

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
профессионального образования
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 531.7

ГРНТИ 59.31.31; 47.33.37

№ гос. регистрации 01201281842

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по научной работе
и инновациям ФГБОУ ВПО НИ ТПУ
А.Н. Пестряков
« 18 » 10 2013 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ОТЧЕТ

В рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы

Шифр заявки «2012-1.5-14-000-2016-006»


Соглашение на предоставление гранта от 14 ноября 2012 г. № 14.В37.21.1951,
дополнительное соглашение от 18 марта 2013 г. № 1

по теме:

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ВЫСОКОУРОВНЕВОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ
МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ МИКРОСИСТЕМ

(заключительный отчёт)







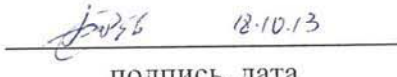
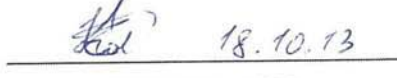
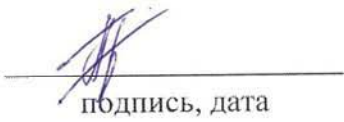

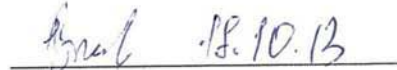
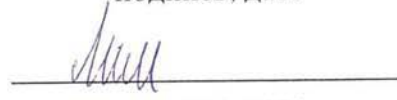
Руководитель НИР,
доктор физ.мат, наук, с.н.с

 18.10, 2013. С.В. Учайкин

подпись, дата

Томск 2013

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель темы, с.н.с., доктор физ.мат.наук	 _____ подпись, дата	С.В. Учайкин (реферат, введение, заключение, Приложение Е)
Ответственный исполнитель, к.т.н., доцент	 _____ подпись, дата	Т.Г. Нестеренко (разделы 2, 6, Приложение В)
Исполнители темы:		
Доцент, к.т.н.	 _____ подпись, дата	Ю.А, Чурсин (подраздел 4.2, Приложение Г)
Доцент, д.т.н.	 _____ подпись, дата	В.Н. Бориков (раздел 1, Приложение Д)
Ассистент, к.т.н.	 _____ подпись, дата	Бритова Ю.А. (Подраздел 5.2)
Научный сотрудник, к.т.н.	 _____ подпись, дата	В.А. Колчужин (подраздел 2.5)
Аспирант	 _____ подпись, дата	Е.С. Барбин (раздел 3, Приложение А)
Аспирант	 _____ подпись, дата	А.Н. Коледа (раздел 4, Приложение Б)
Аспирант	 _____ подпись, дата	Баранов П.Ф. (подраздел 5.1)
Студент	 _____ подпись, дата	Зорина Е. (подраздел 3.5)
Студент	 _____ подпись, дата	С.Е. Вторушин (подраздел 5.3)
Нормоконтролер	 _____ подпись, дата	А.В. Лимарева

Реферат

Отчет 262 с., 199 рис., 25 табл., 60 источников, 6 прил.

МИКРОГИРОСКОП, МИКРОАКСЕЛЕРОМЕТР, ПЕРВИЧНЫЕ КОЛЕБАНИЯ, ИНФОРМАТИВНЫЕ КОЛЕБАНИЯ, ЭЛЕКТРОДНАЯ СТРУКТУРА, ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЙ ВИБРОПРИВОД, МОДАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ, МАКРОМОДЕЛЬ,

Объектом исследования является многокомпонентная микросистема. Целью работы является разработка научно-технических решений для создания программно-инструментальных методов и средств высокоуровневого проектирования микросистем со многими степенями свободы для сокращения времени, стоимости производства отечественных микромеханических систем (МЭМС) в результате использования макромоделей, полученных на физическом уровне проектирования. Высокоуровневое проектирование является одним из основных элементов систем автоматизированного проектирования МЭМС различного назначения. Использование макромоделей позволяет исследовать объект, не прибегая к эксперименту или значительно сокращая экспериментальные исследования.

В процессе работы рассмотрен состав многокомпонентной микросистемы, получены математические модели МЭМС датчиков этой системы, определены их общие динамические свойства. Все рассмотренные МЭМС датчики представляют собой осцилляторы с силами электростатического взаимодействия.

Сделан обзор методов макромоделирования, разработана программная документация для составления макромоделей МЭМС. Методом конечно-элементного анализа проведён модальный, электростатический, тепловой анализ МЭМС датчиков, входящих в состав многокомпонентной системы. Разработаны библиотеки элементов МЭМС. На основании проведённого твердотельного моделирования разработаны макромоделей МЭМС и проведено их моделирование на системном уровне. Разработана конструкция и технологическая документация для изготовления многокомпонентной микросистемы и её МЭМС-датчиков.

Содержание

	С.
Нормативные ссылки.....	7
Определения, обозначения и сокращения.....	8
Введение.....	9
1 Обзор и анализ алгоритмов создания макромоделей микросистем.....	15
1.1 Классификация методов макромоделирования.....	15
1.1.1 Метод понижения размерности системы с помощью подпространства.....	16
1.1.2 Метод модальной суперпозиции.....	17
1.1.3 Метод электромеханических аналогий.....	19
1.2 Обзор программного обеспечения для моделирования микросистем.....	21
2 Принципиальная схема многокомпонентной микросистемы.....	25
2.1 Структура и принцип построения микросистемы.....	25
2.2 Микромеханические гироскопы.....	27
2.2.1 Двухкомпонентный гироскоп с совмещёнными измерительными осями....	28
2.2.2 Двухкомпонентный гироскоп с общей осью первичных колебаний и независимыми измерительными осями.....	31
2.2.3 Двухкомпонентный гироскоп с изолированными измерительными осями...34	
2.3 Микромеханические акселерометры.....	37
2.4 Микромеханический резонатор.....	39
2.5 Принцип высокоуровневого проектирования микромеханических систем....41	
3 Моделирование микрорезонатора на системном уровне.....	51
3.1 Библиотека торсионных подвесов.....	51
3.2 Моделирование в среде ANSYS торсионных подвесов микросистем с учётом технологических дефектов.....	54
3.2.1 Методика определения технологических погрешностей торсионных подвесов.....	54
3.2.2 Изменение высоты торсионов.....	58
3.2.3 Изменение толщины торсионов.....	60
3.2.4 Изменение вертикальности профиля торсионов.....	63

