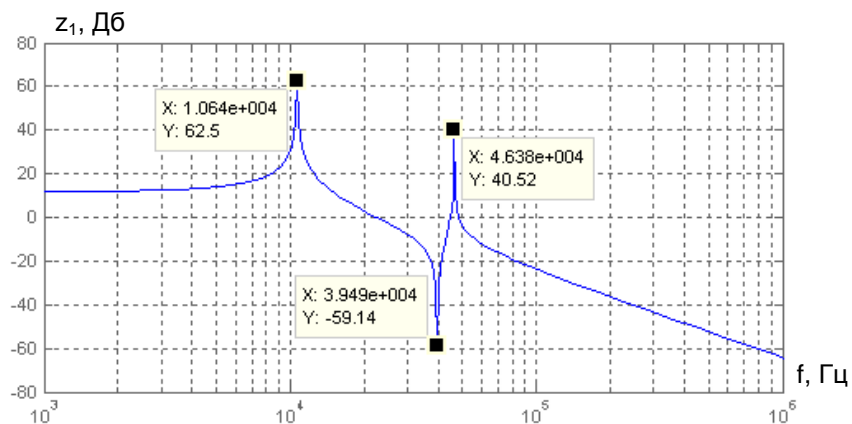


б)

Рисунок 2.8 – АЧХ вторичного канала (ось X): а – перемещение  $x_2$  промежуточной рамки; б – перемещение  $x_1$  инерционного тела



а)



б)

Рисунок 2.9 – АЧХ вторичного канала (ось Z): а – перемещение  $z_2$  промежуточной рамки; б – перемещение  $z_1$  инерционного тела



Из АЧХ видно, что промежуточная рама совместно с инерционным телом при частоте  $f_1$  совершает синфазные колебания, а при частоте  $f_2$  – антифазные колебания. Рабочим для вторичного канала ММГ является режим синфазных колебаний промежуточной рамы вместе с инерционным телом, которые происходят с частотой, близкой к частоте первичных колебаний гироскопа. Частоты антирезонанса и антифазного движения намного больше рабочей частоты синфазного вторичного движения промежуточных рамок и инерционных тел.

### 2.3.2 Характеристики динамической точности

Динамическая точность ММГ может быть определена с помощью его частотных характеристик при гармоническом законе измеряемых скоростей

$$\Omega_x = \Omega_{xm} \sin \delta t, \quad \Omega_y = \Omega_{ym} \sin \delta t, \quad \Omega_z = \Omega_{zm} \sin \delta t,$$

Для установившегося первичного движения и при выполнении его стабилизации, первичные колебания гироскопа, возбуждаемые гребенчатым электростатическим виброприводом, происходят по гармоническому закону

$$y_1(t) = -y_2(t) = y(t) = y_m \sin \nu t,$$

где  $\nu$  – частота первичных колебаний. Как было показано выше, при больших значениях перекрёстных жесткостей промежуточные тела совершают вторичные колебания совместно с инерционными телами как единое тело, поэтому из систем уравнений (2.3, 2.4) получим уравнения вторичных колебаний ММГ в виде

$$\begin{aligned} \ddot{x}_1 + 2\xi_1(\nu + \Delta_1)\dot{x}_1 + (\nu + \Delta_1)^2 x_1 &= h_1 \Omega_{zm} \cos \nu t \cdot \sin \delta t, \\ \ddot{x}_2 + 2\xi_2(\nu + \Delta_2)\dot{x}_2 + (\nu + \Delta_2)^2 x_2 &= -h_2 \Omega_{zm} \cos \nu t \cdot \sin \delta t, \\ \ddot{z}_1 + 2\xi_3(\nu + \Delta_3)\dot{z}_1 + (\nu + \Delta_3)^2 z_1 &= h_3 \Omega_{xm} \cos \nu t \cdot \sin \delta t, \\ \ddot{z}_2 + 2\xi_4(\nu + \Delta_4)\dot{z}_2 + (\nu + \Delta_4)^2 z_2 &= -h_4 \Omega_{xm} \cos \nu t \cdot \sin \delta t \end{aligned} \quad (2.13)$$

где  $\omega_i = (\nu + \Delta_i)$  – частоты собственных колебаний вторичных контуров ( $i = 1, 2, 3, 4$ );  $\Delta_i$  – величина расстройки частоты вторичных колебаний ММГ

относительно частоты его первичных колебаний. Коэффициенты сил Кориолиса, вызывающих вторичные колебания микрогироскопа, определяются выражениями

$$h_1 = \frac{2m_{2x}vy_m}{m_{1x}+m_{2x}}; \quad h_2 = \frac{2m'_{2x}vy_m}{m'_{1x}+m'_{2x}}; \quad h_3 = \frac{2m_{2z}vy_m}{m_{1z}+m_{2z}}; \quad h_4 = \frac{2m'_{2z}vy_m}{m'_{1z}+m'_{2z}},$$

где  $m_{2x}, m'_{2x}, m_{2z}, m'_{2z}$  - массы промежуточных тел;  $m_{1x}, m'_{1x}, m_{1z}, m'_{1z}$  - массы инерционных тел.

Как видно из уравнений (2.13), при сделанных допущениях вторичное движение по каждой информативной оси можно рассматривать отдельно. Рассмотрим вторичный контур, соответствующий первому уравнению системы (2.13) – колебания по оси X

$$\ddot{x}_1 + 2\xi_1(\nu + \Delta_1)\dot{x}_1 + (\nu + \Delta_1)^2 x_1 = h_1 \Omega_{zm} \cos \nu t \cdot \sin \delta t$$

Преобразуем правую часть этого уравнения к виду

$$\ddot{x}_1 + 2\xi_1(\nu + \Delta_1)\dot{x}_1 + (\nu + \Delta_1)^2 x_1 = h_1 \Omega_k(t), \quad (2.14)$$

где  $\Omega_k(t) = \frac{1}{2} \Omega_{zm} [-\sin(\nu - \delta)t + \sin(\nu + \delta)t]$ .

Анализ частотных характеристик вторичного контура в базисах левой  $(\nu - \delta)$  и правой  $(\nu + \delta)$  боковых полос входного воздействия соответствует анализу частотных характеристик звена с передаточной функцией

$$W_{x_1}^{\Omega_k}(s) = \frac{h_1}{s^2 + 2\xi_1(\nu + \Delta_1)s + (\nu + \Delta_1)^2}, \quad (2.15)$$

при  $s = i(\omega + \nu)$  и  $s = i(\omega - \nu)$ .

Частотные характеристики вторичных колебаний гироскопа по огибающим, совпадающим по фазе с первичными колебаниями (синусные частотные характеристики), и сдвинутые по фазе на  $\pi/2$  (косинусные частотные характеристики) определяются выражениями

$$W_c(i\omega) = i \frac{[W_{x_1}^{\Omega_k}[i(\omega + \nu)] - W_{x_1}^{\Omega_k}[i(\omega - \nu)]]}{2}, \quad (2.16)$$

$$W_k(i\omega) = \frac{[W_{x_1}^{\Omega_k}[i(\omega + \nu)] + W_{x_1}^{\Omega_k}[i(\omega - \nu)]]}{2}.$$

Откуда получим передаточные функции, характеризующие динамические характеристики ММГ по огибающим синусной и косинусной составляющих вторичных колебаний

$$W_c(s) = \frac{x_{1c}}{\Omega_{zm}} = h_1 \frac{2\nu[s + \xi_1(\nu + \Delta_1)]}{[s^2 + 2\xi_1(\nu + \Delta_1)s + (\nu + \Delta_1)^2 - \nu^2]^2 + 4\nu^2[s + \xi_1(\nu + \Delta_1)]^2}. \quad (2.17)$$

$$W_k(s) = \frac{x_{1k}}{\Omega_{zm}} = h_1 \frac{[s^2 + 2\xi_1(\nu + \Delta_1)s + (\nu + \Delta_1)^2 - \nu^2]^2}{[s^2 + 2\xi_1(\nu + \Delta_1)s + (\nu + \Delta_1)^2 - \nu^2]^2 + 4\nu^2[s + \xi_1(\nu + \Delta_1)]^2}.$$

АЧХ вторичного канала микрогирроскопа по огибающим при различных добротностях и частотах расстройки представлены на рисунках 2.10 – 2.17.

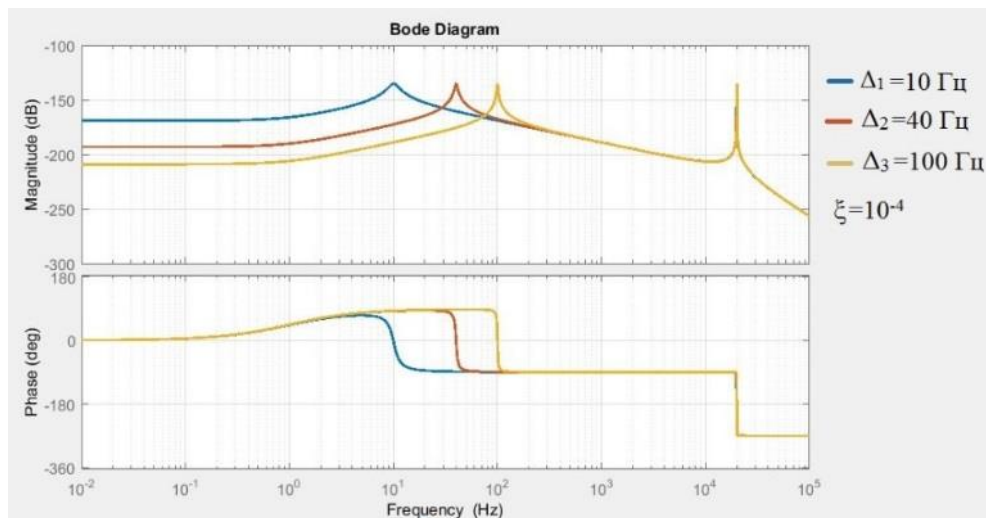


Рисунок 2.10 – АЧХ по огибающим вторичного канала ММГ (синусная составляющая при  $Q_1 = 5000$ )

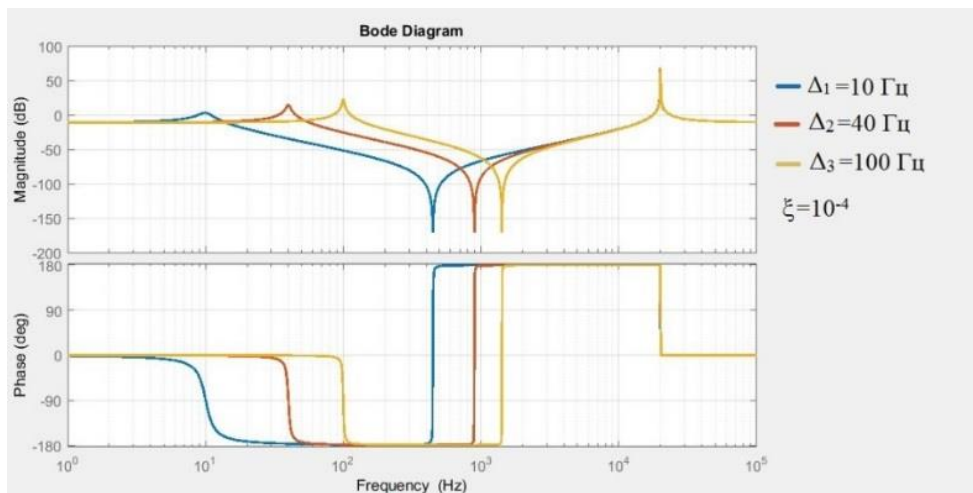


Рисунок 2.11 – АЧХ по огибающим вторичного канала ММГ (косинусная составляющая при  $Q_1 = 5000$ )

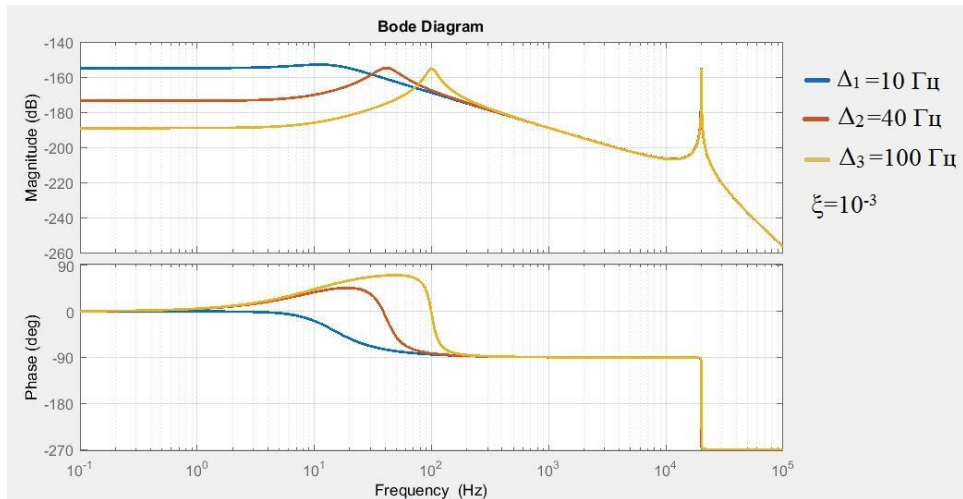


Рисунок 2.12 – АЧХ по огибающим вторичного канала микрогироскопа  
(синусная составляющая при  $Q_1 = 500$ )

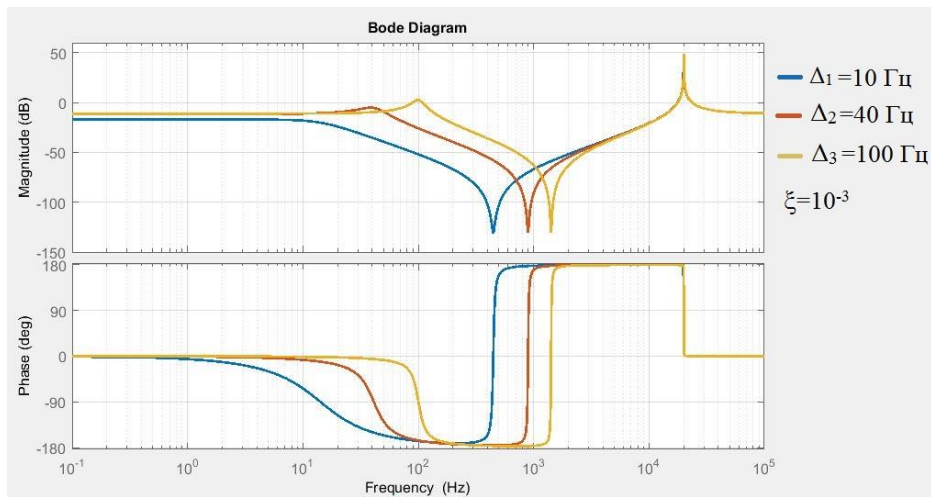


Рисунок 2.13 – АЧХ по огибающим вторичного канала ММГ  
(косинусная составляющая при  $Q_1 = 500$ )

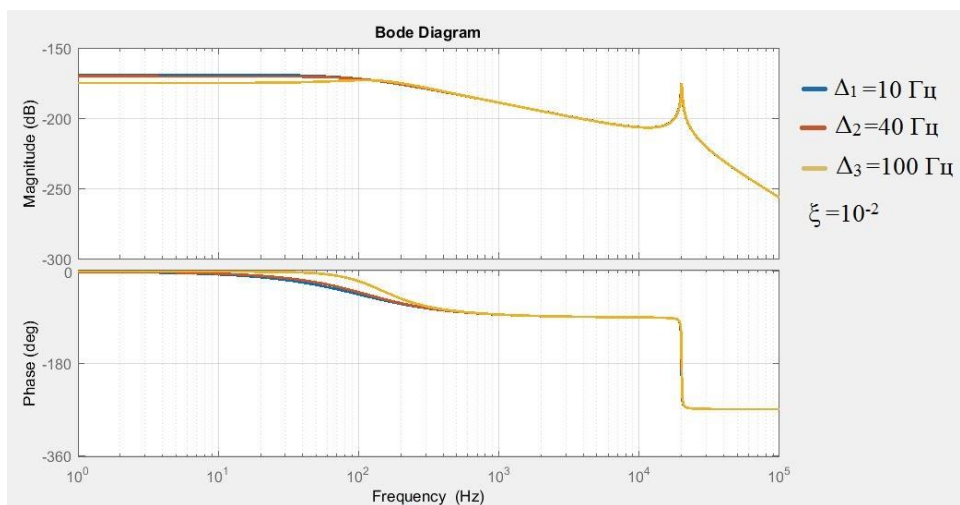


Рисунок 2.14 – АЧХ по огибающим вторичного канала ММГ  
(синусная составляющая при  $Q_1 = 50$ )

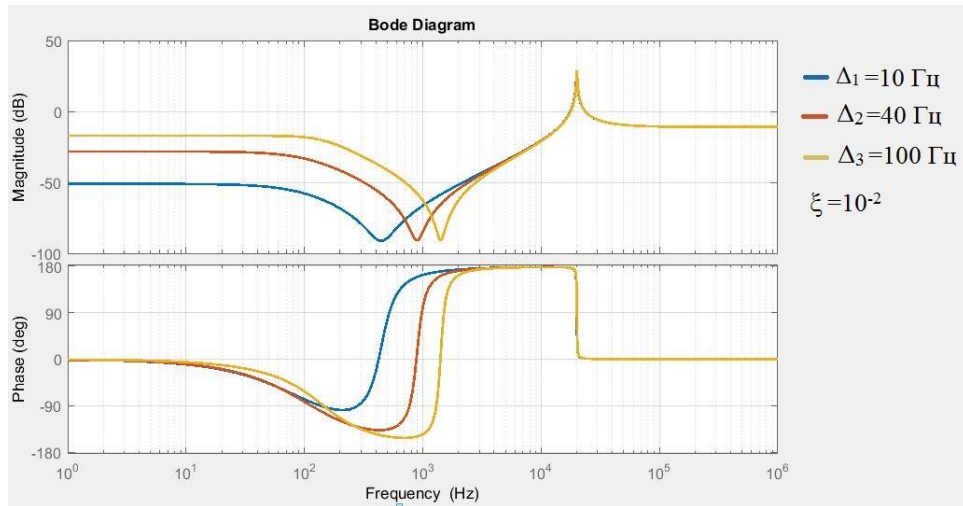


Рисунок 2.15 – АЧХ по огибающим вторичного канала ММГ  
(косинусная составляющая при  $Q_1 = 50$ )

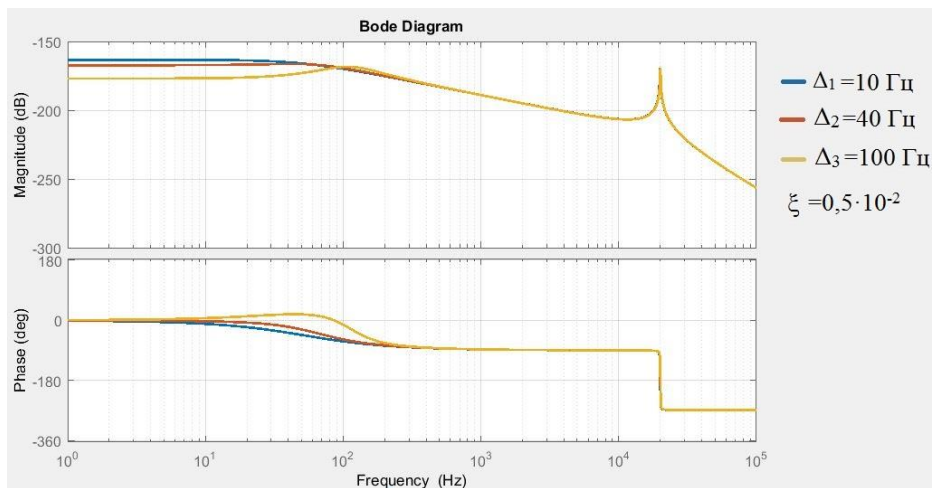


Рисунок 2.16 – АЧХ по огибающим вторичного канала ММГ  
(синусная составляющая при  $Q_1 = 100$ )

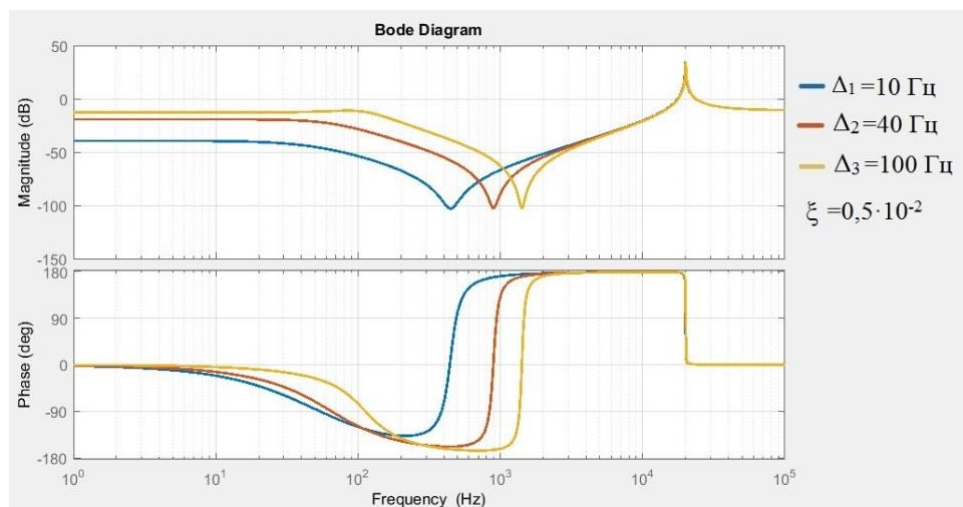


Рисунок 2.17 – АЧХ по огибающим вторичного канала ММГ  
(косинусная составляющая при  $Q_1 = 100$ )

Представленные рисунки позволяют сделать следующие выводы:

1. Резонансные пики находятся на частотах  $\Delta_i$  и  $2\nu$ . Частотная характеристика косинусной составляющей имеет антирезонансный пик на частоте  $\sqrt{2\nu\Delta}$ .
2. Динамические погрешности ММГ будут минимальны, если частоты измеряемых угловых скоростей меньше частоты  $\Delta_i$  расстройки частоты вторичных колебаний относительно частоты первичных колебаний. С увеличением добротности область частот, в которой динамические погрешности минимальны, сужается. При добротности  $Q < 100$  область частот минимальных динамических погрешностей составляет более 40 Гц.
3. Полоса пропускания определяется величиной расстройки  $\Delta_i$  частот первичных и вторичных колебаний.
4. АЧХ гироскопа для косинусной составляющей более, чем на порядок превышает его АЧХ по синусной составляющей. Таким образом, основная составляющая выходного сигнала гироскопа будет формироваться косинусной составляющей вторичных колебаний по огибающей, которая превышает синусную составляющую.

Важным требованием для обеспечения минимальных динамических погрешностей ММГ является обеспечение стабильности его АЧХ в области частот измеряемых скоростей.

Основной вклад в погрешность вносят:

- погрешность амплитуды и частоты первичных колебаний;
- погрешность заданной частоты расстройки первичных и вторичных колебаний.

Снижение этих погрешностей достигается применением системы стабилизации первичных колебаний (стабилизация амплитуды и частоты) и системы стабилизации частоты расстройки введением «электростатической жёсткости» через исполнительные и управляющие электроды [84].

## 2.4 Анализ чувствительности микромеханического гироскопа к вибрационным воздействиям

### 2.4.1 Аналитические исследования

Реальные вибрационные воздействия являются случайными функциями времени, следовательно, именно случайная широкополосная вибрация (ШСВ) наиболее полно описывает реальные процессы в приборе [85]. При ШСВ на исследуемый прибор воздействует знакопеременное ускорение, амплитуда и частота которого являются случайными величинами с заданными спектральными плотностями, что позволяет одновременно возбуждать все резонансные частоты прибора в заданном диапазоне частот.

При синусоидальной вибрации на прибор так же воздействует знакопеременное ускорение. Так как резонансные частоты гироскопа лежат выше пределов частотного диапазона вибрации, то резонансы в гироскопе не возникают и для аналитических расчётов можно рассматривать воздействие синусоидальной вибрации.

Введём обозначения в системах уравнений, описывающих вторичные колебания

$$h = 2\Omega_z y_m v; \quad h_1 = \Omega_x \Omega_y y_m; \quad h_2 = k_{yx} y_m; \quad h_3 = \dot{x}_0 q; \quad h_4 = -\dot{z}_0 \Omega_y + \dot{y}_0 \Omega_z; \quad \xi_2 = \frac{\omega_{x2}}{Q_{x2}}; \quad \xi_1 = \frac{\omega_{x1}}{Q_{x1}};$$

тогда получим уравнения по оси X в виде

$$\ddot{x}_2 + \xi_2 \dot{x}_2 + x_2 \omega_{m4}^2 - \beta_3 x_1 = h \cos vt - (h_1 - h_2) \sin \omega_y t - h_3 \cos qt + h_4 \sin qt,$$

$$\ddot{x}_1 + \xi_1 \dot{x}_1 + x_1 \omega_{m3}^2 - \alpha_3 x_2 = h_4 \sin qt, \quad (2.18)$$

$$\ddot{x}'_2 + \xi'_2 \dot{x}'_2 + x'_2 (\omega'_{m4})^2 - \beta'_3 x'_1 =$$

$$= -h \cos vt + (h_1 - h_2) \sin \omega_y t - h_3 \cos qt + h_4 \sin qt,$$

$$\ddot{x}'_1 + \xi'_1 \dot{x}'_1 + x'_1 (\omega'_{m3})^2 - \alpha'_3 x'_2 = h_4 \sin qt,$$

где  $v$  - частота первичных колебаний;  $q$  – частота вибрации. Из уравнений видно, что промежуточные рамки и инерционные тела будут совершать колебания с частотой первичных колебаний и с частотой вибрации по закону

$$\begin{aligned}
x_1(t) &= x_1^{\text{инф}} \cos(vt + \varepsilon_{11}) + x_1^{\text{КВ}} \sin(vt + \varepsilon_{12}) + x_{11}^{\text{вибр}} \cos(qt + \varepsilon_{13}) + \\
&+ x_{12}^{\text{вибр}} \sin(qt + \varepsilon_{14}), \\
x_2(t) &= x_2^{\text{инф}} \cos(vt + \varepsilon_{21}) + x_2^{\text{КВ}} \sin(vt + \varepsilon_{22}) + x_{21}^{\text{вибр}} \cos(qt + \varepsilon_{23}) + \\
&+ x_{22}^{\text{вибр}} \sin(qt + \varepsilon_{24}),
\end{aligned} \tag{2.19}$$

$$\begin{aligned}
x'_1(t) &= x_1^{\text{инф}} \cos(vt + 180 + \varepsilon'_{11}) + x_1^{\text{КВ}} \sin(vt + 180 + \varepsilon'_{12}) + x_{11}^{\text{вибр}} \cos(qt + \\
&\varepsilon'_{13}) + x_{12}^{\text{вибр}} \sin(qt + \varepsilon'_{14}),
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
x'_2(t) &= x_2^{\text{инф}} \cos(vt + 180 + \varepsilon'_{21}) + x_2^{\text{КВ}} \sin(vt + 180 + \varepsilon'_{22}) + x_{21}^{\text{вибр}} \cos(qt + \\
&\varepsilon'_{23}) + x_{22}^{\text{вибр}} \sin(qt + \varepsilon'_{24}),
\end{aligned}$$

где  $\varepsilon_{ij}$  – сдвиг фаз между измеряемыми угловыми скоростями и возникшими в результате этого перемещениями элементов сенсора ММГ.

Первые составляющие в формулах (2.19) представляют собой информативные колебания, амплитуда которых зависит от измеряемых угловых скоростей. Вторые составляющие колебаний, происходящие с частотой первичных колебаний, обусловлены перекрёстной связью между первичным и вторичным каналами. Третьи составляющие колебаний с частотой  $q$  зависят от вибрации основания. Информация об измеряемых угловых скоростях объекта содержится в амплитудах колебаний инерционных тел, которые определяются

$$x_1^{\text{инф}} = \frac{\sqrt{(\Delta L_1)^2 + (\Delta N_1)^2}}{\Delta_1}, \quad x_1^{\text{КВ}} = \frac{\sqrt{(\Delta L_2)^2 + (\Delta N_2)^2}}{\Delta_1}, \quad x_1^{\text{вибр}} = \frac{\sqrt{(\Delta L_3)^2 + (\Delta N_3)^2}}{\Delta_2}, \quad \text{где}$$

$$\begin{aligned}
\Delta_1 &= (v^2 - \omega_{m4}^2)^2 [(v^2 - \omega_{m3}^2)^2 + v^2 \xi_2^2] + v^2 \xi_2^2 [(v^2 - \omega_{m3}^2)^2 + v^2 \xi_1^2] + \\
&\alpha_2 \beta_2 [\alpha_2 \beta_2 + 2\omega_y^2 \xi_1 \xi_2];
\end{aligned}$$

$$\Delta L_1 = h\alpha_2 [(v^2 - \omega_{m3}^2)(v^2 - \omega_{m4}^2) + \alpha_2 \beta_2 + v^2 \xi_1 \xi_2];$$

$$\Delta N_1 = -h\alpha_2 v [\xi_1 (v^2 - \omega_{m4}^2) + \xi_2 (v^2 - \omega_{m3}^2)]; \tag{2.20}$$

$$\Delta N_2 = (h_1 - h_2) \alpha_2 [\alpha_2 \beta_2 + v^2 \xi_1 \xi_2 - (v^2 - \omega_{m4}^2)(v^2 - \omega_{m3}^2)];$$

$$\Delta L_2 = (h_1 - h_2) \alpha_2 v [\xi_1 (v^2 - \omega_{m4}^2) - \xi_2 (v^2 - \omega_{m3}^2)],$$

$$\begin{aligned}
\Delta_2 &= (q^2 - \omega_{m4}^2)^2 [(q^2 - \omega_{m3}^2)^2 + q^2 \xi_2^2] + q^2 \xi_2^2 [(q^2 - \omega_{m3}^2)^2 + q^2 \xi_1^2] + \\
&\alpha_2 \beta_2 [\alpha_2 \beta_2 + 2q^2 \xi_1 \xi_2];
\end{aligned}$$



$$\Delta L_3 = h_3 \{ (q^2 - \omega_{m3}^2) [(q^2 - \omega_{m4}^2)^2 + q^2 \xi_1 \xi_2] + \alpha_2 [(\alpha_2 \beta_2 + q^2 \xi_1 \xi_2) - (q^2 - \omega_{m4}^2)(q^2 - \omega_{m4}^2 + \beta_2)] \} + q h_4 \{ \alpha_2 [\xi_2 (q^2 - \omega_{m3}^2) + \xi_1 (q^2 - \omega_{m4}^2)] + [\xi_1 (q^2 - \omega_{m4}^2)^2 + \alpha_2 \beta_2 \xi_2 - q^2 \xi_1 \xi_2^2] \},$$

$$\Delta N_3 = h_3 q \{ \alpha_2 [\xi_2 (q^2 - \omega_{m3}^2) + \xi_1 (q^2 - \omega_{m4}^2)] - \xi_1 (q^2 - \omega_{m3}^2)(q^2 - \omega_{m4}^2) - \xi_2 (\alpha_2 \beta_2 + q^2 \xi_1 \xi_2) \} + h_4 \alpha_2 [ -(\alpha_2 \beta_2 + q^2 \xi_1 \xi_2) + (q^2 - \omega_{m4}^2)(q^2 - \omega_{m3}^2 + \beta_2) ].$$

Колебания инерционных тел преобразуются в изменения сенсорных емкостей и затем в выходные сигналы. Колебания инерционных тел по оси Z имеют аналогичный вид, но с параметрами этого канала.

Как видно из решений (2.19), (2.20), на информативные колебания инерционных тел, которые происходят с частотой первичных колебаний, накладываются колебания с частотой вибрации и колебания с частотой первичных колебаний, но сдвинутые на  $90^\circ$  по отношению к информативным колебаниям. Эти колебания представляют собой помеху, которая может быть устранена системой обработки информации [86].

Сенсор гироскопа (рисунок 2.1) имеет шесть сенсорных электродных структур с общей точкой, емкости которых изменяются в зависимости от измеряемых угловых скоростей (таблица 2.3).

Таблица 2.3 – Емкости сенсорных электродов

	$C_{1x} = C_{01} - \Delta C_{\Omega_z} - \Delta C_{ax};$ $C_{1x}^* = C_{01} + \Delta C_{\Omega_z} - \Delta C_{ax};$ $C_{2x} = C_{01} + \Delta C_{\Omega_z} + \Delta C_{ax};$ $C_{2x}^* = C_{01} - \Delta C_{\Omega_z} + \Delta C_{ax};$ $C_{1z} = C_{02} + \Delta C_{\Omega_x} - \Delta C_{az};$ $C_{1z}^* = C_{02} - \Delta C_{\Omega_x} - \Delta C_{az}.$
--	---

$C_{01}$ ,  $C_{02}$  – начальные значения емкостей;  $\Delta C_{\Omega_x}$ ,  $\Delta C_{\Omega_z}$  – изменения емкостей, обусловленные угловыми скоростями;  $\Delta C_{ax}$ ,  $\Delta C_{az}$  – изменения емкостей, обусловленные ускорением основания (в том числе и вибрационным ускорением). Объектом измерения системы обработки сигналов является набор

физических величин: двух угловых скоростей и ускорений по осям декартовой системы координат (таблица 2.4).

Таблица 2.4 – Используемые ёмкости для определения скоростей

№	Физическая величина	Используемые ёмкости	Операция	Результат
1	угловая скорость $\Omega_x$	$C_{1z}$ и $C_{1z}^*$	$C_{1z}^* - C_{1z}$	$2\Delta C_{\Omega_x}$
2	угловая скорость $\Omega_z$	$C_{1x}^*$ и $C_{1x}$	$C_{1x}^* - C_{1x}$	$2\Delta C_{\Omega_z}$

Алгоритм определения гироскопом угловых скоростей (таблицы 2.1, 2.2) позволяет скомпенсировать вибрационные помехи, так как они имеют противоположные знаки за счёт применения антифазного первичного движения.

### 2.4.2 Математическое моделирование влияния вибрации

Математическое моделирование проведено, используя Matlab / Simulink, результаты которого представлены на дальнейших рисунках.

При отсутствии вибрации (рисунки 2.19, 2.20) промежуточные рамки и инерционные тела совершают колебания с одинаковой амплитудой как единое тело.

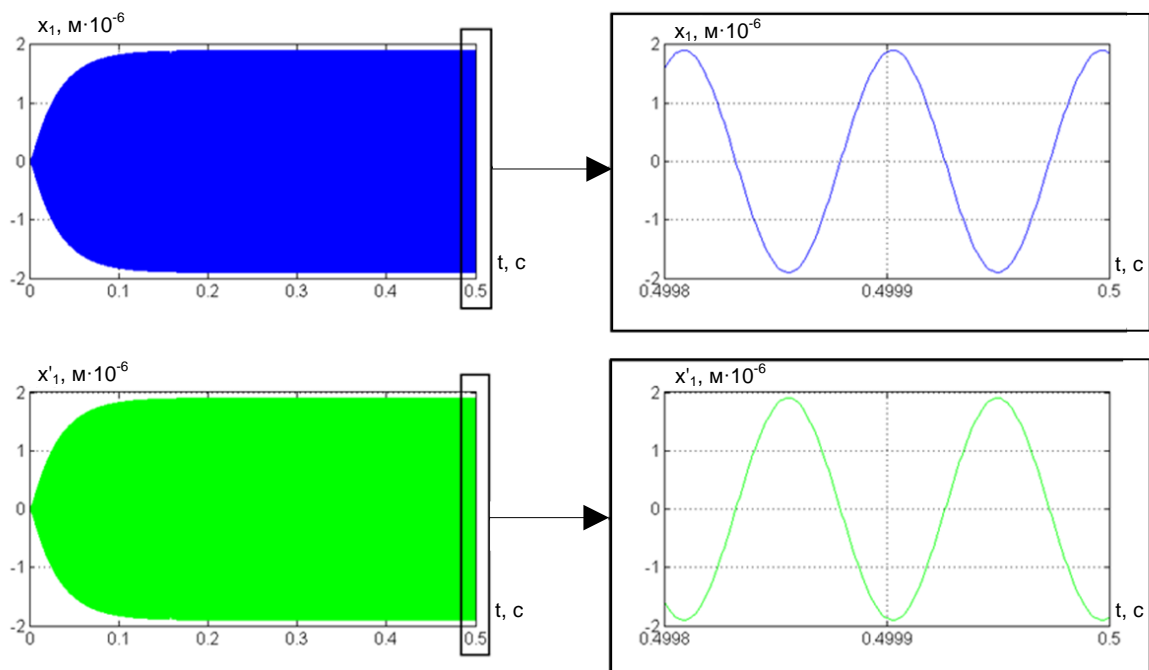


Рисунок 2.19 – Колебания сенсора ММГ при отсутствии вибрации (ось X)

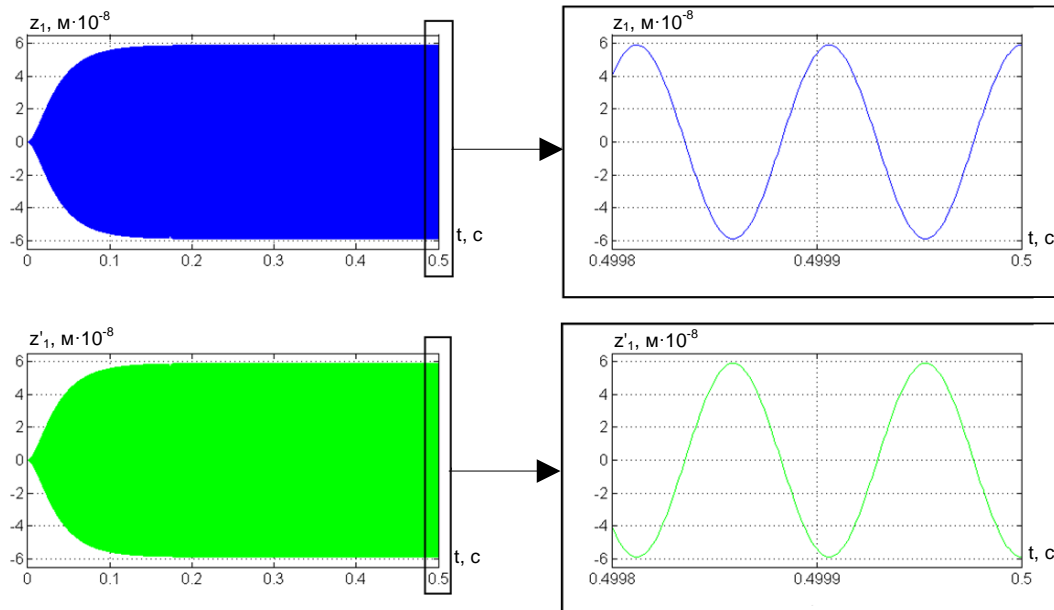


Рисунок 2.20 – Колебания сенсора ММГ при отсутствии вибрации (ось Z)

Вибрация основания вызывает появление колебаний сенсора с частотой вибрации, которые накладываются на первичные (рисунок 2.21) и вторичные информативные колебания (рисунки 2.22, 2.23).

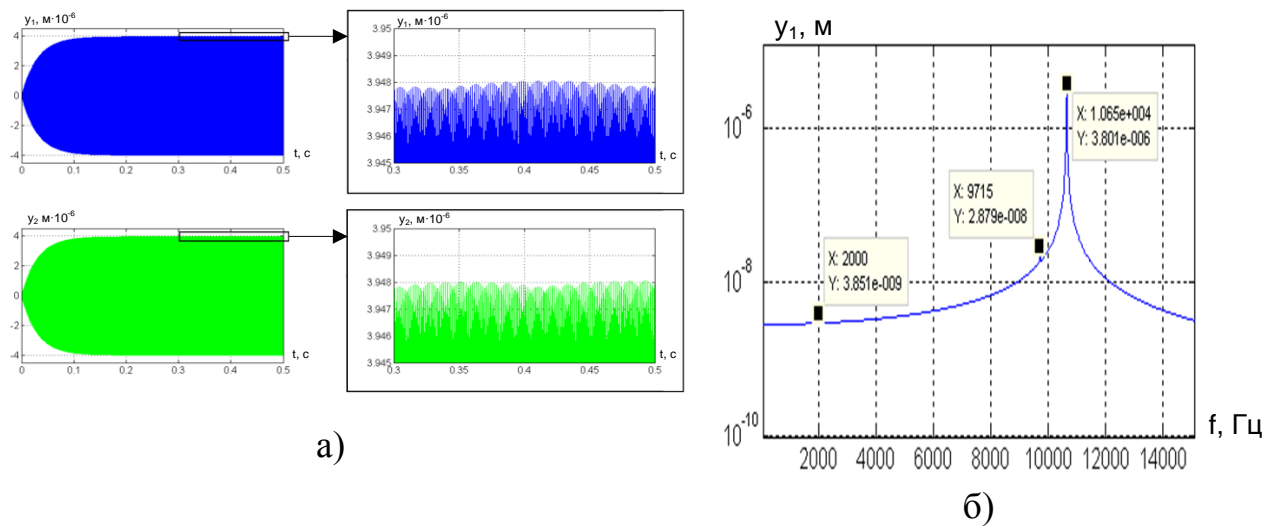


Рисунок 2.21 – Первичные колебания сенсора ММГ при наличии вибрации (ось Y): а – временные характеристики; б – спектр сигнала

Амплитуда первичных колебаний более, чем на два порядка превышает амплитуды вибрационных колебаний (рисунок 2.20,б). Влиянием вибрации на первичный канал можно пренебречь.

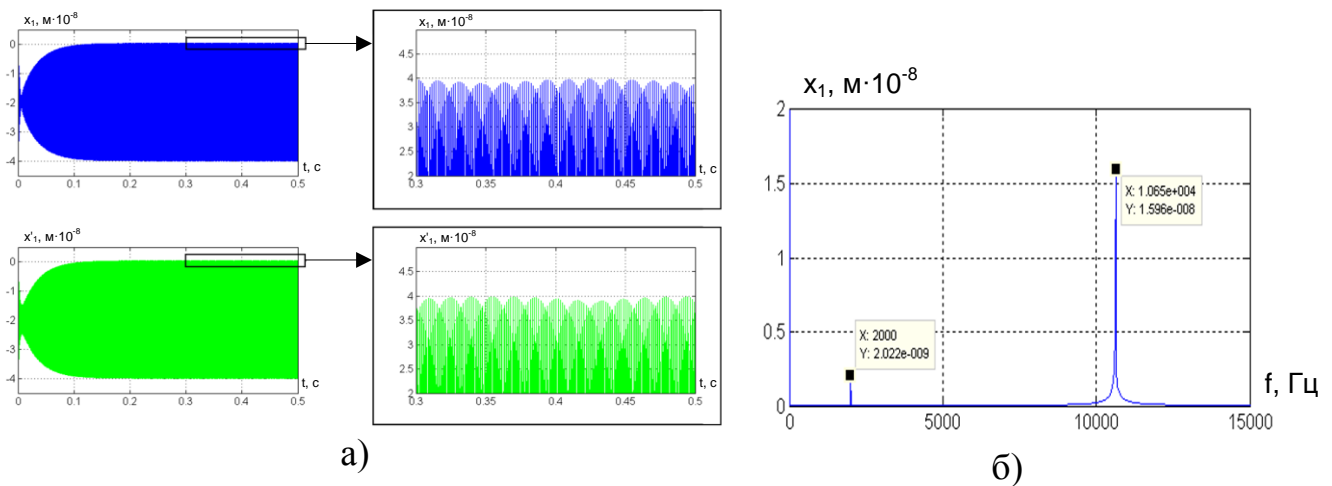


Рисунок 2.22 – Вторичные колебания сенсора ММГ при наличии вибрации (ось X): а – временные характеристики; б – спектр сигнала

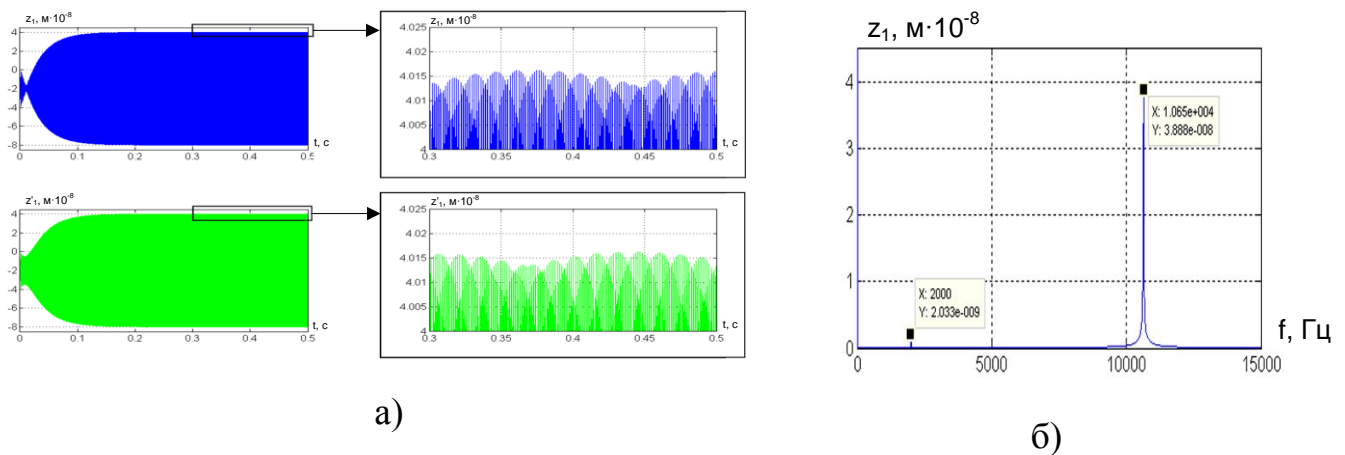


Рисунок 2.23 – Вторичные Колебания сенсора ММГ по оси Z при наличии вибрации^ а – временные характеристики; б – спектр сигнала

В спектре всех вторичных колебаний имеются две гармоники – основная с частотой возбуждения первичных колебаний и дополнительная с частотой вибрации  $f=2$  кГц (рисунки 2.22,б; 2.23,б).

Частота информативных колебаний ММГ примерно в пять раз больше максимальной частоты вибрации, следовательно, вибрационную помеху с частотой вибрации можно уменьшить при обработке выходных сигналов. Так как собственные частоты гироскопа лежат за пределами диапазона частот вибрации, то резонансного усиления вибрационного воздействия в гироскопе не происходит [87].

Выходные сигналы сенсора гироскопа, пропорциональные действующим силам, вычитаются один из другого ( $x_1 - x'_1$ ) и ( $z_1 - z'_1$ ), следовательно,

устраняется действие линейного ускорения, поступательной вибрации и на выходе формируется сигнал, пропорциональный измеряемой угловой скорости (рисунок 2.24).