3.3	Параметрические модели и библиотека электростатических актюаторов микросистем.....	65
3.4	Твёрдотельное моделирование микрорезонатора.....	69
3.4.1	Разработка конструкций микрорезонаторов, модальный анализ.....	69
3.4.2	Температурный анализ.....	75
3.4.3	Статический анализ.....	86
3.4.4	Электростатический анализ.....	88
3.4.4.1	Определение ёмкости гребенчатых электродных структур резонатора аналитическим методом.....	89
3.4.4.2	Определение ёмкости гребенчатых электродных структур КЭ методом...	91
3.5	Компьютерные модели и результаты моделирования микромеханического резонатора.....	96
4	Создание системной модели (макромодели) микрогироскопа.....	107
4.1	Конечно-элементный анализ ММГ.....	107
4.1.1	Чертёж кристалла, модальный анализ.....	107
4.1.2	Статический анализ.....	114
4.1.3	Температурный анализ.....	117
4.1.4	Электростатический анализ.....	124
4.2	Способы возбуждения первичных колебаний микрогироскопа.....	129
4.2.1	Принцип построения и задачи системы управления первичными колебаниями.....	129
4.2.2	Автогенераторная схема возбуждения.....	132
4.2.3	Схемы с автоподстройкой частоты.....	137
4.2.4	Экстремальная система возбуждения первичных колебаний.....	145
4.3	Моделирование на системном уровне микрогироскопа.....	153
4.3.1	Генерация системной модели гироскопа.....	153
4.3.2	Результаты обработки данных, полученных при моделировании микрогироскопа, рекомендации по созданию прототипа тестовой структуры....	158
4.3.2.1	Макромодель гироскопа в Simulink.....	158
4.3.2.2	Система возбуждения первичных колебаний.....	159

4.3.2.3	Определение напряжения «слипания».....	162
4.3.2.4	Моделирование идеальной системы.....	163
4.3.2.5	Расчет погрешностей из-за перекрестных связей между осями сенсора...168	
4.3.2.6	Влияние ускорения поступательного движения объекта.....	171
4.3.2.7	Погрешности, вызванные съемом сигнала.....	173
5	Макромодель микроакселерометра.....	175
5.1	Структурная схема микроакселерометра.....	175
5.2	Чертёж кристалла акселерометра.....	186
5.3	Компьютерные модели и результаты моделирования.....	186
5.3.1	Генерация системной модели акселерометра.....	186
5.3.2	Макромодель акселерометра в Simulink.....	189
6	Структурная схема инерциальной микросистемы.....	196
6.1	Чертёж кристалла.....	196
6.2	Анализ перспектив разработки микросистем с субмикронным зазором.....	199
	Заключение.....	202
	Список использованных источников.....	205
	Приложение А. Программная документация на разработку макромоделей резонатора, микрогироскопа, микроакселерометра.....	211
	Приложение Б. Чертежи кристаллов, топология микрогироскопа, микроакселерометра, многокомпонентной микросхемы.....	220
	Приложение В. Эскизный технологический маршрут изготовления микрогироскопа, микроакселерометра с использованием BDRIE процесса.....	244
	Приложение Г. Принципиальные схемы микрогироскопа, микроакселерометра, инерциальной микросистемы в формате netlist (электронный файл)	
	Приложение Д. Топология микрогироскопа, микроакселерометра в GDSII формате (электронный файл)	
	Приложение Е. Топология микросистемы в GDSII формате (электронный файл)	

Нормативные ссылки

В настоящем отчёте о НИР использованы ссылки на следующие стандарты.

ГОСТ 15.101-98. Система разработки и постановки продукции на производство. Порядок выполнения научно-исследовательских работ.

ГОСТ 7.32-2001. Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Отчет о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления.

ГОСТ 12.1.004-91 ССБТ. Пожарная безопасность. Общие требования.

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

ГОСТ ИСО 14644-1-2002. Чистые помещения и связанные с ними контролируемые среды. Часть 1. Классификация чистоты воздуха.

ГОСТ 2.701-84. Схемы. Виды и типы. Общие требования к выполнению.

ГОСТ 2.125-88. Правила выполнения эскизных конструкторских документов.

ГОСТ 2.102-68. Единая система конструкторской документации. Виды и комплектность конструкторских документов.

Определения, обозначения и сокращения

МЭМС – микроэлектромеханическая система;

ПП – печатная плата;

БИНС – бесплатформенная инерциальная навигационная система;

САПР – система автоматизированного проектирования;

КЭ – конечный элемент;

ИТ – инерционное тело;

ПЕН – преобразователь емкость-напряжение;

СУПК – система управления первичными колебаниями;

ЭБ – электронный блок;

ЧЭ – чувствительный элемент;

ГС – гребенчатая структура;

СИС – система измерения скорости;

СКВК – система коррекции вторичных колебаний;

СУПК – система управления первичными колебаниями;

ВП – вибропривод;

ММГ – микромеханический гироскоп;

ОУ – операционный усилитель;

СК – система координат;

СВПК – схема возбуждения первичных колебаний;

СУВК – система управления вторичными колебаниями;

БПВС – блок преобразования выходного сигнала;

КУ – корректирующее устройство;

ИМ – инерционная масса;

ГУН – генератор, управляемый напряжением;

ФАПЧ – фазовая автоподстройка частот;

АЧХ – амплитудно-частотная характеристика;

ФЧХ – фазо-частотная характеристика;

ЛУ – логическое устройство.

Введение

Микроэлектромеханические системы (МЭМС) – одно из наиболее перспективных направлений в современной электронике. Технология МЭМС позволяет методами, близкими к технологии производства микросхем, получать в интегральном процессе системы с электрическими, электронными, механическими, оптическими и электрохимическими свойствами и размерами, сравнимыми с обычными интегральными схемами. МЭМС-устройства находят широчайшее применение в потребительской и специальной электронике, системах безопасности автомобилей, навигации, медицине, средствах мониторинга и неразрушающего контроля и многих других областях.

Проникновение датчиков во все сферы жизни во многом произошло благодаря технологии МЭМС, которая, наконец, стала массовой и недорогой. Применение решений с одновременной обработкой показаний датчиков различного типа позволяет улучшать устройства потребительской электроники.

Цепочка разработки и производства МЭМС требует развитой инфраструктуры, начиная от специализированных средств разработки и заканчивая производственными возможностями, позволяющими выполнять специфические для этой технологии операции, такие как глубокое травление в кремнии.

Основными датчиками движения являются акселерометры и гироскопы. Большая популярность МЭМС-акселерометров и гироскопов обусловлена их широким потенциалом для использования как в бытовой, так и в промышленной технике. Как правило, для производства МЭМС-акселерометров и гироскопов используют идентичные технологии. Единственная разница заключается в геометрии подвижной структуры.

Основными секторами применения акселерометров и гироскопов являются [1, 2, 3]:

- игровые консоли;
- стабилизация изображения в фото- и видеокамерах;

- курсорные указатели для интеллектуальных интерфейсов пользователя;

- навигационные системы (системы счисления пройденного пути);
- системы управления движением в робототехнике;
- стабилизация платформ промышленного оборудования;
- авиационная и космическая техника;
- приборы медицинского мониторинга;
- приборы нефте- и газодобычи;
- мониторинг климата.

Бурное развитие МЭМС датчиков обусловлено их существенными достоинствами [4, 5, 6].

Малый разброс параметров в пределах изделия. Изготовление компонентов в едином технологическом цикле позволяет получать практически неотличимые параметры у одинаковых компонентов.

Высокая технологичность и повторяемость. При изготовлении МЭМС-устройств в основном применяются хорошо отработанные и управляемые технологические процессы, что позволяет получать изделия с желаемыми характеристиками.

Микроминиатюрность. Применение технологии микросхем позволяет получить микромеханические и оптические узлы значительно меньших размеров, чем это возможно по традиционным технологиям.

Высокая функциональность. Миниатюрность изделия и возможность изготовления датчиков, обрабатывающих схем и исполнительных механизмов в одном устройстве позволяет создавать законченные системы достаточно большой сложности в миниатюрном корпусе.

Улучшенные характеристики функционирования. Электронная часть, а также электрические каналы связи с датчиками и механизмами, выполненные по интегральной технологии и имеющие малые размеры, позволяют улучшить такие характеристики как рабочие частоты, соотношение сигнал/шум и т.д. Высокая

точность, повторяемость чувствительных элементов и их интегральное исполнение совместно с обрабатывающей схемой позволяют значительно повысить точность измерений.

Высокая надежность и стойкость к внешним воздействиям. Факторов, приводящих к повышению надежности и стойкости к внешним воздействиям изделий при применении МЭМС, достаточно много, и они зависят от конкретного типа изделия и его применения. Механические узлы МЭМС в условиях вибраций и ударов, как правило, работают лучше благодаря малым размерам и массе, а также тому факту, что механические узлы расположены в корпусе МЭМС, амортизированном выводами и конструкцией ПП.

Низкая стоимость. Применение МЭМС уменьшает стоимость как механической, так и электронной частей устройства, поскольку обрабатывающая электроника интегрирована в МЭМС-компонент, что позволяет избежать дополнительных соединений и, в некоторых случаях, согласующих схем.

Одним из актуальнейших направлений развития микромеханических датчиков является измерение по нескольким осям. Измерение по нескольким осям позволяет значительно продвинуть интерфейс пользователя. Каждый тип датчиков производит базовые измерения (акселерометр – линейное ускорение по трем осям, гироскоп – угловые скорости вокруг трёх осей, магнитометр – напряженность магнитного поля по трем осям).

От точности датчика зависит точность всего устройства. Разные датчики чувствительны к различным возмущающим воздействиям. Для компенсации погрешностей отдельных датчиков данные с разных датчиков обрабатываются одновременно, в итоге комбинированный результат превышает сумму компонентов. Таким образом, недостатки каждого датчика нивелируются и получается синтезированный более точный выходной сигнал.

В современных условиях, когда решены основные вопросы принципов построения, конструирования и технологии изготовления микромеханических преобразователей, инерциальных модулей и БИНС на их основе, на первый план выступает проблема повышения точности преобразователей и создание приборов

навигационного класса точности. Решение указанной проблемы в значительной степени опирается на методы, традиционно применяемые при разработках новых типов гироскопов и акселерометров. Вместе с тем, учет факторов масштабирования, использование планарных конструктивных схем и групповых микроэлектронных технологий изготовления чувствительных элементов, расширение областей применения микромеханических систем выдвигают новые проблемы конструкторско-технологического характера. К ним относятся:

- выбор расчетных схем и расчетных моделей, наиболее полно учитывающих факторы, влияющие на технические характеристики микромеханических систем;
- оптимизация параметров конструкций, обеспечивающих требуемые динамические характеристики чувствительных элементов;
- подбор и создание материалов с необходимыми физико-механическими характеристиками;
- поиск способов уменьшения влияния напряженно-деформированного состояния конструкций, технологических, температурных и иных факторов на точность и стабильность характеристик микромеханических систем;
- выбор электронных элементов с минимальным уровнем собственных шумов.

Решение указанных проблем приведет к повышению достигнутых технических характеристик микромеханических изделий и расширению сферы применения систем стабилизации, ориентации и навигации на их основе.

В процессе разработки МЭМС большую важность приобретают средства моделирования и инженерных расчетов, поскольку МЭМС – изделия достаточно сложные, и возможность предотвратить ошибку с помощью моделирования до этапов прототипирования и, тем более, серийного производства, является ключевым моментом в достижении экономической целесообразности и конкурентоспособности разработчика МЭМС. Задачи, возникающие при проектировании МЭМС, требуют совместного решения проблем механики, электроники, метрологии, технологии, материаловедения.

САПР МЭМС имеют особенности, которые отличают их от средств разработки других электронных изделий. Среди таких особенностей следует отметить необходимость специализированной библиотеки элементов, представляющих собой одновременно электрические, механические и геометрические модели типовых компонентов МЭМС.

В МЭМС существует очень тесная интеграция процессов проектирования и изготовления, технологический процесс изготовления определяет конструктивные особенности механической части МЭМС. Следовательно, при проектировании МЭМС необходим высокий уровень знаний технологии его производства. При выборе проектного решения необходимо учитывать влияние технологического процесса и различных дестабилизирующих факторов.

Научно-технический прогресс в области разработки микромеханических устройств приводит к их постоянному усложнению. В связи с этим для реализации сложных маршрутов проектирования МЭМС большое значение приобретают современные методы проектирования – это 3D- конструирование и конечно-элементный анализ, что позволяет существенно сократить время разработки и анализа нового варианта конструкции ММГ на различных уровнях проектирования. Успешная разработка ММГ требует физического и имитационного моделирования для более точного прогнозирования поведения устройства. При создании МЭМС возникают проблемы достижения высокой точности и широкого диапазона измерений. Динамические характеристики и погрешности микросистем зависят от кинематической схемы, выбор которой является очень важным, от схемы съёма информации, от неидеальности выполнения конструкции, от температурных, механических, электрических возмущений, поэтому большое значение имеет возможность совместного моделирования этих факторов и подсистем.

В условиях жёсткой конкуренции между производителями МЭМС сроки и стоимость этапов разработки новых изделий имеют определяющее значение. Макромоделирование МЭМС на системном уровне позволит в кратчайшие сроки успешно решать проблемы, связанные с их разработкой.