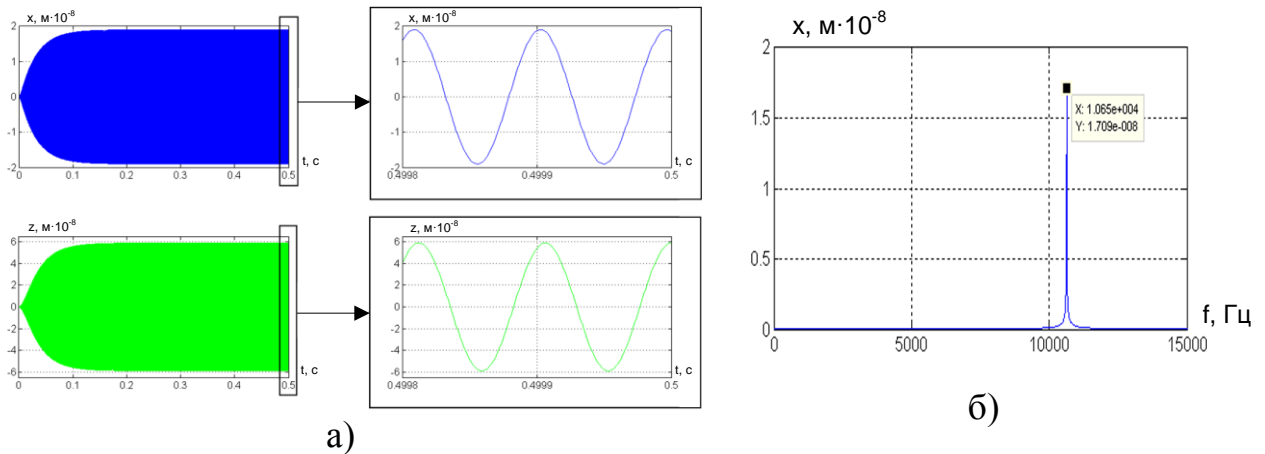


Рисунок 2.24 – Алгоритм определения угловой скорости при вибрации: а – временные характеристики; б – спектр сигнала

Алгоритм определения угловой скорости идеально фильтрует гармоническую составляющую действующей вибрации, оставляя в спектре выходного сигнала лишь информативную составляющую с частотой первичных колебаний, которая и определяет измеряемую угловую скорость.

Все эти результаты моделирования получены при условии идентичности параметров вторичных. Однако, за счёт технологического процесса изготовления и изменения температуры имеет место различие характеристик вторичных каналов (в частности изменяются его собственные частоты) [88].

Рассмотрим работу алгоритмов определения угловой скорости при различии параметров собственных частот вторичных колебаний на 0,05%.

В спектрах вторичных колебаний ММГ присутствуют: гармонические колебания с частотой вибрации и с частотой возбуждения первичного канала (информативная информация) (рисунок 2.25).

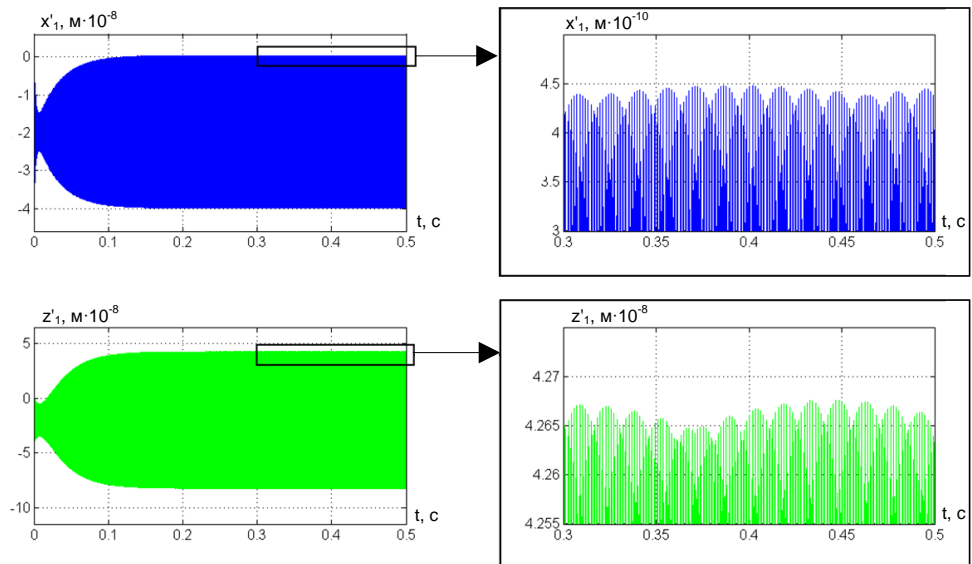
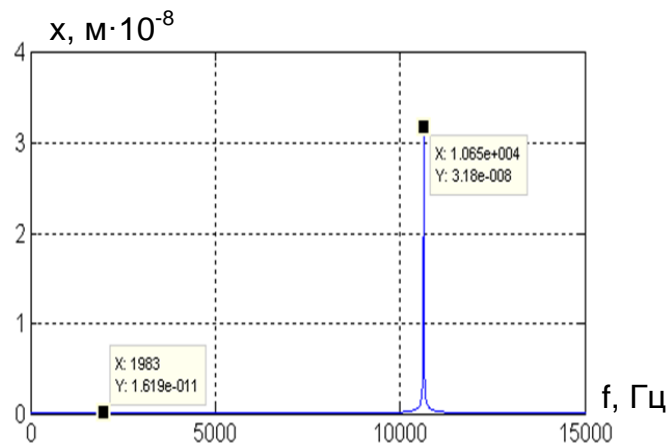
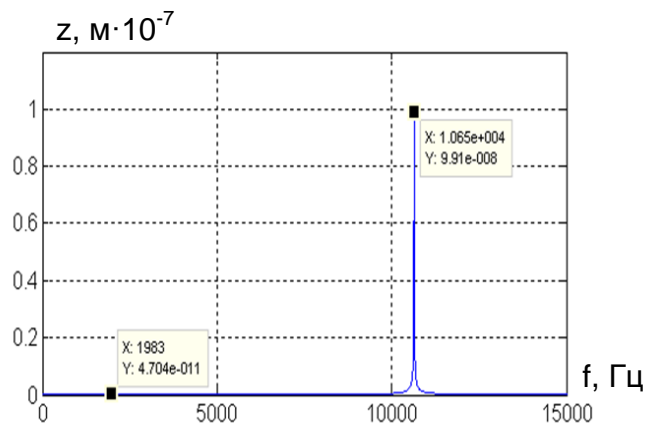


Рисунок 2.25 – Вторичные колебания ММГ при различии их собственных частот на 0,05%



а)



б)

Рисунок 2.26 – Алгоритм определения угловой скорости при вибрации:

а – ось X, б – ось Z

Алгоритм работает практически так же, как и при совпадении частот вторичных каналов. Составляющие, обусловленные постоянным ускорением, компенсируются. В спектре суммарного сигнала вторичных колебаний гироскопа (рисунок 2.26, б) осталась гармоника вибрационного воздействия, амплитуда которой мала по сравнению с амплитудой информативных колебаний и она может быть отфильтрована в выходном сигнале.

## 2.5 Анализ чувствительности микромеханического гироскопа к ударным воздействиям

### 2.5.1 Аналитические исследования

При ударных нагрузках необходимо учитывать не только величину нагрузки, но и время её действия.

Характер удара зависит от периода  $T_0$  колебаний системы [89]. Относительное движение сенсора ММГ при ударе и после него определяется произведением  $\omega_0\tau$ , где  $\omega_0$  - наименьшая собственная частота колебаний сенсора в направлении удара;  $\tau$  - длительность ударного импульса. При  $\omega_0\tau < 1$  удар является коротким, форма импульса ускорения незначительна, относительное перемещение достигает максимума после окончания импульса. После окончания удара происходят свободные колебания сенсора ММГ. Для разработанного ММГ по всем осям  $\omega_0\tau \approx 33,4$ , что составляет  $> 1$ , следовательно, удар является длинным и перемещения под действием ударных ускорений можно считать квазистатическими. Длительность  $\tau$  ударного импульса в несколько раз превышает период  $T_0$  собственных колебаний сенсора. Таким образом, максимальные относительные перемещения сенсора ММГ при ударе можно рассматривать как статические отклонения под действием ускорения

$$\Delta x_i = \frac{W_x}{\omega_{3,4}^2}; \Delta y_i = \frac{W_y}{\omega_{1,2}^2}; \Delta z_i = \frac{W_z}{\omega_{5,6}^2}; i = 1, 2, \quad (2.21)$$

где  $W_x$ ,  $W_y$ ,  $W_z$  - ударные ускорения по направлениям  $x$ ,  $y$ ,  $z$ . Ударное ускорение определяется как

$$W = a \cdot k,$$

где  $a$  – амплитуда ускорения ударного импульса;  $k$  – коэффициент передачи при ударе для полусинусоидального импульса

$$k = \frac{2v}{\mu^2 - 1} \cos\left(\frac{\pi}{2\mu}\right),$$

где  $\mu = \frac{\omega}{\omega_0}$ ;  $\omega = \pi/\tau$  – условная частота ударного импульса;  $\omega_0$  – собственные частоты конструкции. Тогда максимальное ускорение, приводящее к касанию подвижных и неподвижных элементов сенсора гироскопа, можно определить по выражению

$$W_{max} = \Delta \cdot \omega_0^2,$$

где  $\Delta$  – зазор между подвижными и неподвижными элементами конструкции сенсора ММГ. В таблице 2.3 приведены значения максимальных ударных ускорений, приводящие к касанию подвижных частей сенсора ММГ с неподвижными.

Таблица 2.3 – Максимальные ускорения, приводящие к касанию

$\Delta$ , мкм	1	2	3	4	5	6	7	8	8,9	10
$W_{max}$ , g	394	788	1182	1576	1970	2364	2758	3152	3500	3940

При ударе в виде полуволны 3500 g длительностью 500 мкс и используемых зазорах в конструкции гироскопа будут происходить контактные взаимодействия (таблица 2.3). При перемещении вдоль оси Y минимальный зазор составляет 10 мкм между электродами электростатического привода возбуждения первичных колебаний (рис.2.27). Если гироскоп находится в нерабочем состоянии, то при действии максимального ускорения в этом направлении контактного взаимодействия не будет. Наиболее опасными являются направления осей X и Z, где минимальный зазор между электродами составляет 5 мкм.



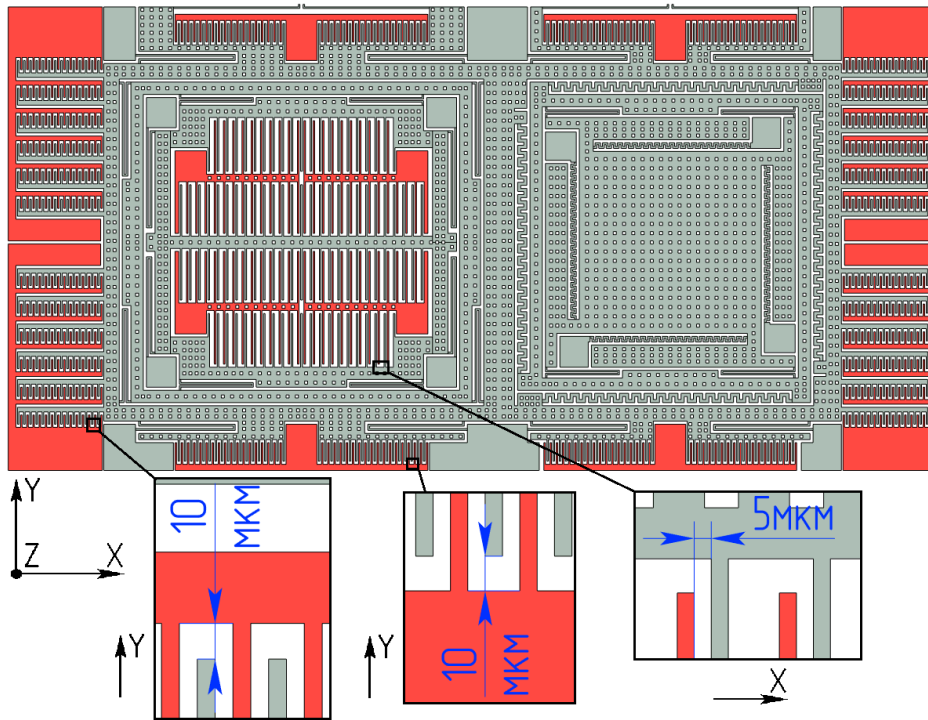


Рисунок 2.27 – Максимальные величины зазоров в гироскопе

Касание зубцов электродных структур по осям X и Z произойдёт при ударном ускорении 1970 g. Контактное взаимодействие приведёт к замыканию электродов и временному отказу прибора, в системе управления необходимо реализовать элементы, препятствующие электрическому пробое. С точки зрения надёжности наиболее уязвимым элементом ММГ является упругий подвес, поэтому необходимо знать возникающие в нем напряжения, которые не должны превышать допустимых напряжений для кремния ( $\sigma_{\text{доп}} = 800 \text{ МПа}$ ), из которого изготавливается механический сенсор ММГ.

В качестве критерия прочности в этом случае принимают количество удельной потенциальной энергии формоизменения, накопленной деформированным элементом. Согласно этой теории, опасное состояние наступает тогда, когда удельная потенциальная энергия формоизменения достигает своего предельного значения, которое определяется из опытов на простое растяжение-сжатие. Отсюда, условие прочности, записанное через нормальные напряжения, примет вид

$$\sigma_z \leq [\sigma_{\text{доп}}].$$

Кроме деформации упругих подвесов, опасность представляет скорость касания электродов. Разрушение материала при ударе может произойти, если скорость соударения превысит величину [12, 81]

$$V_{\text{уд}} = \frac{\sigma_{\text{доп}}}{\sqrt{E\rho}}, \quad (2.22)$$

где  $\rho$  – плотность кремния,  $E$  – модуль упругости. Для монокристаллического кремния в направлении  $\langle 110 \rangle$  допустимая скорость соударения составляет 25 м/сек. Для рассматриваемого длинного удара скорость соударения  $V_0 = \frac{W}{\omega_0}$ . Первые три собственные частоты разработанной конструкции сенсора ММГ находятся вблизи частоты 10 кГц, таким образом, получим, что скорость соударения для гироскопа составляет 0,51 м/с и разрушения материала при контакте происходить не будет.

### 2.5.2 Математическое моделирование влияния вибрации и ударов на сенсор микромеханического гироскопа

На рисунках 2.28, 2.29, 2.30 приведены результаты компьютерного моделирования ударного воздействия на гироскоп, который находится в рабочем состоянии, но без контактного взаимодействия.

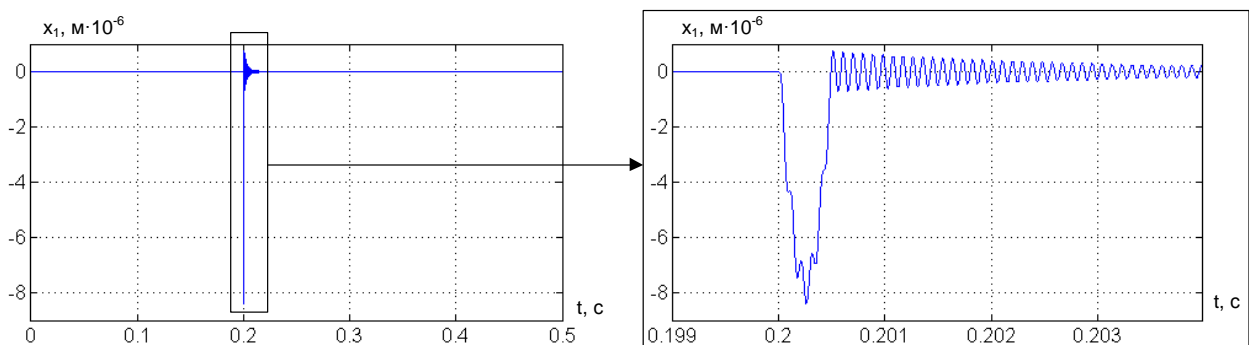


Рисунок 2.28 – Перемещения сенсора ММГ по оси X при ударе

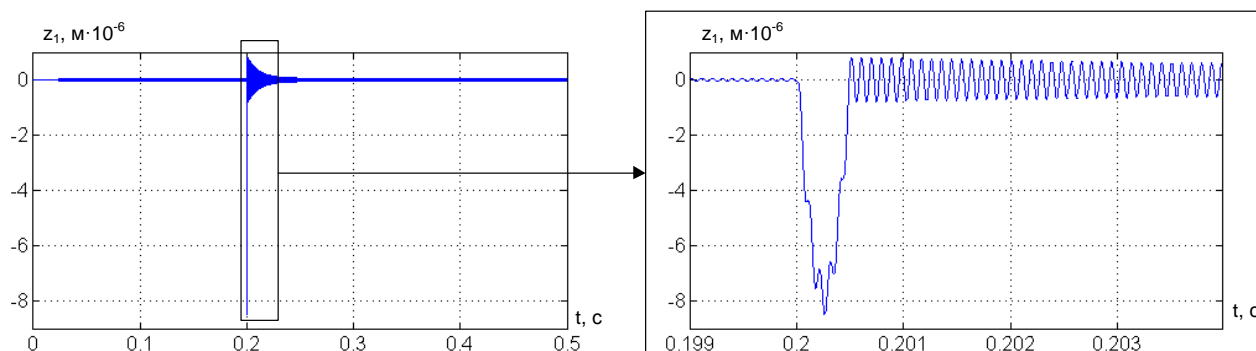


Рисунок 2.29 – Перемещения сенсора ММГ по оси Z при ударе

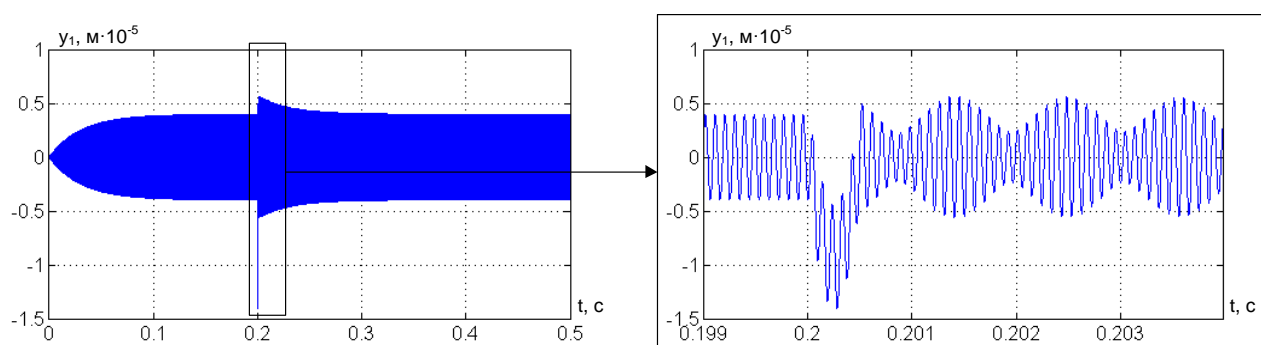


Рисунок 2.30 – Перемещения сенсора ММГ по оси Y при ударе

Перемещения по всем осям превышают имеющиеся зазоры, следовательно, в конструкции ММГ произойдёт контакт и отскок подвижных частей. По оси первичных колебаний также происходит касание, так как максимальное перемещение превышает зазор 10 мкм по этой оси. Это обусловлено тем, что к перемещению из-за удара в рабочем режиме добавляется амплитуда первичных колебаний 4 мкм. Следовательно, необходимо провести расчёт конструкции при условии наличия механического контакта при ударе.

### 2.5.3 Конечно-элементный анализ влияния вибрации и ударов на микромеханический гироскоп

#### 2.5.3.1 Конечно-элементная модель микромеханического гироскопа

Для испытания на вибрационную стойкость и удар применяется программный комплекс ANSYS Workbench. Использовались модули:

- Harmonic response analysis – Гармонический анализ. Результаты гармонического анализа используются для определения стационарного отклика линейной структуры к нагрузкам, которые изменяются синусоидально (гармонично) со временем, что позволяет определить устойчивость конструкции к резонансу на заданном диапазоне частот, а также определить, какие при этом возникают напряжения и не являются ли они критическими.
- Transient structural analysis – Переходный структурный анализ. Этот тип анализа используется для определения динамических характеристик структуры под действием каких-либо нестационарных нагрузок. В процессе анализа определяются изменяющиеся во времени перемещения, деформации и напряжения конструкции.

Вибрационные и ударные нагрузки задаются в трёх ортогональных направлениях. Конструкция ММГ (рисунок 2.31). симметрична относительно оси А-А, что позволяет ограничиться конечно-элементным моделированием только одной его половины.

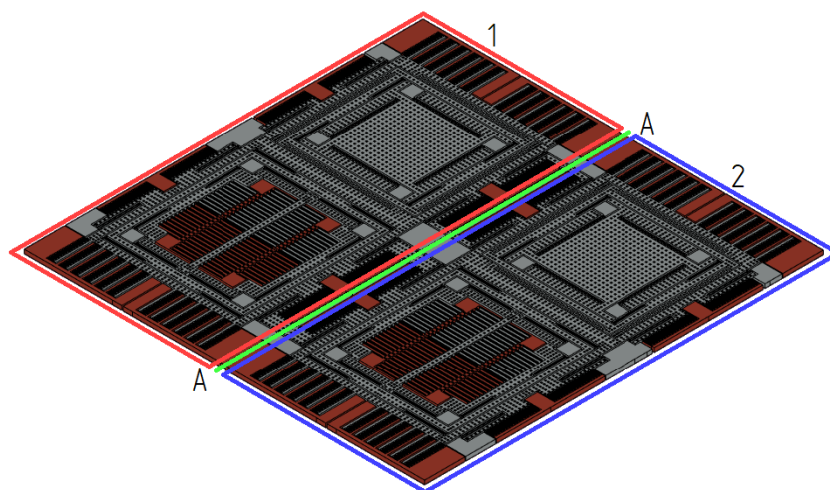


Рисунок 2.31 – 3D модель сенсора ММГ

Конструкция сенсора ММГ импортируется из программы T-Flex посредством формата Parasolid в ANSYS Workbench (рисунок 2.32).

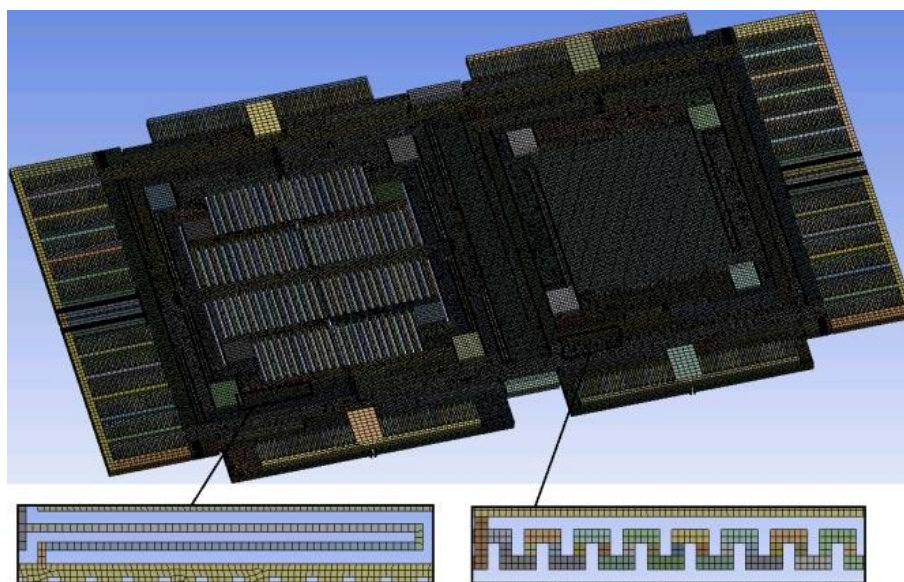


Рисунок 2.32 – Сенсор ММГ с наложенной КЭ сеткой

Конечно-элементная модель составлена из конечных элементов с необходимым уплотнением сетки в областях повышенной концентрации механических напряжений.

### 2.5.3.2 Воздействие удара

При ударе с ускорением  $3500\text{ g}$  в течение  $500\text{ мкс}$  перемещения элементов гироскопа могут достигать: по оси  $X - 9,5 \cdot 10^{-6}\text{ м}$ , по оси  $Y - 9,2 \cdot 10^{-6}\text{ м}$ , по оси  $Z - 9,2 \cdot 10^{-6}\text{ м}$ , если отсутствуют ограничения движению. Минимальные зазоры между подвижными и неподвижными частями конструкции в несколько раз меньше, следовательно, имеет место контактное взаимодействие, причём происходит касание в упругом подвесе (рисунок 2.33).

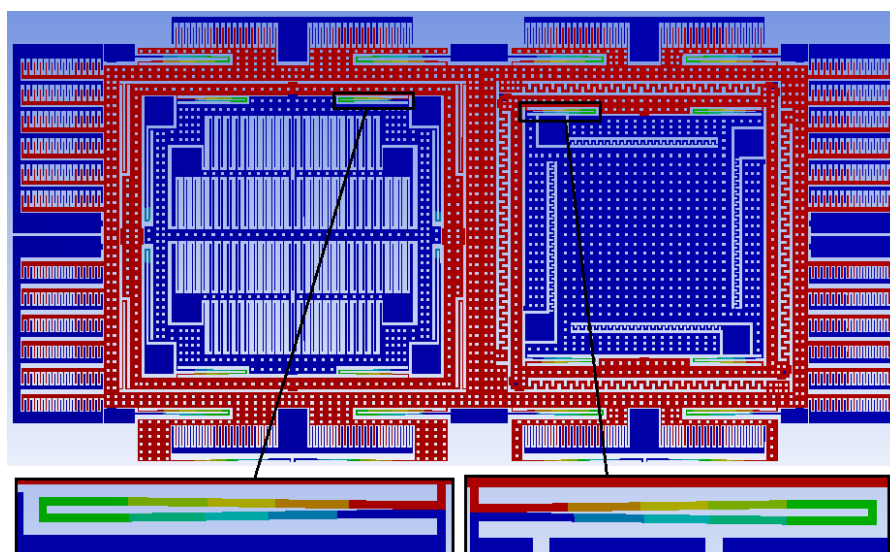


Рисунок 2.33 – Момент удара гироскопа без ограничителей



Для предотвращения контакта упругих подвесов установим упоры (рисунок 2.34), которые ограничивают перемещения гироскопа в пределах 4 мкм.

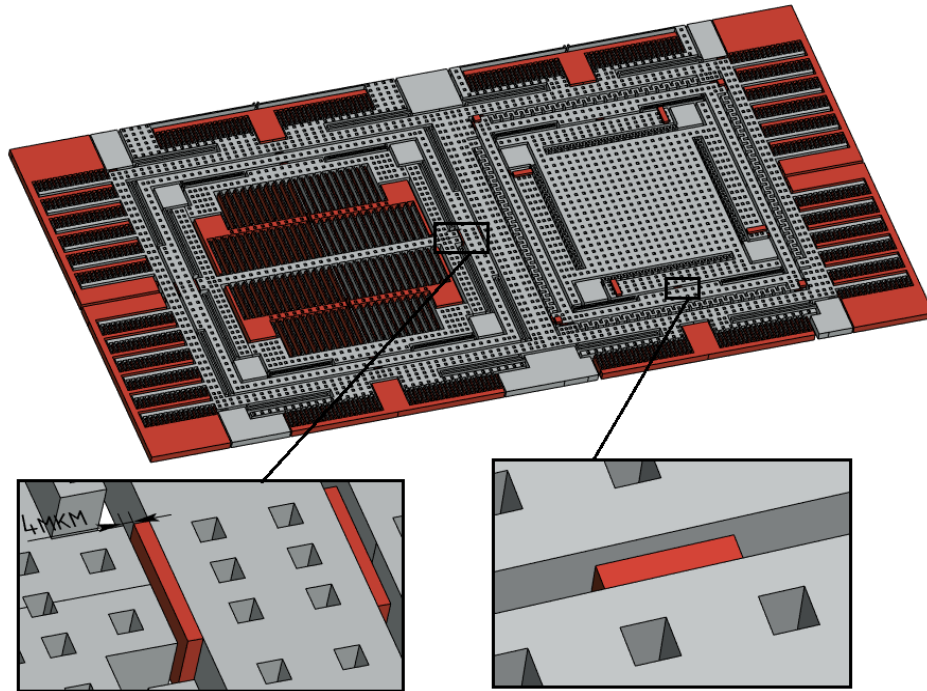


Рисунок 2.34 – Конструкция ММГ с ограничителями

Учитывая, что зазоры в гребенчатых электродах и в упругих подвесах составляют 5 мкм, то в них соприкосновения не будет, касание будет происходить в местах расположения упоров (рисунок 2.35).

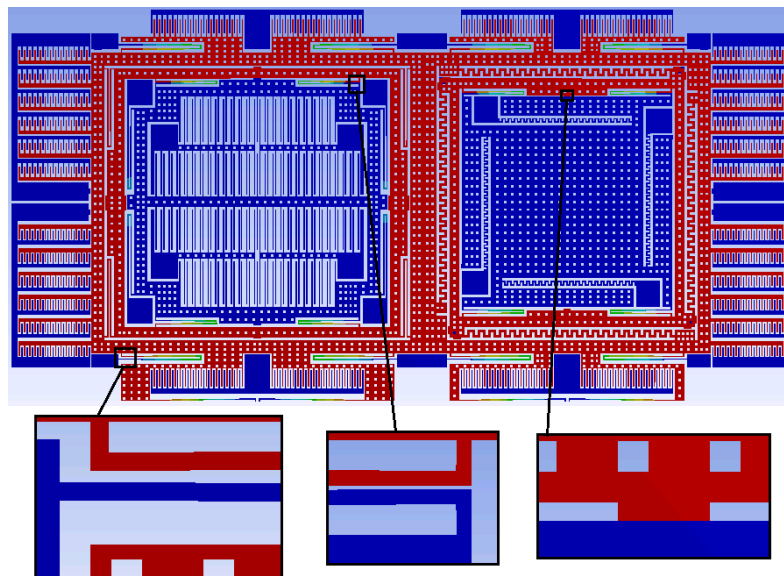


Рисунок 2.35 – Момент соприкосновения сенсора с ограничителем

Перемещения по перекрёстным осям малы, возникающие напряжения меньше допустимого напряжения (рисунки 2.36, 2.37, 2.38).

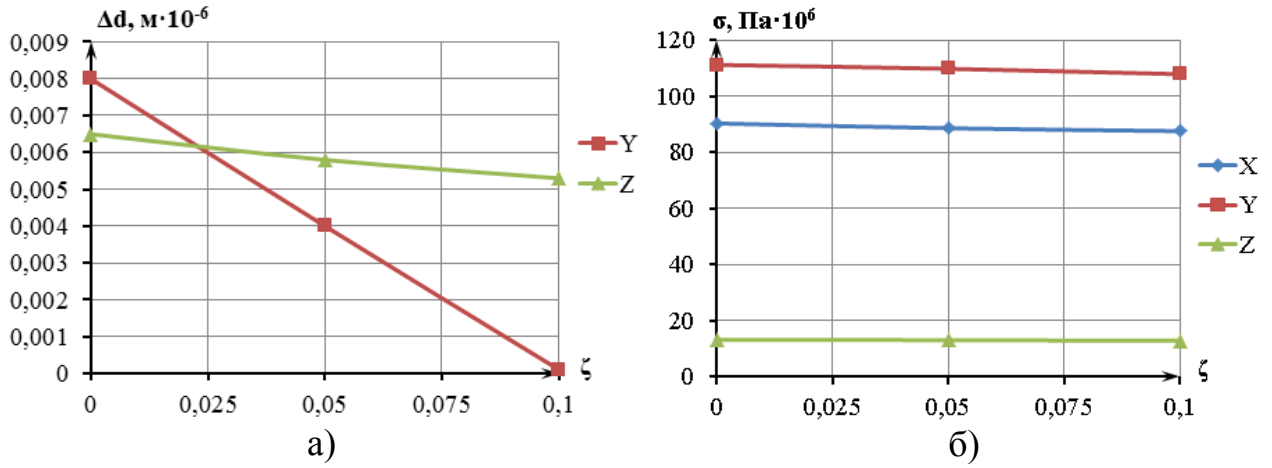


Рисунок 2.36 – Перемещения и напряжения конструкции при ударе по оси X:  
а) перемещения элементов конструкции; б) напряжения в конструкции.

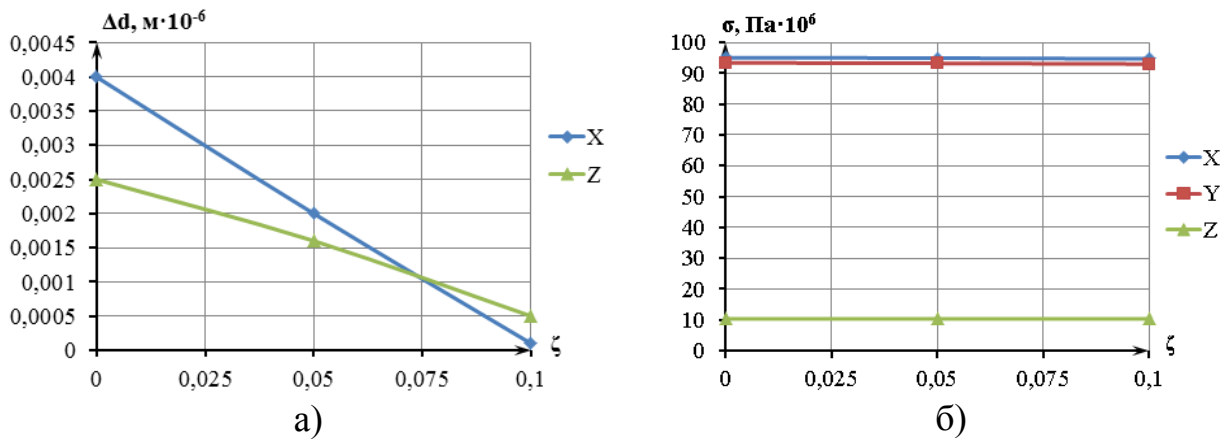


Рисунок 2.37 – Перемещения и напряжения конструкции при ударе по оси Y:  
а) перемещения элементов конструкции; б) напряжения в конструкции.

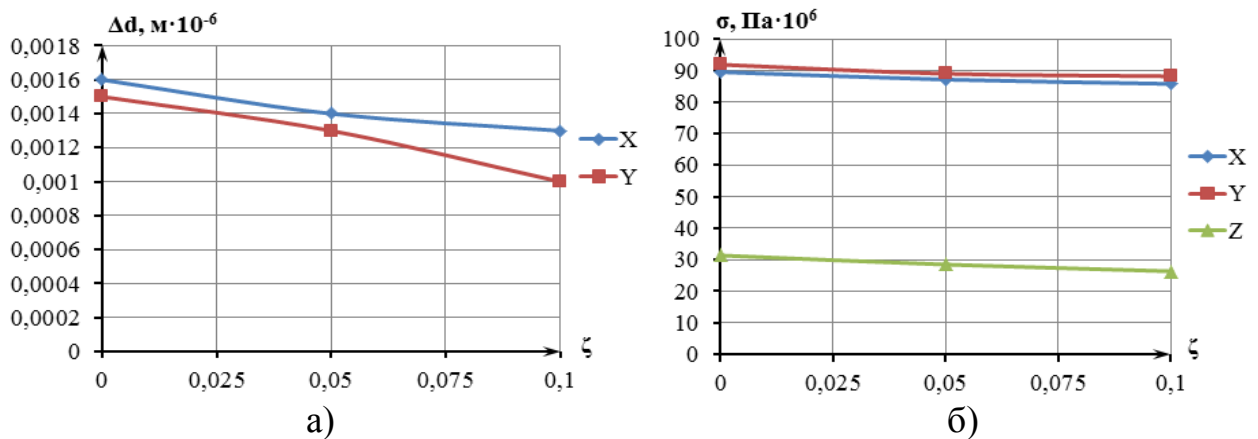


Рисунок 2.38 – Перемещения и напряжения конструкции при ударе по оси Z:  
а) перемещения элементов конструкции; б) напряжения в конструкции.

### 2.4.3.3 Воздействие вибрации

Дестабилизирующим механическим воздействием является и поступательная вибрация. За счёт антифазного первичного движения и применённого алгоритма получения сигналов об угловых скоростях вибрационные составляющие погрешностей компенсируются. Поэтому рассматривается влияние вибрации на прочность ММГ (рисунки 2.39, 2.40, 2.41).

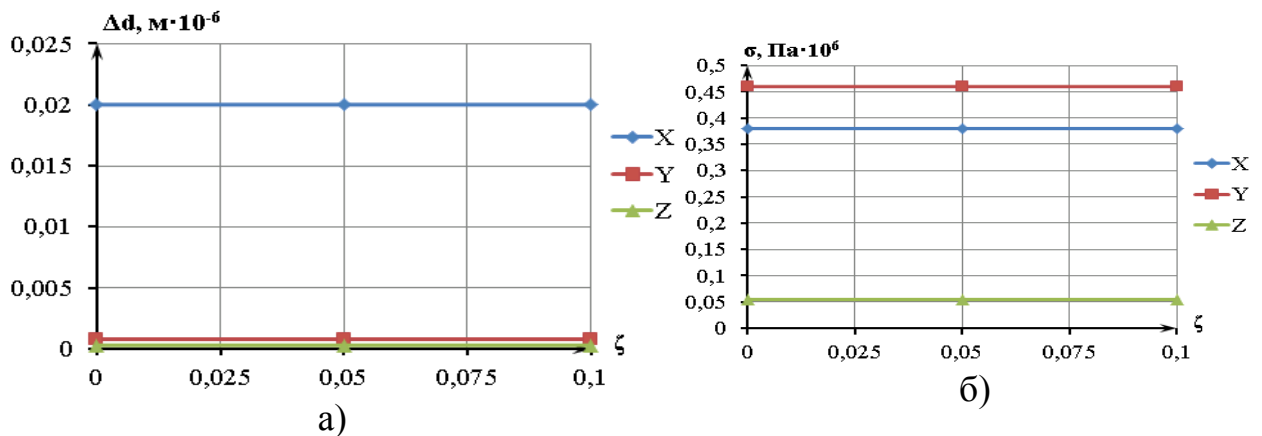


Рисунок 2.39 – Перемещения и напряжения конструкции при вибрации по оси X (частота вибрации 2 кГц): а) перемещения элементов конструкции; б) напряжения в конструкции

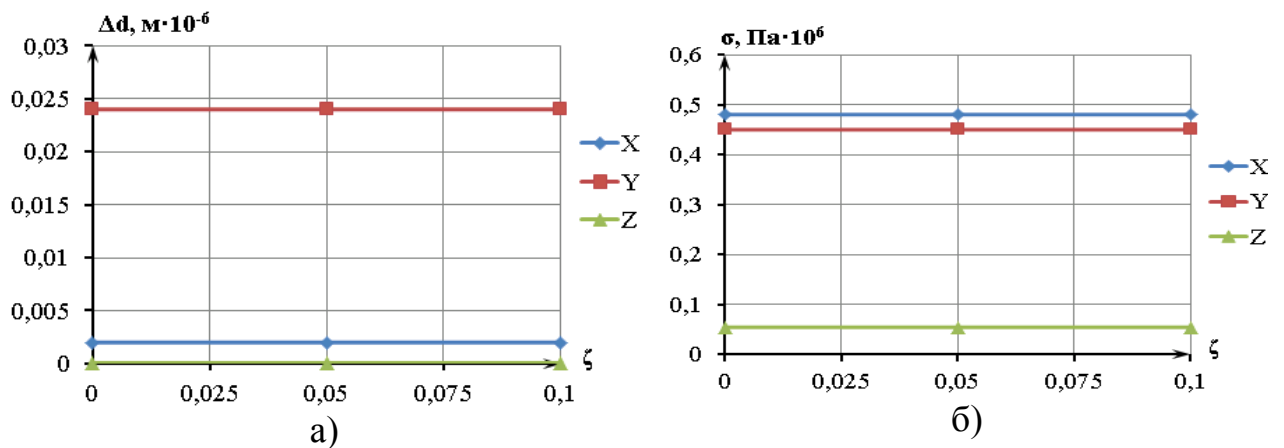


Рисунок 2.40 – Перемещения и напряжения конструкции при вибрации по оси Y (частота вибрации 2 кГц): а) перемещения элементов конструкции; б) напряжения в конструкции



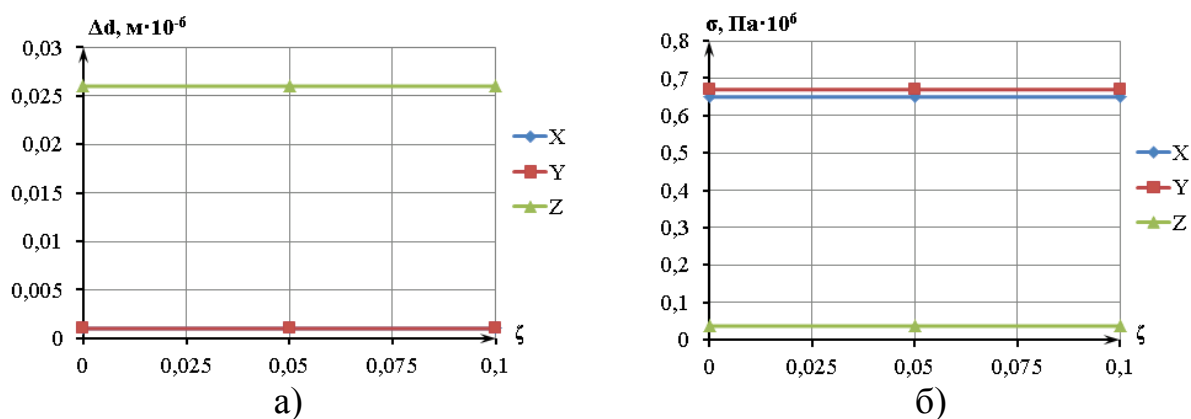


Рисунок 2.41 – Перемещения и напряжения конструкции при вибрации по оси Z (частота вибрации 2 кГц): а) перемещения элементов конструкции; б) напряжения в конструкции

Амплитуды вибрационных колебаний ММГ составляют доли мкм, контакта нет, возникающие напряжения меньше значения допустимого напряжения.

## Выводы по главе 2

- 1) Поступательная вибрация основания вызывает колебания сенсора ММГ с частотой вибрации, которые накладываются на информативные колебания.
- 2) Применение антифазных первичных колебаний ММГ позволяет уменьшить в выходной информации влияние вибрационных ускорений.
- 3) Собственные частоты ММГ превышают частотный диапазон вибрационного воздействия, что исключает возможность возникновения резонансов.
- 4) Исходя из параметров ударного воздействия и сенсора ММГ, удар можно считать длинным, при котором разрушения материала не происходит, но имеет место контактное взаимодействие, при котором происходит замыкание электродов.

5) Для обеспечения ударной стойкости ММГ и сохранения его метрологических характеристик необходимо в конструкции предусмотреть наличие упоров, ограничивающих перемещения элементов конструкции.

6) Динамические погрешности ММГ зависят от величины расстройки частоты контура вторичных колебаний относительно частоты первичных колебаний.

7) С увеличением добротности область частот, в которой динамические погрешности минимальны, сужается.

8) Для обеспечения минимальных динамических погрешностей необходимо обеспечить стабильность первичных колебаний (амплитуды и частоты) и частоты расстройки первичного и вторичного каналов гироскопа.

### 3 ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЕ ИСПЫТАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ ДВУХКОМПОНЕНТНОГО МИКРОМЕХАНИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА

#### 3.1 Экспериментальный макет микромеханического гироскопа

Разработанный сенсор ММГ представлен на рисунке 3.1.

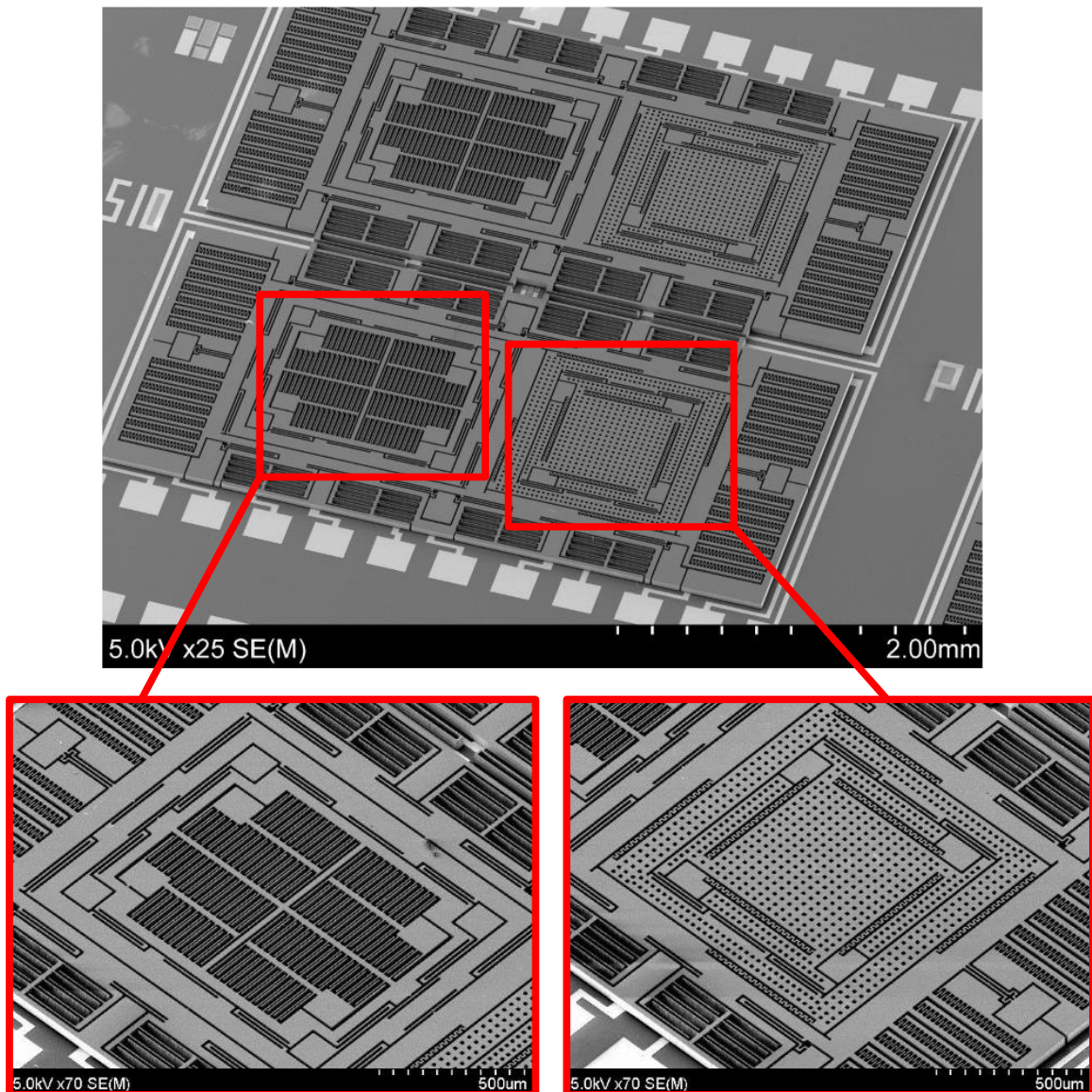


Рисунок 3.1 – Сенсор ММГ

Для проведения испытаний, используя оборудование ЦКП «Импульс» Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники [90], были проведены исследования микроструктуры

поверхности образцов кремниевых тестовых структур сенсоров микроэлектромеханических гироскопов, определены размеры гребенчатых структур, упругих подвесов, габаритные размеры сенсоров, наличие недотравленных областей внутри сенсора, проведён контроль проводников, расположенных на стеклянном основании и кремниевом чувствительном элементе.