Проектирование современных микромеханических систем (МЭМС) на всех этапах автоматизировано. Особенности проектирования МЭМС по сравнению с макроустройствами обусловлены их малыми размерами.

Для изготовления МЭМС используется групповая технология, когда одновременно обрабатывается большее количество элементов. Ручное участие при этом минимально, либо совсем исключено. Из-за малых размеров материальные затраты малы, но в то же время высока стоимость оборудования, обслуживания и контроля. Стоимость одной единицы изделия определяется из закона массового производства (рисунок 1.2).



Рисунок 1.2 – Зависимость стоимости МЭМС от объемов производства

Микросистемы экономически выгодно производить только в больших объемах. Микросистемная технология непригодна для производства опытных образцов, так как при этом возрастают затраты при изготовлении и требуется большое количество времени (недели и месяцы). За то же самое время при помощи моделирования может быть проверено большое количество вариантов конструкций.

Издержки на проектирование составляют порядка 10 % от общей стоимости, но проектирование несёт ответственность за технологию изготовления, которая составляет (70±90)% общей стоимости. Ремонт микросистем практически невозможен.

Таким образом, главная цель при разработке состоит в том, чтобы получить полностью функционирующую систему в первой же реализации. Для этого необходимо широко использовать инструментальные средства моделирования, чтобы надёжно анализировать функционирование системы.

1 Обзор и анализ алгоритмов создания макромоделей микросистем

1.1 Классификация методов макромоделирования

МЭМС – изделия достаточно сложные, и возможность предотвратить ошибку с помощью моделирования до этапов прототипирования и, тем более, серийного производства является ключевым моментом в достижении экономической целесообразности и конкурентоспособности разработчика МЭМС.

Микроэлектромеханические устройства представляют собой системы, состоящие из двух взаимосвязанных подсистем: механической и электрической. Причём электронная схема не только считывает сигналы с микромеханических компонентов, но и управляет ими (актюаторы в микрогироскопах и микрорезонаторах).

Для анализа МЭМС-датчиков оказывается недостаточно статических или динамических расчетов только микромеханической части системы. Необходимо обеспечить анализ, в том числе динамический, функционирования всей электронной схемы МЭМС, чтобы определить характеристики проектируемой системы. Поэтому, для реализации подобного анализа необходимо разработать модели элементов МЭМС, учитывающие воздействие физических величин.

В настоящее время при разработке МЭМС возможность их высококачественного и адекватного моделирования не просто обеспечивает сокращение затрат на экспериментальную отработку и доведение схемы до функционирования, а, зачастую, обуславливает принципиальную возможность их создания. Численное моделирование играет ключевую роль в процессе дизайна микросистем и используется не только как средство проектирования, но и в качестве инструмента для анализа взаимодействия между различными физическими полями и поведением системы в целом.

На физическом уровне проектирования компоненты МЭМС описываются связанными дифференциальными уравнениями в частных производных.

Детальная конечно-элементная (КЭ) модель может содержать несколько сотен тысяч узлов (неизвестных), и решение такой связанной системы может занимать длительное время на персональном компьютере. Основные усилия разработчиков направлены на получение сокращенных моделей, пригодных для дальнейшего использования. На этапе схемотехнического проектирования возникает необходимость в упрощенной модели, которая описывается обыкновенными дифференциальными уравнениями. Такая модель называется компактной или макромоделью.

Известно несколько методов макромоделирования:

- метод понижения размерности системы с помощью подпространства [7];
- метод модальной суперпозиции [8, 9, 10, 11];
- метод электромеханических аналогий [12, 13];

1.1.1 Метод понижения размерности системы с помощью подпространства

Пусть рассматриваемая система представляется формой

$$\frac{dx}{dt} = Ax + b, \quad (1.1)$$

где $A \in \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^n$; $b \in \mathbb{R}^n$; n - размерность системы.

При моделировании, в большинстве случаев, важны решения данной системы только в некоторых узлах, следовательно, систему (1.1) можно представить в виде «черного ящика», для которого уравнения имеют вид

$$\frac{dx}{dt} = Ax + Bu, \quad (1.2)$$

где $u \in \mathbb{R}^m$ u - вектор функций входов, $B \in \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^m$ - матрица рассеяния, $y \in \mathbb{R}^p$ - вектор выходных значений. Зависимость между выходными значениями и состоянием системы описывается матрицей $C \in \mathbb{R}^p \times \mathbb{R}^n$ (в общем случае $y = Cx + Du$).

Идея сокращения размерности такой системы в том, что поведение вектора $x(t)$ во времени можно эффективно описать некоторым подпространством малой размерности

$$x = Xz + \varepsilon; z \in \mathbb{R}^k; k \ll n, \quad (1.3)$$

где $\varepsilon \in \mathbb{R}^n$ - погрешность, $X \in \mathbb{R}^k \times \mathbb{R}^n$ - новый уменьшенный базис, z - новый вектор координат уменьшенного базиса. С учетом (1.3) система (1.2) примет вид

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= \hat{A}z + \hat{B}u, \\ \hat{y} &= \hat{C}z \end{aligned} \quad (1.4)$$

В качестве подпространства уменьшенного размера часто выбираются подпространства Крылова [14]. Подпространство Крылова размерности m , порожденное вектором v и матрицей A определено как

$$K_m(v, A) \stackrel{\text{def}}{=} \text{span}(v, Av, A^2v, \dots, A^m v). \quad (1.5)$$

Прийти к уменьшенному базису можно, используя алгоритмы Арнольди или Ланцоша [10]. Главный недостаток этих алгоритмов – отсутствие возможности получения схемного эквивалента сокращенной математической модели МЭМС. К достоинствам данных методов можно отнести возможность оценки глобальной погрешности, а в случае разложения по сингулярным числам – гарантировано лучшую аппроксимацию для выбранного ранга.

Алгоритмы понижения размерности системы с помощью подпространства Крылова работают непосредственно с математическими матрицами, которые, как правило, описывают систему первого порядка, и редуцированная модель не может быть представлена в виде эквивалентной схемы.

1.1.2 Метод модальной суперпозиции

Метод модальной суперпозиции получил широкое распространение для структурного анализа линейных динамических систем второго порядка [13]. В работах [11, 15] этот метод был адаптирован для моделирования связанных микроэлектромеханических систем с электростатическим и магнитным

управлением. В качестве базисных функций в этом методе используются собственные формы колебаний механического подвижного элемента системы.

Метод суперпозиции предполагает, что основные неизвестные, т.е. перемещения, могут быть получены комбинацией (суперпозицией) собственных векторов (мод), умноженных на соответствующие масштабные коэффициенты.