Визуальный контроль геометрических параметров необходим для прогнозирования выходных характеристик гироскопа и подстройки технологического процесса в случае выявления постоянных отклонений от требуемых размеров. Используя возможности электронного микроскопа ZEISS SUPRA 55 (Raith Two) проведено исследование 20 экспериментальных образцов на отклонение размеров от геометрической модели и определены бракованные экземпляры.

К браку относятся экспериментальные образцы, имеющие хотя бы один из перечисленных дефектов (рисунок 3.2).

1) Недотравленные области или слипание, что приводит к невозможности движения подвижных масс относительно друг друга (рисунок 3.1а).

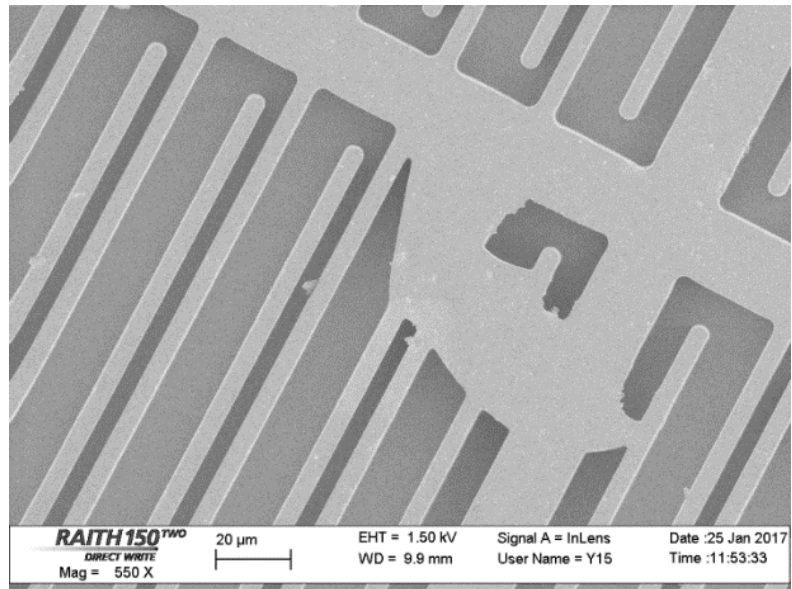
2) Некачественное соединение (бондинг) неподвижной гребенчатой структуры (ГС) с основанием. Отсутствие одного измерительного преобразователя делает неработоспособным весь сенсор (рисунок 3.2б).

3) Плохой электрический контакт между металлической дорожкой, напыленной на основание, и кремниевой структурой.

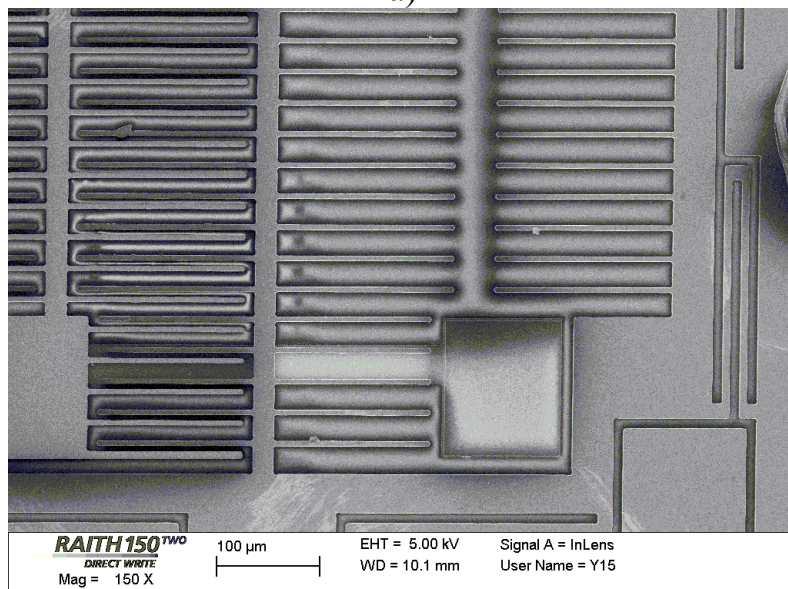
4) Замыкание соседних металлических дорожек между собой либо их отслоение вследствие плохой адгезии (рисунок 3.3в).

5) Превышение несоответствия размеров кремниевой структуры вследствие ошибок фотолитографии и травления на величину более 100 нм.

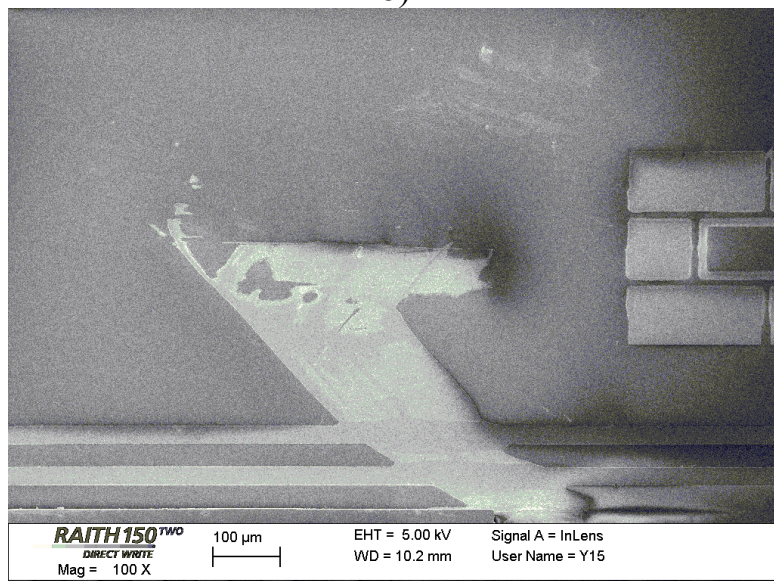




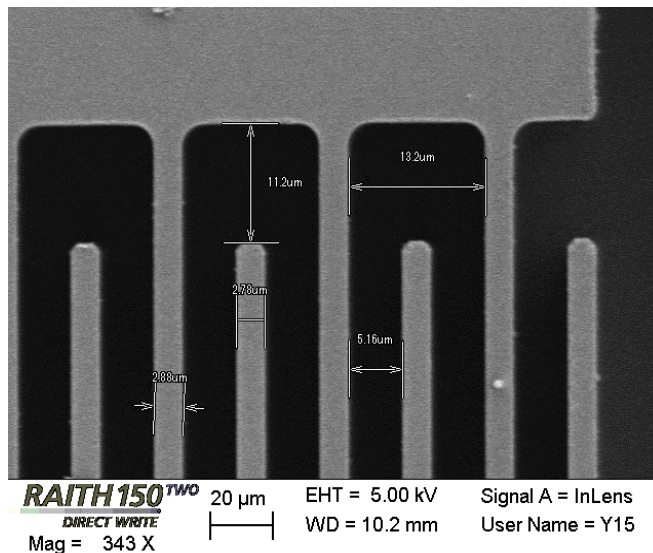
a)



b)



B)



г)

Рисунок 3.2 – Виды дефектов экспериментальных образцов:

- а) «слипшиеся» гребенчатые структуры; б) брак бондинга; в) замыкание дорожек; г) несоответствие размеров

Результаты исследования поверхности кремниевых экспериментальных образцов сенсоров ММГ, в ходе которого определены размеры гребенчатых структур, упругих подвесов, габаритных размеров сенсоров и наличие дефектов представлены в таблице 3.1.

Номера кодов дефектов, представленных в таблице 3.1, соответствуют вышеупомянутым на рисунке 3.2. Шероховатость поверхности составляет 50-70 нм (рисунок 3.3), при измерении размеров ошибка измерения составляет 20-30 нм (рисунок 3.4). Размеры в таблице 3.1 приведены с учётом ошибки измерения.

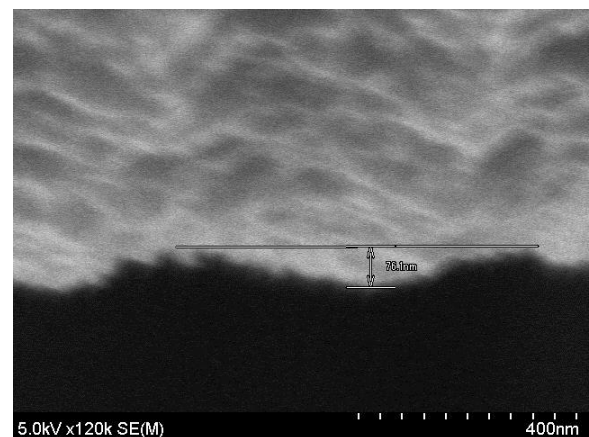
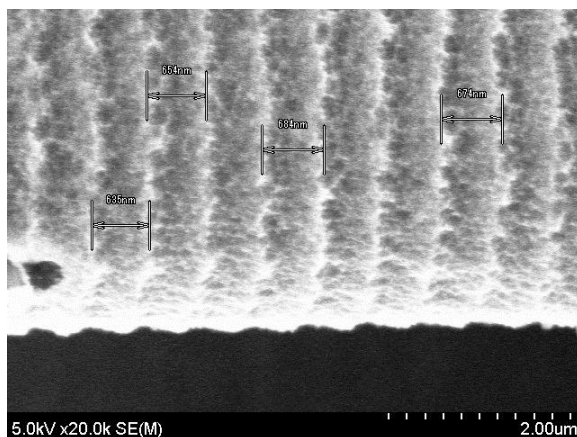


Рисунок 3.3 – Шероховатость поверхности кремниевой структуры



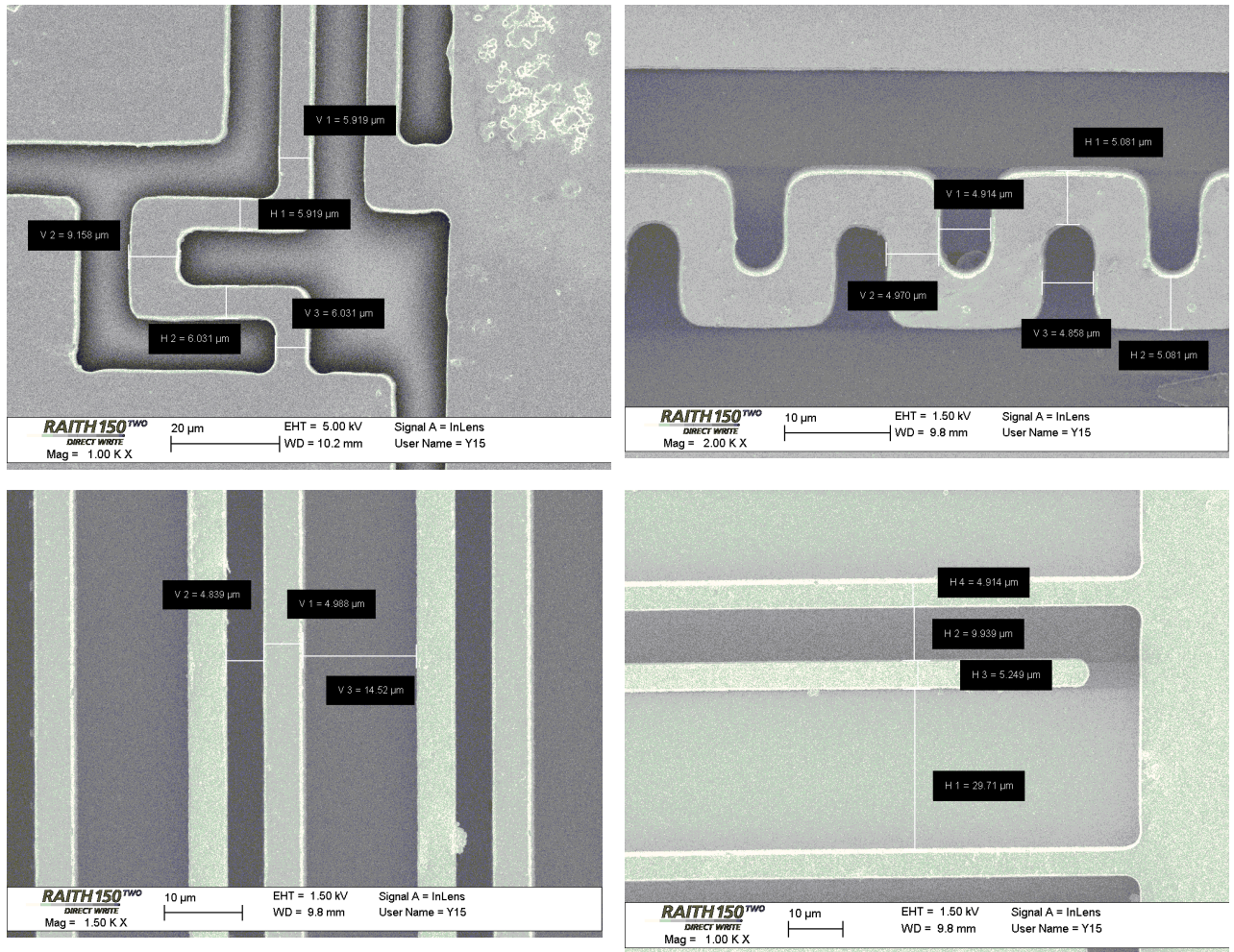


Рисунок 3.4 – Размеры гребенчатых структур и упругих элементов

Таблица 3.1 – Результаты исследований экспериментальных образцов

№ образца	Отклонение размера гребенчатых структур, не более, нм	Отклонение размера упругих элементов, не более, нм	Наличие дефекта
1	100	90	нет
2	80	90	1
3	140	120	5
4	120	120	5
5	70	80	нет
6	50	70	нет
7	100	100	1
8	100	90	нет
9	180	150	5
10	110	100	5 (небольшое отклонение)
11	100	100	4

Продолжение таблицы 3.1

№ образца	Отклонение размера гребенчатых структур, не более, нм	Отклонение размера упругих элементов, не более, нм	Наличие дефекта
12	90	100	Нет
13	90	80	нет
14	120	130	5
15	130	120	5
16	100	100	нет
17	90	90	нет
18	80	90	2
19	60	80	1
20	110	100	2

Из 20 исследованных образцов 45 % образцов полностью удовлетворяют всем требованиям, 25 % имеют отклонения размеров вследствие ошибок фотолитографии и травления кремния, 15 % имеют недотравленные области («слипшиеся» гребенчатые структуры), 5 % - замыкание соседних дорожек, 10 % - некачественный бондинг.

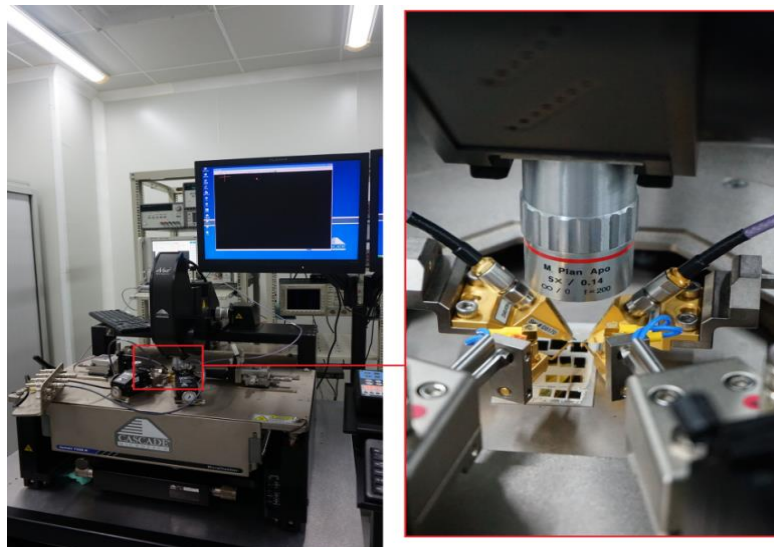


Рисунок 3.5 – Зондовая станция Cascade SUMMIT 11000B-M

Контроль проводников, расположенных на стеклянном основании и кремниевом чувствительном элементе производился двумя методами: визуально при проведении электронной микроскопии и измерением переходного



сопротивления между кремниевой структурой и металлической площадкой, куда производится подпайка золотых проводников при посадке в корпус. Измерение осуществлено с помощью зондовой станции Cascade SUMMIT 11000B-M (рисунок 3.5).

Удельное Омическое сопротивление КНИ-пластины не превышает  $0,005 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ , при измерении сопротивления между кремниевой структурой и металлической площадкой общее сопротивление не должно превышать десятков Ом. Было произведено измерение сопротивления для 24 контактных площадок 9 годных экспериментальных образцов сенсора гироскопа. Сопротивление не превышало  $70 \text{ Ом}$ .

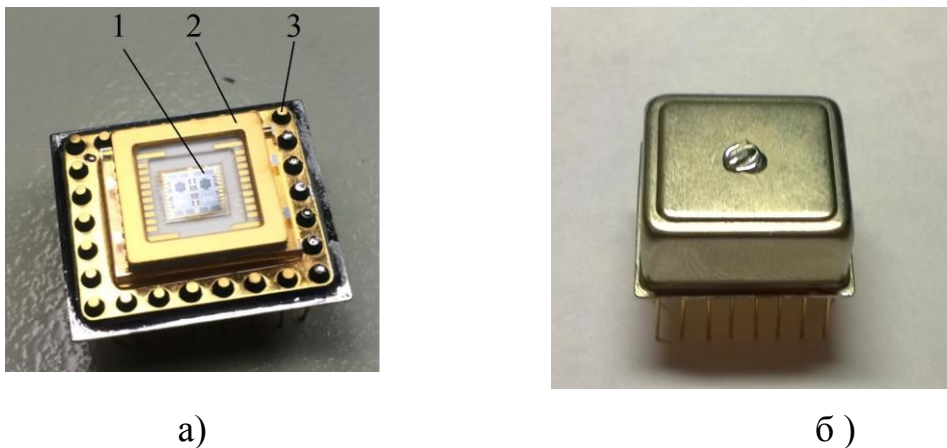


Рисунок 3.6 – Сенсор двухкомпонентного ММГ в корпусе:

а – крышка снята; б – внешний вид

На рисунке 3.6 обозначено: 1 – ММГ; 2 – корпус керамический LLCC 5134.64-6; 3 – корпус металлостеклянный 1409.26-1Н.

В экспериментальных образцах сенсоры ММГ сначала были установлены в корпуса LLCC 5134.64-6, где были разварены контакты, а затем эти корпуса установлены в металлостеклянные корпуса 1409.26-1Н (рисунок 3.6), в которых методом лазерной сварки осуществлено вакууммирование и герметизация.

Электродная структура ММГ в канале первичных колебаний (рисунок 3.7) содержит две группы электродов, одна из которых (рисунок 3.7, ёмкости  $C_{3y}^*$ ,  $C_{4y}^*$ ,  $C_{3y}$ ,  $C_{4y}$ ) предназначена для создания силы возбуждения первичных колебаний, вторая (рисунок 3.7, ёмкости  $C_{1y}^*$ ,  $C_{2y}^*$ ,  $C_{1y}$ ,  $C_{2y}$ ) может быть

использована для резонансной настройки канала первичных колебаний. Амплитуда первичных колебаний устанавливается на уровне 4 мкм.



Рисунок 3.7– Электродная структура сенсора ММГ

Электродная структура ММГ в канале вторичных колебаний содержит группы электродов, которые предназначены для измерения перемещений подвижной массы вдоль оси  $X$  и для частотной настройки канала вторичных колебаний при изменении температуры (рисунок 3.7, ёмкости  $C_{1x}^*$ ,  $C_{2x}^*$ ,  $C_{1x}$ ,  $C_{2x}$ ). Электроды с ёмкостями  $C_{1z}$ ,  $C_{2z}$  используются для измерения перемещений инерционных масс вдоль оси  $Z$ .

Сенсоры гироскопа закрепляются на плате, которая соединена с платой электроники (рисунок 3.8).

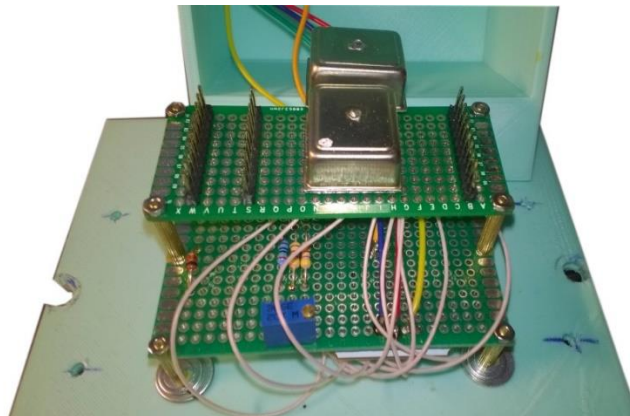


Рисунок 3.8 – Гироскоп с платой электроники

Сенсор гироскопа имеет шесть сенсорных электродных структур с общей точкой, емкости которых изменяются в зависимости от измеряемых угловых скоростей и ускорений (таблица 3.2).

Таблица 3.2 – Емкости сенсорных электродов канала вторичных колебаний

	$C_{1x} = C_{01} - \Delta C_{\Omega_z} - \Delta C_{ax};$ $C_{1x}^* = C_{01} + \Delta C_{\Omega_z} - \Delta C_{ax};$ $C_{2x} = C_{01} + \Delta C_{\Omega_z} + \Delta C_{ax};$ $C_{2x}^* = C_{01} - \Delta C_{\Omega_z} + \Delta C_{ax};$ $C_{1z} = C_{02} + \Delta C_{\Omega_x} - \Delta C_{az};$ $C_{1z}^* = C_{02} - \Delta C_{\Omega_x} - \Delta C_{az}.$
--	---

$C_{01}$ ,  $C_{02}$  – начальные значения емкостей;  $\Delta C_{\Omega_x}$ ,  $\Delta C_{\Omega_z}$  – изменения емкостей, обусловленные угловыми скоростями;  $\Delta C_{ax}$ ,  $\Delta C_{az}$  – изменения емкостей, обусловленные ускорением основания. Угловые скорости рассчитываются, используя информацию о емкостях гироскопа (таблица 3.3).

Таблица 3.3 – Используемые ёмкости для определения угловых скоростей

№	Физическая величина	Используемые емкости	Операция
1	угловая скорость $\Omega_x$	$C_{1z}$ и $C_{1z}^*$	$C_{1z}^* - C_{1z}$
2	угловая скорость $\Omega_z$	$C_{1x}^*$ и $C_{1x}$	$C_{1x}^* - C_{1x}$

Для испытаний разработанного гироскопа была создана система сбора данных, состоящая из платформы сбора данных NI MyRIO 1900 и ноутбука. Для управления платформой сбора данных NI MyRIO 1900 и получения измерительной информации с ММГ было разработано специальное программное обеспечение в среде графического программирования LabVIEW.

Интерфейс пользователя, созданный на языке графического программирования LabVIEW, называется виртуальным прибором (ВИ). Текст программы, написанный на языке LabVIEW называется блок-диаграммой.

На рисунке 3.9 приведён внешний вид лицевой панели для управления

платформой сбора данных NI MyRIO 1900 и получения измерительной информации с гироскопа.

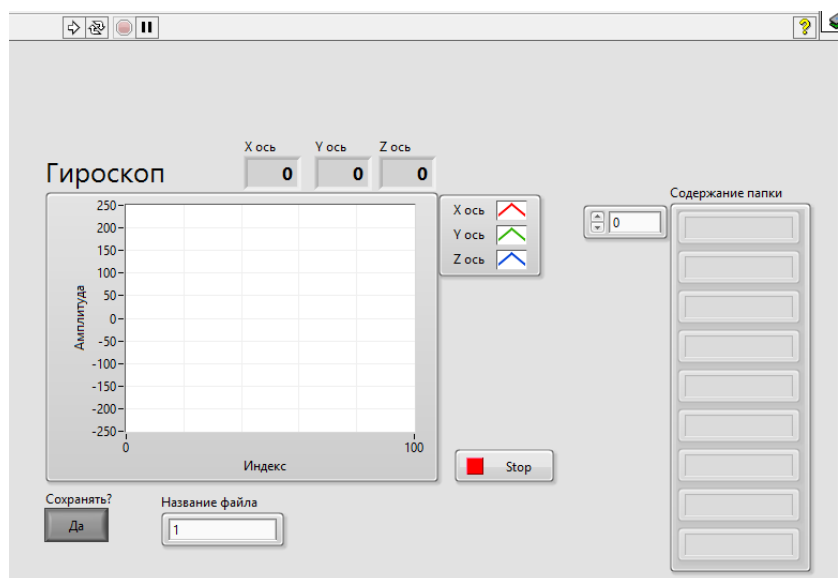


Рисунок 3.9 – Лицевая панель для управления платформой сбора данных NI MyRIO 1900 и получения измерительной информации с ММГ

Программа сбора данных работает следующим образом: после включения питания платформы NI MyRIO 1900 напряжения, необходимые для питания гироскопа, поступают на блок электроники; блок электроники генерируют переменный сигнал заданной частоты для возбуждения ММГ. После этого платформой сбора данных NI MyRIO 1900 оцифровываются сигналы со вторичных каналов, пропорциональные угловым скоростям по двум осям. Оцифрованные данные, преобразуются в результаты измерений угловой скорости, выводятся на лицевую панель программы в виде графиков и числовых значений, а также сохраняются в файл в формате \*csv.

Результаты измерений, записанные в файл, затем анализируются в соответствии с методикой испытаний.

### 3.2 Испытания макета микромеханического гироскопа

Для проведения испытаний ММГ была разработана программа и методика испытаний (ПиМИ) макета (приложение А).

Целью испытаний является исследование метрологических характеристик экспериментального макета ММГ в режиме двухкомпонентного гироскопа.

Проверяемые характеристики макета ММГ:

- динамическая погрешность не более 10 %;
- число осей чувствительности микрогироскопа – 2;
- диапазон измерения угловой скорости –  $\pm 300$  град/сек;
- нелинейность характеристики гироскопа не более 1 %.
- полоса пропускания гироскопа не менее 40 Гц;
- время готовности не более 3 с;
- диапазон рабочих температур от минус 40 °С до +105 °С;
- дрейф нуля на температурном диапазоне не более  $\pm 1$  град/с;
- температурное смещение чувствительности не более 1 %;
- собственный шум не более 0,1 град/с;
- вибростойкость в диапазоне частот (20 – 2000) Гц с амплитудой виброускорения 9g;
- удар: 1 полуволна 3500g в течение до 500мкс, 500g в течение 1 мс.

Проверка метрологических характеристик ММГ выполнялась путем задания для датчика известных входных физических воздействий, таких как, вращение чувствительной оси датчика в поле действия гравитации Земли, изменение температуры, действие вибрации, в соответствии с разработанной программой и методикой испытаний.

Определяемые показатели и точность их измерений в соответствии с программой испытаний приведены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Определяемые показатели

Пункт программы испытаний	Вид испытаний (проверок)	Номинальное значение	Предельные отклонения	Пункт методики
4.1	Определение числа осей чувствительности	2		6.1
4.2	Определение метрологических характеристик			6.2
4.2.1	Определение диапазона измерения угловой скорости	От минус 300 град/с до +300 град/с;		6.2.1

## Продолжение таблицы 3.4

Пункт программы испытаний	Вид испытаний (проверок)	Номинальное значение	Предельные отклонения	Пункт методики
4.2.2	Определение динамической погрешности		$\pm 10\%$	6.2.1
4.2.3	Определение нелинейности характеристики гироскопа		$\pm 1\%$	6.2.2
4.2.4	Определение полосы пропускания гироскопа		Не менее 40 Гц	6.2.3
4.2.5	Определение времени готовности		Не более 3 с	6.2.4
4.2.6	Определение диапазона рабочих температур	От минус 40 °С до +105 °С		6.2.5
4.2.7	Определение температурного смещения чувствительности		$\pm 1\%$	6.2.5
4.2.8	Определение дрейфа нуля на температурном диапазоне		$\pm 1$ град/с	6.2.6
4.2.9	Определение собственного шума		$\pm 0,1$ град/с	6.2.7
4.3	Испытания на вибростойкость		9g	6.3
4.4	Испытания на удар	3500 g	Не менее 500 мкс	6.4

Средства проведения испытаний:

- 1-осевой поворотный стенд AC 1120 S.
- Климатическая камера VT 7004.
- NI MyRIO 1900.
- Вибростенд BC252.
- Анализатор спектра E4448A.
- Ударный стенд HS15.

Внешний вид установки для проведения испытаний приведён на рисунке 3.10. Все испытания проводили на трех образцах ММГ.

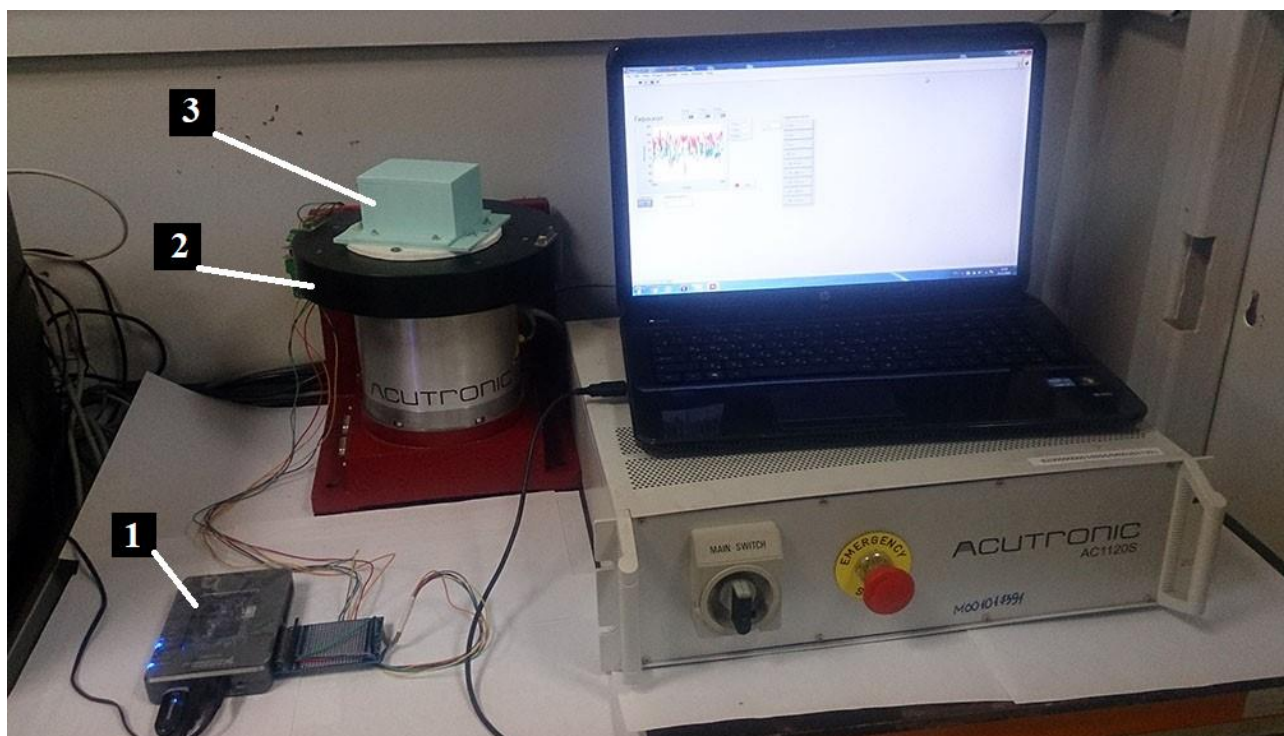


Рисунок 3.10 – Внешний вид установки для проведения испытаний:  
1 – NI MyRIO 1900, 2 – поворотный стенд AC 1120 S, 3 – макет ММГ

### 3.2.1 Определение диапазона измерения угловой скорости, динамической погрешности и относительной нелинейности характеристики

Определение диапазона измерения угловой скорости, определение динамической погрешности и относительной нелинейности характеристики проводили следующим образом: установили на поворотный стенд AC 1120 S объект испытаний, соединили объект испытаний, средства измерений и испытательное оборудование в соответствии со схемой рисунка 3.11, изменяли на поворотном столе угловую скорость от минус 325 град/с до 325 град/с и проводили регистрацию и измерение амплитуды сигнала с объекта испытаний с помощью платформы NI MyRIO 1900. Относительную динамическую погрешность вычисляли по формуле (3.1)

$$\delta_x = \frac{\Omega_{\text{изм}} - \Omega}{\Omega} \cdot 100\%, \quad (3.1)$$

где  $\Omega$  – заданная угловая скорость, град/с;  $\Omega_{\text{изм}}$  – измеренная угловая скорость, град/с.

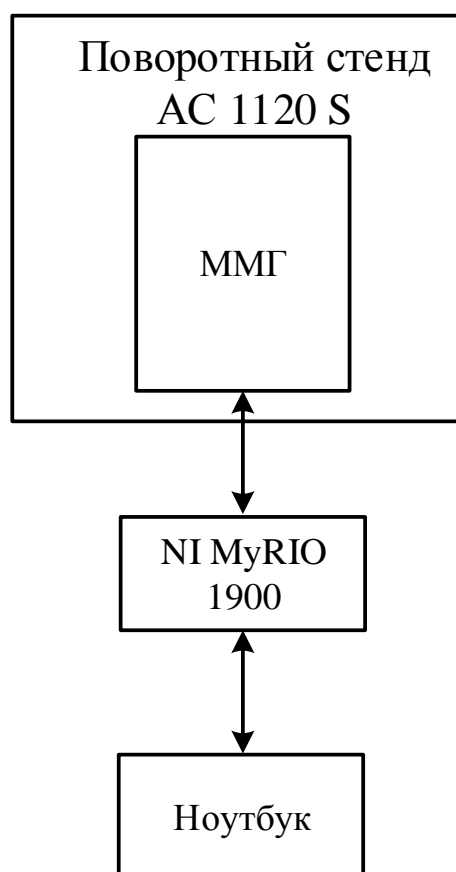


Рисунок 3.11 – Схема установки объекта испытаний на поворотном столе

Результаты определения диапазона измерения угловой скорости в диапазоне от минус 300 град/с до +300 град/с и определение динамической погрешности приведены в таблице 3.5 для первого экземпляра объекта испытаний, в таблице 3.6 для второго экземпляра объекта испытаний, в таблице 3.7 для третьего экземпляра объекта испытаний.

Таблица 3.5 – Определение динамической погрешности 1-го образца ММГ

$\Omega_x$ , град/с		$\Omega_{x \text{ изм}}$ , град/с		$\delta_x$ , %	
влево	вправо	влево	вправо	влево	вправо
25	25	24,71	25,54	1,16	2,16
50	50	49,40	50,91	1,19	1,81
75	75	71,14	75,84	5,14	1,12
100	100	106,92	104,67	6,92	4,67
125	125	122,57	133,36	1,94	6,69
150	150	155,63	147,03	3,75	1,98



Продолжение таблицы 3.5

$\Omega_x$ , град/с		$\Omega_{x \text{ изм}}$ , град/с		$\delta_x$ , %	
влево	вправо	влево	вправо	влево	вправо
175	175	169,69	164,67	3,03	5,90
200	200	204,84	212,19	2,42	6,10
225	225	210,77	217,90	6,32	3,16
250	250	261,51	256,54	4,60	2,62
275	275	266,50	283,65	3,09	3,15
300	300	292,48	307,62	2,51	2,54
325	325	321,16	337,55	1,18	3,86
$\Omega_z$ , град/с		$\Omega_{z \text{ изм}}$ , град/с		$\delta_z$ , %	
влево	вправо	влево	вправо	влево	вправо
25	25	23,72	25,55	5,12	2,21
50	50	47,73	52,96	4,54	5,92
75	75	76,01	72,09	1,35	3,88
100	100	106,65	99,15	6,65	0,85
125	125	126,24	124,34	0,99	0,53
150	150	151,73	160,07	1,15	6,71
175	175	165,80	168,85	5,26	3,51
200	200	212,98	191,68	6,49	4,16
225	225	228,39	218,89	1,51	2,71
250	250	252,94	248,86	1,18	0,46
275	275	280,58	290,94	2,03	5,80
300	300	297,37	306,24	0,88	2,08
325	325	308,91	332,84	4,95	2,41

Таблица 3.6 – Определение динамической погрешности 2-го образца ММГ

$\Omega_x$ , град/с		$\Omega_{x \text{ изм}}$ , град/с		$\delta_x$ , %	
влево	вправо	влево	вправо	влево	вправо
25	25	25,07	24,53	0,27	1,87
50	50	46,37	50,58	7,27	1,16
75	75	79,04	75,12	5,38	0,16
100	100	97,82	94,59	2,18	5,41
125	125	131,85	128,30	5,48	2,64

Продолжение таблицы 3.6

$\Omega_x$ , град/с		$\Omega_{x \text{ изм}}$ , град/с		$\delta_x$ , %	
влево	вправо	влево	вправо	влево	вправо
150	150	156,44	138,74	4,29	7,51
175	175	181,09	181,57	3,48	3,76
200	200	208,77	189,46	4,39	5,27
225	225	211,05	224,04	6,20	0,43
250	250	251,40	241,74	0,56	3,30
275	275	281,59	268,31	2,40	2,43
300	300	315,37	317,34	5,12	5,78
325	325	326,05	341,22	0,32	4,99
$\Omega_z$ , град/с		$\Omega_{z \text{ изм}}$ , град/с		$\delta_z$ , %	
влево	вправо	влево	вправо	влево	вправо
25	25	26,36	23,05	5,43	7,80
50	50	46,06	48,73	7,88	2,54
75	75	78,40	76,96	4,53	2,61
100	100	93,82	98,89	6,18	1,11
125	125	120,77	130,15	3,39	4,12
150	150	156,20	160,27	4,13	6,84
175	175	161,51	177,83	7,71	1,61
200	200	186,40	209,17	6,80	4,59
225	225	230,02	213,24	2,23	5,23
250	250	230,66	245,16	7,74	1,94
275	275	277,52	293,13	0,92	6,59
300	300	310,77	302,34	3,59	0,78
325	325	336,57	339,36	3,56	4,42

Таблица 3.7 – Определение динамической погрешности 3-го образца ММГ

$\Omega_x$ , град/с		$\Omega_{x \text{ изм}}$ , град/с		$\delta_x$ , %	
влево	вправо	влево	вправо	влево	вправо
25	25	25,76	24,34	3,04	2,62
50	50	49,83	47,13	0,33	5,74
75	75	74,27	71,10	0,98	5,21
100	100	100,19	99,87	0,19	0,13

Продолжение таблицы 3.7

$\Omega_x$ , град/с		$\Omega_{x \text{ изм}}$ , град/с		$\delta_x$ , %	
влево	вправо	влево	вправо	влево	вправо
125	125	118,34	131,33	5,33	5,06
150	150	151,50	155,20	1,00	3,47
175	175	181,62	177,59	3,78	1,48
200	200	203,68	190,33	1,84	4,83
225	225	214,11	236,86	4,84	5,27
250	250	246,17	236,06	1,53	5,58
275	275	262,62	261,94	4,50	4,75
300	300	308,82	289,02	2,94	3,66
325	325	25,76	24,34	3,04	2,62
$\Omega_z$ , град/с		$\Omega_{z \text{ изм}}$ , град/с		$\delta_z$ , %	
влево	вправо	влево	вправо	влево	вправо
25	25	23,51	24,26	5,97	2,96
50	50	49,68	47,27	0,63	5,46
75	75	78,27	71,00	4,36	5,33
100	100	103,98	97,57	3,98	2,43
125	125	120,46	124,26	3,64	0,59
150	150	143,79	143,44	4,14	4,37
175	175	181,75	165,70	3,86	5,31
200	200	200,84	193,38	0,42	3,31
225	225	233,39	211,53	3,73	5,99
250	250	246,63	246,04	1,35	1,58
275	275	265,85	289,72	3,33	5,35
300	300	302,22	310,11	0,74	3,37
325	325	23,51	24,26	3,12	4,70

Относительную нелинейность характеристики NI вычисляли следующим образом: построили график измеренных значений угловой скорости от заданных значений угловой скорости. Через две крайние точки измеренных значений угловой скорости провели прямую, рассчитали нелинейность характеристики как максимальное относительное линейное расстояние от прямой до измеренных значений.

$$Nl = \frac{\Delta}{F} 100\%, \quad (3.2)$$

где  $\Delta$  – максимальное отклонение от аппроксимирующей прямой;  $F$  – диапазон измерений.

На рисунке 3.12 приведен график нелинейности характеристики по оси  $X$  для объекта испытаний № 1. На рисунке 3.13 приведен график нелинейности характеристики по оси  $Z$  для объекта испытаний № 1.

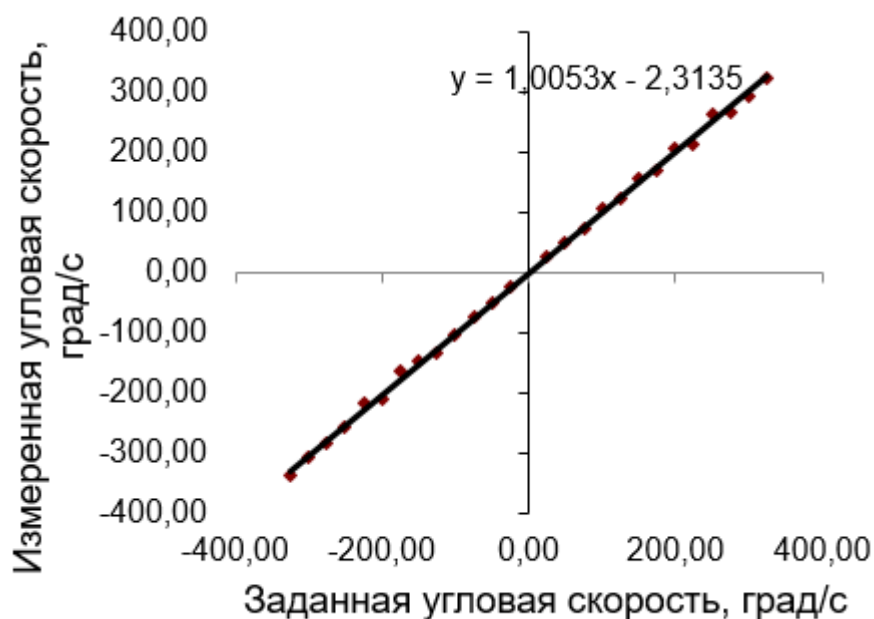


Рисунок 3.12 – Нелинейность по оси  $X$

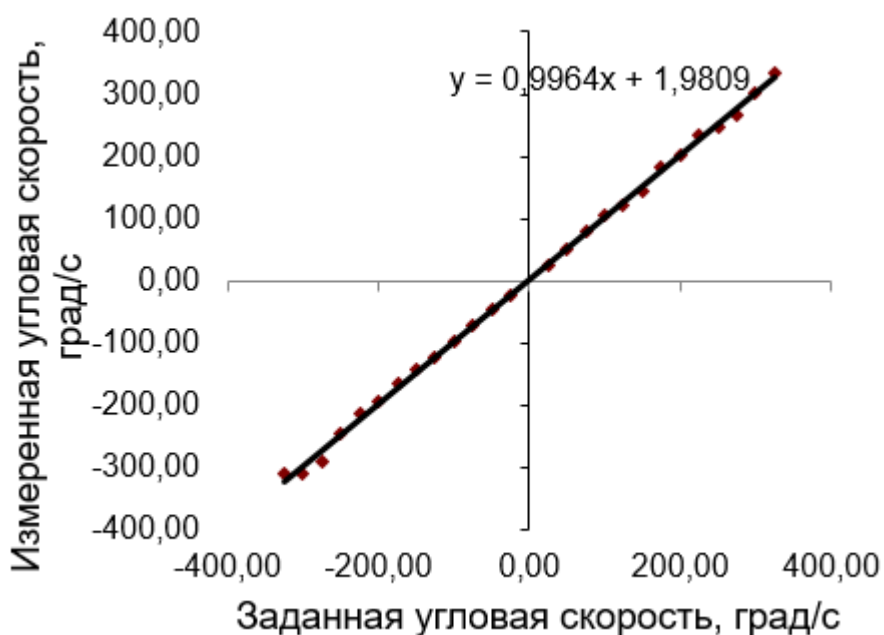


Рисунок 3.13 – Нелинейность по оси  $Z$

Максимальная динамическая погрешность в диапазоне от минус 300 град/с до 300 град/с составляет для: 1-ого экземпляра – 5,92 %, 2-ого – 7,8 %, 3-его – 5,99 %. Максимальная относительная нелинейность не превышает  $\pm 1$  % для каждого экземпляра объекта испытаний.

Таким образом ММГ производит измерения угловой скорости в диапазоне от минус 300 град/с до +300 град/с, максимальная динамическая погрешность в диапазоне от минус 300 град/с до 300 град/с не превышает  $\pm 10$  %, максимальная относительная нелинейность не превышает  $\pm 1$  %.

### 3.2.2 Определение полосы пропускания микромеханического гироскопа

Определение полосы пропускания проводили следующим образом: установили на поворотный стенд АС 1120 S объект испытаний, соединили объект испытаний, средства измерений и испытательное оборудование в соответствие со схемой рисунка 3.11, задали режим движения поворотного стола синусоидальный, изменяли на поворотном столе угловую скорость от 10 град/с до 300 град/с, частоту от 5 Гц до 40 Гц и проводили регистрацию и измерение амплитуды сигнала с объекта испытаний с помощью платформы NI MyRIO 1900.

Результаты определения полосы пропускания приведены в таблице 3.8 для первого экземпляра объекта испытаний, в таблице 3.9 для второго экземпляра объекта испытаний, в таблице 3.10 для третьего экземпляра объекта испытаний.

Таблица 3.8 – Полоса пропускания 1-го образца ММГ

$\Omega_x$ град/с		10	50	100	150	200	250	300
Частота, Гц	5	9,41	52,35	107,75	156,90	186,86	230,63	282,63
	10	9,59	48,94	106,21	146,79	185,10	235,86	284,50
	20	10,02	50,02	98,98	157,71	206,26	267,64	309,04
	30	8,32	43,42	95,60	140,76	186,13	208,42	249,57
	40	7,01	37,35	71,96	117,03	144,06	183,08	225,66

Продолжение таблицы 3.8

$\Omega_z$ град/с		10	50	100	150	200	250	300
Частота, Гц	5	9,76	50,18	96,77	148,54	191,50	232,03	320,02
	10	10,56	46,07	98,28	139,82	192,29	233,37	319,41
	20	9,76	49,42	99,53	156,68	184,10	241,42	280,00
	30	8,33	48,10	95,64	124,50	193,98	233,66	256,14
	40	7,51	40,25	75,39	108,84	146,38	185,33	227,67

Таблица 3.9 – Полоса пропускания 2-го образца ММГ

$\Omega_x$ град/с		10	50	100	150	200	250	300
Частота, Гц	5	9,63	48,49	92,59	146,87	207,91	239,48	299,94
	10	9,30	48,24	104,85	144,08	215,84	258,38	294,06
	20	9,53	49,79	107,08	140,94	191,02	231,72	303,15
	30	8,48	45,32	87,31	141,99	174,79	222,14	273,80
	40	7,32	37,64	72,58	111,41	143,62	174,02	240,01
$\Omega_z$ град/с		10	50	100	150	200	250	300
Частота, Гц	5	9,25	48,25	106,23	156,40	206,82	231,57	277,30
	10	9,27	52,04	102,41	143,83	198,25	261,05	317,16
	20	9,25	53,45	106,27	138,34	215,54	259,62	284,60
	30	9,11	48,84	91,47	132,06	177,61	224,86	276,24
	40	7,32	37,07	74,65	117,51	138,07	181,07	210,00

Таблица 3.10 – Полоса пропускания 3-го образца ММГ

$\Omega_x$ град/с		10	50	100	150	200	250	300
Частота, Гц	5	9,62	48,34	95,53	150,92	190,39	235,43	296,56
	10	10,65	54,20	107,51	150,09	204,12	238,52	294,20
	20	9,58	49,84	93,04	154,69	216,31	268,02	286,73
	30	9,45	42,60	84,29	129,70	193,15	226,17	250,84
	40	7,22	36,36	69,44	110,15	155,93	179,61	224,95

Продолжение таблицы 3.10

$\Omega_z$ град/с		10	50	100	150	200	250	300
Частота, Гц	5	10,20	50,37	100,17	139,40	184,56	265,28	307,02
	10	10,87	47,70	92,03	160,40	189,16	234,99	303,42
	20	9,69	50,83	97,59	140,96	194,99	247,14	276,54
	30	8,95	44,09	93,16	125,91	166,18	228,97	248,41
	40	7,14	37,34	80,31	105,70	143,26	173,79	227,36

На рисунке 3.14 приведен график зависимости относительной амплитуды выходного сигнала от частоты по оси X для объекта испытаний № 1.

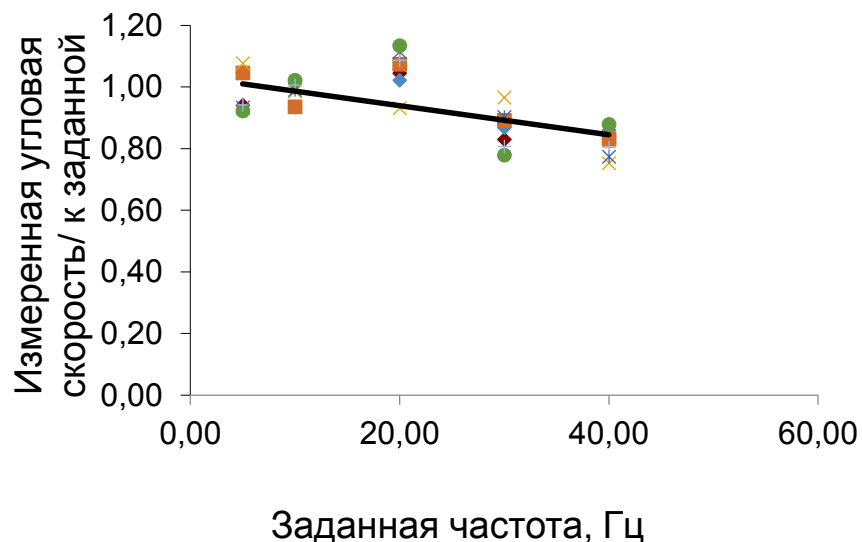


Рисунок 3.14 – ЛАЧХ ММГ

Из анализа результатов, приведённых в таблицах 3.8-3.10 следует, что максимальные измеренные значения частоты для каждой из осей составляют не менее 40 Гц для каждого экземпляра ММГ.

### 3.2.3 Определение времени готовности

Определение времени готовности проводили следующим образом: установили на поворотный стенд AC 1120 S объект испытаний, соединили объект испытаний, средства измерений и испытательное оборудование в соответствии со схемой рисунка 3.11, установили на поворотном столе угловую

скорость 150 град/с, затем проводили регистрацию амплитуды сигнала с объекта испытаний с помощью платформы NI MyRIO 1900 и фиксировали значения времени с момента включения объекта испытаний, через которые был зарегистрирован сигнал по каждой из осей.

Рабочий режим установился:

- 1-ый экземпляр - через 2,5 с;
- 2-ой экземпляр - через 2,2 с;
- 3-ий экземпляр - через 2,9 с.

Таким образом сигнал, пропорциональный заданной угловой скорости, по каждой из осей зарегистрирован не более, чем за 3 с после момента включения объекта испытаний.

### **3.2.4 Определение диапазона рабочих температур и температурного смещения чувствительности**

Определение диапазона рабочих температур и определение температурного смещения чувствительности проводили следующим образом: установили на поворотный стенд AC 1120 S объект испытаний, поворотный стенд AC 1120 S с объектом испытаний установили в климатическую камеру соединили объект испытаний, средства измерений и испытательное оборудование в соответствии со схемой рисунка 3.11, установили на поворотном столе угловую скорость 150 град/с, значение температуры минус 40 °С и выдерживали объект испытаний при установившейся температуре не менее 1 часа, затем установили скорость изменения температуры 3 град/мин и проводили регистрацию и измерение амплитуды сигнала с объекта испытаний с помощью платформы NI MyRIO 1900.

Относительную погрешность температурного смещения чувствительности вычислили по формуле (3.3)

$$\delta_T = \frac{\Omega(T_{=20}) - \Omega(T)}{\Omega(T_{=20})} \cdot 100 \% \quad (3.3)$$



где  $\Omega(T_{=20})$  – измеренная угловая скорость при номинальной температуре 20 °С, град/с;

$\Omega(T)$  – измеренная угловая скорость при температуре отличной от 20 °С, град/с.

Результаты определения диапазона рабочих температур и определения температурного смещения чувствительности приведены в таблице 3.11 для первого экземпляра объекта испытаний, в таблице 3.12 для второго экземпляра объекта испытаний, в таблице 3.13 для третьего экземпляра объекта испытаний.

Таблица 3.11 – Температурное смещение чувствительности 1-го образца ММГ

Температура, °С	-40	-20	0	20	40	60	80	105
$\Omega_x$ , град/с	155,7	155,8	156,4	157,1	157,5	158,1	158,3	158,4
$\delta_{xT}$ , %	0,89	0,83	0,45	0,00	0,25	0,64	0,76	0,83
$\Omega_z$ , град/с	157,1	157,2	157,6	158,1	158,3	158,6	158,7	158,8
$\delta_{zT}$ , %	0,63	0,57	0,32	0,00	0,13	0,32	0,38	0,44

Таблица 3.12 – Температурное смещение чувствительности 2-го образца ММГ

Температура, °С	-40	-20	0	20	40	60	80	105
$\Omega_x$ , град/с	154,3	154,6	155,6	155,5	155,7	156,2	156,3	156,5
$\delta_{xT}$ , %	0,77	0,58	0,06	0,00	0,13	0,45	0,51	0,64
$\Omega_z$ , град/с	150,3	150,4	150,6	151,8	151,9	152	152,1	152,2
$\delta_{zT}$ , %	0,99	0,92	0,79	0,00	0,07	0,13	0,20	0,26

Таблица 3.13 – Температурное смещение чувствительности 3-го образца ММГ

Температура, °С	-40	-20	0	20	40	60	80	105
$\Omega_x$ , град/с	146	146,2	146,3	147,4	147,7	147,9	148	148,1
$\delta_{xT}$ , %	0,95	0,81	0,75	0,00	0,20	0,34	0,41	0,47
$\Omega_z$ , град/с	153,4	153,6	153,7	153,9	154,2	154,4	154,6	154,7
$\delta_{zT}$ , %	0,32	0,19	0,13	0,00	0,19	0,32	0,45	0,52

На рисунке 3.15 приведен график изменения результатов измерений угловой скорости ММГ 1 от температуры для объекта испытаний № 1.

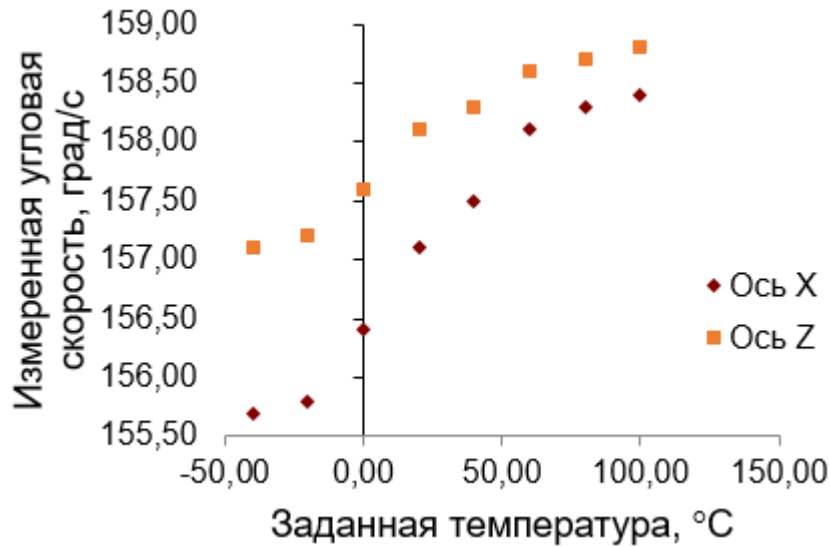


Рисунок 3.15 – Изменения угловой скорости ММГ 1 от температуры

Из полученных результатов видно, что все объекты испытаний сохраняет свою работоспособность в диапазоне от минус 40 °C до 105 °C и максимальные значения температурного смещения чувствительности для каждой из осей не превышает  $\pm 1$  %.

### 3.2.5 Определение собственного шума микромеханического гироскопа

Для определения собственного шума использовался метод, основанный на построении графиков дисперсии Аллана (ДА) и вычислении характеристик случайных составляющих (рисунок 3.16).

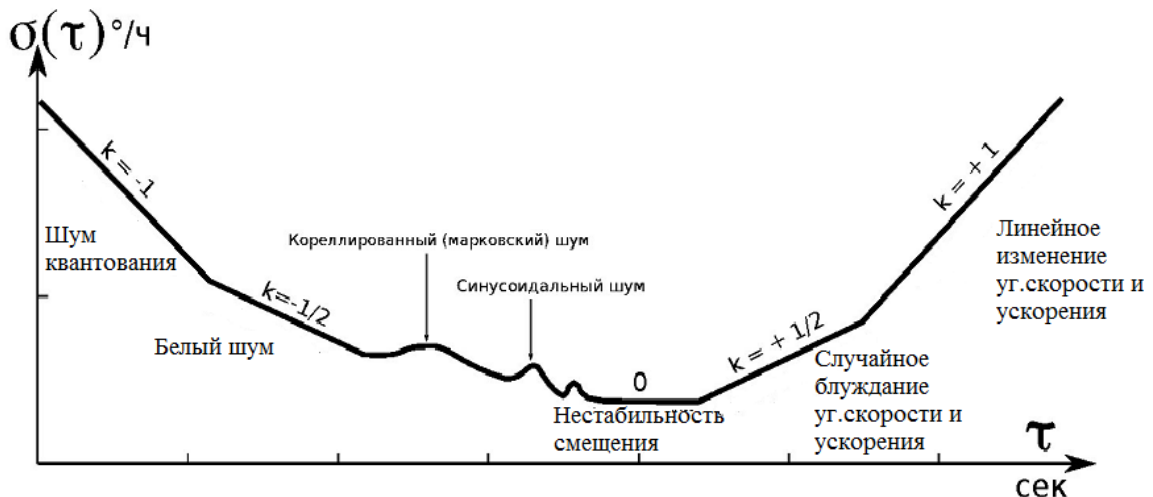


Рисунок 3.16 – График отклонения Аллана

Суммарная информация о случайных процессах представлена в таблице 3.14.

Таблица 3.14 – Участки графиков спектральной плотности мощности (СПМ) и ДА, соответствующие различным типам ошибок

Название случайного процесса	Выражение для ДА	Параметр	СПМ	Наклон графика ДА
Шум квантования	$\frac{3 \cdot Q^2}{T^2}$	$Q$ – погрешность квантования выходного сигнала	$(2\pi f)^2 Q^2 T$	-1
Белый шум (ARW/VRW)	$\frac{N^2}{T}$	$N$ – коэффициент случайного блуждания выходного сигнала	$N^2$	- 0.5
Нестабильность смещения	$\frac{2B^2 \ln 2}{\pi}$	$B$ – коэффициент нестability смещения нуля выходного сигнала	$\frac{B^2}{2\pi} \cdot \frac{1}{f}$	0
Случайное блуждание угловой скорости/ускорения	$\frac{K^2 \cdot T}{3}$	$K$ – коэффициент случайного блуждания скорости изменения выходного сигнала	$\left(\frac{K}{2\pi}\right)^2 \cdot \frac{1}{f^2}$	+0.5
Линейное изменение угловой скорости/ускорения	$\frac{R^2 \cdot T^2}{2}$	$R$ – коэффициент случайного ухода выходного сигнала	$\frac{R^2}{(2\pi f)^3}$	+1

Алгоритм вычисления функции ДА состоит в том, что для каждого  $\tau$ :

1. Определяем частоту дискретизации  $f=1/T$ ;
2. Определяем количество  $M$  выборок данных во временном окне ( $\tau = \frac{M}{T}$ );
3. Из выборки длиной в  $N$  выборок формируем  $K = N/M$  временных окон.
4. Находим среднее для каждого из  $K$  окон:

$$\bar{\Omega}_k = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \Omega_{M(k-1)+i} \quad \text{где } k = 1, \dots, K ;$$

5. Находим ДА для данного размера окна:

$$\sigma^2(T) = \frac{1}{2(K-1)} \sum_{k=1}^{K-1} [\bar{\Omega}_{k+1}(T) - \bar{\Omega}_k(T)]^2$$

Определение собственного шума проводили следующим образом: установили на поворотный стенд АС 1120 S объект испытаний, поворотный стенд АС 1120 S с объектом испытаний установили в климатическую камеру соединили объект испытаний, средства измерений и испытательное

оборудование в соответствии со схемой рисунка 3.11, установили на поворотном столе угловую скорость 0 град/с, значение температуры минус 40 °С и выдерживали объект испытаний при установившейся температуре не менее 1 часа, затем установили скорость изменения температуры 3 град/мин и проводили регистрацию и измерение амплитуды сигнала с объекта испытаний с помощью платформы NI MyRIO 1900. в течении 10 с, по результатам измерений строили ДА. Частота дискретизации была принята равной  $f = 100$  Гц, так как полоса пропускания ММГ ограничена частотой 40 Гц.

На рисунке 3.17 приведен график дисперсии Аллана для объекта испытаний № 1.

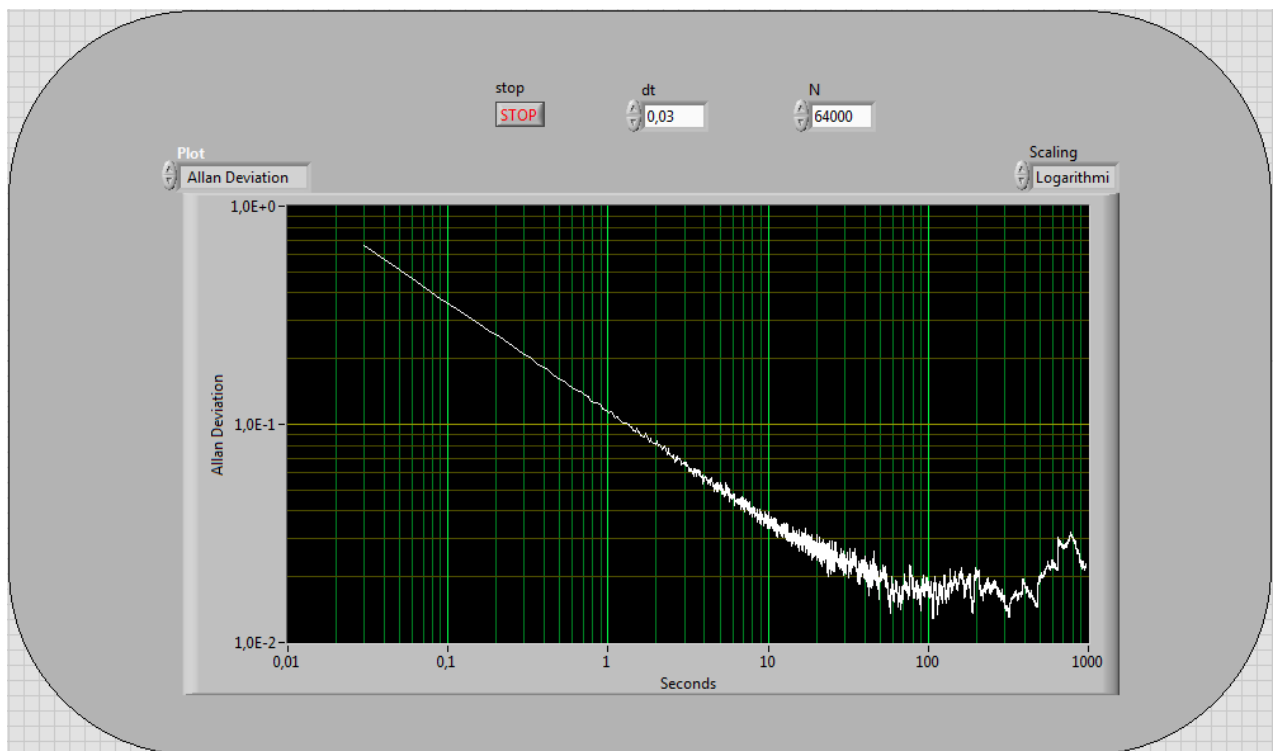


Рисунок 3.17 – Дисперсия Аллана для объекта испытаний № 1

По кривой отклонения Аллана отыскиваются: белый шум, определяемый как значение отклонения Аллана при  $\tau = 1$  с и нестабильность смещения.

В результате вычисления ДА для трех объектов испытаний максимальная величина шума в рабочем диапазоне температур составила 0,98 град/с, максимальная величина собственного шума в рабочем диапазоне температур составила 0,097 град/с.

### 3.2.6 Испытания на вибростойкость

На рисунке 3.18 приведен внешний вид используемого вибростенда.



Рисунок 3.18 – Вибростенд ВС252

Испытания на вибростойкость проводили следующим образом: установили объект испытаний на вибростенд ВС252 в положение, приближенном к его положению при эксплуатации, соединили кабелем выход X объекта испытаний с входом анализатора спектра E4448A, задали воздействие вибрации с амплитудой 9g в трех взаимно перпендикулярных плоскостях. Изменяя частоты в диапазоне от 20 Гц до 2000 Гц с непрерывно изменяющейся частотой со скоростью 1 Гц/с провели регистрацию спектра сигнала с объекта испытаний с помощью анализатора спектра E4448A.

Все экземпляры объекта испытаний сохранили работоспособность во всем заданном частотном диапазоне вибраций. Резонансных явлений в диапазоне частот вибрации не обнаружено.

### 3.2.7 Испытания на удар

При испытаниях на удар полуволна до 100g использовался вибростенд ВС252, до 3500g – ударный стенд HS15.

Испытания на удар проводили следующим образом: установили объект испытаний на испытательное оборудование в положении, приближенном к

положению эксплуатации, соединили кабелем выход X объекта испытаний с платформой NI MyRIO 1900, выход платформы NI MyRIO 1900 соединили кабелем USB с ноутбуком, задали воздействие удара с амплитудой 3500g и длительностью полуволны 500 мкс в трех взаимно перпендикулярных плоскостях, провели регистрацию амплитуды сигнала с объекта испытаний с помощью платформы NI MyRIO 1900 при воздействии 9 ударов.

Происходит касание подвижных частей, объект испытаний восстановил свою работоспособность через 2,1 с.

Затем задали воздействие удара с амплитудой 500g и длительностью полуволны 1 мс в трех взаимно перпендикулярных плоскостях и провели регистрацию амплитуды сигнала при воздействии 9 ударов.

Происходит касание подвижных частей, объект испытаний восстановил свою работоспособность через 1,8 с.

### **Выводы по главе 3**

1) Все гироскопы, прошедшие температурные испытания, сохраняют свою работоспособность в диапазоне от минус 40 °С до плюс 105 °С.

2) Все испытуемые гироскопы сохранили работоспособность во всем заданном частотном диапазоне вибраций. Резонансных явлений в диапазоне частот вибрации не обнаружено.

3) При ударах происходит касание подвижных частей, затем гироскоп восстанавливает свою работоспособность.

## 4 РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЯ ОДНОКОМПОНЕНТНОГО МИКРОМЕХАНИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА, УСТОЙЧИВОГО К ВИБРАЦИИ И УДАРАМ

Механический расчет приборов включает в себя: модальный расчет для определения собственных частот и собственных форм колебаний, анализ на воздействие гармонической вибрации в диапазоне частот 20-2000 Гц с амплитудой виброускорения 10g, а также ударов с полусинусоидальной формой импульса длительностью 550 мкс, 450 мкс, 320 мкс, 250 мкс, 150 мкс, 100 мкс и 50 мкс с амплитудой ускорения 1500g, 3000g, 4500g, 7500g, 10000g, 15000g и 20000g соответственно.

### 4.1 Функциональная схема и математическая модель микромеханического гироскопа

Гироскоп используется для измерения угловой скорости вокруг оси Z (рисунок 4.1).

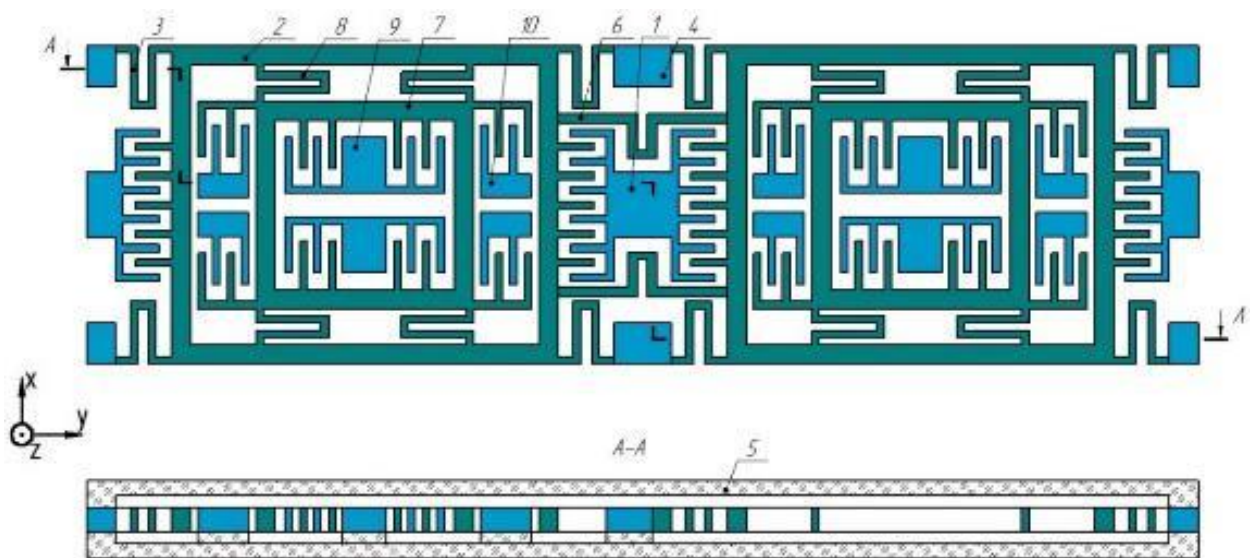


Рисунок 4.1 – Функциональная схема сенсора ММГ

Гребенчатый привод 1 возбуждает вдоль оси Y противофазные гармонические первичные колебания наружных рамок 2, которые установлены в упругих подвесах 3 и закреплены через анкеры 4 на основании 5. Наружные

рамки связаны между собой упругими элементами 6, что обеспечивает их первичные колебания в противоположные стороны с одной частотой. Инерционные тела 7 совершают первичные колебания вместе с рамками 2 вдоль оси  $Y$ , так как жёсткость упругого подвеса 8 вдоль осей  $Y, Z$  намного больше их жёсткости вдоль оси  $X$ .

При наличии угловой скорости  $\Omega_z$  возникают силы Кориолиса, которые возбуждают информативные колебания инерционных тел 7 вдоль оси  $X$ . Перемещения этих тел, пропорциональные скорости  $\Omega_z$ , вызывают изменения ёмкостей электродных структур 9, которые входят в преобразователи ёмкость-напряжение (ПЕН).

Эквивалентная схема гироскопа представлена на рисунке 4.2, где  $m_{p1}, m_{p2}$  – массы рамок 2, совершающих первичное движение;  $m_{x1}, m_{x2}$  – массы рамок 8, совершающих вторичное информативное движение;

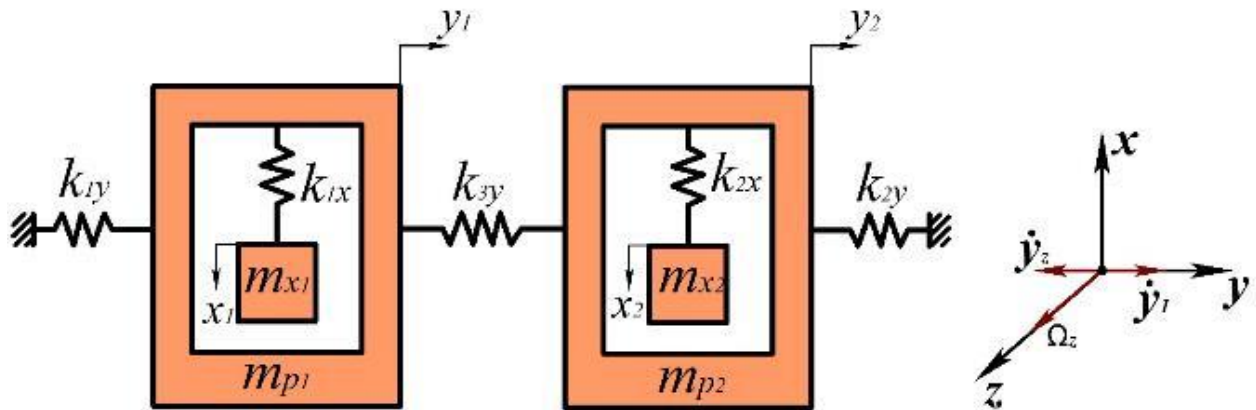


Рисунок 4.2 – Эквивалентная схема сенсора ММГ

Используя уравнение Лагранжа, получим уравнения гироскопа в виде:

- первичные колебания по оси  $Y$

$$\ddot{y}_1 + \frac{\omega_{y1}}{Q_{y1}} \dot{y}_1 + y_1 [\omega_{y1}^2 - (\Omega_z^2 + \Omega_x^2)] = \frac{1}{m_{y1}} F_{\text{э}1} + \frac{k_{3y}}{m_{y1}} (y_2 - y_1) - \ddot{y}_0 - a_y - \dot{x}_0 \Omega_z + \dot{z}_0 \Omega_x, \quad (4.1)$$

$$\ddot{y}_2 + \frac{\omega_{y2}}{Q_{y2}} \dot{y}_2 + y_2 [\omega_{y2}^2 - (\Omega_z^2 + \Omega_x^2)] = -\frac{1}{m_{y2}} F_{\text{э}2} + \frac{k_{3y}}{m_{y2}} (y_1 - y_2) - \ddot{y}_0 - a_y - \dot{x}_0 \Omega_z + \dot{z}_0 \Omega_x.$$



- вторичные колебания по оси X

$$\ddot{x}_1 + \frac{\omega_{x1}}{Q_{x1}} \dot{x}_1 + x_1 [\omega_{x1}^2 - (\Omega_z^2 + \Omega_y^2)] = 2\Omega_z \dot{y}_1 - \ddot{x}_0 - a_x - \dot{z}_0 \Omega_y + \dot{y}_0 \Omega_z - \Omega_x \Omega_y y_1 + \frac{k_{xy}}{m_{x1}} y_1, \quad (4.2)$$

$$\ddot{x}_2 + \frac{\omega_{x2}}{Q_{x2}} \dot{x}_2 + x_2 [\omega_{x2}^2 - (\Omega_z^2 + \Omega_y^2)] = -2\Omega_z \dot{y}_2 - \ddot{x}_0 - a_x - \dot{z}_0 \Omega_y + \dot{y}_0 \Omega_z + \Omega_x \Omega_y y_2 - \frac{k_{xy}}{m_{x2}} y_2,$$

где  $Q_{yi}$ ,  $Q_{xi}$  – добротность гироскопа по соответствующему направлению (y, x);  $\ddot{z}_0$ ,  $\dot{y}_0$ ,  $\ddot{x}_0$ ,  $\dot{x}_0$ ,  $\dot{y}_0$ ,  $\dot{z}_0$  – ускорения и скорости поступательной вибрации;  $a_y$ ,  $a_x$  – ускорения основания,  $F_{\text{э}i}$  – сила, возбуждающая первичные колебания гироскопа; парциальные частоты гироскопа:  $\omega_{yi}^2 = \frac{k_{iy}}{m_{yi}}$ ;  $\omega_{xi}^2 = \frac{k_{ix}}{m_{xi}}$ ;  $i=1, 2$ ;  $m_{yi}$  – массы, перемещающиеся вдоль оси Y (рамка 2 с инерционным телом 7). Электродная структура сенсора ММГ представлена на рисунке 4.3.

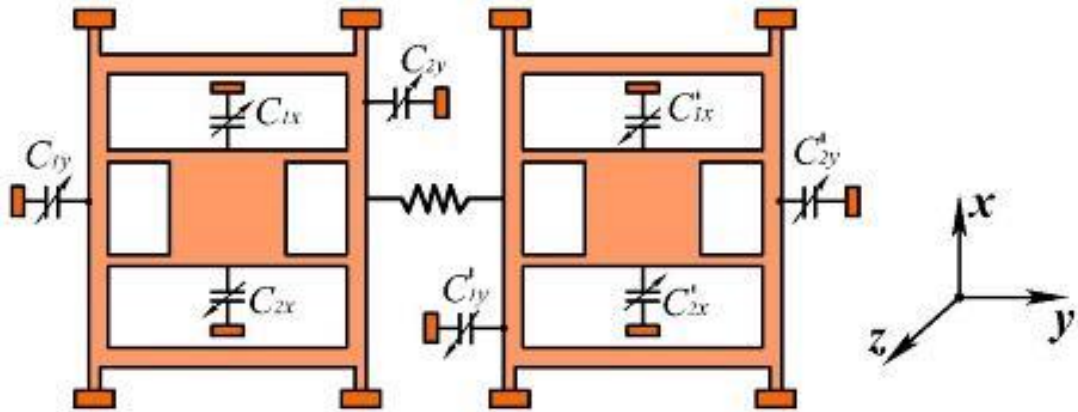


Рисунок 4.3 – Электродная структура сенсора ММГ

Ёмкости в канале первичных колебаний

$$C_{1y} = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 a(b+y)}{d}, \quad C_{2y} = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 a(b-y)}{d}.$$

$$C'_{1y} = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 a(b-y)}{d}, \quad C'_{2y} = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 a(b+y)}{d}.$$

Электроды ПЕН вторичного канала расположены таким образом, что их ёмкости не зависят от перемещений первичных колебаний

$$C_{1x} = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 ab}{d+x}, \quad C_{2x} = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 ab}{d-x}, \quad C'_{1x} = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 ab}{d-x}, \quad C'_{2x} = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 ab}{d+x}.$$

Механические масштабные коэффициенты сенсора имеют вид

$$K_{m1x} \frac{2y_m \omega_y}{\sqrt{(\omega_{x1}^2 - \omega_y^2)^2 + \frac{\omega_y^2 \omega_{x1}^2}{Q_{x1}^2}}}, \quad K_{m2x} = \frac{2y_m \omega_y}{\sqrt{(\omega_{x2}^2 - \omega_y^2)^2 + \frac{\omega_y^2 \omega_{x2}^2}{Q_{x2}^2}}} \quad (4.3)$$

## 4.2 Конструкция и модальный анализ сенсора микромеханического гироскопа

Конструкция сенсора ММГ, соответствующая его функциональной схеме (рисунок 4.1), представлена на рисунке 4.4.

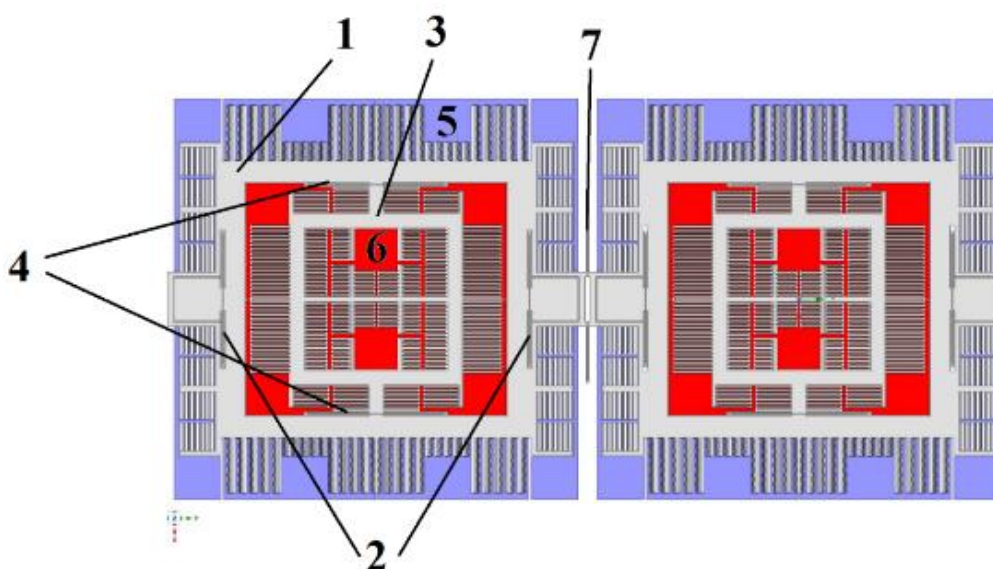


Рисунок 4.4 – Конструкция сенсора ММГ

Наружные рамки 1 сенсора ММГ подвешены в упругом подвесе 2 и совершают первичные колебания вдоль оси Y. Гребенчатые структуры 5 наружной рамки служат для возбуждения и стабилизации первичных колебаний. Инерционные тела 3 подвешены в упругом подвесе 4 и движутся под действием сил Кориолиса вдоль оси X. Амплитуда вторичных колебаний измеряется с помощью гребенчатых структур 6. Наружные рамки связаны между собой упругой связью 7.

Исходя из принципа работы ММГ, при их проектировании очень важно выполнить близость собственных частот по осям первичных и вторичных колебаний. Так как рассматривается возможность работы микромеханического гироскопа при воздействии вибрации от 0 до 2000 Гц, то собственные частоты

должны быть выше паразитных вибраций. Результаты модального анализа приведены на рисунках 4.5, 4.6, 4.7, 4.8.

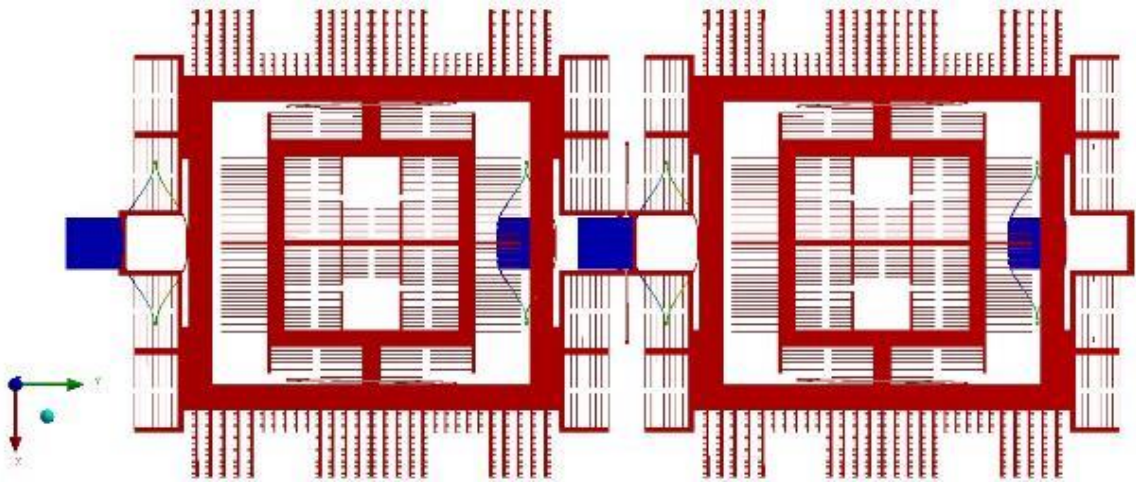


Рисунок 4.5 – 1 мода собственных колебаний сенсора ММГ ( $f_{y\phi}=3122$  Гц)

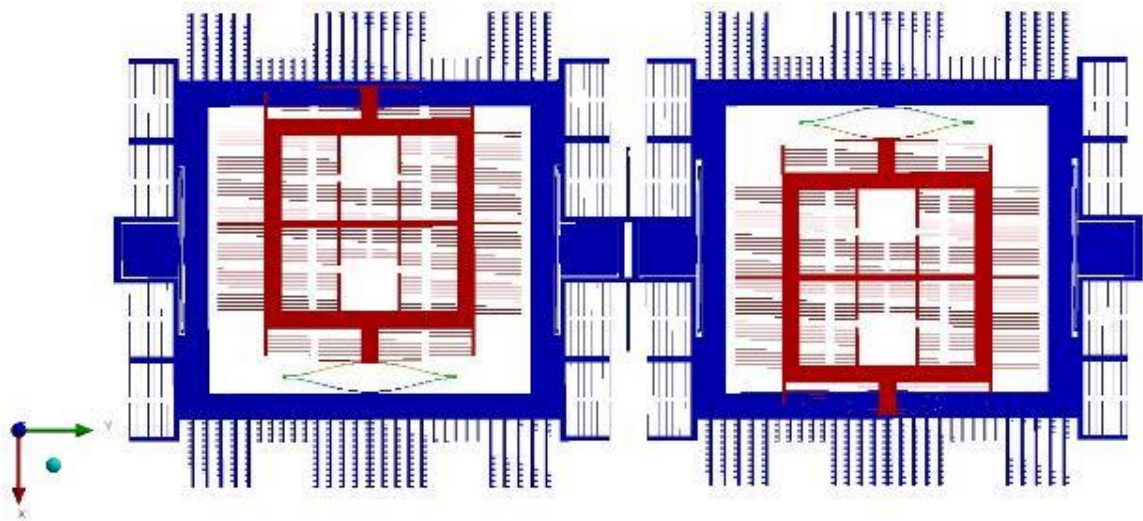


Рисунок 4.6 – 2 мода собственных колебаний сенсора ММГ ( $f_x=3390$  Гц)

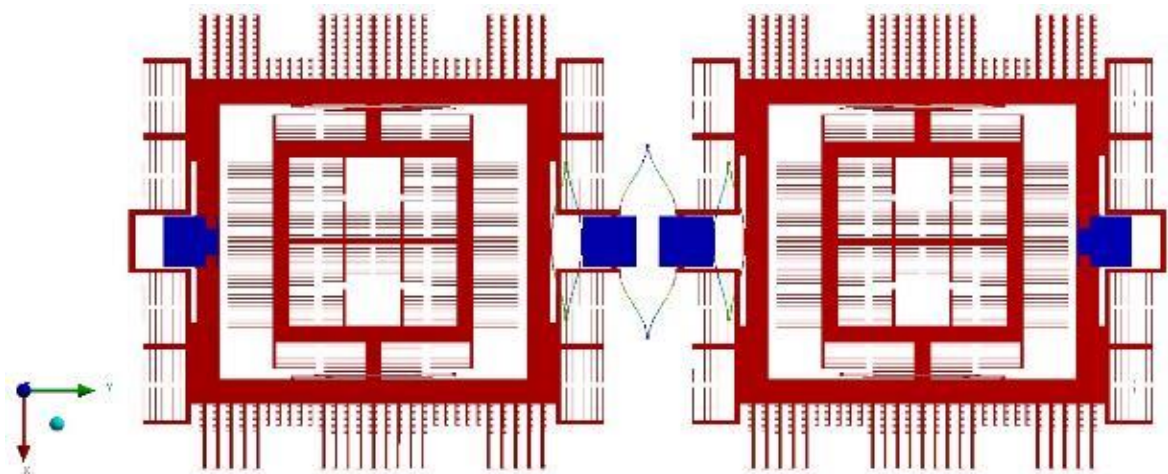


Рисунок 4.7 – 3 мода собственных колебаний сенсора ММГ ( $f_{y\phi}=3397$  Гц)

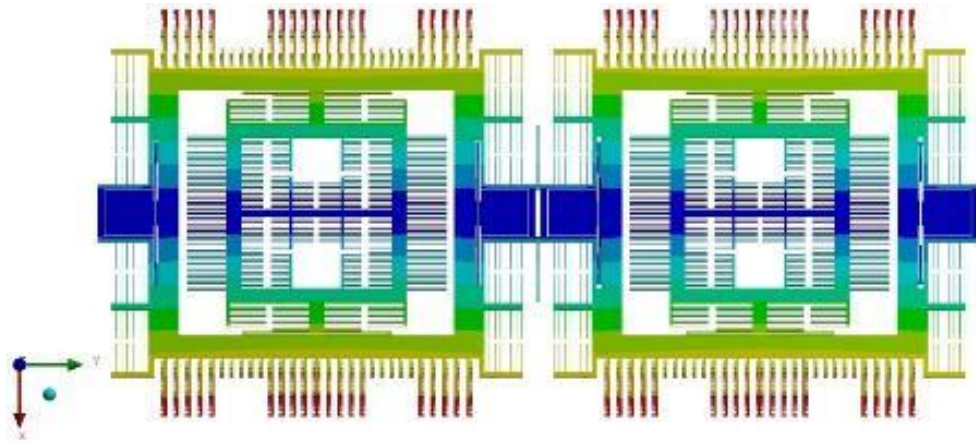


Рисунок 4.8 – 4 мода собственных колебаний сенсора ММГ ( $f_4=5253$  Гц)

При первой моде  $f_{y\text{сф}}$  (рисунок 4.5) первичные колебания рамок происходят в одном направлении. Поэтому для возбуждения первичных колебаний будет использоваться третья мода  $f_{y\text{аф}}$  (рисунок 4.7), где рамки совершают противофазное движение. Вторая мода  $f_x$  (рисунок 4.6) является рабочей для информативного движения. Частота  $f_4$  (рисунок 4.8) лежит выше рабочих частот.

## 4.3 Математическое моделирование гироскопа

### 4.3.1 Моделирование влияния ударного воздействия

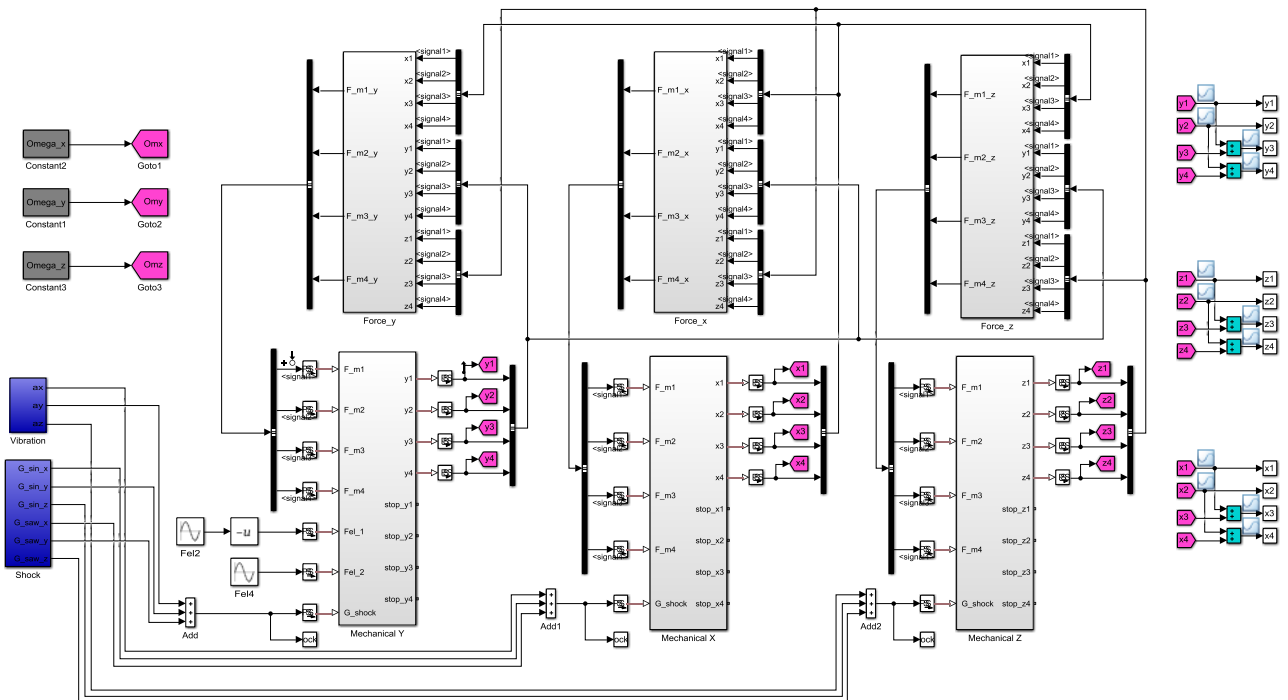


Рисунок 4.9 – Simulink – модель сенсора ММГ



На рисунке 4.9 представлена Simulink – модель сенсора ММГ. Блоки Mechanical содержат блоки инерционных тел, упругих и демпфирующих элементов. Блок Vibration является генератором синусоидальных вибрационных воздействий, блок Shock – генератор ударных воздействий. Блоки Force содержат в своем составе слагаемые инерционных сил, обусловленных угловыми скоростями  $\Omega_x$ ,  $\Omega_y$ ,  $\Omega_z$ .