Поскольку собственные векторы доступны, проблема заключается в отыскании значений масштабных коэффициентов.

Вектор перемещений общего вида $\{u(t)\}$ рассматривается как сумма произведений масштабных коэффициентов (относительных смещений для i -той собственной формы) $y_i(t)$ и собственных векторов $\{\phi_i\}$

$$\{u(t)\} = y_1(t) \{\phi_1\} + y_2(t) \{\phi_2\} + \dots + y_p(t) \{\phi_p\}.$$

Каждый вектор имеет n компонент (n равно числу ведущих степеней свободы), а число слагаемых $p \leq n$.

При использовании метода суперпозиции форм колебаний выполняются пять основных шагов

- построение модели;
- получение решения для отдельных форм колебаний;
- получение решения методом суперпозиции;
- расширение решения, полученного суперпозицией (стадия расширения);
- обзор результатов.

Метод макро моделирования МЭМС, основанный на модальной суперпозиции, был встроен в пакеты ANSYS/Multiphysics, IntelliSuite, MEMS Pro и в настоящее время широко используется для генерации макромоделей МЭМС компонентов такими компаниями и организациями как: Bosch, Freescale, Siemens Industry IA&DT AT, TU Chemnitz, TU München, MIT, Fraunhofer IIC/EAS, Fraunhofer ENAS [16, 17, 18]. Макромодель, основанная на методе модальной суперпозиции, хорошо подходит для описания и интеграции МЭМС компонентов в схемотехнические и системные программные пакеты.

Наиболее распространенные инструменты моделирования на системном уровне: на основе направленных графов потока сигнала MATLAB/Simulink; схемотехнический симулятор PSPICE и симуляторы гетерогенных систем на основе VHDL-AMS, VERILOG-AMS языков описания аппаратной части. Пример МЭМС макромодели с использованием модальной суперпозиции в PSPICE представлен в работе [19, 20, 21].

Пакет ANSYS/Multiphysics позволяет генерировать и экспортировать макромодель в VHDL-AMS [22]. Следует отметить, что современные коммерчески доступные МЭМС сенсоры, как правило, имеют цифровой интерфейс и поэтому библиотеки электромеханических компонентов представляют интерес для узкой группы специалистов и не доступны для открытого использования.

На физическом уровне для заданных геометрии и физических параметров строится конечно-элементная модель. Затем выполняется переход к моделям на более высоком уровне, базирующемся на обыкновенных дифференциальных уравнениях. Далее на основе метода макромоделей строится упрощенная модель устройства с сохранением ее основных свойств. Эта модель может быть использована на системном уровне проектирования микросистем для проведения оценочных расчетов.

1.1.3 Метод электромеханических аналогий

В данном методе механические параметры представляются в виде электрических эквивалентов с использованием резисторов, индуктивностей, конденсаторов, источников тока, управляемых напряжением или других электрических компонентов.

В работе [23] приводится описание процесса моделирования и основных характеристик микромеханического конденсаторного микрофона. Механическую чувствительность, резонансную частоту, нулевое прижимное смещение и температурную зависимость диафрагмы определяют через физическую модель элемента, полученную в программе ANSYS. Эта программа позволяет создавать и

оптимизировать модели конструкций (геометрия, краевые условия), изучать реакции конструкции на различные физические воздействия, такие, как воздействие различных нагрузок, температурных и электромагнитных полей, решать задачи механики жидкости и газа.

Микромеханический преобразователь рассматривается как структурно сложная динамическая система, которая состоит из множества блоков со скрытой от внешнего наблюдателя внутренней структурой, взаимодействующих между собой через функциональные связи между видимыми извне переменными.

Структура такой системы обычно является иерархической. Множество элементов системы может, вообще говоря, изменяться в процессе функционирования системы. Как правило, элементы сложной системы характеризуются различными физическими принципами действия, что, в конце концов, не столь заметно в итоговой математической модели, но чрезвычайно важно на этапе построения модели.

Поведение эквивалентного блока строится по описаниям локальных систем с учетом функциональных связей. Наличие связи между контактами означает, что значения переменных, соответствующих контактам, в любой момент равны. Для оценки механической, электростатической и акустической эффективности емкостного преобразователя используется замена полученной модели схемой замещения с использованием однонаправленной связи, где соединяемые контакты делятся на приемник и источник, а также постулируется, что приемник не может влиять на источник.

В случае использования только однонаправленных связей контакты блоков делятся на входы и выходы (такие блоки также называются ориентированными). Входная переменная не может находиться в левой части формулы или дифференциального уравнения, а также являться искомой переменной в алгебраических уравнениях. Источником на данном уровне иерархии может быть выход внутреннего или вход внешнего блока, а приемником - вход внутреннего или выход внешнего блока. Любой источник может участвовать в любом числе связей, в то время как приемник может участвовать только в одной связи.

Ориентированные связи позволяют вполне адекватно описывать информационные взаимодействия между блоками в технических системах, где обычно специально принимаются меры, исключаящие обратное влияние по связи.

Процесс определения параметров преобразователя и разработки электронной схемы разбивается на ряд последовательных, зачастую независимых друг от друга, операций. В таком варианте не учитывается влияние электронной схемы на преобразователь, что накладывает неточность в поведении микромеханической части и, следовательно, в самой электронной схеме и далее в выходном сигнале. Разработка однонаправленных эквивалентных схем является трудоемкой по причине перерасчета физических характеристик в электрический эквивалент.

В рассмотренных примерах электрическое моделирование МЭМС осуществляется независимо от механического путем составления эквивалентных схем или схем замещения. В этой ситуации не учитывается влияние электрической схемы приема, обработки и передачи сигналов с преобразователей физических величин на их основные узлы. В результате, некоторые решения практических задач имеют неудовлетворительный результат.

1.2 Обзор программного обеспечения для моделирования микросистем

Для компьютерного проектирования микромеханических устройств существует ряд программных комплексов. Из них можно выделить CoventorWare, IntelliSuite, MEMSCAP Mems Pro, SUGAR, EM3DS, NODAS, [24, 25, 26, 27].

Программный комплекс IntelliSuite, первая коммерческая система автоматизированного проектирования МЭМС устройств, для конструирования, моделирования и оптимизации МЭМС. IntelliSuite начинает процесс для конструирования не от геометрии устройства, а от параметров изготовления механизма. IntelliSuite оптимизирует конструкции MEMS до изготовления, сокращая цикл времени развития опытного образца и сокращая производственные

затраты. Объединяя в себе шаблоны процесса производства, данные о материале, топологию фотошаблона, и анализ устройства, IntelliSuite предоставляет проектным группам инструментальный комплекс для разработки технологичных устройств с более высоким КПД [25].

Программный комплекс MEMSCAP MemsPro предназначен для автоматизированного проектирования СБИС и микросистем на персональных компьютерах.

В состав САПР входят три основных подсистемы:

- S-Edit – схемный редактор, предназначенный для создания и редактирования электрических схем проектов;
- L-Edit – топологический редактор, предназначенный для синтеза топологии в автоматическом или интерактивном режимах, проверки правил проектирования, экстракции схемы проекта из топологии, сохранения топологии проекта в виде файлов стандартных форматов;
- T-Spice – подсистема схемотехнического моделирования проектов. Данные подсистемы являются автономно функционирующими программными продуктами, не объединенными общей оболочкой [26].

Пакет CoventorWare предназначен для проектирования MEMS-устройств на системном уровне. Проектирование начинается на системном уровне с использованием параметрических моделей, что позволяет оценить, как MEMS-компоненты взаимодействуют между собой и окружающей их системой.

Состав САПР CoventorWare:

- Модуль ARCHITECT предлагает пользователям библиотеки моделей электромеханических, оптических, микрожидкостных, СВЧ и магнитомеханических компонентов. Все эти модели являются параметрическими, что позволяет разработчикам эффективно ориентироваться в пространстве параметров и выполнять оптимизацию. Пользователь может изменять размеры, свойства технологических процессов и материалов, а также внешние воздействия. Специальные инструменты выполняют автоматическую экстракцию плоской топологии устройства из редактора схем в редактор масок. На основе

полученных масок и детального описания технологического процесса модуль DESIGNER генерирует трёхмерные модели MEMS-устройств.

- Модуль ANALYZER предназначен для моделирования и оптимизации специфических физических процессов [24].

Nodal Design of Actuators and Sensors - библиотека для узлового метода моделирования МЭМС. NODASv1.4 - это библиотека параметризованных компонентов для использования в программе моделирования узловым методом SABER для моделирования МЭМС устройств, получаемых поверхностной микрообработкой. Библиотека составлена из подложек, фотошаблонов, анкеров, электростатических гребневых микродвигателей (горизонтальных и вертикальных) и.п. Компоненты могут быть соединены как для представления устройств, так и более сложных систем. Электрические свойства включены в модели компонентов, предоставляя одновременное выполнение электрического и электромеханического анализа.

NODASv1.4 разделяет расчёт местоположения элементов от моделирования их поведения. Пользователь первоначально создаёт схемное решение, используя обозначения компонентов, использует статические модели для расчёта расположения каждого компонента, и затем генерирует новое описание поведения, используя набор динамических моделей, в которых расположение автоматически определено, как статический параметр компонента. Такой подход уменьшает количество узлов и переменных для каждого множества моделей, таким образом, увеличивая общую скорость моделирования, а также помогает устранять ошибки размещения, сделанные пользователем.

SUGAR - инструмент моделирования МЭМС устройств базируется на методах узлового анализа из мира моделирования интегральных схем. Подложки, компоненты интегральных схем и т.д. моделируются двойной системой дифференциальных уравнений.

SUGAR унаследовала своё название и философию от SPICE. МЭМС проектировщик может описывать устройство в компактном формате таблицы соединений, и очень быстро моделировать поведение устройства. Используя

простые моделирования в SUGAR, проектировщик может быстро находить проблемы конструкции или испытывать новые идеи. Далее в процессе конструирования, проектировщик может управлять более детальным моделированием конструкции для проверки неявных эффектов второго порядка.

К сожалению, многим разработчикам МЭМС большинство таких программ пока остаются недоступны по ряду причин. Основная из которых – это стоимость программного продукта, которая зачастую превышает нескольких сотен тысяч евро.

Целью проекта является разработка научно-технических решений для создания программно-инструментальных методов и средств высокоуровневого проектирования микросистем со многими степенями свободы для сокращения времени, стоимости проектирования и производства отечественных микромеханических устройств (МЭМС) в результате использования макромоделей, полученных на физическом уровне проектирования.

2 Принципиальная схема многокомпонентной микросистемы

2.1 Структура и принцип построения микросистемы

Многокомпонентные микросистемы представляют собой модули, объединяющие на общем носителе или в одном корпусе модуля два или несколько однотипных или разнотипных измерительных микромеханических устройств. Примером такой системы является блок инерциальных измерений (IMU-кластер) [28, 29, 30], объединяющий в одном корпусе три взаимно ортогональных акселерометра и гироскопа или трехосевой акселерометр и трехосевой гироскоп. Такие блоки могут быть доукомплектованы трехосевым магнитометром, а также датчиком температуры. Название IMU может применяться для блоков с 4–6 степенями свободы.

IMU, дополненная электроникой и магнитометрами, на аппаратном и программном уровне выполняет основные функции, определенные в названии, то есть предоставляет информацию об ориентации объекта в пространстве. IMU дополняются GPS и другими датчиками, электроникой со специальным программным обеспечением, и таким образом поставляют навигационную информацию и данные о положении.

В то же время и отдельные МЭМС датчики можно рассматривать как микросистемы, поскольку в них сенсорная часть объединена с ASIC, что обеспечивает всю цепочку получения качественного (калиброванного, скомпенсированного, высокоразрешающего и т. д.) сенсорного сигнала.

Объединение вместе с датчиком всех схем, включая оптимизированное питание, обработку сигнала, интерфейс (выходной электрический и входной пользовательский), коммуникацию, программируемость, избыточность, объединение и слияние сенсорных данных нескольких датчиков, сетевые коммуникации — все это различные проявления системного подхода к сенсорной интеграции.

Отдельного МЭМС-датчика недостаточно для определения ориентации в пространстве или описания сложного движения или траектории.

Комбинация таких трёхосевых датчиков как акселерометр, гироскоп и магнитометр вместе с соответствующим аппаратно-программным обеспечением позволяет решать навигационные задачи. Такая микросистема, установленная в корпусе, является мобильной и характеризуется несколькими степенями свободы.

На рисунке 2.1 приведена схема многокомпонентной микросистемы.