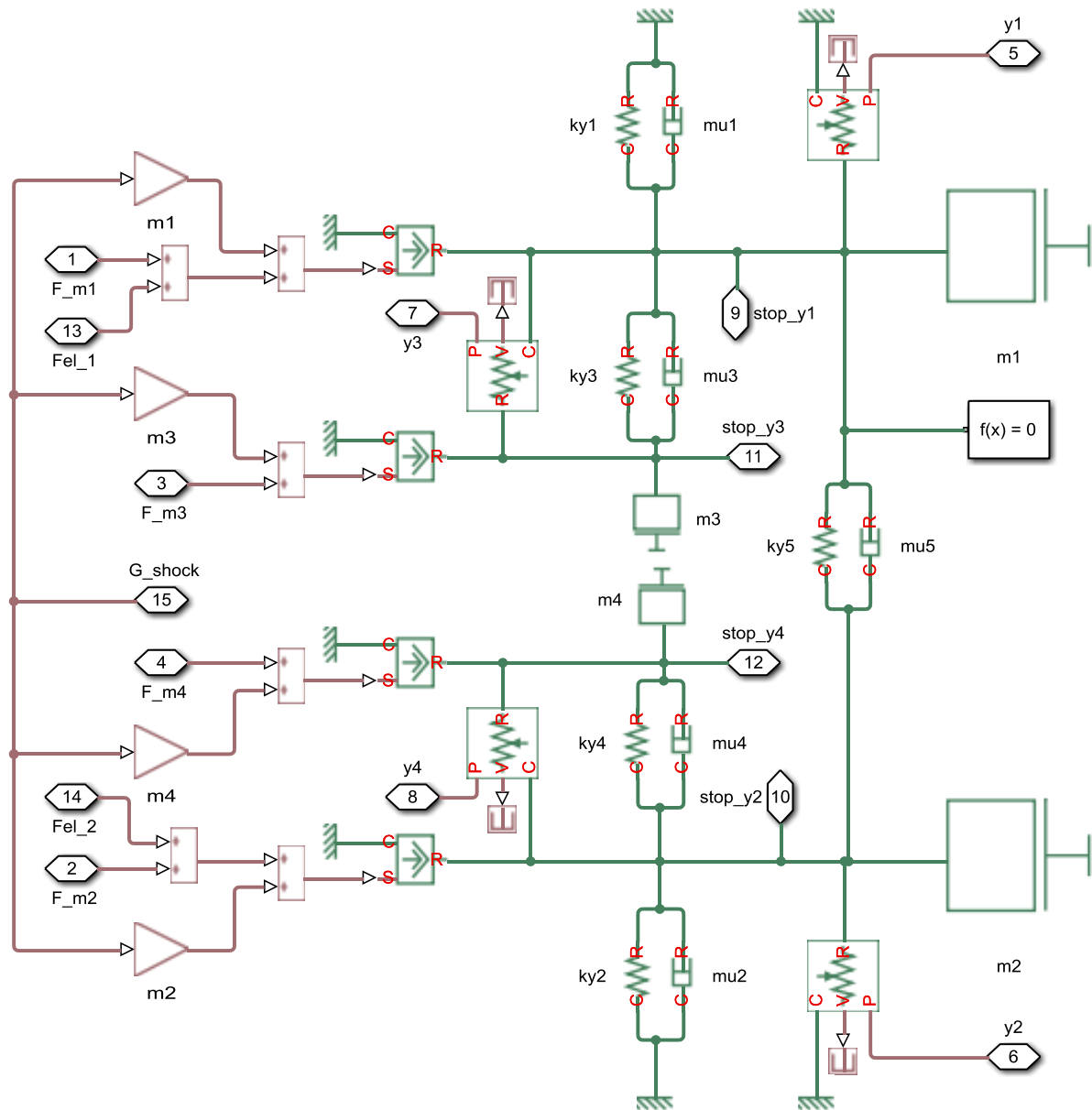


Рисунок 4.10 – Состав блока Mechanical Y

Полученные при моделировании АЧХ сенсора ММГ представлены на рисунке 4.11.

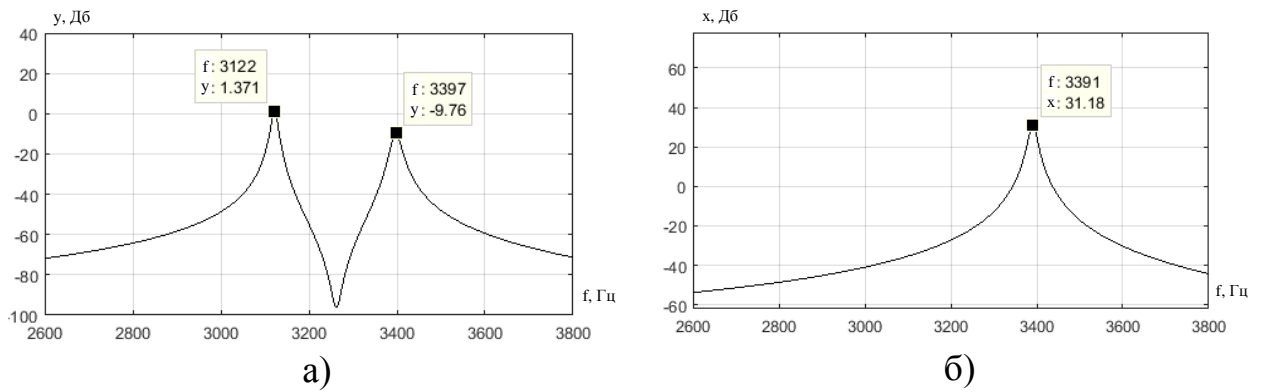


Рисунок 4.11 – АЧХ сенсора ММГ:

а) АЧХ канала Y, б) АЧХ канала X

Первый пик канала Y соответствует синфазным колебаниям рамок с массами  $m_1$  и  $m_2$  с частотой 3122 Гц, второй – антифазным с частотой 3397 Гц. Вторичный канал X имеет 2 массы по 1 в каждой рамке. ИМ  $m_3$  и  $m_4$  имеют частоту колебаний 3391 Гц. Частоты настроены согласно модальному анализу. Минимальные зазоры в конструкции: по оси X – 4 мкм, по оси Z – 4 мкм, по оси Y – 7,5 мкм. Рассматривается удар формы полусинус с амплитудой 3g, длительность импульса 100 мс (рисунок 4.12).

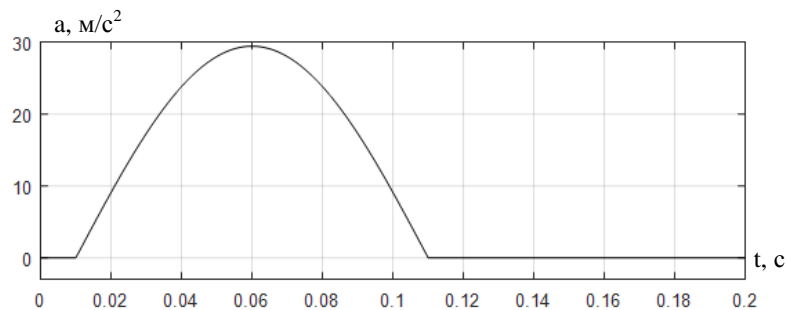
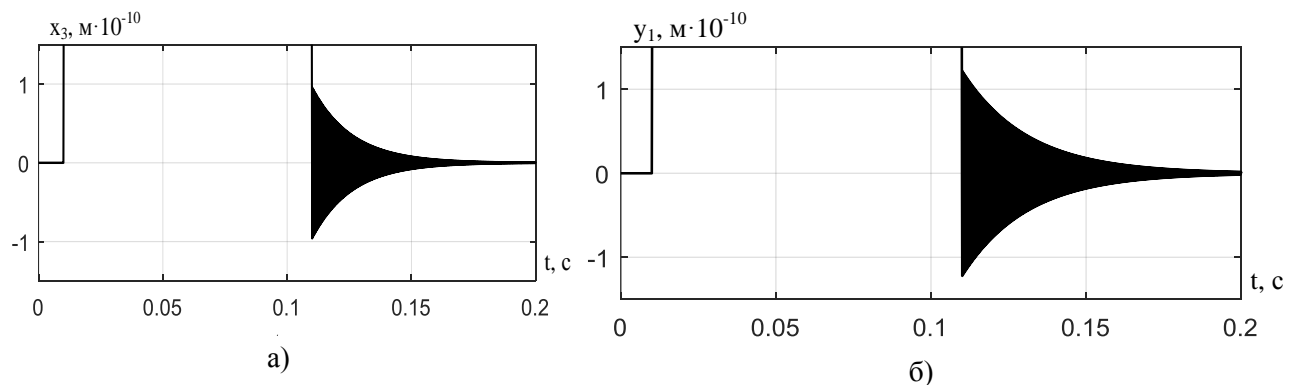
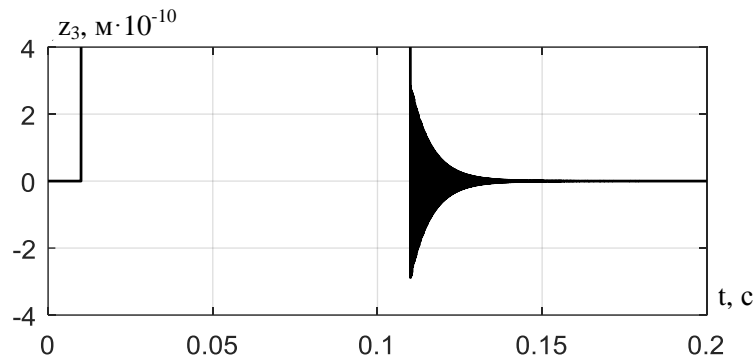


Рисунок 4.12 – Форма ударного воздействия

Перемещения подвижных элементов сенсора ММГ представлены на рисунке 4.13.





в)

Рисунок 4.13 – Перемещения в конструкции сенсора ММГ при ударном воздействии: а) удар вдоль оси X; б) удар вдоль оси Y; в) удар вдоль оси Z

При минимальной величине ударного воздействия амплитудой  $3g$ , касания не происходит. Максимальные перемещения не превышают минимального зазора.

Удар формы полусинус с амплитудой  $3g$ , длительность импульса  $12 \text{ мкс}$  (рисунок 4.14).

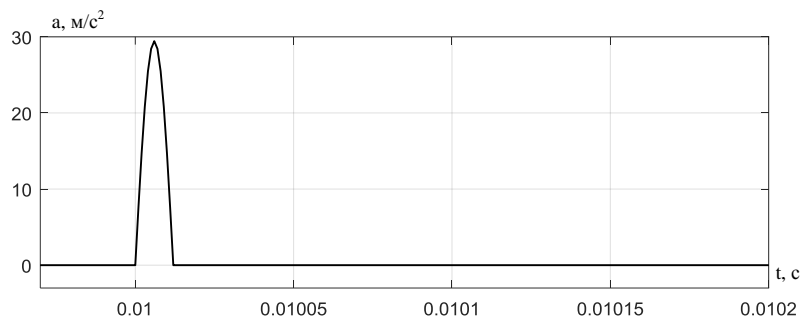
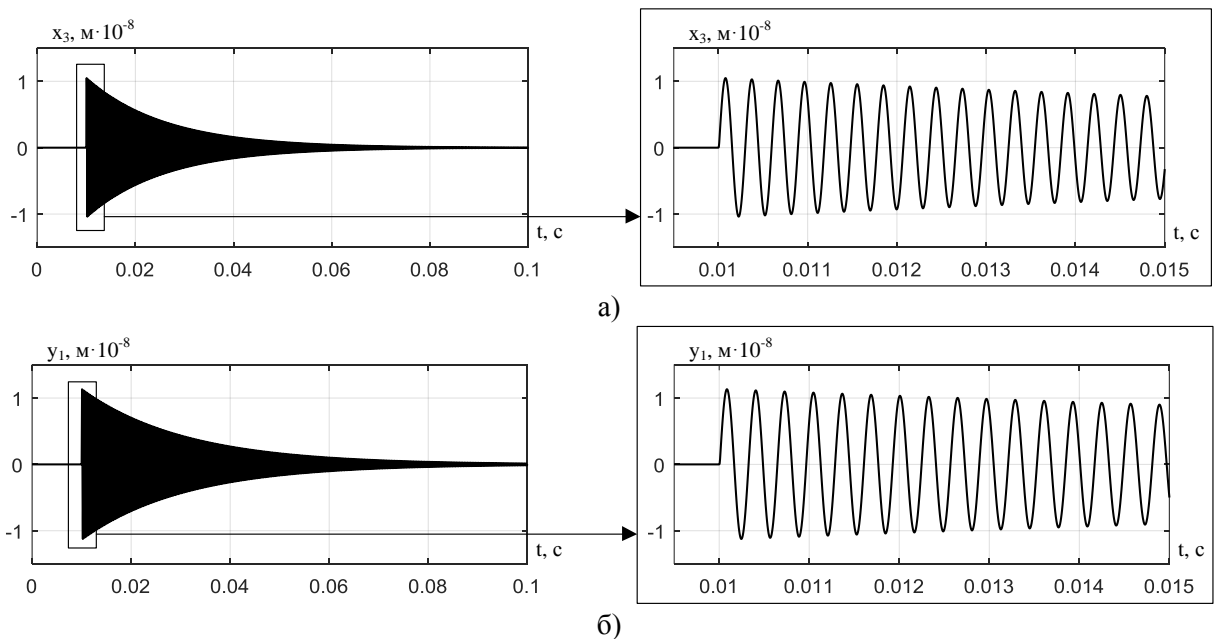


Рисунок 4.14 – Форма ударного воздействия



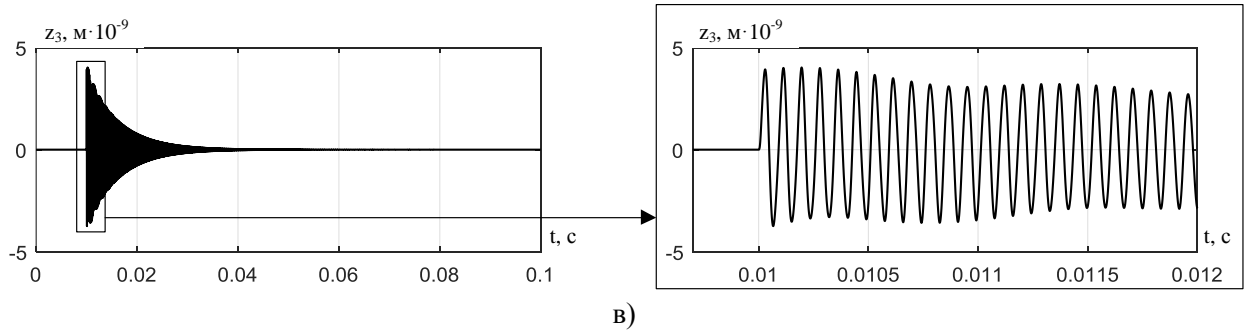


Рисунок 4.15 – Перемещения в конструкции сенсора ММГ при ударном воздействии: а) удар вдоль оси X; б) удар вдоль оси Y; в) удар вдоль оси Z

При минимальной величине ударного воздействия амплитудой  $3g$  касания не происходит. Максимальные перемещения не превышают минимального зазора.

Удар формы пила с амплитудой  $3g$ , длительность импульса 100мс (рисунок 4.16).

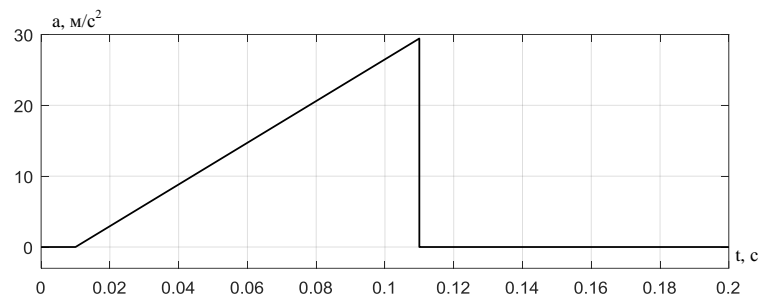
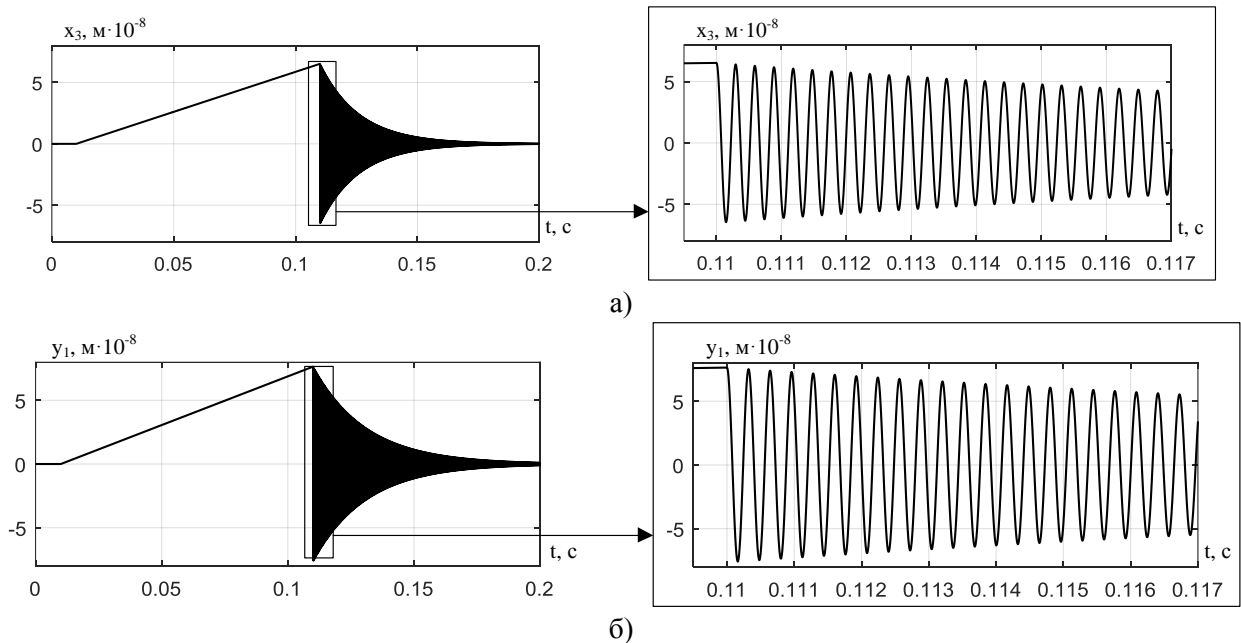


Рисунок 4.16 – Форма ударного воздействия





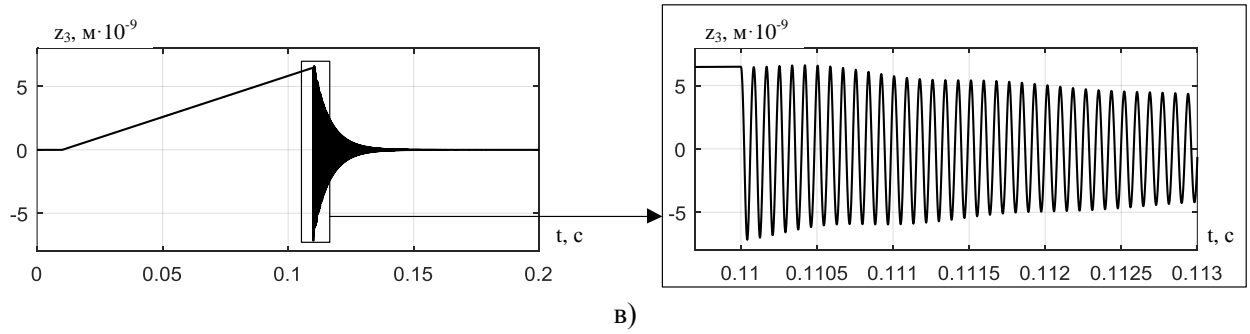


Рисунок 4.17 – Перемещения в конструкции сенсора ММГ при ударном воздействии: а) удар вдоль оси X; б) удар вдоль оси Y; в) удар вдоль оси Z  
Перемещения не превышают минимальный зазор.

Удар формы пила с параметрами  $3g$ , длительность импульса 12 мкс, рисунок 4.18.

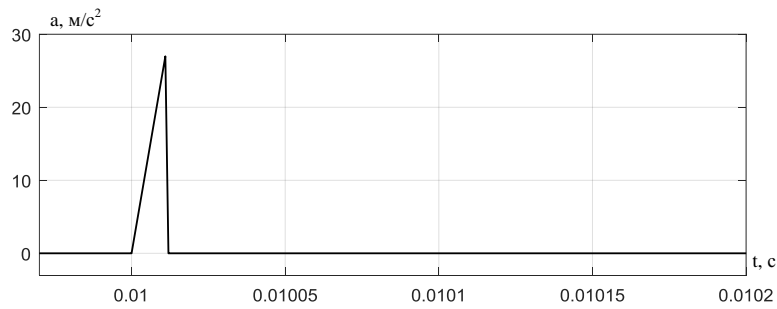
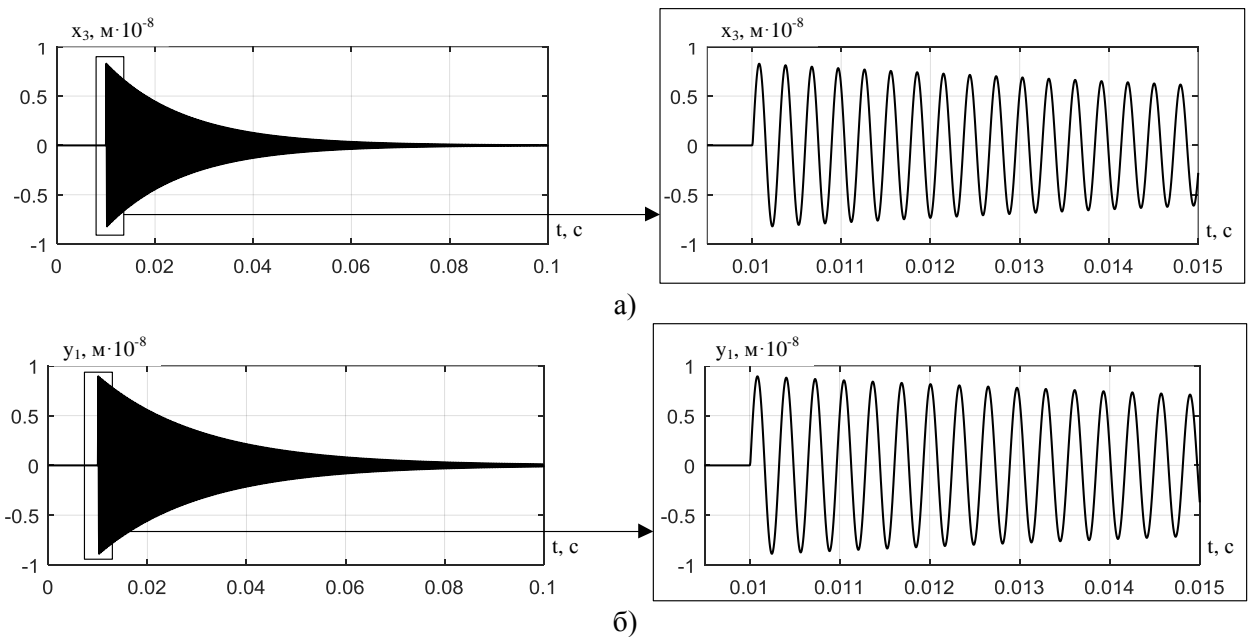


Рисунок 4.18 – Форма ударного воздействия



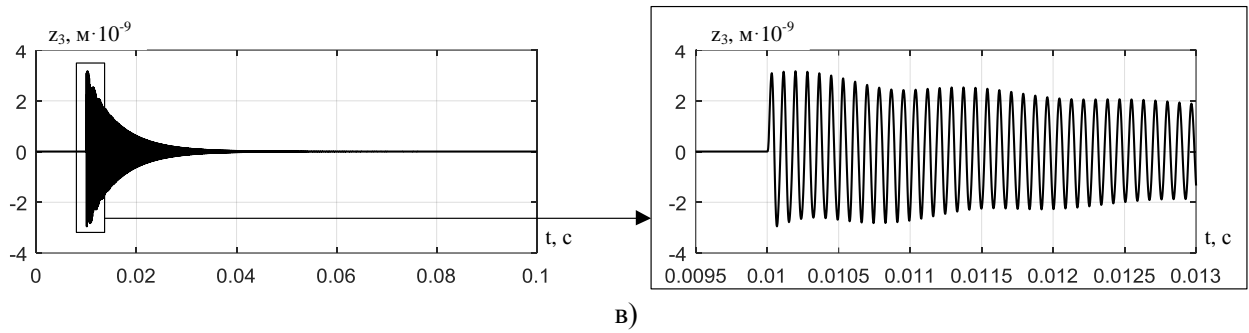


Рисунок 4.19 – Перемещения в конструкции сенсора ММГ при ударном воздействии: а) удар вдоль оси X; б) удар вдоль оси Y; в) удар вдоль оси Z.

Перемещения не превышают минимальный зазор.

Удар формы полусинус с параметрами 30000g, длительность импульса 100 мс (рисунок 4.20).

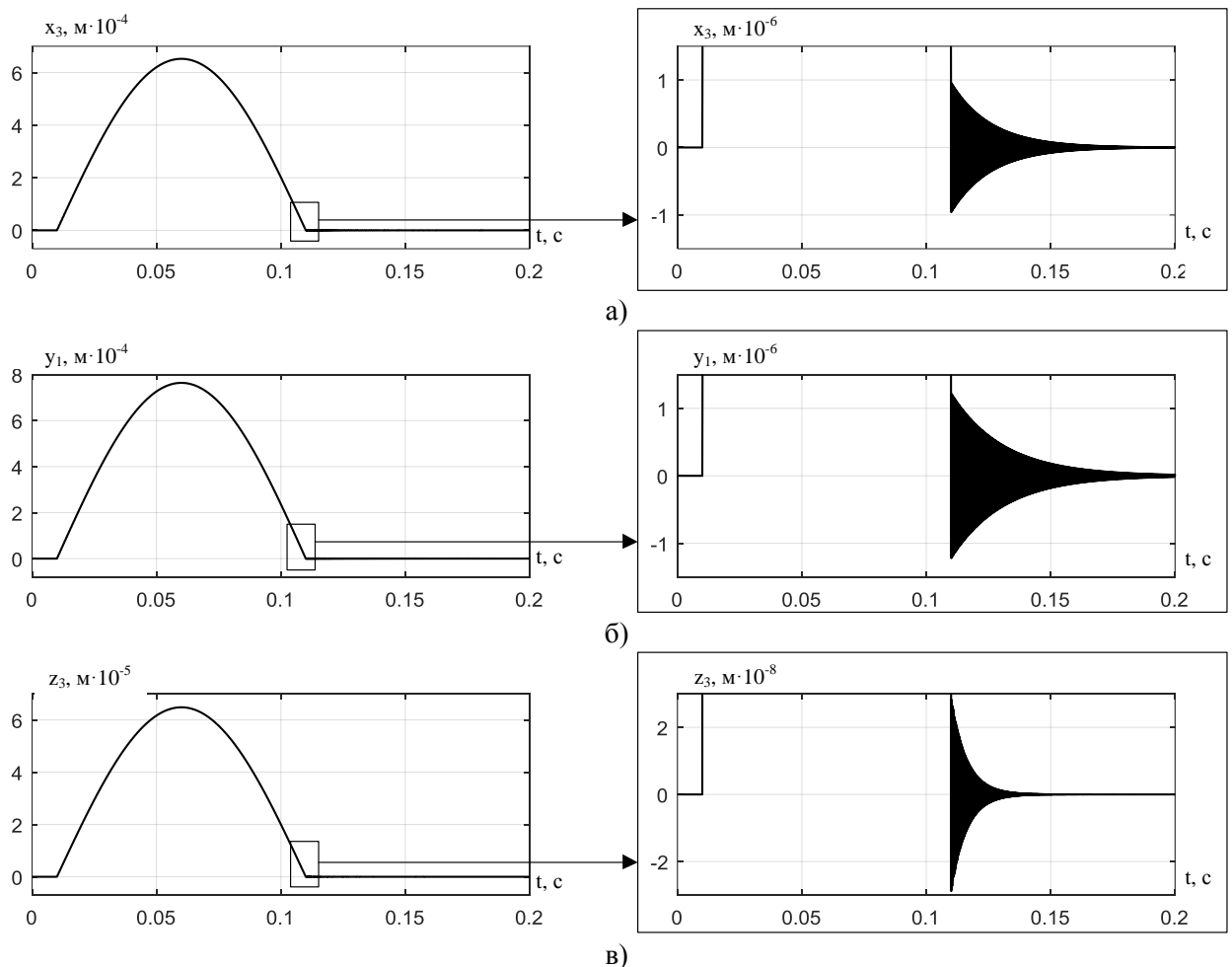


Рисунок 4.20 – Перемещения в конструкции сенсора ММГ при ударном воздействии: а) удар вдоль оси X; б) удар вдоль оси Y; в) удар вдоль оси Z.

Удар амплитудой 30000g приводит к перемещениям инерционных тел, которые превышают минимальный зазор в конструкции, равный 4 мкм вдоль оси

X, 7 мкм вдоль оси Y и 5 мкм вдоль оси Z. Ударное воздействие формы пила так же приводит к большим перемещениям, даже при минимальной длительности импульса.

Для того, чтобы оценить поведение гироскопа при ударах, в Simulink модель вводятся ограничители перемещений вдоль осей X, Y и Z.

Удар формы полусинус с параметрами 30000g, длительность импульса 100мс с упорами (рисунок 4.21).

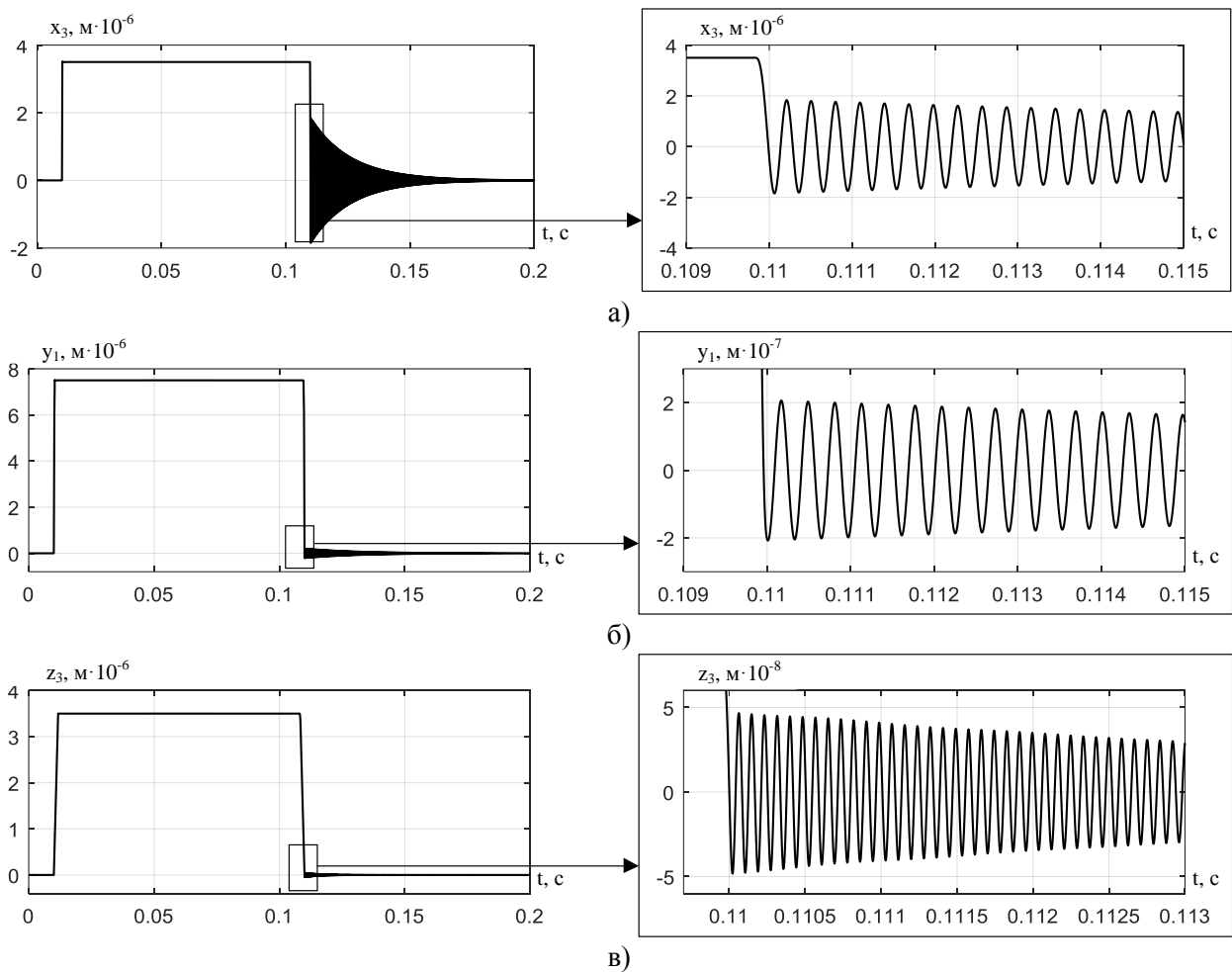


Рисунок 4.21 – Перемещения в конструкции сенсора ММГ при ударном воздействии: а) удар вдоль оси X; б) удар вдоль оси Y; в) удар вдоль оси Z.

По обеим осям чувствительности можно наблюдать воздействие удара. Удар приводит к касанию защитных упоров, а после завершения ударного импульса наблюдаются затухающие гармонические колебания инерционных тел. Используя только результаты моделирования в Simulink, невозможно

сказать о напряжениях, которые возникают в конструкции гироскопа во время удара. Для этого используется КЭ моделирование в программе ANSYS.

### 4.3.2 Воздействие вибрации на сенсор микромеханического гироскопа

На рисунке ниже приведены результаты расчета ММГ на воздействие синусоидальной вибрации в диапазоне частот от 20 до 2000 Гц с амплитудой виброускорения 10g. В расчетах предполагалось, что добротность гироскопа равна 50.

Так как гироскоп не имеет собственных частот в рассматриваемом диапазоне, связанных с колебаниями вдоль оси Z, то воздействие виброускорения вдоль этой оси вызывает максимальные перемещения не более 0,05 мкм (рисунок 4.22).

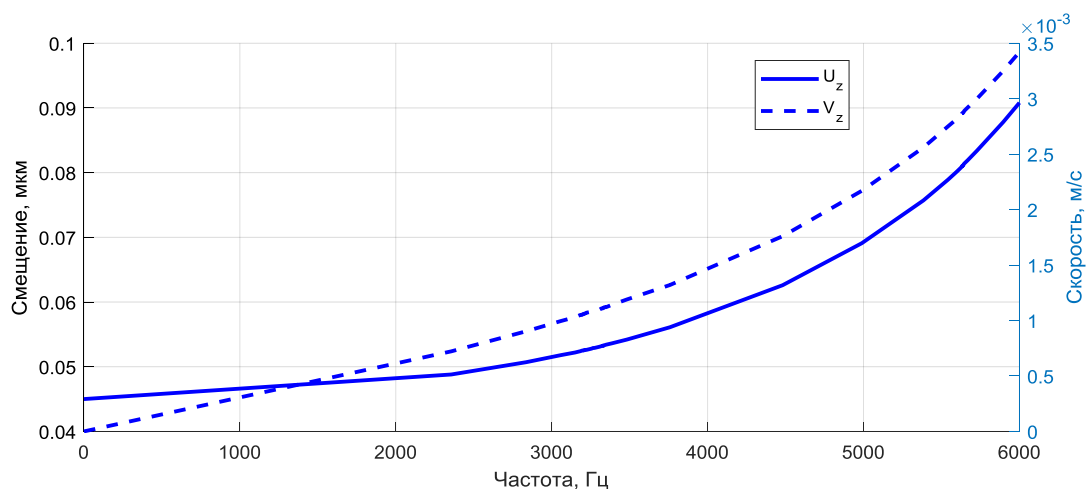


Рисунок 4.22 – Синусоидальная вибрация вдоль оси Z:

сплошная линия – смещения, мкм; пунктирная линия – скорости, м/с.

При большем диапазоне частот вибрации возникнут резонансы на рабочих частотах гироскопа. Максимальные смещения элементов конструкции превысят 10 мкм, что является физически невозможным, так как уже при смещениях 4 мкм вдоль оси X и 6 мкм вдоль оси Y возникнут соударения рамок, рисунок 4.23.

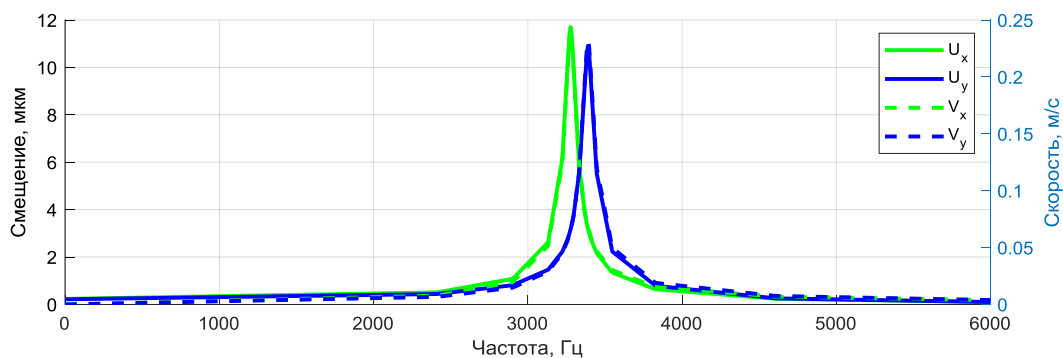


Рисунок 4.23 – Расчет на синусоидальную вибрацию вдоль осей X и Y: сплошная линия – смещения, мкм; пунктирная линия – скорости, м/с.

Для обеспечения вибростойкости ММГ необходимо, чтобы его резонансные частоты лежали за пределами диапазона частот вибрации, что и было выполнено в разработанной конструкции.

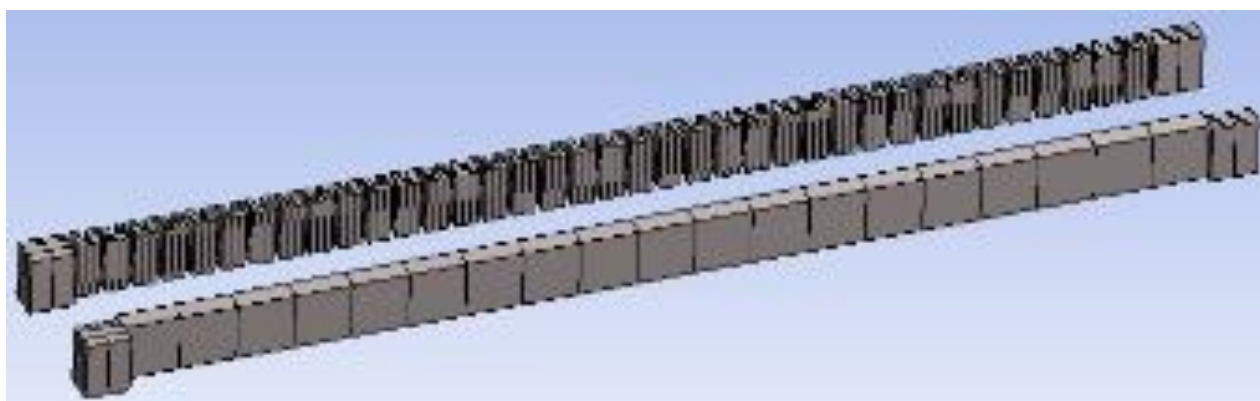
## 4.4 Конечно-элементное моделирование гироскопа

### 4.4.1 Оптимизация конечно-элементной модели гироскопа

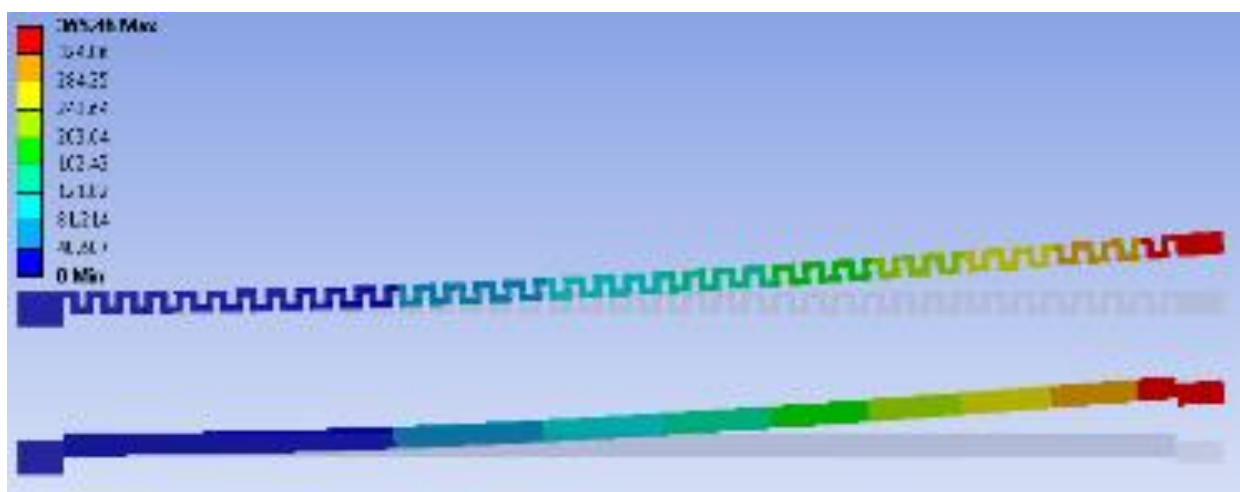
Задача определения поведения прибора при ударном воздействии включает проведение нестационарного расчета в нелинейной постановке с учетом возможных соударений элементов конструкции приборов. Корректный учет указанных процессов возможен только при достаточно малом шаге интегрирования по времени, что делает данную задачу вычислительно сложной. В связи с этим необходимо использование в расчетах оптимизированной конечно-элементной модели, включающей минимально возможное число степеней свободы без потери точности вычислений. Для достижения этой цели при построении модели был использован ряд упрощений, описание которых приведено ниже.

#### 4.4.1.1 Упрощение геометрической модели

Модель можно упростить за счет использования эффективных параметров упругих подвесов, работающих в плоскости (рисунок 4.24 а).



а)



б)

Рисунок 4.24 – Сравнение объемной и балочной модели подвеса:

а) конечно-элементная сетка; б) результаты расчета

За счет сложной геометрии подвеса его объемная модель требует использования в расчетах значительного числа степеней свободы (до 10 000 на один подвес). В это же время, модель подвеса с использованием балочных элементов с эффективными параметрами требует всего нескольких десятков степеней свободы. Эффективными параметрами модели подвеса будут ширина, толщина и модуль упругости балки. Подбор этих трех параметров осуществляется по трем величинам, полученным с использованием объемной модели подвеса: смещения по трем осям конца консольно закрепленного подвеса под действием небольшой точечной силы. Плотность материала подбирается из условия сохранения массы подвеса. На рисунке 4.24 б) приведены результаты одного из расчетов.

В таблице 4.1 приведено сравнение численных результатов, полученных с использованием объемной и балочной модели подвеса гироскопа.

Таблица 4.1 – Сравнение объемной и балочной модели подвеса

	Объемная модель	Балочная модель с эффективными параметрами
Смещение по оси X (сила 0,0001 Н), мкм	0,027991	0,028
Смещение по оси Y (сила 0,0001 Н), мкм	363,23	365,46
Смещение по оси Z (сила 0,0001 Н), мкм	28,912	29,239
Первая собственная частота, Гц	43411	43146
Число степеней свободы	7677	120

Как следует из данных таблицы, погрешность, вызванная использованием упрощенной модели с эффективными параметрами, не превышает процента.

#### 4.4.1.2 Использование симметрии сенсора микромеханического гироскопа

Использование симметрии позволяет упростить конечно-элементный анализ гироскопа (рисунок 4.25).

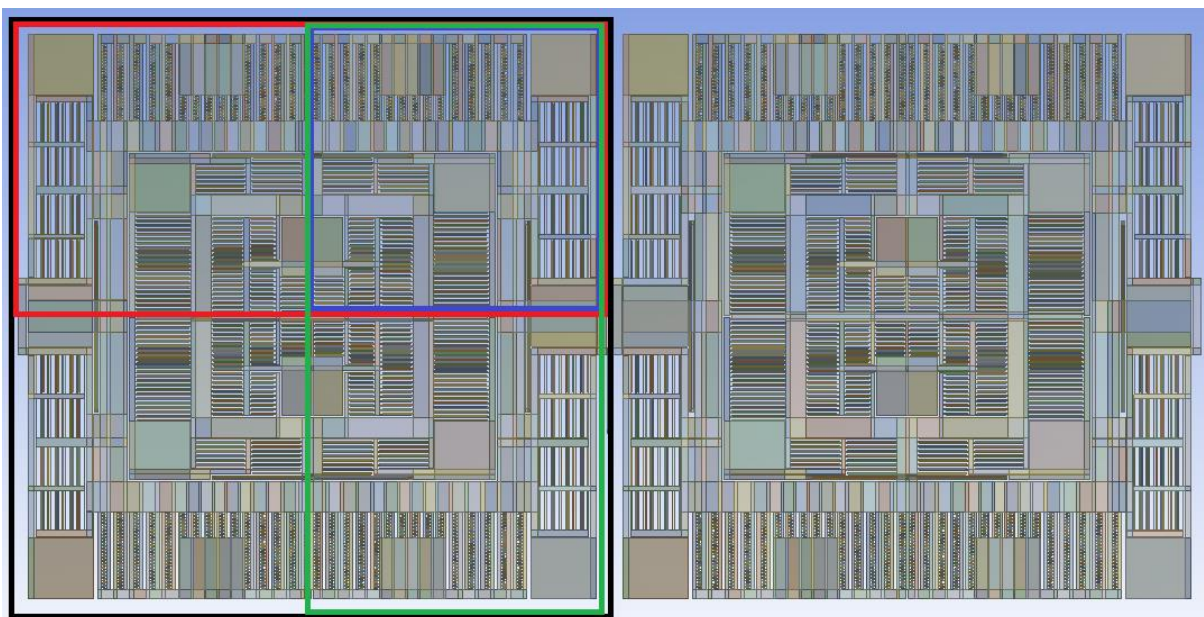


Рисунок 4.25 – Использование симметрии конструкции сенсора ММГ

Так как две «половинки» прибора одинаковы, то возможен расчет только одной из них (выделена черным цветом). При расчете воздействия по оси X (горизонтальное направление на рисунке 4.25) на плоскости симметрии не задается никаких граничных условий. При расчете воздействия по двум другим осям на плоскости симметрии задаются стандартные условия симметрии – отсутствие смещений перпендикулярно плоскости.

Так как рассматриваемая половинка прибора тоже обладает симметрией, то возможно еще более сократить модель и при расчете воздействия по оси X использовать только часть, выделенную красным цветом; при расчете воздействия по оси Y (вертикальное направление на рисунке 4.25) использовать только часть, выделенную зеленым цветом; а при расчете воздействия по оси Z (направление перпендикулярно плоскости рисунка 4.25) использовать только часть, выделенную синим цветом. При этом на границах областей используются стандартные условия симметрии.

#### 4.4.2 Конечно-элементное моделирование ударного воздействия

В конечно-элементной модели гироскопа использованы элементы второго порядка. Для сокращения числа степеней свободы элементы конструкции, незначительно влияющие на поведение прибора (в первую очередь гребенчатые структуры), моделировались элементами первого порядка. Вид конечно-элементной модели приведен на рисунке 4.26.

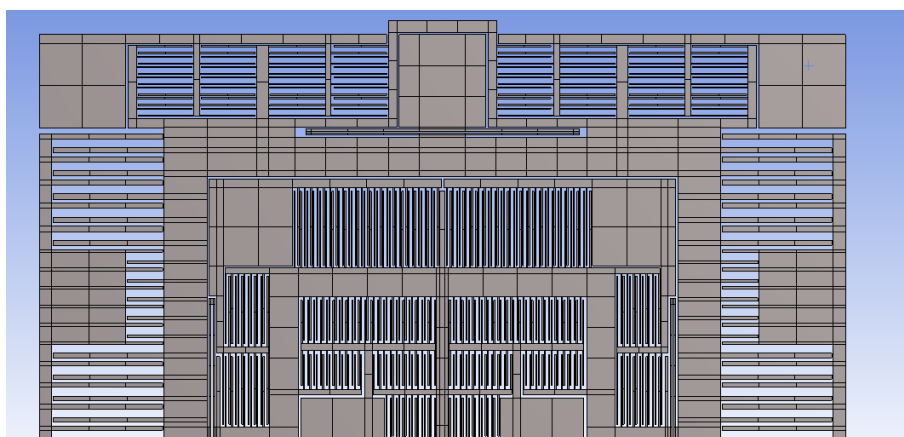


Рисунок 4.26 – Конечно-элементная модель сенсора ММГ



Моделировалось воздействие ударного импульса длительностью 0,012 мс с амплитудой ускорения 30000g для полусинусоидальной и пилообразной формы. Целью данного расчета являлось определение качественного поведения элементов конструкции сенсора ММГ и возможности соударения инерционного тела и наружной рамки при данном воздействии, поэтому расчет собственно соударений не производился, что и привело к значительным расчетным смещениям рамок, невозможным для реального устройства (рисунок 4.27).

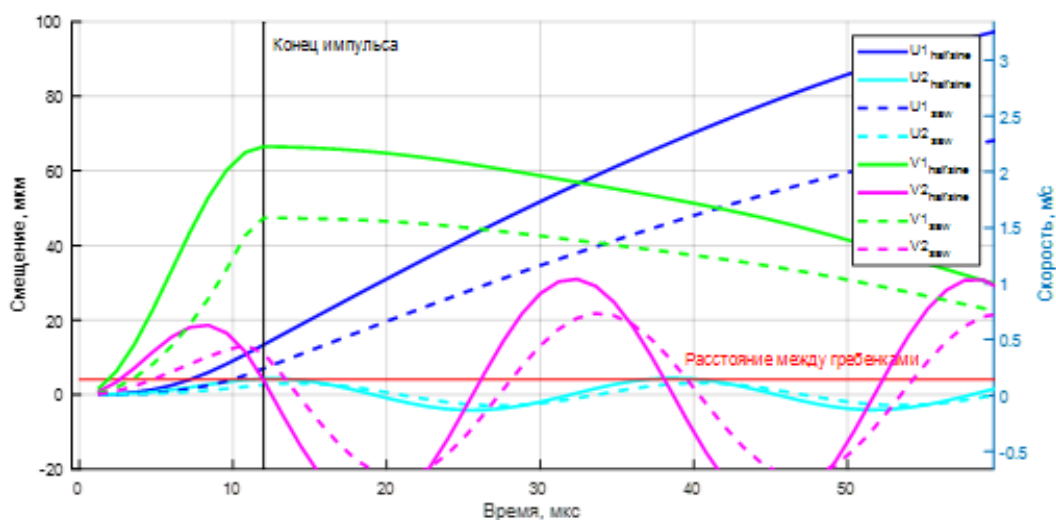


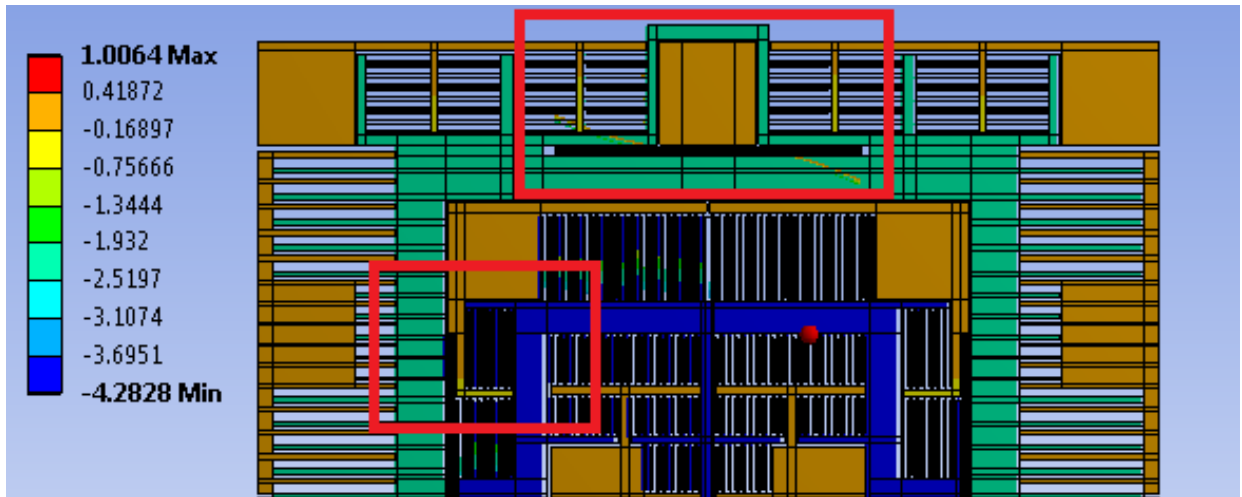
Рисунок 4.27 – Расчет на ударный импульс по оси X:

$U_1, U_2$  – смещение инерционного тела и наружной рамки, мкм;

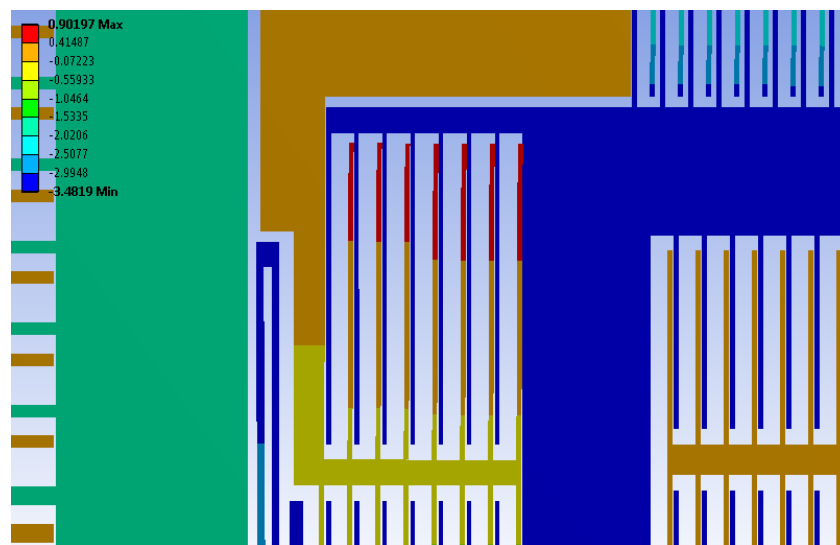
$V_1, V_2$  – скорости соударения инерционного тела и наружной рамки, м/с.

Из графиков, представленных на рисунке 4.27 видно, что в результате удара амплитудой 30000g конструкция перемещается на расстояние большее, чем допустимый зазор, равный 4 мкм.

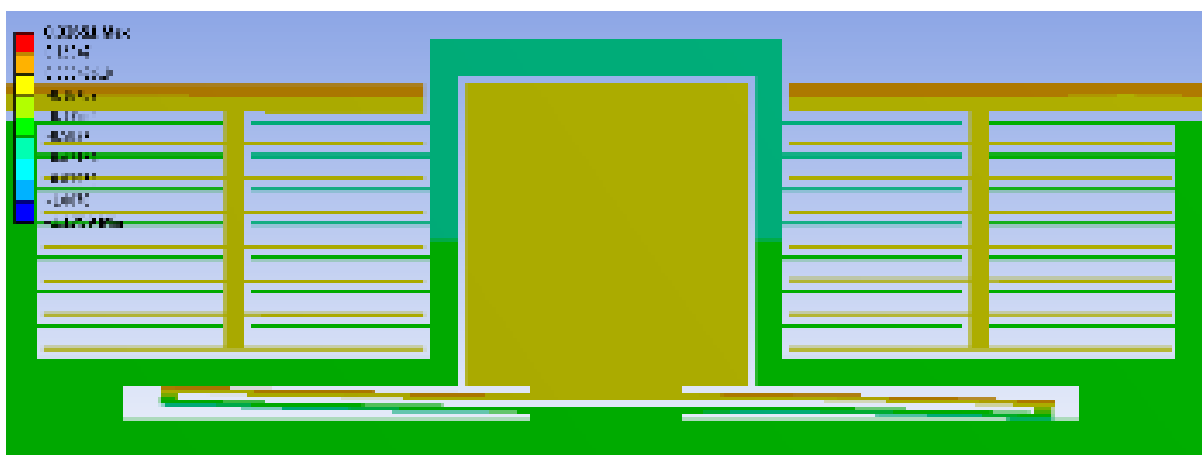
В случае ударного воздействия вдоль оси X в движение приходят инерционное тело и наружная рамка, причем инерционное тело смещается значительно больше, чем внешняя рамка (рисунок 4.28,а). Первое касание возникнет между упругим подвесом и наружной рамкой примерно через 4,2 мкс от начала полусинусоидального импульса (рисунок 4.28,в). Далее, в момент времени 6,6 мкс произойдет касание гребенок (рисунок 4.28,б). Скорость соударения составит примерно 0,7 м/с.



а)



б)



в)

Рисунок 4.28 – Смещения при полусинусоидальном ударном воздействии вдоль оси X: а) гироскоп в момент времени 7,2 мкс; б) касание гребенок в момент времени 6,6 мкс; в) касание упругих подвесов в момент времени 4,2 мкс

В случае ударного воздействия вдоль оси  $Y$  в движение приходит инерционное тело и наружная рамка, но они смещаются синхронно (рисунок 4.31,а). Анализ результатов показывает, что первое касание возникнет между наружной рамкой и ее упругим подвесом примерно через 8,4 мкс от начала полусинусоидального импульса (рисунок 4.31,б). Скорость соударения составит примерно 1,8 м/с.

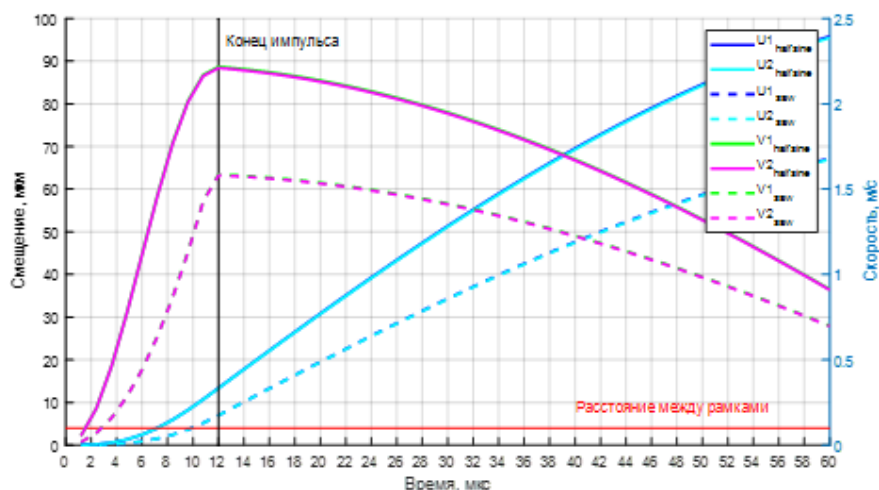
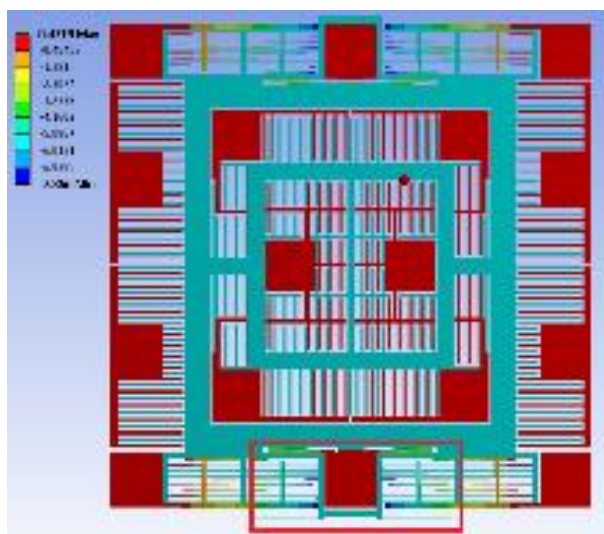


Рисунок 4.29 – Расчет на ударный импульс по оси  $Y$ :

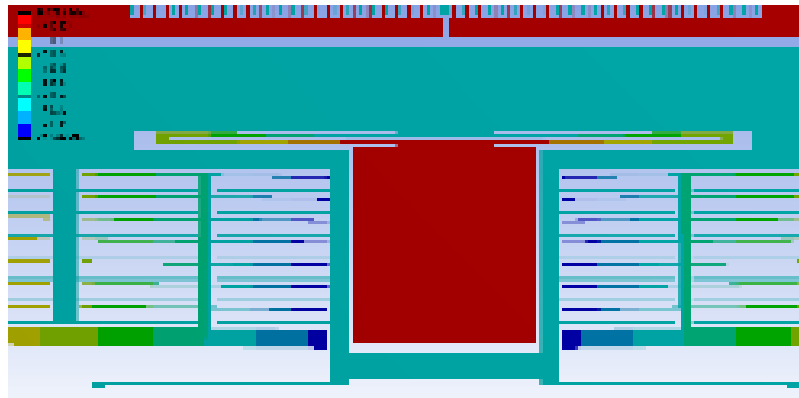
$U_1, U_2$  – смещение инерционного тела и наружной рамки, мкм;

$V_1, V_2$  – скорости инерционного тела и наружной рамки, м/с.

Из графиков, представленных на рисунке 4.29, видно, что в результате удара амплитудой 30 000g конструкция перемещается на расстояние большее, чем допустимый зазор, равный 7 мкм.



а)



б)

Рисунок 4.31 – Смещения при полусинусоидальном ударном воздействии вдоль оси  $Y$ : а) гироскоп в момент времени 8,4 мкс;

б) касание наружной рамки и упругого подвеса в момент времени 8,4 мкс

В случае ударного воздействия вдоль оси  $Z$  в движение приходит инерционное тело и наружная рамка, они смещаются синхронно, причем смещение инерционного тела примерно в два раза больше, чем наружной рамки (рисунок 4.33, а). Анализ результатов показывает, что первое касание возникнет между инерционным телом и основанием гироскопа примерно через 9 мкс от начала полусинусоидального импульса (рисунок 4.33, б). Скорость соударения составит примерно 2,5 м/с.

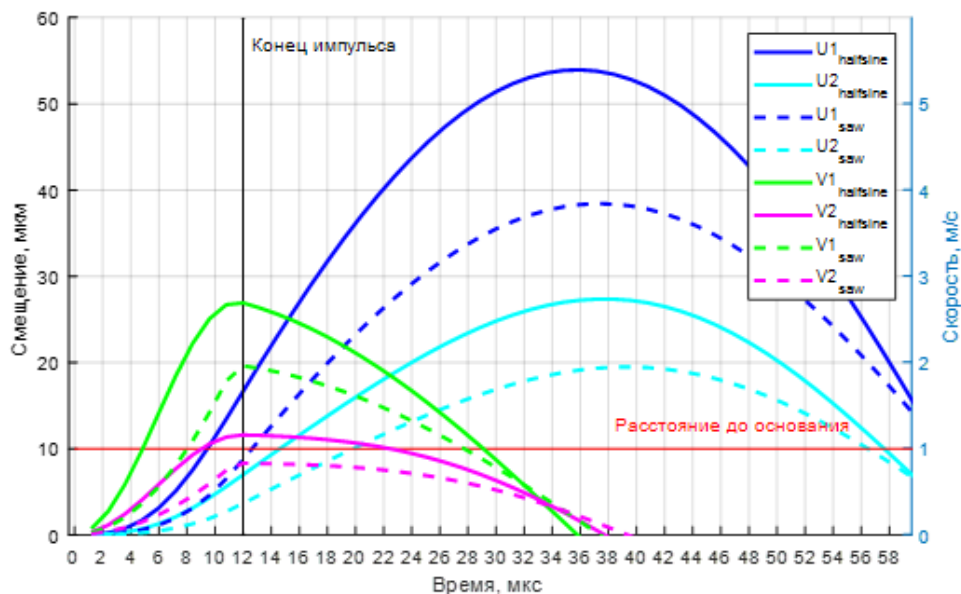
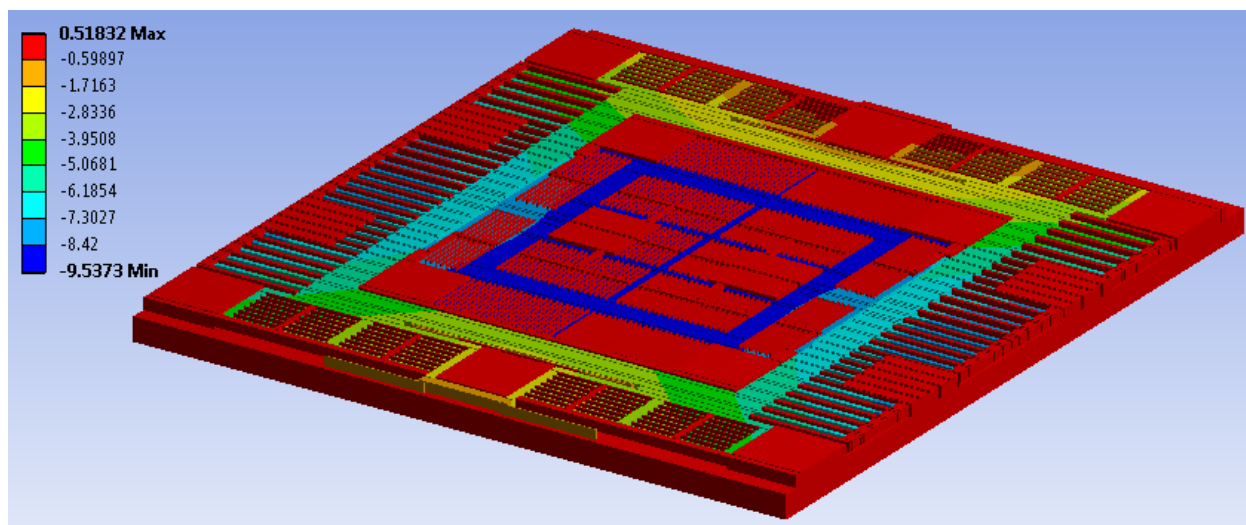


Рисунок 4.32 – Расчет на ударный импульс по оси  $Z$ :

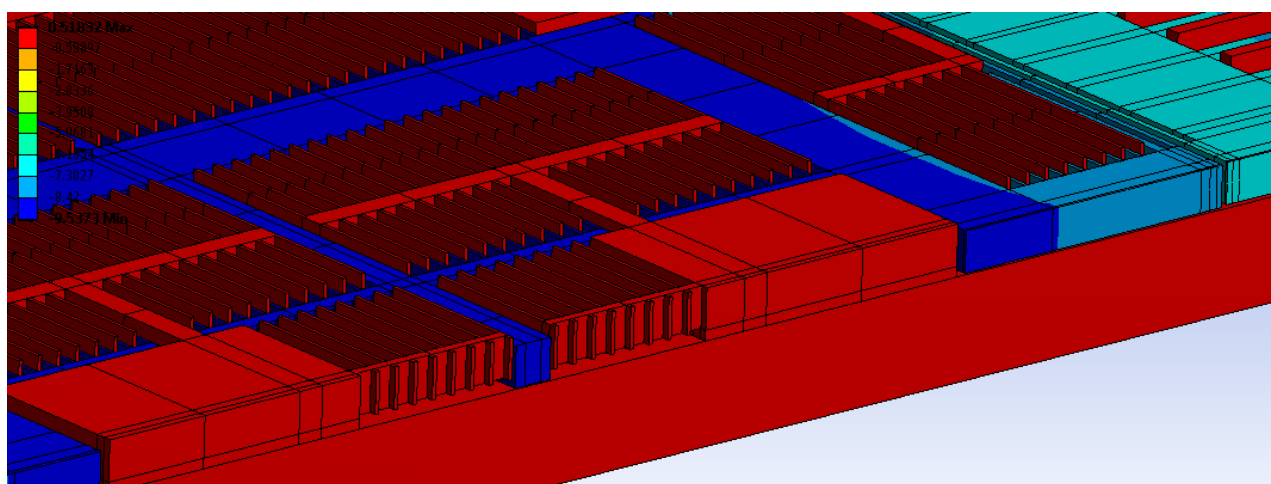
$U_1, U_2$  – смещение инерционного тела и наружной рамки, мкм;

$V_1, V_2$  – скорости инерционного тела и наружной рамки, м/с.

Из графиков, представленных на рисунке 4.33, видно, что в результате удара амплитудой 30000g конструкция перемещается на расстояние большее, чем допустимый зазор, равный 4 мкм.



а)



б)

Рисунок 4.33 – Смещения при полусинусоидальном ударном воздействии вдоль оси Z: а) гироскоп в момент времени 9,0 мкс;

б) касание инерционного тела и основания в момент времени 9,0 мкс

Так как перемещения больше, чем максимально допустимые значения, в модель гироскопа введены контактные взаимодействия между гребенчатыми структурами, инерционным телом и наружной рамкой, между упругим элементом и наружной рамкой, между инерционным телом и анкерами. На основании проведённого КЭ анализа конструкции на ударные воздействия, были

определены места предполагаемого соприкосновения подвижных частей конструкции с неподвижными.

В программе ANSYS для задания условия соприкосновения отдельных частей конструкции есть инструмент «Contact» в котором выбирается тип контакта Frictionless – без трения (рисунок 4.34). Данный тип контакта позволяет моделировать соприкосновения различных частей модели между собой в зависимости от приложенной нагрузки. Данный тип контакта является нелинейным, так как площадь контакта может изменяться при приложении нагрузки. При расчёте контактной задачи, необходимо указать две поверхности, между которыми должен произойти контакт. Данные поверхности называются Contact и Target. Поведение контакта – Symmetric. Используется для гибких упругих тел. Опция Pinball region показывает программе, что через заданное расстояние должен произойти контакт между телами. Это в свою очередь позволяет более точно определить момент соприкосновения контактирующих тел.

<b>Scope</b>	
Scoping Method	Geometry Selection
Contact	1 Face
Target	1 Face
Contact Bodies	Тело_5_3а_1\Тело_5:11
Target Bodies	Тело_5_3а_1\Тело_5:12
Protected	No
<b>Definition</b>	
Type	Frictionless
Scope Mode	Manual
Behavior	Symmetric
Trim Contact	Program Controlled
Suppressed	No
<b>Advanced</b>	
Formulation	Augmented Lagrange
Small Sliding	Program Controlled
Detection Method	Program Controlled
Penetration Tolerance	Program Controlled
Normal Stiffness	Program Controlled
Update Stiffness	Program Controlled
Stabilization Damping Factor	0,
Pinball Region	Radius
Pinball Radius	2, $\mu\text{m}$
Time Step Controls	None

Рисунок 4.34 – Настройка контакта Frictionless

По результатам проведённого КЭ анализа на контактные взаимодействия при воздействии удара амплитудой от 1500g до 30000g, были построены графики, которые показывают максимальные напряжения, возникающие в конструкции вдоль осей X, Y и Z, рисунок 4.35.

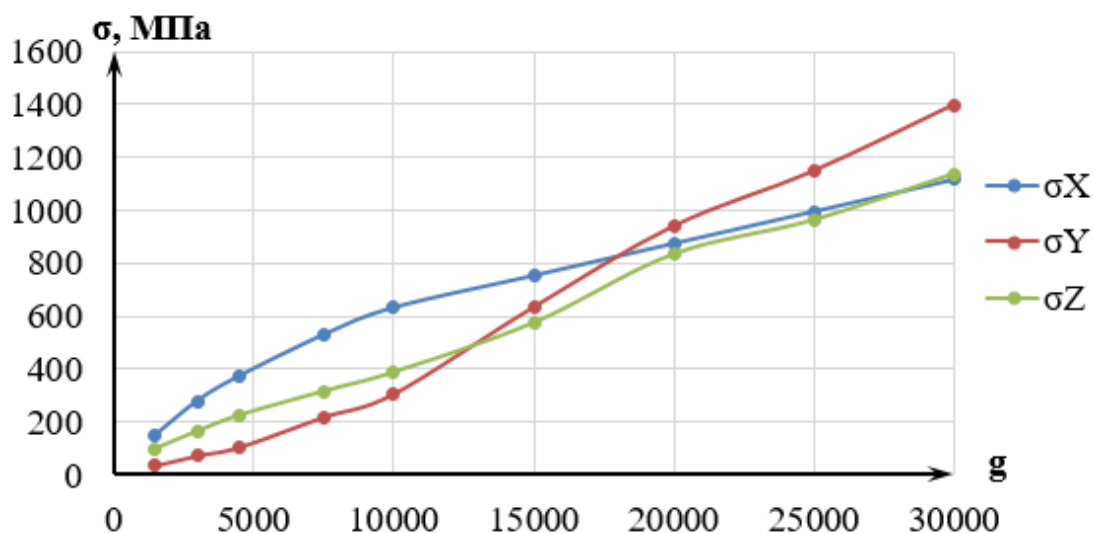


Рисунок 4.35 – Зависимость максимальных напряжений от амплитуды удара

Из графиков видно, что при ударах выше 10000g, напряжения, возникающие в конструкции, превышают допустимое значение, равное 800 МПа, что приведёт к разрушению конструкции. Следовательно, необходимо разработать метод, который позволит увеличить порог ударопрочности конструкции.

#### 4.4.3 Конструктивные решения повышения ударной стойкости микромеханического гироскопа

На основании проведённого анализа конструкции гироскопа на ударные воздействия вдоль осей X, Y и Z с амплитудой ударов от 1500 g до 30000 g, можно сделать вывод о том, что конструкция гироскопа разрушится при амплитуде удара более 10000 g. Для того, чтобы сделать гироскоп устойчивым к ударам амплитудой 30000 g, необходимо внести в него ряд конструктивных решений.

### 4.4.3.1 Введение упоров

Чтобы не допустить соприкосновения упругих подвесов и гребенчатых структур с неподвижными частями конструкции, а также уменьшить напряжения, возникающие в результате ударов подвижных частей конструкции о неподвижные, были проанализированы 3 типа упоров, представленные на рисунке 4.36.

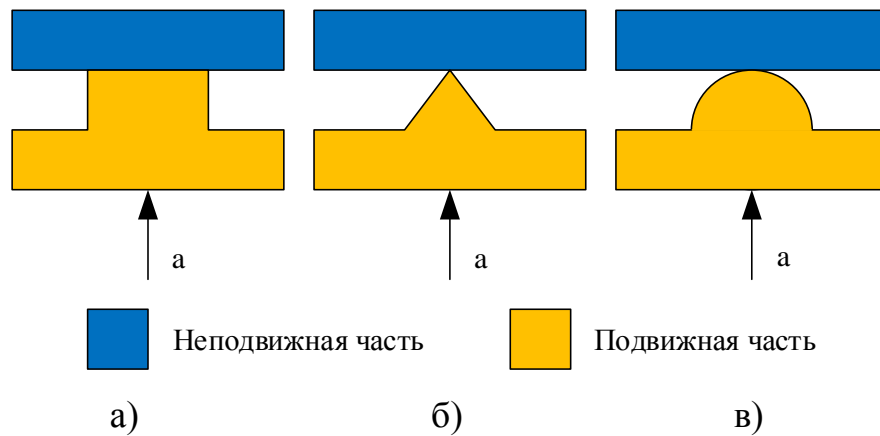


Рисунок 4.36 – Типы упоров: а) жёсткий упор с плоским концом («тип 1»); б) конический упор («тип 2»); в) сферический упор («тип 3»)

Используя метод конечно-элементного анализа, 3 типа упоров были исследованы на максимальные напряжения, возникающие в конструкции при воздействии ускорения амплитудой от 1500g до 30000g. Результаты представлены на рисунках 4.37, 4.38, 4.39.

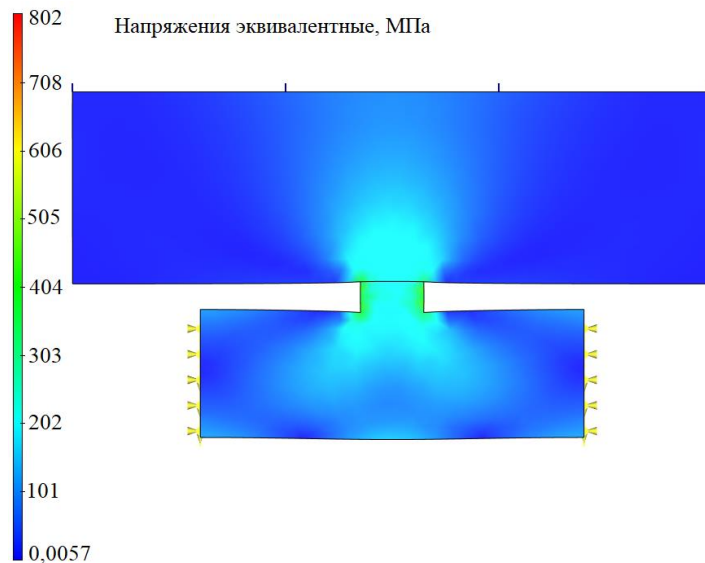


Рисунок 4.37 – Напряжения в упоре «тип 1» при воздействии ускорения 30000g



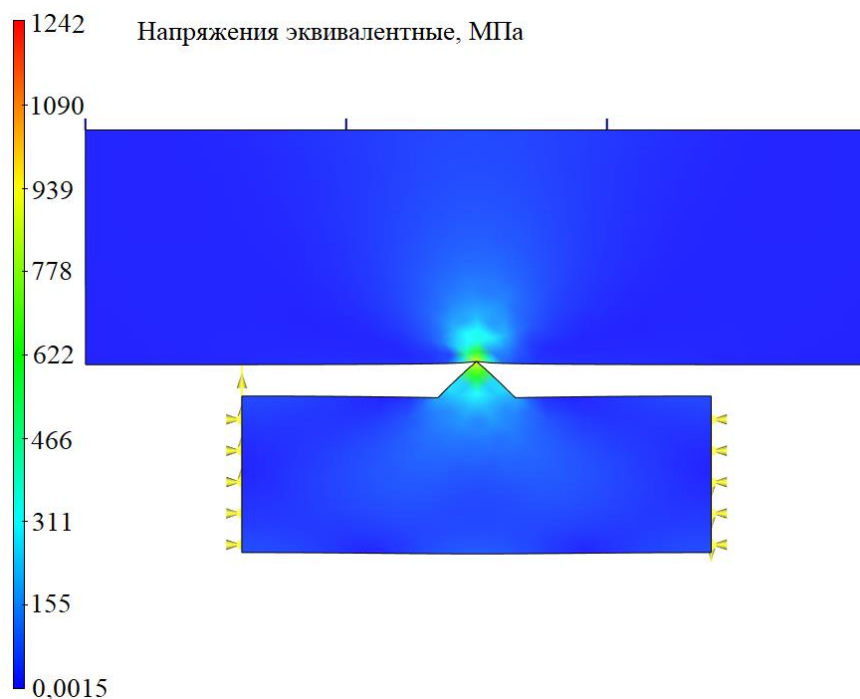


Рисунок 4.38 – Напряжения в упоре «тип 2» при воздействии ускорения 30000g

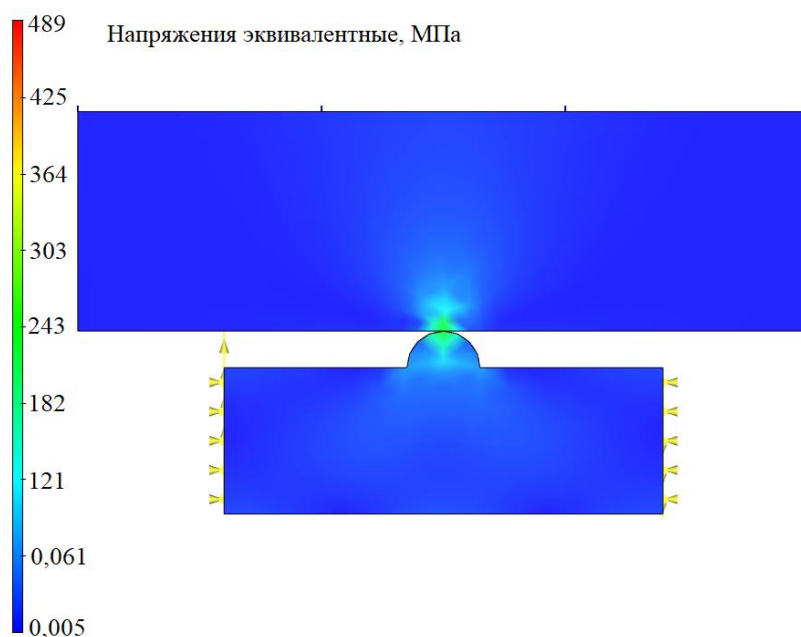


Рисунок 4.39 – Напряжения в упоре «тип 3» при воздействии ускорения 30000g

Как видно из результатов, представленных на рисунках 4.37, 4.38, 4.39, наибольшие напряжения при воздействии удара амплитудой 30000g возникают в упоре «тип 2» и составляют 1242 МПа. В упоре «тип 1» напряжения равны 802 МПа. Для упора «тип 3» напряжения получились равными 489 МПа.

Также по результатам анализа был построен график зависимости напряжений от приложенного ускорения (рисунок 4.40).

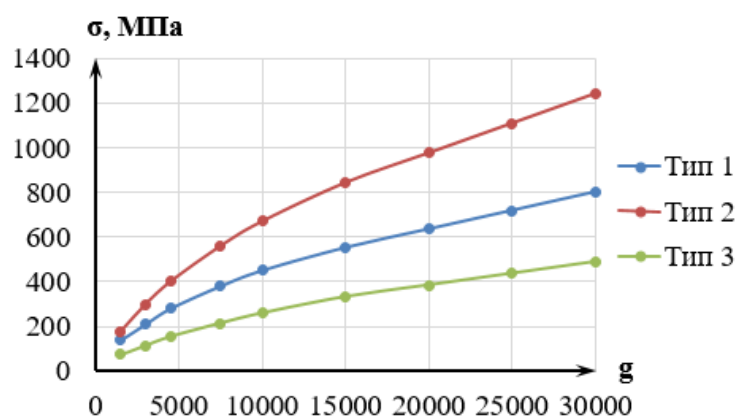


Рисунок 4.40 – Напряжения, возникающие в разных типах упоров

Как следует из полученных результатов, при использовании сферического упора («тип 3») в конструкции не возникает напряжений, превышающих максимально допустимых. Следовательно, в качестве упора целесообразно использовать сферический тип.

#### 4.4.3.2 Упругие гасители ударных воздействий в микромеханическом гироскопе

Чтобы повысить надёжность при ударах, предлагается использовать упругие гасители ударов. Идея состоит в том, что при воздействии на ММГ ударного воздействия, его инерционная масса ударится не о жёсткое препятствие, а о балку, которая деформируется и гасит энергию удара, тем самым сохранив работоспособность устройства (рисунок 4.41).

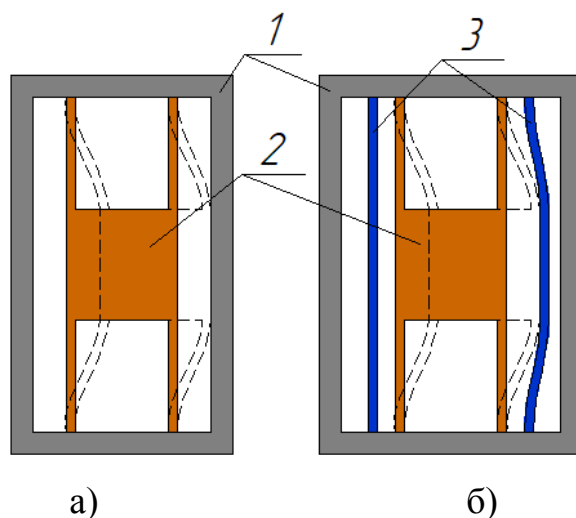


Рисунок 4.41 – Типы ударов, возникающих в конструкции:

а) жёсткий удар; б) упругий удар

На рисунке 4.41 обозначено: 1 – неподвижная часть, 2 – подвижная масса, 3 – упругие гасители удара.

Упругие гасители удара, представленные на рисунке 4.41, могут быть интегрированы со многими МЭМС устройствами без существенного изменения конструкции и полностью совместимы с существующей технологией изготовления МЭМС при использовании глубокого анизотропного травления кремния (BOSCH процесс). Для увеличения скорости расчётов, конструкция гироскопа была упрощена до эквивалентной массы в упругом подвесе с аналогичной собственной частотой (рисунок 4.42).

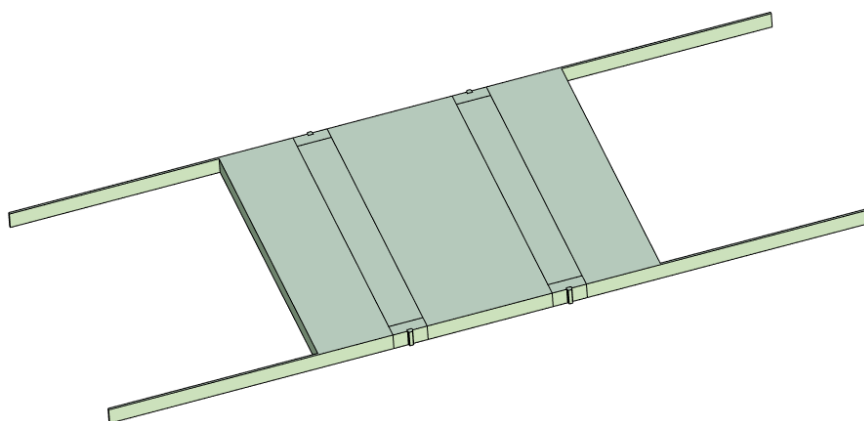


Рисунок 4.42 – Эквивалентная масса гироскопа в упругом подвесе

С технологической точки зрения ширина  $b$  упругих гасителей удара, должна быть близка к ширине упругих подвесов, используемых в конструкции микромеханического гироскопа, что составляет  $7 \pm 1$  мкм. Расчёт проведён для ширины упругих подвесов, равной 6, 7, 8, 9, 10 мкм.

Исследуем упругий гаситель удара в виде балки, закреплённой с двух концов (тип 1) (рисунок 4.43).



Рисунок 4.43 – Одиночная балка, закреплённая с двух концов (тип 1)

Результаты анализа для упругого гасителя удара (тип 1) представлены на рисунке 4.44.

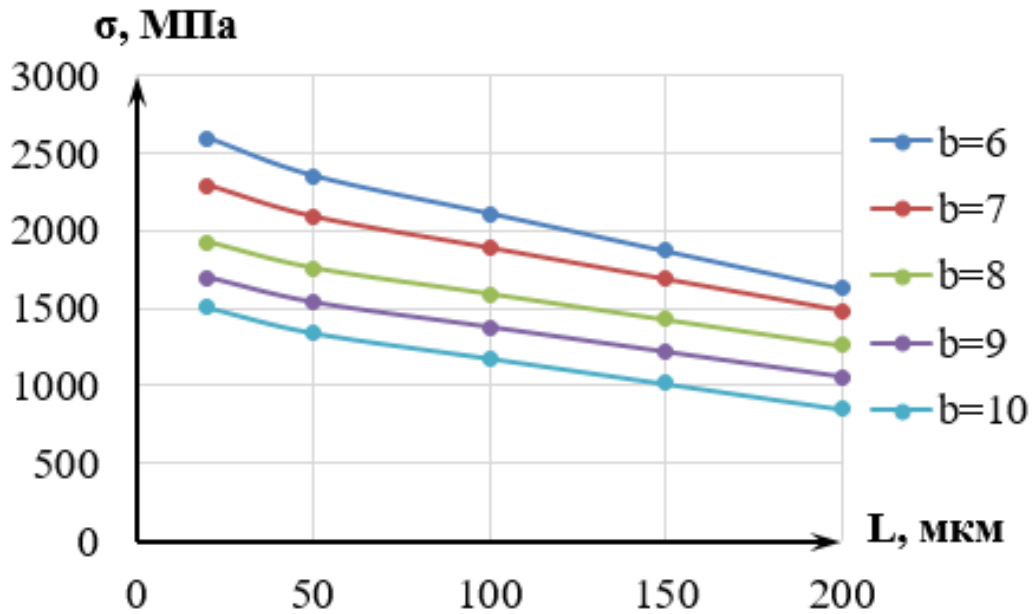


Рисунок 4.44 – Зависимость напряжений в упругом гасителе удара (тип 1) от параметров  $b$  и  $L$

По графикам на рисунке 4.44 видно, что при уменьшении длины и ширины упругого гасителя удара, напряжения, возникающие в нём во время удара амплитудой  $30000g$  увеличиваются, и наоборот, при увеличении ширины и длины напряжения уменьшаются. Дальнейшее увеличение длины невозможно из-за ограничения габаритов гироскопа. Увеличение ширины ограничено технологическими требованиями к максимально одинаковым размерам отдельных частей конструкции. Следовательно, данный тип упругого гасителя удара трудно реализовать в гироскопе.

Второй тип упругого гасителя удара представлен на рисунке 4.45.



Рисунок 4.45 – Консольно защемлённая балка (тип 2)

На рисунке 4.46 представлены результаты анализа упругого гасителя удара второго типа.

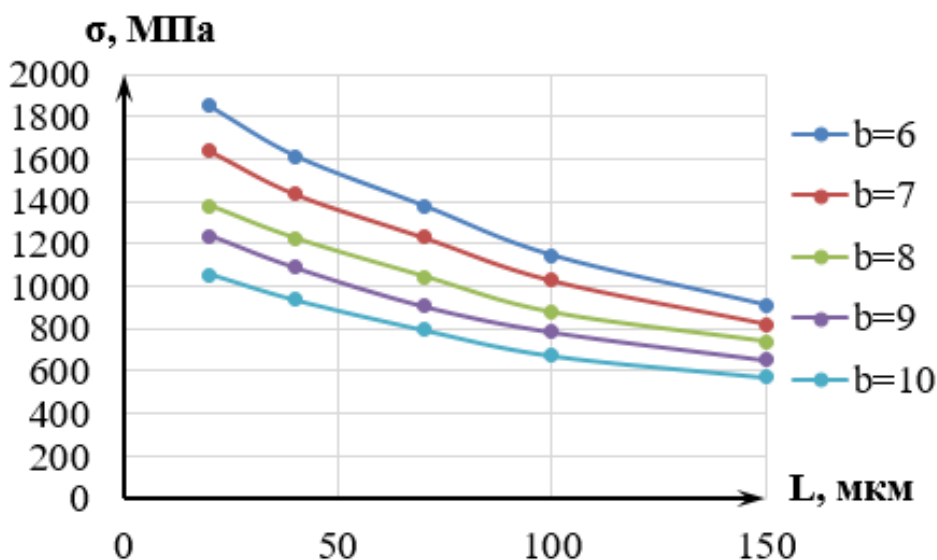


Рисунок 4.46 – Напряжения в упругом гасителе удара (тип 2)

Из графиков, представленных на рисунке 4.46 видно, что при увеличении длины и ширины, напряжения в упругом гасителе удара снижаются. При ширине упругого гасителя удара, равной 9 мм и длине 150 мм напряжения равны 738,25 МПа, что меньше максимально допустимых напряжений. При этом прогиб упругого компенсатора составляет 8,38 мм, что больше максимально допустимого зазора. Наименьшие напряжения возникают при следующих параметрах упругого компенсатора: длина 150 мм, ширина 10 мм. При этом прогиб равен 5,15 мм, что также больше максимально допустимого зазора. Также, при длине упругого компенсатора 150 мм, возникнут сложности с его размещением в конструкции гироскопа из-за габаритных ограничений. С целью уменьшения прогиба упругого компенсатора, а также уменьшения его габаритов, был исследован третий тип гасителя удара (рисунок 4.47).



Рисунок 4.47 – Тип 3-Две консольно закреплённые балки

Результаты моделирования упругого гасителя удара (тип 3), представлены на рисунке 4.48.

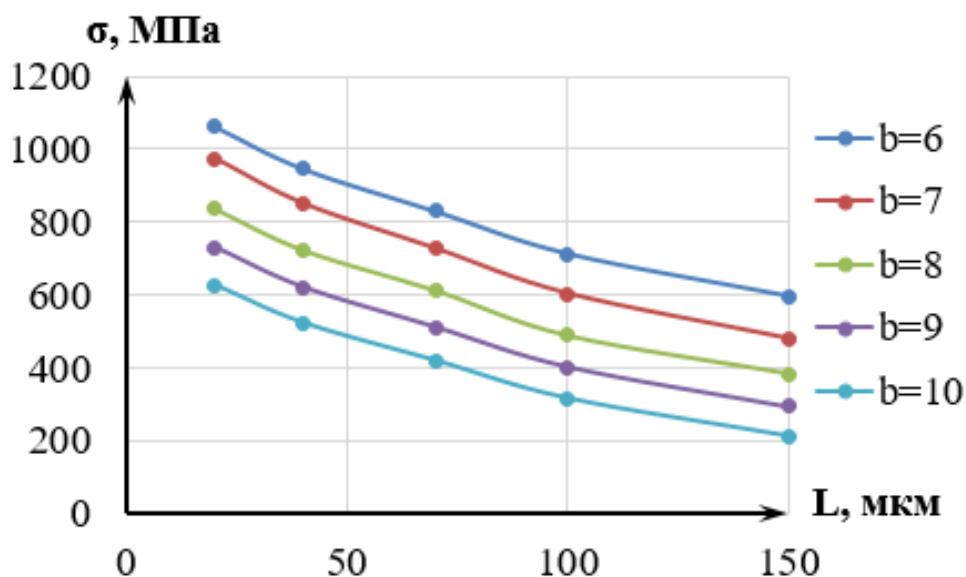


Рисунок 4.48 – Напряжения в упругом гасителе удара (тип 3)

Из рисунка 4.48 видно, что при использовании третьего типа упругого гасителя удара и при его длине от 20 до 150 мкм и при ширине от 8 до 10 мкм, можно компенсировать ударные воздействия амплитудой 30000 г. Однако при данных параметрах упругого гасителя удара его перемещения выходят за пределы максимально допустимых перемещений.

Для того, чтобы уменьшить перемещения упругого гасителя удара (тип 3), в него кроме упругих гасителей удара были добавлены жёсткие гасители удара. Идея состоит в том, что сначала происходит удар о консольно закреплённые балки, а после того как они сместятся на 0,2 мкм, погасив часть энергии удара, происходит жёсткий удар.

Исходя из того, что ширина упругих гасителей удара должна быть близка или равна ширине упругих подвесов, то выбираем ширину упругих гасителей удара равной 7 мкм. Из-за ограничения пространства в конструкции гироскопа для установки упругих гасителей удара, выбираем их длину равной 40 мкм. Исходя из вышесказанного был разработан двухступенчатый гаситель удара, представленный на рисунке 4.49.