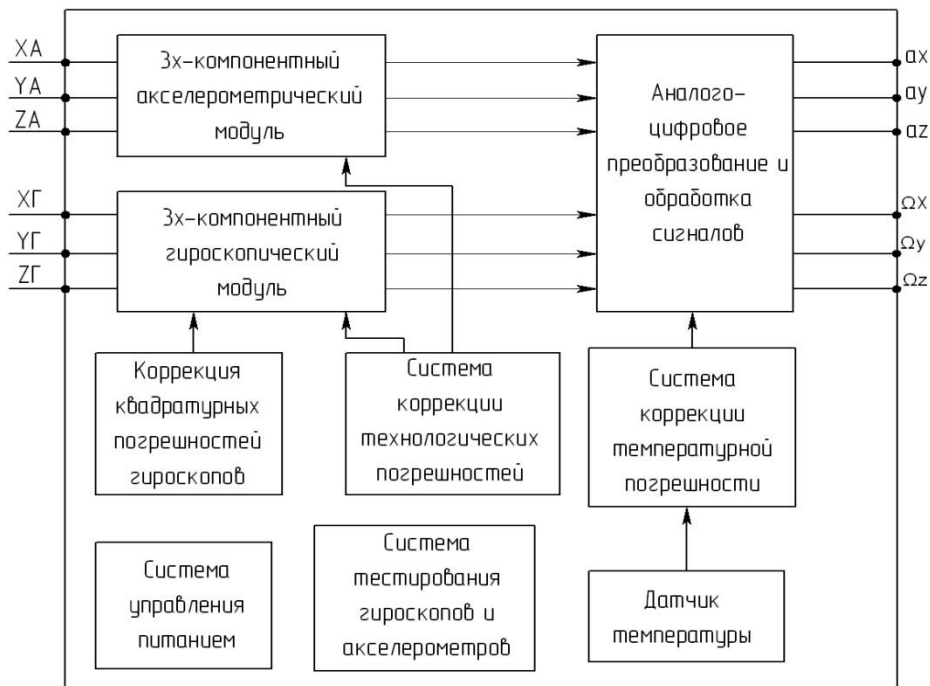


Рисунок 2.1 – Структурная схема многокомпонентной микросистемы

Микросистема включает в себя программно-аппаратную электронную часть и микромеханические измерительные датчики:

- акселерометры, измеряющие три составляющие ускорения поступательного движения объекта;

- микромеханические гироскопы, измеряющие три компоненты
- угловой скорости объекта;
- микрорезонатор, выполняющий функцию измерителя температуры.

Программно-аппаратная часть выполняет следующие функции:

- управлением питанием микросистемы;
- тестирование гироскопов и акселерометров;
- алгоритмическую коррекцию температурных погрешностей датчиков;
- коррекцию технологических погрешностей датчиков;

- коррекцию квадратурных погрешностей гироскопов.

В настоящее время ведущими мировыми производителями в качестве конструкционного материала в производстве МЭМС используется кремний. Кремний представляет собой материал с уникальными механическими характеристиками. Отсутствие гистерезиса, стойкость к перегрузкам на порядок больше, чем у сталей, возможность встраивания схемы обработки сигнала в кристалл чувствительного элемента идеально подходит для конструирования и производства преобразователей физических величин и датчиков.

Основой сенсора является чувствительный элемент, преобразующий механическое перемещение в электрический сигнал. Основным материалом для изготовления чувствительных элементов служит кремний и его соединения.

При изготовлении чувствительных элементов из монокристаллического кремния удаётся получать уникальные параметры изделий: простота конструкции, малые габариты и масса, высокая механическая прочность, очень высокая химическая стойкость, идеальная упругая характеристика, большой срок службы, стабильность электрофизических характеристик в течение длительного времени.

Для проведения макро моделирования микросистемы необходимо составить математические модели её измерительных микродатчиков (микрогироскопы, микроакселерометры, микрорезонансный датчик температуры).

2.2 Микромеханические гироскопы

Целью работы является разработка методов высокоуровневого проектирования микромеханических датчиков, используя макро моделирование на системном уровне. Для этого рассматриваются различные схемы микрогироскопов, чтобы выработать общие принципы их макро моделирования.

2.2.1 Двухкомпонентный гироскоп с совмещёнными измерительными осями

Конструктивная схема и принцип действия данного гироскопа [31] поясняются рисунком 2.2. Схемы построения таких датчиков основаны на принципе работы осцилляторного вибрационного гироскопа. Гироскоп состоит из механической части (сенсора) и электронных блоков.