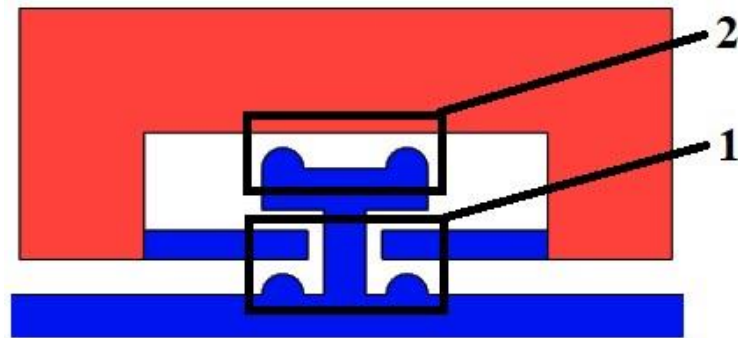


Рисунок 4.49 – Двухступенчатый гаситель удара (тип 4):

1 – упругие гасители удара; 2 – жесткие гасители удара

Конструкция с установленным двухступенчатым гасителем удара была исследована на максимальные напряжения, возникающие во время удара амплитудой 30 000g, длительностью 150 мкс при трёх начальных положениях подвижных частей конструкции. Первый вариант – начальное положение подвижных частей конструкции вдоль оси воздействия удара равно 0, начальные зазоры ( $Z_n$ ) с каждой стороны составляют 4 мкм (сенсор в нерабочем состоянии) (рисунки 4.50, 4.51, 4.52).

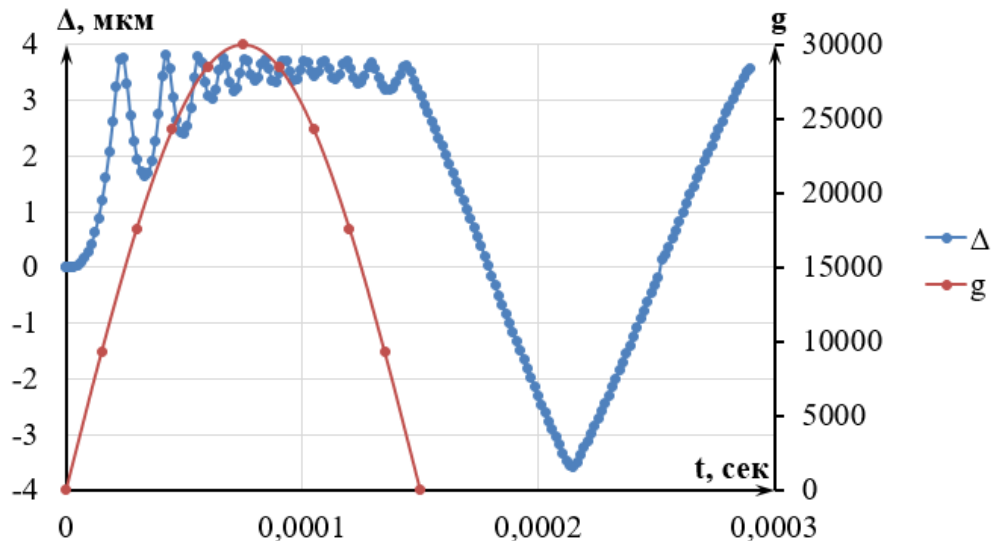


Рисунок 4.50 – Зависимость перемещений подвижной массы при ударе ( $Z_n = 4$  мкм)

Из графика на рисунке 4.50 следует, что во время действия удара, подвижная часть конструкции ударяется и отскакивает от двухступенчатого гасителя удара. Это повторяется до окончания воздействия удара. При этом в конструкции возникают напряжения (рисунок 4.51).

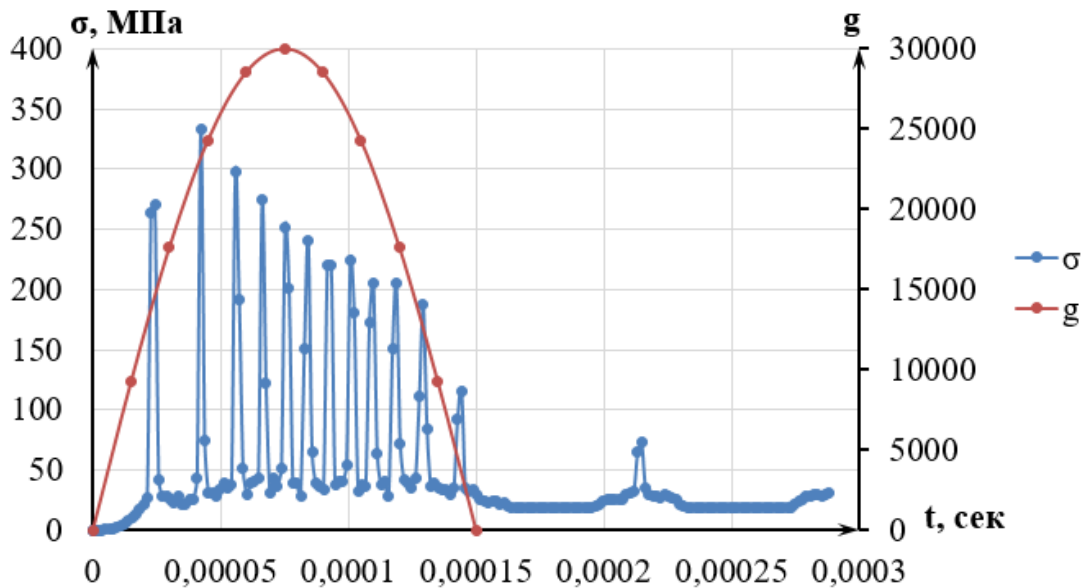


Рисунок 4.51 – Зависимость максимальных напряжений при ударе ( $Z_n = 4$  мкм)

Напряжения в конструкции также изменяются во время действия удара, при этом их максимальная величина составляет 333,75 МПа.

Момент соприкосновения подвижной части конструкции с двухступенчатым гасителем удара показан на рисунке 4.52.

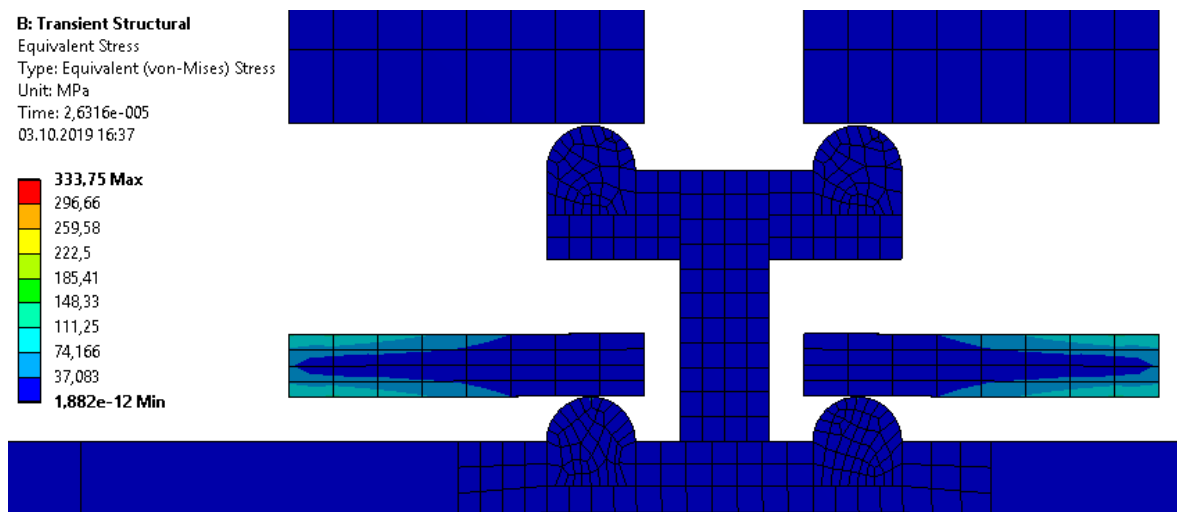


Рисунок 4.52 – Напряжения в конструкции в момент удара ( $Z_n = 4$  мкм)

Из рисунка 4.52 видно, что в момент соприкосновения подвижной массы с двухступенчатым гасителем ударов, максимальные напряжения возникают в упругом гасителе удара и не превышают максимально допустимых.

Во втором и третьем варианте моделируется рабочий режим, когда подвижная масса может находиться как на большем начальном расстоянии от двухступенчатого гасителя удара ( $Z_n = 7,5$  мкм, рисунки 4.53, 4.54, 4.55), так и на



меньшем расстоянии ( $Z_n = 0,5$  мкм, рисунки 4.56, 4.57, 4.58). С другой стороны конструкции сенсора ММГ зеркально расположены двухступенчатые гасители удара, зазоры в которых изменяются в противоположную сторону для второго и третьего варианта.

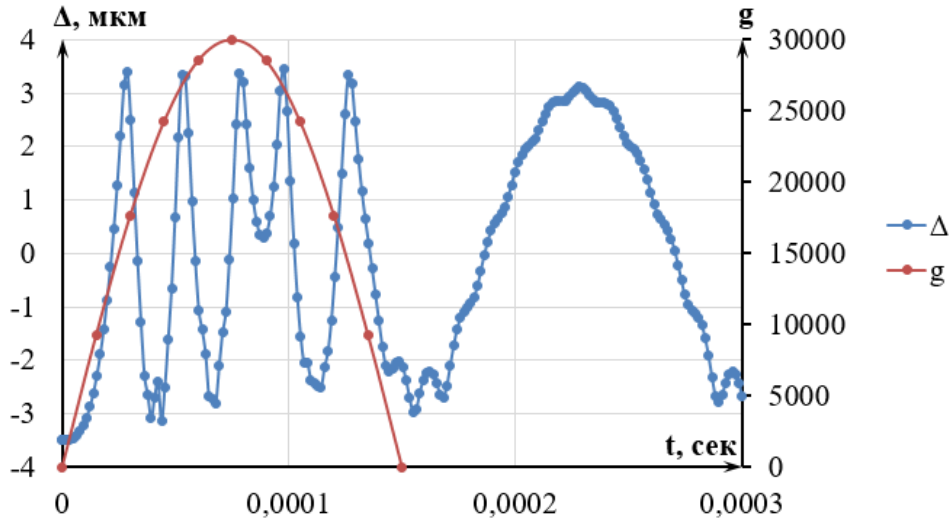


Рисунок 4.53 – Зависимость перемещений подвижной массы при ударе ( $Z_n = 7,5$  мкм)

Из рисунка 4.53 видно, что при начальном положении подвижной массы на расстоянии 7,5 мкм от двухступенчатого гасителя ударов, отскок происходит на большее расстояние, чем при нулевом начальном положении подвижной массы. При этом напряжения, возникающие в конструкции, также увеличиваются, рисунок 4.54.

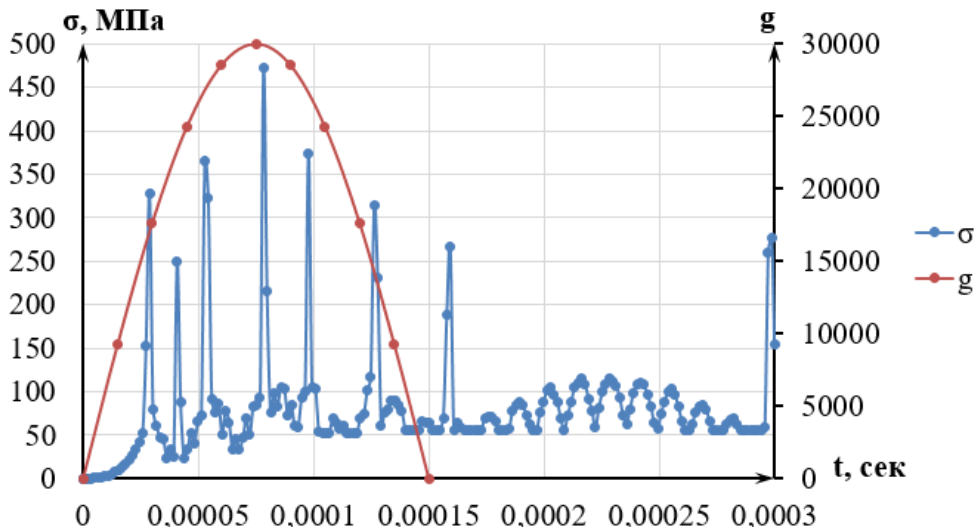


Рисунок 4.54 – Зависимость максимальных напряжений при ударе ( $Z_n = 7,5$  мкм)

Максимальные напряжения в конструкции при начальном положении подвижной массы на расстоянии 7,5 мкм от гасителя ударов составляют 474,19 МПа (рисунок 4.54).

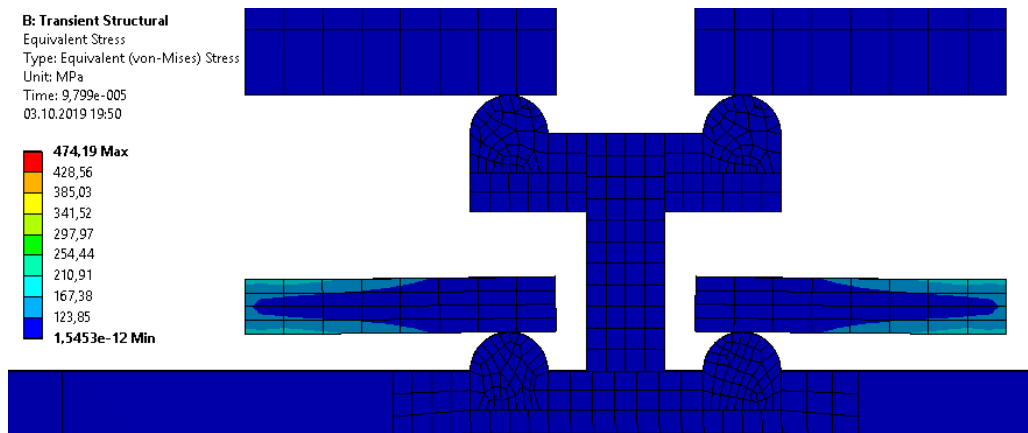


Рисунок 4.55 – Напряжения в конструкции в момент удара ( $Z_n = 7,5$  мкм)

На рисунке 4.55 показан момент удара подвижной массы о двухступенчатый гаситель ударов, из которого видно, что максимальные напряжения сосредоточены в местах закрепления упругих гасителей ударов, но не превышают максимально допустимых.

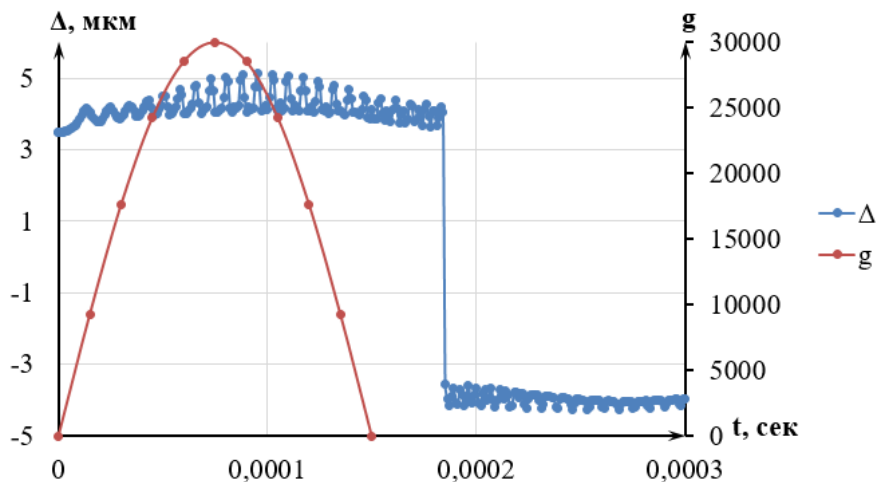


Рисунок 4.56 – Зависимость перемещений подвижной массы при ударе ( $Z_n = 0,5$  мкм)

Из графика (рисунок 4.56) видно, что подвижная часть конструкции во время действия удара ударяется и отскакивает от двухступенчатых гасителей удара. Эти соударения прекращаются при окончании воздействия удара. В конструкции при этом возникают напряжения, представленные на рисунке 4.57.

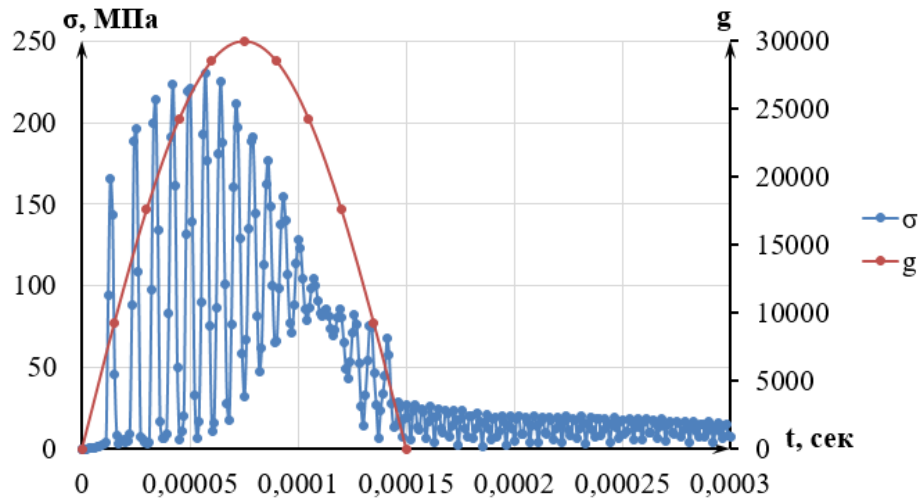


Рисунок 4.57 – Зависимость максимальных напряжений при ударе ( $Z_n = 0,5$  мкм)

Из графика, представленного на рисунке 4.57, можно сделать вывод о том, что при  $Z_n = 0,5$  мкм между подвижной и неподвижной частью конструкции во время удара напряжения будут меньше и они составляют 230,34 МПа. Таким образом, в конструкции не возникают напряжения, которые будут больше максимально допустимых и сенсор ММГ сохранит свою работоспособность. На рисунке 4.58 показаны напряжения в конструкции в момент удара.

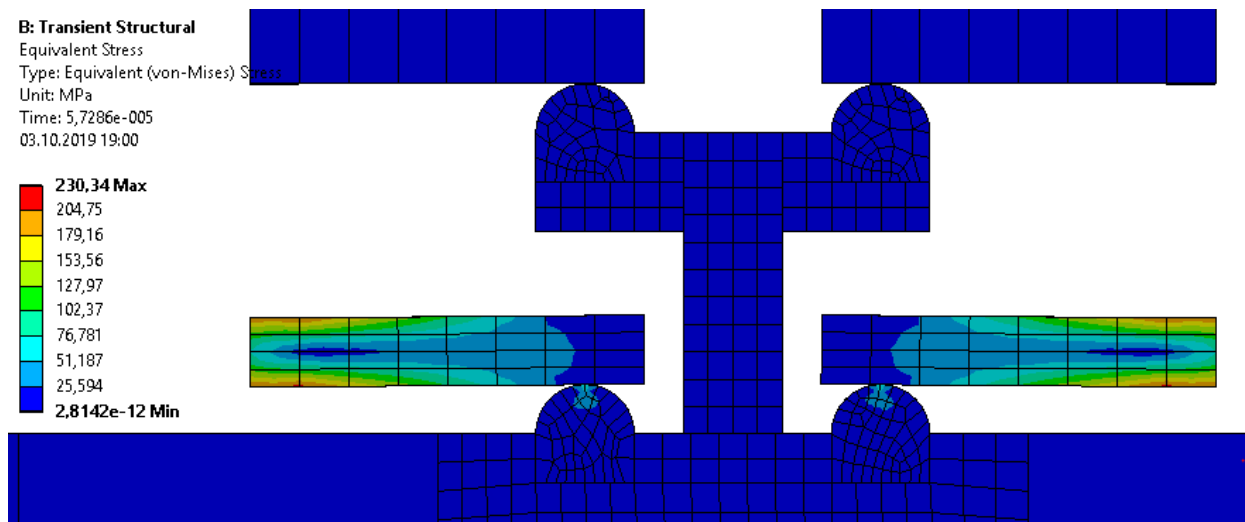


Рисунок 4.58 – Напряжения в конструкции в момент удара ( $Z_n = 0,5$  мкм)

Из рисунка 4.58 видно, что в момент соприкосновения подвижной массы с двухступенчатым гасителем ударов, напряжения сосредоточены в месте закрепления упругих гасителей удара, а также в месте соприкосновения

сферического упора с упругим гасителем удара и они не превышают максимально допустимых напряжений.

Анализируя результаты анализа, полученные при различных значениях  $Z_n$ , можно сделать вывод о том, что при воздействии на ММГ удара амплитудой 30000g, он сохраняет свою работоспособность независимо от начального положения подвижной массы, так-как максимальные напряжения возникающие при этом в конструкции, не превышают 474,19 МПа. Это меньше максимально допустимых напряжений, равных 800 МПа, что обеспечивает коэффициент запаса по напряжениям равный 1,7.

Другой проблемой является длина гребенчатых структур, так как при ударах, перемещения гребёнок выходят за пределы допустимого зазора равного 4 мкм.

Следовательно, необходимо найти оптимальные размеры гребенчатых структур, при которых они не будут соприкасаться между собой во время ударов.

Для увеличения скорости расчёта, добавим гребенчатые структуры к уже существующей эквивалентной массе гироскопа в упругом подвесе, которая также содержит двухступенчатые гасители ударов (рисунок 4.59).

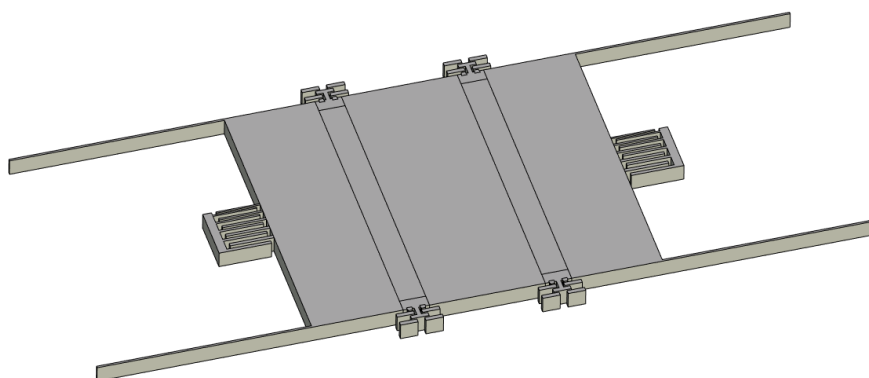


Рисунок 4.59 – 3D модель для исследования параметров гребенчатых структур

В конструкции меняются ширина гребёнок  $b$  и их длина  $L$ . Изменение параметра  $b$  происходит в пределах от 4 до 7 мкм. Длина гребёнок меняется в пределах от 19 до 266 мкм. Результаты анализа представлены на рисунке 4.60.

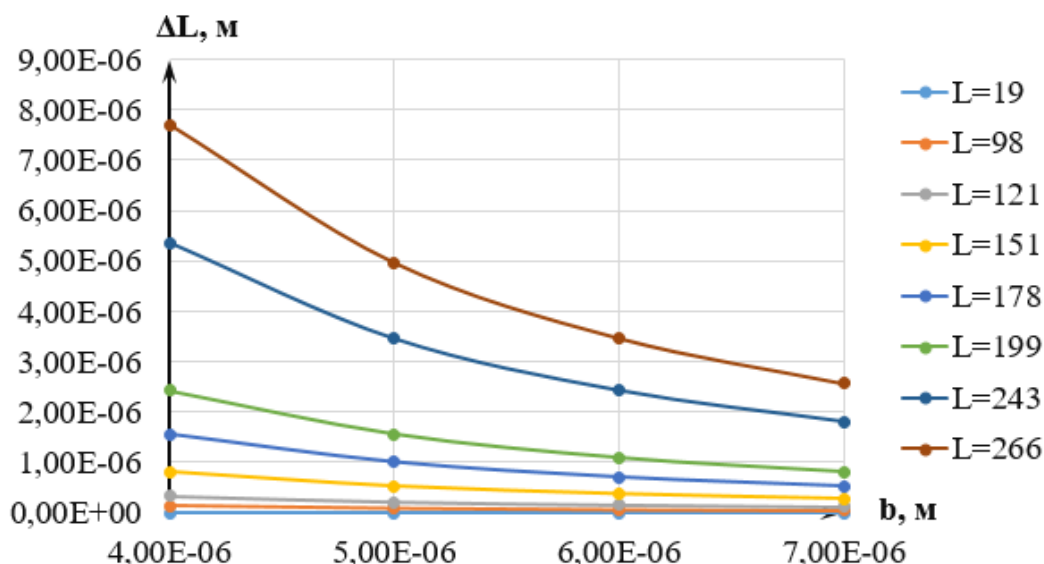


Рисунок 4.60 – Исследование максимальных перемещений гребёнок при изменении параметров  $L$  и  $b$

Из графиков, представленных на рисунке 4.60 видно, что при уменьшении длины  $L$  гребёнок, а также при увеличении ширины  $b$ , уменьшаются их перемещения в результате воздействия на них ускорения амплитудой  $30000g$ . При зазоре  $4$  мкм длина гребёнки не должна превышать  $120$  мкм, а её ширина  $4$  мкм, что применимо для гребёнок, которые служат для возбуждения первичных колебаний, где ёмкость изменяется от изменения площади пересечения ГС, а зазор остаётся постоянным.

По оси вторичных колебаний, используются гребенчатые структуры с изменяемым зазором между обкладками гребёнок. В этом случае более рационально увеличить минимальный зазор между гребёнками до  $4,5$  мкм и длину до  $150$  мкм. При этом получим большее изменение ёмкости с единицы площади, занимаемой гребенчатыми структурами, чем при зазоре  $4$  мкм и длине гребёнки  $120$  мкм.

Исходя из проведённых анализов, в конструкции гироскопа изменяем размер гребёнок и устанавливаем двухступенчатые гасители удара (рисунок 4.61).

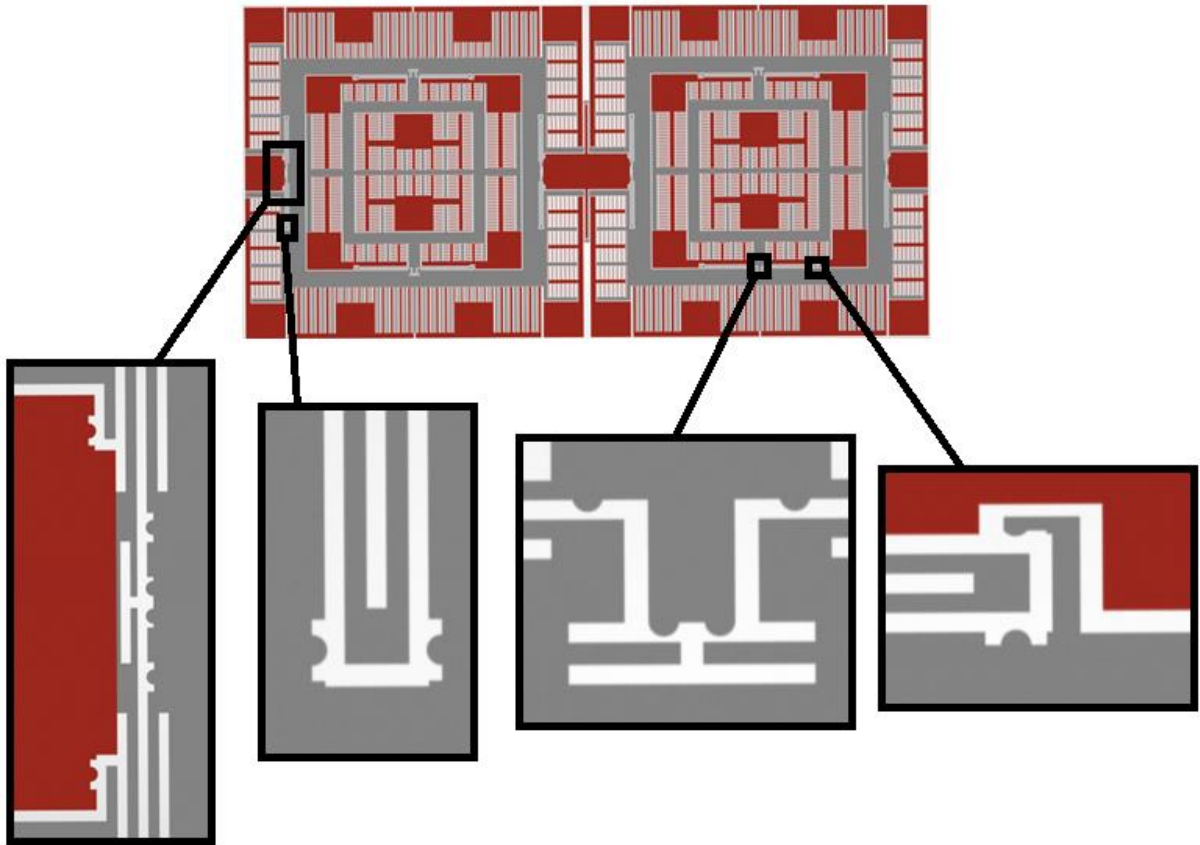


Рисунок 4.61 – Оптимизированная конструкция сенсора гироскопа

#### 4.5 Методика проектирования микромеханического гироскопа, устойчивого к ударам

На основании проведённых исследований была предложена методика проектирования микромеханических гироскопов, устойчивых к ударным и вибрационным воздействиям (рисунок 4.62).



Рисунок 4.62 – Методика проектирования ММГ, устойчивого к механическим воздействиям

Методика проектирования, изображённая на рисунке 4.62, содержит следующие шаги.

Шаг 1. Задаются условия эксплуатации, максимальные габариты конструкции, диапазон измерения.

Шаг 2. Разрабатывается функциональная схема ММГ, на основании которой составляется математическая модель.

Шаг 3. Задаются технологические нормы изготовления:

- Максимально допустимые габариты конструкции;
- Минимальные размеры конструкции;
- Минимальные зазоры, которые определяют расстояние между подвижными и неподвижными частями конструкции;
- Материалы из которых будет изготавливаться механическая часть ММГ.

Шаг 4. На основании функциональной схемы, строится 3D модель ММГ. Затем проводится КЭ анализ в результате которого определяются собственные частоты, формы колебаний ММГ, рассчитываются жёсткости упругих подвесов, находится масса подвижных частей конструкции. Эти данные передаются на Шаг 5.

Шаг 5. В компьютерную модель, составленную в программе MATLAB/Simulink на основе математической модели вносятся значения жёсткостей упругих подвесов, а также массы подвижных рамок конструкции. Затем проводится анализ влияния вибрации и ударов на ММГ. Результатом этого анализа являются АЧХ ММГ, перемещения подвижных рамок вдоль осей X, Y, Z. Если в результате анализа перемещения конструкции составляют больше максимально допустимых, то необходимо перейти на Шаг 6.

Шаг 6. Для ускорения расчётов, производится упрощение геометрической модели. Строится КЭ сетка. Накладываются ограничения на конструкцию ММГ: ограничение перемещения, задание симметрии (при наличии), определение мест контактов между подвижными и неподвижными частями конструкции, задание внешнего воздействия (удара) в виде ускорения амплитудой 30000 g. Результатом являются напряжения, возникающие в конструкции во время



соприкосновения подвижных частей конструкции с неподвижными. Если напряжения превышают максимально допустимые напряжения равные 800 МПа для кремния, то осуществляется переход на шаг 7.

Шаг 7. Определяются места для установки двухступенчатых гасителей удара с целью уменьшения напряжений в местах соприкосновения подвижных частей конструкции с неподвижными.

Шаг 8. Проводится КЭ анализ с целью определения максимальной длины гребенчатых структур, при которой не происходит их соприкосновения между собой.

По результатам проведённых исследований, можно сделать вывод о том, что данная методика может применяться для разработки ММГ, устойчивых к ударным воздействиям амплитудой до 30000g.

#### **Выводы по главе 4**

1) Разработана математическая модель сенсора ММГ и проведено её моделирование в программе Simulink. При воздействии на конструкцию удара амплитудой 30000g перемещения инерционных тел составляют больше максимально допустимых зазоров.

2) Методом конечных элементов определены максимальные напряжения, которые возникают в конструкции при соприкосновении подвижных и неподвижных частей во время воздействия удара амплитудой от 1500g до 30000g. Возникающие напряжения по всем осям превышают допустимое значение.

3) Исследованы 4 типа гасителей удара, которые можно применять в различных микромеханических сенсорах. Наилучшими свойствами обладает двухступенчатый гаситель удара, который совмещает в себе как упругие, так и жёсткие гасители удара. В момент удара срабатывают упругие гасители удара, после их отклонения происходит жёсткий удар. В результате такой комбинации

максимальные напряжения, возникающие в конструкции при воздействии удара амплитудой 30000g меньше допустимых значений.

4) На основании сделанных исследований и выводов была доработана конструкция сенсора однокомпонентного ММГ, который устойчив к механическим воздействиям. При этом, габариты конструкции не увеличились, технология изготовления не изменилась и не требует доработок.

5) Разработана методика проектирования ММГ, позволяющая расширить диапазон его использования при возникающих ударных воздействиях до 30000 g.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результатом диссертационной работы являются разработанные принципы построения и проведённый анализ характеристик ММГ устойчивых к ударам и вибрациям.

Проведён обзор существующих литературных источников, описывающих микромеханические гироскопы, их функциональные возможности и конструктивные решения, которые применяются при проектировании сенсоров, работающих в условиях наличия вибрации и ударов.

Разработана математическая модель двухкомпонентного ММГ, учитывающая действия постоянных и вибрационных ускорений. На основании математической модели был выполнен анализ динамических характеристик механической структуры ММГ в условиях вибрационного воздействия.

Используя математическую модель двухкомпонентного ММГ было проведено компьютерное моделирование в программе MATLAB/Simulink, которое показало, что, используя анти-фазные движения в канале первичных колебаний можно устранить влияние вибрационных воздействий с частотой до 2 кГц, при собственных резонансных частотах  $f_1 = 10645,08$  КГц и  $f_2 = 10637,4$  кГц.

Разработанная КЭ модель двухкомпонентного ММГ позволила определить, что напряжения в конструкции, возникающие во время удара амплитудой 3500g и длительностью 500 мкс не превышают максимально допустимых, но происходит соприкосновение гребенчатых структур между собой, что может привести к потере работоспособности устройства.

Проведённые испытания показали, что все исследованные двухкомпонентные микромеханические гироскопы LL-типа сохраняют свою работоспособности в диапазоне температур от минус 40 до плюс 105 °С. Время готовности сенсора составляет не более 3 с. Также было подтверждено, что при использовании анти-фазного движения рамок, вибрация амплитудой 9g в частотном диапазоне от 20 Гц до 2000 Гц не вызывает резонансных явлений и не влияет на работоспособность устройства. При испытании на удар амплитудой

3500g и длительностью 500 мкс было определено, что происходит касание подвижных частей конструкции с неподвижными и нарушается работоспособность устройства. Восстановление работоспособности происходит через 2,1 с. Таким образом ММГ производит измерения угловой скорости в диапазоне от минус 300 град/с до +300 град/с, максимальная динамическая погрешность в диапазоне от минус 300 град/с до 300 град/с не превышает  $\pm 10\%$ , максимальная относительная нелинейность не превышает  $\pm 1\%$ .

На основании проведённых исследований двухкомпонентного ММГ, с целью увеличения диапазона работоспособности при ударных воздействиях амплитудой 30000g и длительностью 150 мкс была разработана математическая модель однокомпонентного гироскопа, на основании которой была создана компьютерная модель в программе MATLAB/Simulink. Исследования компьютерной модели показали, что диапазон перемещения подвижных частей конструкции превышает допустимый зазор равный 4 мкм.

Разработана КЭ модель однокомпонентного ММГ, с помощью которой определили, что при воздействии удара амплитудой 30000g и длительностью 150 мкс, в конструкции возникают напряжения, которые больше максимально допустимых.

Разработана КЭ модель двухступенчатого гасителя ударов, при использовании которого максимальные напряжения, возникающие в конструкции при ударе амплитудой 30000g, длительностью 150 мкс не превышают 474,19 МПа, что меньше максимально допустимых напряжений равных 800 МПа и таким образом обеспечивается запас по максимальным напряжениям равный 1,7.

Разработана КЭ модель с двухстепенными гасителями ударов с помощью которой было проведено исследование влияния ударных воздействий на длину гребенчатых структур. Результатом являются рекомендации по выбору оптимальных параметров длины и ширины подвижных гребенчатых структур, при котором не будет происходить их соприкосновения с неподвижными гребенчатыми структурами.

**СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ**

- АЧХ – амплитудно-частотная характеристика;  
ВИ – виртуальный прибор;  
ГС – гребенчатая структура;  
ДА – дисперсия Аллана;  
КНИ – кремний на изоляторе;  
КЭ – конечный элемент;  
КЭС – кремниевый электромеханический сенсор;  
ЛАЧХ – логарифмическая амплитудно-частотная характеристика;  
ММГ – микромеханический гироскоп;  
МЭМС – микроэлектромеханические системы;  
ПиМИ – программа и методика испытаний;  
СПМ – спектральная плотность мощности;  
УП – упругий подвес;  
ЦКП – центр коллективного пользования;  
ШСВ – случайная широкополосная вибрация.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

- 1) Сысоева С. Автомобильные гироскопы / С. Сысоева // Компоненты и технологии. – 2007. – №1. – С. 58 – 66.
- 2) Тимошенко С. П. Применение МЭМС-сенсоров в системах навигации и ориентации подвижных объектов / С.П. Тимошенко, А.П. Кульчицкий // Известия вузов. Электроника. – 2012. – №6. - С.51 – 56.
- 3) Распопов В. Я. Микромеханические приборы: учебное пособие / В.Я. Распопов. – М.: Машиностроение, 2007. – 400 с.
- 4) Боронахин А. М. Исследование микромеханических чувствительных элементов в задачах диагностики рельсового пути / А. М. Боронахин [и др.] // Гироскопия и навигация. – 2012. – № 1. – С. 57 – 66.
- 5) Биндер Я. И. Мобильная инклинометрическая станция на основе микромеханических чувствительных элементов для съемки траекторий стволов группы скважин подземной выработки / Я. И. Биндер [и др.] // Гироскопия и навигация. – 2013. – № 1. – С. 95 – 106.
- 6) Коновалов С. Ф. Инерциальный метод измерения перемещений строительных свай в процессе забивки / С. Ф. Коновалов, В. П. Подчезерцев // Гироскопия и навигация. – 2013. – № 4. – С. 14 – 23.
- 7) Пешехонов В. Г. Микромеханические инерциальные преобразователи. Современное состояние и применение в военной технике / В. Г. Пешехонов, Л. П. Несенюк, Д. Г. Грязин // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2009. – № 3. – С. 28 – 32.
- 8) Lutwak, R. Precise Robust Inertial Guidance for Munitions: Advanced Inertial Micro Sensors (PRIGM: AIMS) Proposers' Day / R. Lutwak // DARPA Microsystems Technology Office. – 2015. – 17 p.
- 9) Лестев, А. М. Современное состояние теории и практических разработок микромеханических гироскопов / А. М. Лестев, И. В. Попова // Гироскопия и навигация. – 1998. – № 3. – С. 81 – 94.

- 10) Евстифеев М. И. Вопросы обеспечения стойкости микромеханических гироскопов при механических воздействиях / М. И. Евстифеев, И. Б. Челпанов // Гироскопия и навигация. – 2013. – № 1. – С. 119 – 133.
- 11) Barbour N. Inertial MEMS System Applications / N. Barbour [et al.] // Advances in Navigation Sensors and Integration Technology. RTO LECTURE SERIES 232. – 2004. – pp.7-1–7-12.
- 12) Феодосьев В.И. Соппротивление материалов / В.И. Феодосьев. – М. Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 1999. т.2.
- 13) Srikar V. T. The reliability of microelectromechanical systems (MEMS) in shock environments / V.T. Srikar, S.D. Senturia // Journal of Microelectromechanical Systems. – 2002. – vol. 11 – pp. 206 – 214.
- 14) Inman D.J. Engineering Vibration / D.J. Inman // Prentice Hall. – 2000. – 2 ed.
- 15) Yee J.K. Shock resistance of ferromagnetic micromechanical magnetometers / J.K. Yee, H.H. Yang, J.W. Judy // Sensors and Actuators A: Physical. – 2003. – vol. 103 – pp. 242 – 252.
- 16) Turner J.D. Sensors for automotive telematics / J.D. Turner, A.L. Austin // Measurement Science and Technology. – 2000. – vol. 11 – pp. 58 – 79.
- 17) Yazdi N. Micromachined inertial sensors / N. Yazdi, F. Ayazi, K. Najafi // Proceedings of the IEEE. – 1998. – vol. 86 – pp. 1640 – 1659.
- 18) Sparks D.R. Application of MEMS technology in automotive sensors and actuators / D.R. Sparks // Proceeding of Micromechatronics and Human Science. – 1998. – pp. 9 – 15.
- 19) Jean-Michel S. Current Capabilities of MEMS Capacitive Accelerometers in a Harsh Environment / S. Jean-Michel // IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine. – 2006. – vol. 21 – pp. 29 – 32.
- 20) Brown T.G. Strap-down microelectromechanical (MEMS) sensors for high-g munition applications / T.G. Brown [et al.] // IEEE Transactions Magnetics. – 2001. – vol. 37 – pp. 336 – 342.

- 21) Scaysbrook I.W. A miniature, gun-hard MEMS IMU for guided projectiles, rockets and missiles / I.W. Scaysbrook, S.J. Cooper, E. T. Whitley // Position Location and Navigation Symposium. – 2004. – pp. 26 – 34.
- 22) Brown T.G. Harsh military environments and microelectromechanical (MEMS) devices / T.G. Brown // IEEE Sensors. – 2003. – vol. 2 – pp. 753 – 760.
- 23) Sievers L.A. Linear control design for active vibration isolation of narrow band disturbances / L.A. Sievers, A.H. von Flotow // IEEE Decision and Control. – 1988. – vol .2 – pp. 1032 – 1037.
- 24) Wong J.Y. Theory of ground vehicles / J.Y. Wong // John Wiley & Sons. – 1993. – 2 ed.
- 25) Wu J. Stevens Environmental vibration assessment and its applications in accelerated tests for medical devices / J. Wu, R.R. Zhang, Q. Wu, K.K. Stevens // Journal of Sound and Vibration. – 2003. – vol. 267 – pp. 371 – 383.
- 26) VIBRATION EXCITER Type 4809 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.bksv.com/en/products/shakers-and-exciters/measurement-exciters/vibration-exciter-type-4809>.
- 27) Woodard S.E. Measured spacecraft dynamic effects on atmospheric science instruments / S.E. Woodard, D.A. Gell, R.R. Lay // IEEE Geoscience and Remote Sensing. – 1998. – vol. 36 – pp. 359 – 367.
- 28) Zhao Y. Effects of G-jitter on Experiments Conducted in Low-Earth Orbit: A Review / Y. Zhao and J. Alexander // Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, Nevada, USA. – 2003.
- 29) Wilke P. Whole-spacecraft vibration isolation for broadband attenuation / P. Wilke, C. Johnson, P. Grosserode, D. Sciulli // IEEE Aerospace. – 2000. – vol. 4 – pp. 315 – 321.
- 30) Veilleux E. Vibration Control of Printed-Circuit Boards in a Dynamic Environment / E. Veilleux // IEEE Parts, Materials and Packaging. – 1970. – vol. 6 – pp. 100 – 105.



31) Weglein R.D. The Vibration Sensitivity of VHF Quartz Crystals for Missile Applications / R.D. Weglein // Annual Symposium on Frequency Control. – 1984. – vol. 38 – pp. 73 – 79.

32) Nguyen, C. The Harsh Environment Robust Micromechanical Technology (HERMiT) Program: Success and Some Unfinished Business // Microwave Symposium Digest (MTT), 2012 IEEE MTT-S International. – 2012. – pp. 1 – 3.

33) Евстифеев М.И. Методы повышения стойкости микромеханических гироскопов к механическим воздействиям / М. И. Евстифеев, Д. П. Елисеев, И. Б. Челпанов // Гироскопия и навигация. – 2014. – № 4. – С. 56 – 68.

34) Weinberg H. Gyro Mechanical Performance: The Most Important Parameter / H. Weinberg // Technical Article MS-2158. Analog Devices, Inc. – 2011. – pp.1 – 5.

35) Sang Won Yoon Analysis and wafer-level design of a high-order silicon vibration isolator for resonating MEMS devices / Sang Won Yoon [et al.] // J. Micromech. Microeng. – No. 21. – 2011. – pp. 1 – 12.

36) Habibi S. Gun Hard Inertial Measurement Unit based on MEMS capacitive accelerometer and rate sensor / S. Habibi [et al.] // Proceedings of IEEE/ION PLANS. – 2008. – pp. 232 – 237.

37) Елисеев Д.А. Повышение виброустойчивости микромеханического гироскопа RR-типа: Диссертация канд. техн. наук: 16.12.15/Елисеев Даниил Павлович. – Санкт-Петербург., 2015. – 142 с.

38) Евстифеев М.И. Анализ прочности упругих подвесов микромеханических гироскопов / М.И. Евстифеев, Д.В. Розенцвейн, И.Б. Челпанов // Гироскопия и навигация. – 2009. – № 3. – С. 22 – 34.

39) ADXRS150. Single Chip Yaw Rate Gyro with Signal Conditioning / Data Sheet. Analog Devices. – 2010. – 12 p.

40) Lapadatu D. SAR500 – A High-Precision High-Stability Butterfly Gyroscope with North Seeking Capability / D. Lapadatu [et al.] // Proceedings of IEEE/ION PLANS. – 2010. – pp. 6 – 13.

41) Barbour N. Micro-Electromechanical Instrument and Systems Development at Draper Laboratory / N. Barbour [et al.] // 3rd Saint Petersburg International Conference of Integrated Navigation Systems. – 1996. – Part 1. – pp. 3 – 10.

42) Patent 6443008 United States, Int. Cl. G01P 9/04. Decoupled Multi-Disk Gyroscope / K. Funk, M. Lutz, W. Frey; assignee Robert Bosch GmbH, – Appl. No. 09/507583; filed 19.02.2000; published 03.09.2002. – 11 p.

43) Patent 5635640 United States, Int. Cl. G01P 15/08. Micromachined Device With Rotationally Vibrated Masses / J. A. Geen; assignee Analog Devices, Inc. – Appl. No. 471023; filed 06.06.1995; published 03.06.1997. – 8 p.

44) Patent 8266961 United States, Int. Cl. G01C 19/56. Inertial Sensors With Reduced Sensitivity To Quadrature Errors And Micromachining Inaccuracies / J. Kuang, J. A. Geen ; assignee Analog Devices, Inc. – Appl. No. 12/535477; filed 04.08.2009; published 18.09.2012. – 17 p.

45) ADXRS646. High Stability, Low Noise Vibration Rejecting Yaw Rate Gyroscope / Data Sheet. Analog Devices. – 2012. – 1 p.

46) Некрасов, Я. А. Улучшение эксплуатационных характеристик отечественного микромеханического гироскопа RR-типа / Я. А. Некрасов [и др.] // Материалы XXI Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. – 2014. – С. 226 – 235.

47) Geen, J. A. Progress in Integrated Gyroscopes / J. A. Geen // IEEE A&E Systems magazine. – 2004. – pp. 12 – 17.

48) Евстифеев, М. И. Вопросы обеспечения стойкости микромеханических гироскопов при механических воздействиях / М. И. Евстифеев, И. Б. Челпанов // Гироскопия и навигация. – 2013. – № 1. – С. 119 – 133.

49) Евстифеев М.И. Исследование электромеханической модели микромеханического гироскопа R-R типа с учетом вибраций основания / М. И. Евстифеев, А. С. Ковалев, Д. П. Елисеев // Гироскопия и навигация. – 2013. – № 3. – С. 24 – 32.

50) Lestev M.A. The influence of nonlinear factors on dynamics and accuracy of micromechanical gyroscopes // Proceedings of 14th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems. – 2007. – pp. 24 – 25.

51) Евстифеев, М. И. Упругие подвесы инерционных тел в точном приборостроении / М. И. Евстифеев // Гироскопия и навигация. – 2007. – № 2. – С. 63 – 76.

52) Патент 2447403 Российская Федерация, МПК G01C 19/56. Микромеханический гироскоп / Я. А. Некрасов. – 2010150706/28; заявл. 07.12.2010; опубл. 10.04.2012; Бюл. № 10. – 10 с.

53) Евстифеев М.И. Результаты испытаний микромеханических гироскопов при механических воздействиях / М. И. Евстифеев, Д. П. Елисеев, А. С. Ковалев, Д. В. Розенцвейн // Гироскопия и навигация – 2011. – № 1. – С. 49 – 59.

54) Челпанов И.Б. Вопросы обеспечения стойкости микромеханических гироскопов при механических воздействиях / И.Б. Челпанов, М.И. Евстифеев // Гироскопия и навигация. – 2011. – №1. – С. 37 – 48.

55) Патент 2693010 Российская федерация, МПК G01P 15/135. Трёхосевой микромеханический акселерометр / Т.Г. Нестеренко. – 2018143342; заявл. 07.12.2018; опубл. 01.07.2019; Бюл. №19.

56) Евстифеев М.И. Исследование электромеханической модели ММГ RR-типа с учётом вибрации основания / М.И. Евстифеев, А.С. Ковалёв, Д.П. Елисеев // Гироскопия и навигация. – 2013. – №3. – С. 37 – 46.

57) Лестев А.М. О комбинационных резонансах в динамике ММГ/А.М. Лестев // Гироскопия и навигация. – 2014. – №3. – С. 53 – 58.

58) Евстифеев М.И. Критерий качества и вопросы оптимизации конструкций микромеханических гироскопов RR-типа /М.И. Евстифеев, И.Б. Челпанов // Гироскопия и навигация. – 2012. – №1. – С.122 – 132.

59) Евстифеев М.И. Особенности испытаний ММГ RR-типа на ударные воздействия / М.И. Евстифеев [и др.] // Гироскопия и навигация. – 2011. – №3. – С. 42 – 51.

60) Евстифеев М.И. Результаты испытаний ММГ при механических воздействиях / М.И. Евстифеев [и др.] // Гироскопия и навигация. – 2011. – №1. – С. 49 – 58.

61) Барбин Е.С. Динамика многокомпонентного микромеханического гироскопа-акселерометра с развязывающими рамками: Диссертация канд. техн. наук: 16.12.16/Барбин Евгений Сергеевич. – Новосибирск.,2016. – 200 с.

62) Евстифеев М.И. Анализ прочности упругих подвесов микромеханических гироскопов /М.И. Евстифеев, Д.В. Розенцвейн, И.Б. Челпанов // Гироскопия и навигация. – 2009. – №.3 – С.22 – 34.

63) Евстифеев М.И. Анализ контактных взаимодействий в микромеханических гироскопах /М.И. Евстифеев, Розенцвейн Д.В. // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2010. – №4. – С.46 – 50.

64) Евстифеев М.И. Оптимизация расположения упоров в микромеханическом гироскопе /М.И. Евстифеев, Д.В. Розенцвейн // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2010. – №4. – С.93 – 96.

65) Gao Y. Design and Implementation of a Dual-Mass MEMS Gyroscope with High Shock Resistance / Y. Gao, L. Huang, X. Ding, H. Li // Sensors. – 2018. – vol.18 – Номер статьи 1037.

66) ОАО КОНЦЕРН ЦНИИ «ЭЛЕКТРОПРИБОР» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.elektropribor.spb.ru>.

67) Пешехонов В.Г. Результаты испытаний установочной партии ММГ RR-типа. /В.Г.Пешехонов [и др.] // Гироскопия и навигация. – 2013. – №1. – С. 57 – 68.

68) Кафедра микроэлектроники НИУ «МИЭТ» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://cathedra.me/cathedra/development/>.

69) АО Инерциальные технологии «Технокомплекса» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://inertech.ru/ru/mems-development.html>

70) 62) ПАО АНПП «ТЕМП-АВИА» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.temp-avia.ru/index-26.htm>.

- 71) 63) ООО «Совтест АТЕ». Системы мониторинга [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.sovtest.ru/equipment/monitoring/>.
- 72) Yole Development. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.yole.fr>.
- 73) Colibrys. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.colibrys.com>.
- 74) Endveco. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://endveco.com>.
- 75) Acar C., MEMS Vibratory Gyroscope: Structural Approaches to Improve Robustness / C. Acar, A. Shkel -Berlin: Springer. – 2009. – 262 p.
- 76) Schofield R.A. Anti-Phase Driven Rate Gyroscope with Multi-Degree of Freedom Sense Mode / R.A. Schofield, A.A. Trusov, A.M. Shkel // Proceedings of the International Conference on transducers: Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, Lyon, France. –10–14 June 2007. – pp. 1119–1202.
- 77) Yoona S.W. Vibration-induced errors in MEMS tuning fork gyroscopes. / S.W. Yoona, S. Lee, K. Najafia // Sensors and Actuators A: Physical. – 2012. – №180. – pp.32 – 44.
- 78) Zimmermann S. Single Axis gyroscope Prototype Base on a Micromechanical Coriolis Rate Sensor / S. Zimmermann [et. al] // Proceedings of Symposium Gyro Technology, Stuttgart, Germany. – 2006. – pp.9.0 – 9.9.
- 79) Hao L.V. MEMS Instrument Accuracy in Automated Vehicle Control / L.V. Hao, A.N. Koleda, E.S. Barbin, T.G. Nesterenko // Journal of Physics: Conference Series.- 2018. Volume 1118, Issue 1.
- 80) Wang W. Design of micromachined vibratory gyroscope with two degree-of-freedom drive-mode and sense-mode. W. Wang, X.Y. Lv, F. Sun // IEEE Sens. J. – 2012. – № 12. – pp. 2460 – 2464.
- 81) Baranov P.F. A novel multiple-axis MEMS gyroscope-accelerometer with decoupling frames / P. Baranov, T. Nesterenko, E. Barbin, A. Koleda, S. Tanaka, T. Tsukamoto, I. Kulinich, D. Zykov, A. Shelupanov // Sensor Review.- 16 September 2019, Issue 5, Volume 39, Pages 670-681.

82) Zorina E.V. New Architecture and Configuration of Microelectromechanical Acceleration Measuring Gyro with Intermediate Bodies / E.V. Zorina, T.G. Nesterenko, P.F. Baranov, A.N. Koleda, E.S. Barbin // 30th Eurosensors Conference. – 2016. – Vol. 168. – pp. 904 – 907.

83) Патент 2630542 Российская федерация, МПК G01C 19/56. Интегральный микромеханический гироскоп / Т.Г. Нестеренко Т.Г. – 2016124405; заявл. 20.06.2016; опубл. 11.09.2017; Бюл. №26.

84) Нестеренко Т.Г. Электродная структура микромеханического гироскопа / Т.Г. Нестеренко [и др.] // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2012 – №7. – С. 62 – 66.

85) Ильинский, В. С. Защита аппаратов от динамических воздействий. – М.: «Энергия», 1970. – 320 с.

86) Nesterenko T.G. Integrated microelectromechanical gyroscope under shock loads / T.G. Nesterenko, E.S. Barbin, A.N. Koleda // 6th International Conference on Modern Technologies for Non-Destructive Testing. – 2017. – Vol. 289. – Issue 1.

87) Лысенко И.Е. Анализ чувствительности микромеханического микрогироскопа к вибрационным воздействиям / И.Е. Лысенко, А.Н. Коледа // Современные наукоемкие технологии. – 2018 - № 12, ч.1 – С. 95 –101.

88) Nesterenko T.G. Temperature error compensation in two-component Micromechanical Gyroscope / T.G. Nesterenko, E.S. Barbin, A.N. Koleda, S.V. Uchaikin // IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology.- 2014.- Volume 4, Issue 10.- p. 1598-1605.

89) Старовойтов Э. И. Сопротивление материалов. – М.: Физматлит, 2008. – С. 384.

90) Центр коллективного пользования «Импульс» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://tusur.ru/ru/o-tusure/struktura-i-organy-upravleniya/departament-nauki-i-innovatsiy/nauchnoe-upravlenie/tsentry-kollektivnogo-polzovaniya/tsentr-kollektivnogo-polzovaniya-impuls>.

## Приложение А

### Программа и методика испытаний экспериментальных образцов двухкомпонентного микромеханического гироскопа

#### 1 Общие положения

1.1 Настоящая программа и методика испытаний предназначена для проведения исследовательских испытаний экспериментального образца двухкомпонентного ММГ (далее – объект испытаний), разработанного и изготовленного в ФГАОУ ВО НИ ТПУ (г. Томск).

1.2. Цель испытаний:

Исследование технических характеристик объекта испытаний.

1.3 Условия предъявления объекта испытаний на испытания.

1.3.1 Испытания проводятся на трех объектах (3) испытаний.

1.3.2 Объекты испытаний предъявляются на испытания в следующей комплектности:

- объект испытаний;
- комплект эскизной конструкторской документации на объект испытаний;
- настоящая программа и методика испытаний.

#### 2 Общие требования к условиям, обеспечению и проведению испытаний

2.1 Место проведения испытаний

Испытания проводятся в лаборатории микросистемной техники Отделения электронной инженерии ФГАОУ ВО НИ ТПУ.

2.2 Требования к средствам проведения испытаний

Перечень средств проведения испытаний приведён в приложении А

Средства измерений, подлежащие государственному метрологическому контролю и надзору, должны быть проверены по ПР 50.2.006, а неподлежащие государственному метрологическому контролю и надзору – калиброваны по ПР 50.2.016 или проверены.

Испытательное оборудование должно быть аттестовано по ГОСТ Р 8.568.

2.3 Требования к условиям проведения испытаний (состояние окружающей, искусственно создаваемой или моделируемой среды и т.п.)

Испытания проводят в нормальных климатических условиях:

температура окружающей среды, °С	(25 ± 10)
относительная влажность окружающего воздуха, %	от 45 до 80
атмосферное давление, кПа	от 84 до 106,7
напряжение питания переменного тока, В	(220 ± 22)
частота питающей сети, Гц	(50 ± 1)

2.4 Требования к подготовке изделия к испытаниям

Непосредственно перед проведением испытаний выполняют следующие операции:

- проводят организационно-технические мероприятия по обеспечению безопасности испытательных работ в соответствии с действующими правилами и документами по эксплуатации применяемого испытательного оборудования и средств измерений;

- выдерживают объект испытаний в условиях окружающей среды, указанных в п. 2.3, не менее 1 ч.;

- подготавливают средства измерений и испытаний к работе в соответствии с их эксплуатационной документацией, все средства измерений, которые подлежат заземлению, должны быть надежно заземлены, подсоединение зажимов защитного заземления к контуру заземления должно производиться ранее других соединений, а отсоединение – после всех отсоединений.

2.5 Требования к обслуживанию изделия в процессе испытаний

В процессе проведения испытаний персоналом ФГАОУ ВО НИ ТПУ проводятся работы в объеме контрольного осмотра объекта испытаний и при необходимости его текущего обслуживания.

2.6 Требования к порядку работы на объекте испытаний по завершении испытаний



По результатам испытаний делается заключение о соответствии объекта испытаний требованиям ТЗ.

2.7 Требования к персоналу, осуществляющему подготовку к испытаниям и испытания

К проведению испытаний допускается персонал, прошедший обучение изучивший эскизную конструкторскую документацию объекта испытаний, подготовленный в соответствии с «Правилами технической эксплуатации электроустановок потребителей» и «Правил техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей» и имеющий степень аттестации по электробезопасности не ниже III-ей группы.

### **3 Требования безопасности**

3.1 Требования безопасности при подготовке объекта испытаний к испытаниям.

При проведении испытаний соблюдают:

– требования безопасности, установленные ГОСТ 12.2.007.0-75 – ГОСТ 12.2.007.3-75, ГОСТ 24855, действующими «Правилами технической эксплуатации электроустановок потребителей», межотраслевые правила по охране труда (правила безопасности) при эксплуатации электроустановок ПОТ Р М–016–2001, РД 153-34.0-03.150 00, «Правилами техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей», утверждённые Госэнергонадзором;

– требования разделов «Указания мер безопасности» инструкций по эксплуатации применяемых средств поверки и испытаний.

3.2 Требования безопасности при проведении испытаний

При проведении испытаний необходимо соблюдать требования разделов «Меры безопасности» эксплуатационных документов на средства измерений и используемое испытательное оборудование.

#### 4 Программа испытаний

Определяемые показатели и точность их измерений приведены в таблице А.1, которая заполняется во время испытаний.

Таблица А.1 – Определяемые показатели

Пункт программы испытаний	Вид испытаний (проверок)	Пункт требований ТЗ	Номинальное значение	Предельные отклонения	Пункт методики
4.1	Определение числа осей чувствительности	4.3.1.2	2		6.1
4.2	Определение метрологических характеристик				6.2
4.2.1	Определение диапазона измерения угловой скорости	4.3.1.2	От минус 300 град/с до +300 град/с;		6.2.1
4.2.2	Определение динамической погрешности	4.3.1.2		±10 %	6.2.1
4.2.3	Определение нелинейности характеристики гироскопа	4.3.1.2		±1 %	6.2.2
4.2.4	Определение полосы пропускания гироскопа	4.3.1.2		Не менее 40 Гц	6.2.3
4.2.5	Определение времени готовности	4.3.1.2		Не более 3 с	6.2.4
4.2.6	Определение диапазона рабочих температур	4.3.1.2	От минус 40 °С до +105 °С		6.2.5
4.2.7	Определение температурного смещения чувствительности	4.3.1.2		±1 %	6.2.5
4.2.8	Определение дрейфа нуля на температурном диапазоне	4.3.1.2		±1 град/с	6.2.6
4.2.9	Определение собственного шума	4.3.1.2		±0,1 град/с	6.2.7
4.3	Испытания на вибростойкость	4.3.1.2		9g	6.3
4.4	Испытания на удар	4.3.1.2	3500 g	Не менее 500 мкс	6.4
			500 g	Не менее 1 мс	

## **5 Режимы испытаний**

### **5.1 Порядок испытаний**

Для проведения испытаний приказом директора института, в котором проводятся испытания, назначается комиссия.

Последовательность проведения испытаний может быть изменена по решению комиссии.

5.2. Правила регулировки (настройки) в процессе подготовки объекта испытаний к испытаниям в соответствии с эскизной конструкторской документацией.

5.3. Ограничения и другие указания, которые необходимо выполнять на всех режимах испытаний.

Испытания прекращаются в случаях:

- несоответствия получаемых результатов требованиям п. 4;
- возникновения аварийных ситуаций;

5.4 Условия перерыва, аннулирования и возобновления испытаний на всех или на отдельных режимах.

Необходимость, условия и порядок перерыва, аннулирования или прекращения испытаний определяется комиссией.

## **6 Методы испытаний**

### **6.1 Определение числа осей чувствительности**

Определение числа осей чувствительности проводить следующим образом:

а) соединить объект испытаний и средства измерений в соответствии со схемой рисунка А.1;

б) включить объект испытаний и средства измерений, время установления рабочего режима объекта испытаний после включения питания должно быть не более 3 с;

в) соединить кабелем выход объекта испытаний с платформой NI MyRIO 1900, выход платформы NI MyRIO 1900 соединить кабелем USB с ноутбуком;

г) вращая объект испытаний вокруг оси  $X$  с провести регистрацию сигнала с помощью платформы NI MyRIO 1900;

д) повторить операции в) – г) 6.1 настоящей ПиМИ для оси  $Z$ .

Объект испытаний считается выдержавшим испытания, если проведена регистрация выходного сигнала по осям  $X$ ,  $Z$ .

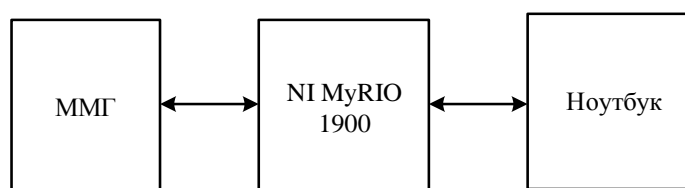


Рисунок А1 – Схема соединений объекта испытаний и средств измерений

## 6.2 Определение метрологических характеристик

6.2.1 Определение диапазона измерения угловой скорости в диапазоне от минус 300 град/с до +300 град/с и определение динамической погрешности

Определение диапазона измерения угловой скорости в диапазоне от минус 300 град/с до +300 град/с и определение динамической погрешности проводить совместно следующим образом:

а) установить на поворотный стенд АС 1120 S объект испытаний.

б) соединить объект испытаний, средства измерений и испытательное оборудование в соответствии со схемой рисунка А.2;

в) включить объект испытаний, средства измерений и испытательное оборудование;

г) соединить кабелем выход объекта испытаний с платформой NI MyRIO 1900, выход платформы NI MyRIO 1900 соединить кабелем USB с ноутбуком;

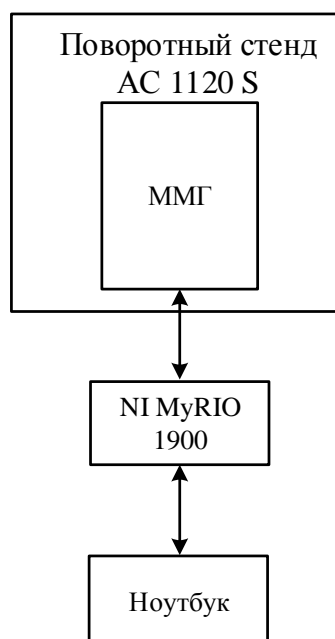


Рисунок А.2 – Схема установки объекта испытаний на поворотном столе

д) установить на поворотном столе угловую скорость от минус 300 град/с до +300 град/с;

е) провести регистрацию и измерение амплитуды сигнала с объекта испытаний с помощью платформы NI MyRIO 1900;

ж) провести обработку результатов измерений.

Относительную динамическую погрешность вычислять по формуле (А.1)

$$\delta_x = \frac{\Omega_{\text{изм}} - \Omega}{\Omega} \cdot 100\%, \quad (\text{А.1})$$

где  $\Omega$  – заданная угловая скорость, град/с;  $\Omega_{\text{изм}}$  – измеренная угловая скорость, град/с.

и) занести полученное значение относительной погрешности в таблицу по форме таблицы А.2.

Таблица А.2 – Погрешности ММГ

$\Omega_x$ град/с		$\Omega_{x \text{ изм}}$ град/с		$\delta_x, \%$	
влево	вправо	влево	вправо	влево	вправо
25	25				
50	50				
75	75				
100	100				

Продолжение таблицы А.2

$\Omega_x$ град/с		$\Omega_{x \text{ ИЗМ}}$ град/с		$\delta_x, \%$	
влево	вправо	влево	вправо	влево	вправо
125	125				
150	150				
175	175				
200	200				
225	225				
250	250				
275	275				
300	300				
325	325				
$\Omega_z$ град/с		$\Omega_{z \text{ ИЗМ}}$ град/с		$\delta_z, \%$	
влево	вправо	влево	вправо	влево	вправо
25	25				
50	50				
75	75				
100	100				
125	125				
150	150				
175	175				
200	200				
225	225				
250	250				
275	275				
300	300				
325	325				

к) повторить операции а) – и) 6.2.1 настоящей ПиМИ для остальных значений угловой скорости и осей, указанных в таблице А.2.

л) занести в протокол испытаний максимальные значения относительной погрешности из таблицы 3 для каждой из осей.

Результаты испытаний по пункту 6.2.1 считаются положительными, если объект испытаний производит измерения угловой скорости в диапазоне от минус

300 град/с до +300 град/с и максимальная динамическая погрешность в диапазоне от минус 300 град/с до 300 град/с не превышает  $\pm 10\%$ .

6.2.2 Определение относительной нелинейности характеристики от минус 300 град/с до +300 град/с.

- а) установить на поворотный стенд AC 1120 S объект испытаний.
- б) соединить объект испытаний, средства измерений и испытательное оборудование в соответствии со схемой рисунка А.2;
- в) включить объект испытаний, средства измерений и испытательное оборудование;
- г) соединить кабелем выход объекта испытаний с платформой NI MyRIO 1900, выход платформы NI MyRIO 1900 соединить кабелем USB с ноутбуком;
- д) установить на поворотном столе угловую скорость 150 град/с;
- е) провести регистрацию и измерение амплитуды сигнала с объекта испытаний с помощью платформы NI MyRIO 1900;
- ж) провести обработку результатов измерений.

Относительную нелинейность характеристики NI вычислять следующим образом: построить график измеренных значений угловой скорости от заданных значений угловой скорости. Через две крайние точки измеренных значений угловой скорости провести прямую, рассчитать нелинейность характеристики как максимальное относительное линейное расстояние от прямой до измеренных значений.

$$NI = \frac{\Delta}{F} 100\%, \quad (\text{A.2})$$

где  $\Delta$  – максимальное отклонение от аппроксимирующей прямой;  $F$  - диапазон измерений.

и) занести полученное значение измерений в таблицу по форме таблицы А.4.

к) повторить операции а) – ж) 6.2.2 настоящей ПиМИ для остальных значений угловой скорости и осей, указанных в таблице А.3.

л) занести в протокол испытаний максимальные значения относительной нелинейности для каждой из осей.

Таблица А.3 – Нелинейность характеристики ММГ

$\Omega_x$ град/с		$\Omega_{x \text{ изм}}$ град/с		$\Omega_z$ град/с		$\Omega_{z \text{ изм}}$ град/с	
влево	вправо	влево	вправо	влево	вправо	влево	вправо
25	25			25	25		
50	50			50	50		
75	75			75	75		
100	100			100	100		
125	125			125	125		
150	150			150	150		
175	175			175	175		
200	200			200	200		
225	225			225	225		
250	250			250	250		
275	275			275	275		
300	300			300	300		
325	325			325	325		

Результаты испытаний по пункту 6.2.2 считаются положительными, если максимальная относительная нелинейность не превышает  $\pm 1\%$ .

### 6.2.3 Определение полосы пропускания.

Определение полосы пропускания проводить следующим образом:

а) установить на поворотный стенд АС 1120 S объект испытаний объект испытаний.

б) соединить объект испытаний, средства измерений и испытательное оборудование в соответствии со схемой рисунка А.2;

в) включить объект испытаний, средства измерений и испытательное оборудование;

г) соединить кабелем выход объекта испытаний с платформой NI MyRIO 1900, выход платформы NI MyRIO 1900 соединить кабелем USB с ноутбуком;



д) установить на поворотном столе угловую скорость 150 град/с, задать режим движения поворотного стола синусоидальный с частотой 5 Гц;

е) провести регистрацию и измерение амплитуды сигнала с объекта испытаний с помощью платформы NI MyRIO 1900;

ж) занести полученное значение частоты сигнала в таблицу по форме таблицы А.5.

и) повторить операции а) – ж) 6.2.3 настоящей ПиМИ для остальных значений угловой скорости, частот и осей, указанных в таблице А.4.

Таблица А.4 – Результаты определения полосы пропускания ММГ

$\Omega_x$ град/с		10	50	100	150	200	250	300
Частота, Гц	5							
	10							
	20							
	30							
	40							
$\Omega_z$ град/с		10	50	100	150	200	250	300
Частота, Гц	5							
	10							
	20							
	30							
	40							

к) занести в протокол испытаний максимальные измеренные значения частоты из таблицы А.4 для каждой из осей.

Результаты испытаний по пункту 6.2.3 считаются положительными, если максимальные измеренные значения частоты для каждой из осей составляют не менее 40 Гц.

#### 6.2.4 Определение времени готовности

Определение времени готовности проводить следующим образом:

а) установить на поворотный стенд AC 1120 S объект испытаний.

б) соединить объект испытаний, средства измерений и испытательное оборудование в соответствии со схемой рисунка А.2;

в) включить объект испытаний, средства измерений и испытательное оборудование;

г) соединить кабелем выход объекта испытаний с платформой NI MyRIO 1900, выход платформы NI MyRIO 1900 соединить кабелем USB с ноутбуком;

д) установить на поворотном столе угловую скорость 150 град/с;

е) провести регистрацию и измерение амплитуды сигнала с объекта испытаний с помощью платформы NI MyRIO 1900;

ж) повторить операции а) – е) 6.2.4 настоящей ПиМИ для оси Z.

и) занести в протокол испытаний значения времени с момента включения объекта испытаний, через которые зарегистрирован сигнал по каждой из осей.

Результаты испытаний по пункту 6.2.4 считаются положительными, если сигнал пропорциональный заданной угловой скорости по каждой из осей зарегистрирован не более, чем за 3 с после момента включения объекта испытаний.

6.2.5 Определение диапазона рабочих температур и определение температурного смещения чувствительности

Определение диапазона рабочих температур и определение температурного смещения чувствительности проводить совместно следующим образом:

а) установить на поворотный стенд АС 1120 S объект испытаний, поворотный стенд АС 1120 S с объектом испытаний установить в климатическую камеру.

б) соединить объект испытаний, средства измерений и испытательное оборудование в соответствии со схемой рисунка А.2;

в) включить объект испытаний, средства измерений и испытательное оборудование;

г) соединить кабелем выход объекта испытаний с платформой NI MyRIO 1900, выход платформы NI MyRIO 1900 соединить кабелем USB с ноутбуком;

- д) установить на поворотном столе угловую скорость 150 град/с;
- е) установить значения температуры минус 40 °С и выдержать объект испытаний при установившейся температуре не менее 1 часа.
- ж) провести регистрацию и измерение амплитуды сигнала с объекта испытаний с помощью платформы NI MyRIO 1900;
- и) занести полученное значение амплитуды сигнала в таблицу по форме таблицы А.6;
- к) повторить операции е) – и) п. 6.2.5 настоящей ПиМИ для остальных значений температуры и осей, указанных в таблице А.5, установить скорость изменения температуры 3 град/мин;
- л) провести обработку результатов измерений;

Таблица А.5 – Результаты температурных испытаний

Температура, °С	-40	-20	0	20	40	60	80	105
$\Omega_x$ , град/с								
$\Omega_z$ , град/с								

Относительную погрешность температурного смещения чувствительности вычислять по формуле (А.3)

$$\delta_T = \frac{\Omega(T_{=20}) - \Omega(T)}{\Omega(T_{=20})} \cdot 100 \% \quad (\text{А.3})$$

где  $\Omega(T_{=20})$  – измеренная угловая скорость при номинальной температуре 20 °С, град/с;

$\Omega(T)$  – измеренная угловая скорость при температуре отличной от 20 °С, град/с.

м) занести в протокол испытаний максимальные значения погрешность температурного смещения чувствительности для каждой из осей.

Результаты испытаний по пункту 6.2.5 считаются положительными, если объект испытаний сохраняет свою работоспособность в диапазоне от минус 40 °С до 105 °С и максимальные значения температурного смещения чувствительности для каждой из осей не превышает  $\pm 1$  %.

### 6.2.6 Определение дрейфа нуля

Определение дрейфа нуля проводить следующим образом:

- а) установить на поворотный стенд AC 1120 S объект испытаний.
- б) соединить объект испытаний, средства измерений и испытательное оборудование в соответствии со схемой рисунка А.2;
- в) включить объект испытаний, средства измерений и испытательное оборудование;
- г) соединить кабелем выход объекта испытаний с платформой NI MyRIO 1900, выход платформы NI MyRIO 1900 соединить кабелем USB с ноутбуком;
- д) провести регистрацию и измерение постоянной составляющей сигнала с объекта испытаний с помощью платформы NI MyRIO 1900 в течении не менее 10 с;
- е) повторить операции а) – д) 6.2.6 настоящей ПиМИ для осей *Y* и *Z*.
- ж) занести в протокол испытаний максимальные значения постоянной составляющей сигнала по каждой из осей.

Результаты испытаний по пункту 6.2.6 считаются положительными, если постоянная составляющая сигнала не превышает  $\pm 1$  град/с.

### 6.2.7 Определение собственного шума

Определение собственного шума проводить следующим образом:

- а) установить на поворотный стенд AC 1120 S объект испытаний, поворотный стенд AC 1120 S с объектом испытаний установить в климатическую камеру.
- б) соединить объект испытаний, средства измерений и испытательное оборудование в соответствии со схемой рисунка А.2;
- в) включить объект испытаний, средства измерений и испытательное оборудование;
- г) соединить кабелем выход объекта испытаний с платформой NI MyRIO 1900, выход платформы NI MyRIO 1900 соединить кабелем USB с ноутбуком;
- д) установить значения температуры минус 40 °С и выдержать объект испытаний при установившейся температуре не менее 1 часа.

е) провести регистрацию и измерение переменной составляющей сигнала с объекта испытаний с помощью платформы NI MyRIO 1900;

ж) занести полученное значение амплитуды сигнала в таблицу по форме таблицы А.7;

и) повторить операции е) – ж) п. 6.2.7 настоящей ПиМИ для остальных значений температуры и осей, указанных в таблице А.6, установить скорость изменения температуры 3 град/мин;

Таблица А.6 – Результаты определения собственного шума

Температура, °С	-40	-20	0	20	40	60	80	105
$\Omega_x$ , град/с								
$\Omega_z$ , град/с								

Результаты испытаний по пункту 6.2.7 считаются положительными, если амплитуда переменной составляющей сигнала шума не превышает  $\pm 0,1$  град/с.

### 6.3 Испытания на вибростойкость

Испытания на вибростойкость проводить следующим образом:

а) установить объект испытаний на вибростенд ВС252 в положение, приближенном к его положению при эксплуатации;

б) соединить объект испытаний, средства измерений и испытательное оборудование.

в) включить объект испытаний, средства измерений и испытательное оборудование;

г) соединить кабелем выход X объекта испытаний с входом анализатора спектра E4448A;

д) задать воздействие вибрации с амплитудой 9g в трех взаимно перпендикулярных плоскостях.

е) изменяя частоты в диапазоне от 20 Гц до 2000 Гц и обратно провести регистрацию спектра сигнала с объекта испытаний с помощью анализатора спектра E4448A для каждой частотной точки, указанной в таблице А.7; для определения резонансных частот испытания провести методом сканирования

диапазона при синусоидальной вибрации с непрерывно изменяющейся частотой со скоростью 1 Гц/с в полосе частот от 20 Гц до 2 кГц.

ж) повторить операции а) – д) п. 6.3 настоящей ПиМИ для оси Z.

Таблица А.7 – Результаты вибрационных испытаний

Частота, Гц	20	50	70	100	200	300	400	500	600
Выходной сигнал ММГ, град/с									
Частота, Гц	700	800	900	1000	1200	1400	1600	1800	2000
Выходной сигнал ММГ, град/с									

Результаты испытаний по пункту 6.3 считаются положительными, если объект испытаний сохраняет работоспособность во всем заданном частотном диапазоне вибраций.

#### 6.4 Испытания на воздействие удара

Испытания на удар проводить следующим образом:

При испытаниях на удар полуволна до 100g используется вибростенд ВС252, до 3500g – ударный стенд HS15.

а) установить объект испытаний на испытательное оборудование в положении, приближенном к положению эксплуатации;

б) соединить объект испытаний, средства измерений и испытательное оборудование.

в) включить объект испытаний, средства измерений и испытательное оборудование;

г) соединить кабелем выход X объекта испытаний с платформой NI MyRIO 1900, выход платформы NI MyRIO 1900 соединить кабелем USB с ноутбуком;

д) задать воздействие удара с амплитудой 3500g и длительностью полуволны 500 мкс в трех взаимно перпендикулярных плоскостях;

е) провести регистрацию амплитуды сигнала с объекта испытаний с помощью с помощью платформы NI MyRIO 1900 при воздействии не менее чем 9 ударов;

ж) задать воздействие удара с амплитудой 500g и длительностью полуволны 1 мс в трех взаимно перпендикулярных плоскостях;

и) провести регистрацию амплитуды сигнала с объекта испытаний с помощью платформы NI MyRIO 1900 при воздействии не менее чем 9 ударов;

к) повторить операции а) – и) п. 6.4 настоящей ПиМИ для оси Z.

Результаты испытаний по пункту п. 6.4 считаются положительными, если объект испытаний сохраняет работоспособность при воздействии не менее чем 9 ударов амплитудой 500g и длительностью полуволны 1 мс и не менее чем 9 ударов амплитудой 3500g и длительностью полуволны 500 мкс.

## Приложение Б

## Патент на изобретение. Трёхосевой микромеханический акселерометр

05.10.2019

ИЗ №2693010

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** (11) **2 693 010** (13) **C1**

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ  
(51) МПК

[G01P 15/135 \(2006.01\)](#)

(52) СПК

[G01P 15/135 \(2019.02\)](#)

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

Статус: действует (последнее изменение статуса: 16.07.2019)

(21)(22) Заявка: [2018143342](#), 07.12.2018

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
07.12.2018

Дата регистрации:  
01.07.2019

Приоритет(ы):  
(22) Дата подачи заявки: 07.12.2018

(45) Опубликовано: [01.07.2019](#) Бюл. № 19

(56) Список документов, цитированных в отчете о  
поиске: US 2017363655 A1, 21.12.2017. RU  
2543686 C1, 10.03.2015. CN 102955046 B,  
14.05.2014. RU 152289 U1, 20.05.2015. SU  
1346058 A3, 15.10.1987.

Адрес для переписки:  
634050, Томская обл., г. Томск, пр-кт  
Ленина, 30, Отдел правовой охраны  
результатов интеллектуальной  
деятельности, ФГАОУ ВО "Национальный  
исследовательский Томский  
политехнический университет"

(72) Автор(ы):

Нестеренко Тамара Георгиевна (RU),  
Барбин Евгений Сергеевич (RU),  
Зорина Елена Васильевна (RU),  
Коледа Алексей Николаевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):

федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего  
образования "Национальный  
исследовательский Томский  
политехнический университет" (RU)

(54) ТРЁХОСЕВОЙ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИЙ АКСЕЛЕРОМЕТР

(57) Реферат:

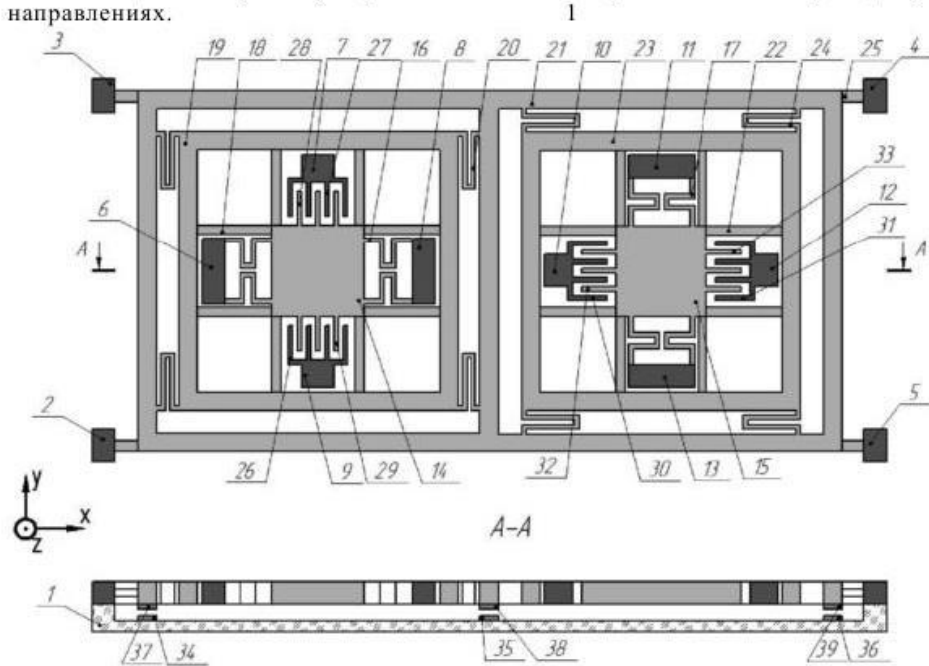
Изобретение относится к области микросистемной техники и может быть использовано для одновременного измерения линейных ускорений вдоль трех взаимно перпендикулярных осей. Акселерометр содержит подложку, неподвижные анкерные блоки, внешнюю прямоугольную раму, расположенную с зазором относительно подложки, разделенную перемычкой на два равных квадрата и закрепленную на анкерных блоках с помощью плоских упругих элементов. Внутри каждого квадрата расположены идентичные структуры, лежащие в плоскости рамы и повернутые на угол 90 градусов относительно друг друга, каждая из которых содержит расположенную в центре инерционную массу, промежуточную раму, соединенную с массой при помощи прямоугольных упругих элементов, при этом инерционные массы соединены  $\Omega$ -образными упругими элементами с анкерными блоками. Промежуточная рама посредством двух пар  $\Omega$ -образных упругих элементов закреплена в квадрате наружной рамы. На двух противоположных сторонах каждой



05.10.2019

ИЗ №2693010

инерционной массы расположены гребенчатые электроды, образующие плоские конденсаторы в паре с неподвижными гребенчатыми электродами, расположенными на подложке. Рама снабжена планарными электродами, образующими плоские конденсаторы с неподвижными планарными электродами, расположенными на подложке. Технический результат – снижение чувствительности акселерометра к ускорениям по перекрёстным осям, расширение арсенала технических средств, позволяющих измерять ускорение объекта в трёх взаимно перпендикулярных направлениях.



## Приложение В

## Патент на изобретение. Интегральный микромеханический гироскоп

05.10.2019

ИЗ №2630542

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** (11) **2 630 542** (13) **C1**ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(51) МПК

[G01C 19/56 \(2012.01\)](#)

## (12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

Статус: действует (последнее изменение статуса: 06.05.2019)  
Пошлина: учтена за 4 год с 21.06.2019 по 20.06.2020(21)(22) Заявка: [2016124405](#), 20.06.2016(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
20.06.2016

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 20.06.2016

(45) Опубликовано: [11.09.2017](#) Бюл. № 26(56) Список документов, цитированных в отчете о  
поиске: RU 2503924 C1, 10.01.2014. RU  
2266521 C1, 20.12.2005. RU 2351896 C1,  
10.04.2009. WO 2005/031257 A2, 07.04.2005.  
US 7513155 B2, 07.04.2009.

Адрес для переписки:

634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, ФГАОУ  
ВО "Национальный исследовательский  
Томский политехнический университет",  
отдел правовой охраны результатов  
интеллектуальной деятельности

(72) Автор(ы):

Нестеренко Тамара Георгиевна (RU),  
Коледа Алексей Николаевич (RU),  
Барбин Евгений Сергеевич (RU),  
Вторушин Сергей Евгеньевич (RU),  
Колчужин Владимир Анатольевич (DE)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего  
образования "Национальный  
исследовательский Томский  
политехнический университет" (RU)

## (54) ИНТЕГРАЛЬНЫЙ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИЙ ГИРОСКОП

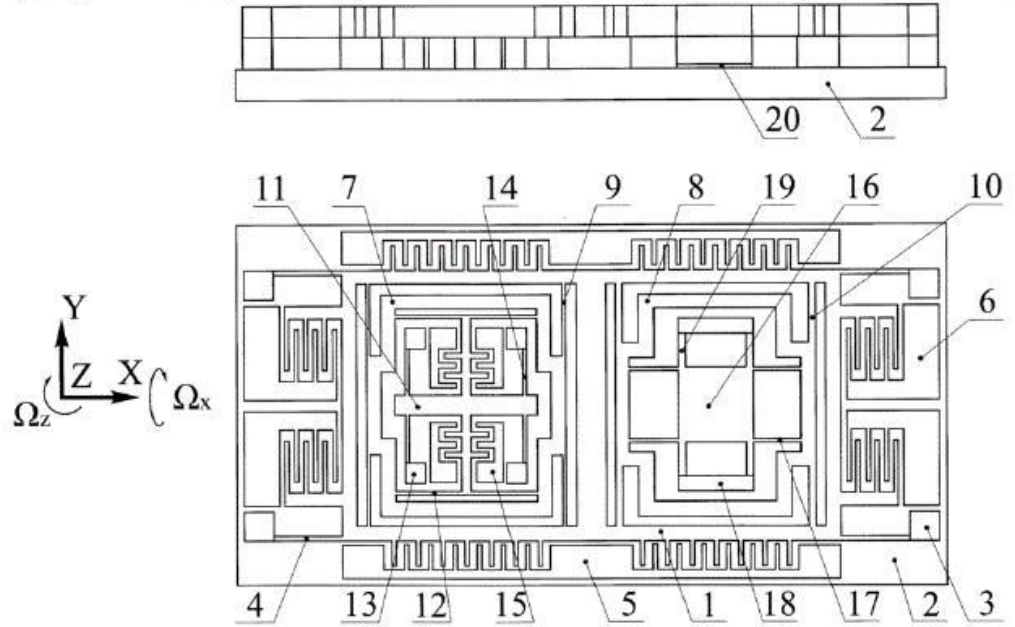
(57) Реферат:

Изобретение относится к гироскопическим приборам, а именно к датчикам угловой скорости, основанным на Кориолисовых силах, и может быть использовано для измерения угловой скорости. Интегральный микромеханический гироскоп, выполненный из полупроводникового материала, содержит рамку, закрепленную на диэлектрическом основании в неподвижных анкерах через упругие переемычки (4). На рамке выполнены гребенчатые структуры вибропривода. Первое промежуточное тело (7) закреплено на упругих переемычках (9) внутри рамки. Первое инерционное тело (11) расположено на упругих переемычках (12) внутри первого промежуточного тела (7) и связано с неподвижными анкерами (13) через упругие переемычки (14). На первом инерционном теле (1) выполнены подвижные части сенсорных электродов (15), неподвижные части которых закреплены на диэлектрическом основании. Анкеры, неподвижные части вибропривода, неподвижные части сенсорных электродов зафиксированы на диэлектрическом основании. Внутри рамки дополнительно расположено второе промежуточное тело (8), которое связано с рамкой через упругие переемычки (10). Второе инерционное тело (16) расположено внутри второго промежуточного тела (8) и связано с ним через упругие переемычки (17), а также связано с неподвижными анкерами (18) через упругие переемычки (19).

05.10.2019

ИЗ №2630542

Под вторым инерционным телом (16) расположен неподвижный планарный электрод, закрепленный на диэлектрическом основании. Данное изобретение позволяет проводить измерения двух составляющих угловой скорости. 1 ил.



Фиг. 1

**Приложение Г**  
**Акт внедрения на предприятие**

**ООО «Потенциал»**

ИНН 7017279096/КПП 701701001  
634034, г. Томск, ул. Савиных, 7-36

**АКТ**

**Об использовании в научно-исследовательских работах  
ООО «Потенциал» результатов диссертации  
Коледы Алексея Николаевича на тему «Исследования и  
разработка микромеханических гироскопов, устойчивых к  
вибрации и ударам»**

Настоящим актом подтверждается, что при выполнении научно-исследовательских работ на предприятии в период 2016-2017 гг. были использованы разработанные Коледой А.Н. модели микромеханических сенсоров и программные средства моделирования, которые применены при разработке средств персонализированной медицины.

Директор



И.А.Лежнина

02.10.19г.



## Приложение Д

## Акт об использовании в учебном процессе результатов работы

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по образовательной деятельности

ФГАОУ ВО НИ ТПУ

Вагнер А.Р.

2019 г.



АКТ

об использовании в учебном процессе Федерального государственного  
образовательного учреждения высшего образования  
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет»  
результатов диссертационной работы Коледы Алексея Николаевича

Мы нижеподписавшиеся, директор Инженерной школы неразрушающего контроля и безопасности (ИШНКБ) Томского политехнического университета, к.т.н., доцент Седнев Д.А. и и.о. зав.кафедрой-руководитель Отделения электронной инженерии ИШНКБ, к.т.н., доцент Баранов П.Ф., составили настоящий акт о том, что отдельные результаты диссертационной работы Коледы Алексея Николаевича на тему «Исследования и разработка микромеханических гироскопов, устойчивых к вибрации и ударам», представленной на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.27.01 – «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах», в том числе разработанные и изготовленные в ходе исследования экспериментальные образцы кремниевых кристаллов микромеханического гироскопа, а также электронные модели гасителей удара микромеханических гироскопов используются в учебном процессе Отделения электронной инженерии ИШНКБ в материалах курсов «Компоненты микросистемной техники» и «Инжиниринг сенсорных систем» для студентов направления «Электроника и нанoeлектроника».

Директор ИШНКБ  
Томского политехнического университета  
к.т.н., доцент

Седнев Д.А.

И.о. зав.кафедрой-руководитель  
Отделения электронной инженерии ИШНКБ  
к.т.н., доцент

Баранов П.Ф.

## Приложение Е

### Акт внедрения в научные работы



«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор

по научной работе и инновациям

ФГАОУ ВО НИ ТПУ

И.Б. Степанов

«07» 10 2019 г.

#### А К Т

О внедрении результатов диссертационной работы на соискание учёной степени кандидата технических наук Коледа Алексея Николаевича на тему «Исследования и разработка микромеханических гироскопов, устойчивых к вибрации и ударам» в научные работы, проводимые по ФЦП.

Результаты диссертации на соискание степени кандидата технических наук по теме «Исследования и разработка микромеханических гироскопов, устойчивых к вибрации и ударам» выполненной Коледа Алексеем Николаевичем, использовались при выполнении следующих работ:

- 1) Соглашение о предоставлении субсидии №14.578.21.0232 от 26 сентября 2017 г. «Интеллектуальный инерциальный модуль на основе микроэлектромеханических датчиков с функциями гироскопа, акселерометра и магнитометра для систем ориентации и навигации транспортных средств с автоматизированным управлением», выполняемой в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы».
- 2) Соглашение № 17-37-50014 мол\_нр от 09.08.2017 г. «Разработка и исследование конструктивных методов уменьшения влияния вибрации и ударов на микромеханические инерциальные сенсоры LL-типа» в рамках гранта РФФИ на «Конкурс научных проектов, выполняемых молодыми учеными под руководством кандидатов и докторов наук в научных организациях Российской Федерации в 2017 году».
- 3) Соглашение о предоставлении субсидии №14.575.21.0068 от 11 августа 2014 г. «Разработка методов проектирования многокомпонентных

микроэлектромеханических гироскопов и акселерометров, устойчивых к дестабилизирующим воздействиям», шифр «2014-14-576-0097» в рамках реализации ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы» по приоритетному направлению развития науки, технологий и техники в Российской Федерации «Индустрия наносистем».

4) Соглашение о предоставлении субсидии от 14 ноября 2012 г. № 14.В37.21.1951 «Разработка методов высокоуровневого проектирования многокомпонентных микросистем» в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы. Шифр заявки «2012-1.5-14-000-2016-006».

5) Соглашение о предоставлении субсидии от 19 апреля 2011 г. № 16.513.11.3056. «Разработка микромеханического инерциального датчика повышенной точности и информативности для систем ориентации и навигации транспортных средств» в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2013 годы».

Руководитель темы, к.т.н.

  
\_\_\_\_\_

Нестеренко Т.Г.