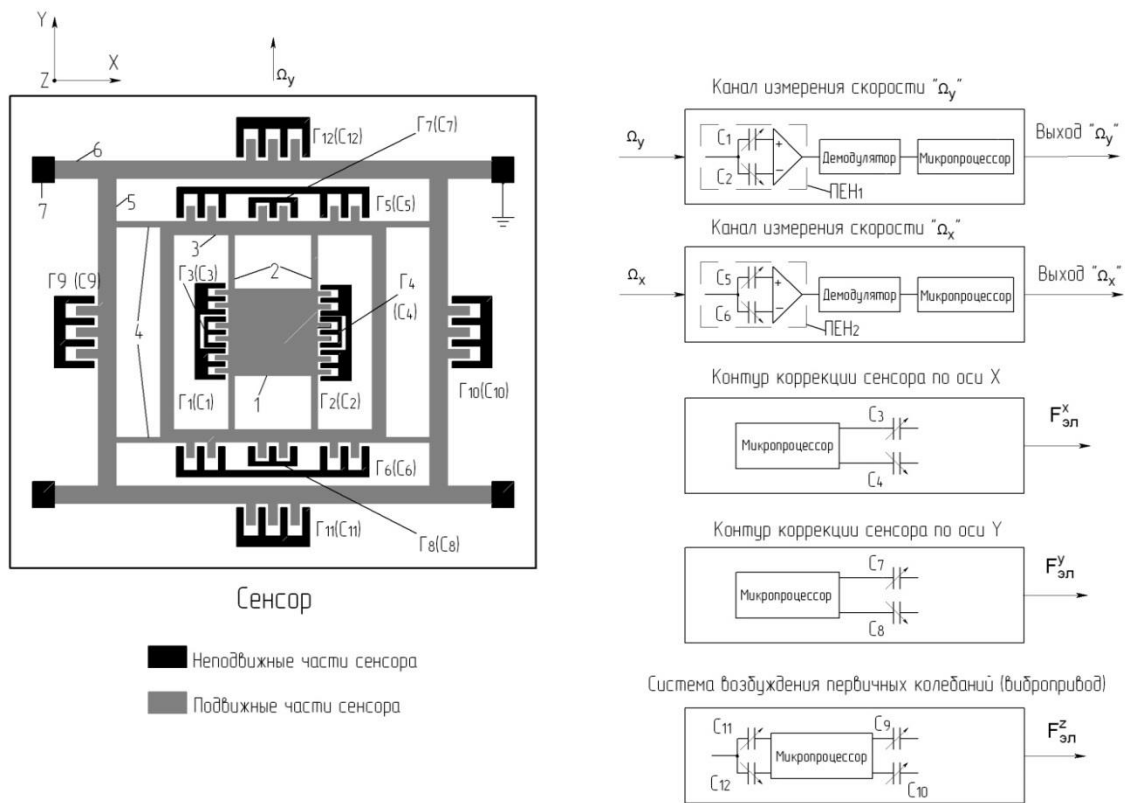


Рисунок 2.2 – Блок схема микрогироскопа

Механическая часть (сенсор гироскопа) представляет собой активную кремниевую структуру, которая содержит инерционное тело (ИТ) 1, установленное во внутренней рамке 3 при помощи упругого подвеса 2, обеспечивающего возможность перемещения тела 1 вдоль оси X. Рама 3 установлена в наружной рамке 5 при помощи упругого подвеса 4, который обеспечивает возможность перемещения рамы 3 вместе с телом вдоль оси Y. Рама 5 установлена в корпусе 7 при помощи упругого подвеса 6, который обеспечивает возможность перемещения рамы 5 вместе с рамой 3 и телом 1 вдоль оси Z.

Гребенчатые структуры Г1, Г2, имеющие емкости C1, C2, входят в состав преобразователя «емкость-напряжение» ПЕН1, который преобразует

перемещения инерционного тела 1, вызванного угловой скоростью Ω_y основания. Гребенчатые структуры Г3, Г4, имеющие емкости С3, С4, являются силовым элементом контура коррекции сенсора по оси X. Гребенчатые структуры Г7, Г8, имеющие емкости С7, С8, являются силовыми элементами контура коррекции сенсора по оси Y.

Гребенчатые структуры Г5, Г6, имеющие емкости С5, С6, входят в состав преобразователя «емкость – напряжение» ПЕН2, который преобразует механическое перемещение рамы 3 вдоль оси Y. Это перемещение возникает при наличии угловой скорости Ω_x . Гребенчатые структуры Г9, Г10, имеющие емкости С9, С10, создают электростатическую силу, которая возбуждает гармонические первичные колебания всей системы вдоль оси Z. Гребенчатые структуры Г11, Г12, имеющие емкости С11, С12, используются в виброприводе для измерения амплитуды перемещения активной структуры вдоль оси Z.

Электронная часть содержит:

- канал измерения угловой скорости вокруг оси X;
- канал измерения угловой скорости вокруг оси Y;
- систему возбуждения первичных колебаний (вибропривод);
- контур коррекции по оси X;
- контур коррекции по оси Y.

Электронная и механическая части макета гироскопа связаны между собой через ёмкости, которые образованы гребенчатыми электродными структурами сенсора.

Электростатический вибропривод (Г9, Г10) возбуждает первичные поступательные гармонические колебания $z(t) = z_0 \sin \omega t$ сенсора гироскопа вдоль оси Z, перпендикулярной плоскости сенсора. Через упругие подвесы эти первичные колебания передаются на инерционное тело 1 и внутреннюю раму 3, которые будут совершать такие же колебания вдоль оси Z.

При вращении основания вокруг оси X с угловой скоростью Ω_x возникает сила Кориолиса, которая заставляет колебаться внутреннюю раму вместе с инерционным телом вдоль оси Y (вторичные колебания). Амплитуда этих

колебаний, измеряемая емкостным датчиком перемещения (Г5, Г6), пропорциональна измеряемой угловой скорости Ω_x поворота объекта.

При вращении основания вокруг оси Y с угловой скоростью Ω_y возникает сила Кориолиса, которая заставляет колебаться инерционное тело вдоль оси X (вторичные колебания). Амплитуда этих колебаний, измеряемая емкостным датчиком перемещения (Г1, Г2), пропорциональна измеряемой угловой скорости Ω_y поворота объекта. Таким образом, измерительными осями гироскопа являются оси X и Y.

Используя уравнение Лагранжа, получим уравнения движения сенсора гироскопа в виде

$$m_1 \ddot{y} + \mu_y \dot{y} + y[k_y - m_1(\Omega_z^2 + \Omega_x^2)] = 2m_1 \dot{z}\Omega_x - 2m_1 \dot{x}\Omega_z - m_1 x\Omega_x\Omega_y - m_1 z\Omega_y\Omega_z + F_1 - m_1 \alpha_y \quad (2.1)$$

$$(m_1 + m_2) \ddot{x} + \mu_x \dot{x} + x[k_x - (m_1 + m_2)(\Omega_z^2 + \Omega_y^2)] = -2(m_1 + m_2) \dot{z}\Omega_y + 2(m_1 + m_2) \dot{y}\Omega_z + (m_1 + m_2) z\Omega_x\Omega_z - m_1 y\Omega_x\Omega_y + F_2 - (m_1 + m_2) \alpha_x,$$

$$(m_1 + m_2 + m_3) \ddot{z} + \mu_z \dot{z} + z[k_z - (m_1 + m_2 + m_3)(\Omega_x^2 + \Omega_y^2)] = F_m \sin qt - 2m_1 \dot{y}\Omega_x + 2(m_1 + m_2) \dot{x}\Omega_y - m_1 y\Omega_y\Omega_z - (m_1 + m_2) x\Omega_x\Omega_z + F_3 - (m_1 + m_2 + m_3) \alpha_z, \quad (2.2)$$

где m_1, m_2, m_3 - масса инерционного тела и рамок подвеса; k_x, k_y, k_z - коэффициенты жёсткости подвесов; μ_x, μ_y, μ_z - коэффициенты сил вязкого трения в направлении соответствующих обобщённых координат; $\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$ - ускорения поступательного движения объекта; $F = F_m \sin qt$ - сила, создаваемая виброприводом; F_1, F_2, F_3 - силы, обусловленные статической несбалансированностью гироскопа.

$$F_1 = m_1 [-\delta_{zM} \Omega_y \Omega_z + \delta_{yM} (\Omega_x^2 + \Omega_z^2) - \Omega_x \Omega_y \delta_{xM}];$$

$$F_2 = +(m_1 + m_2) [-\delta_{zB} \Omega_x \Omega_z + \delta_{xB} \Omega_z^2 - \delta_{yB} \Omega_x \Omega_y + \delta_{xB} \Omega_y^2]$$

$$F_3 = (m_1 + m_2 + m_3) [\delta_z (\Omega_x^2 + \Omega_y^2) - \delta_y \Omega_y \Omega_z - \delta_x \Omega_x \Omega_z]$$

Уравнение (2.2) описывает первичные колебания гироскопа, которые возбуждаются виброприводом. Амплитуда этих колебаний должна

поддерживаться постоянной, что обеспечивается в гироскопе при помощи системы возбуждения первичных колебаний, следовательно, те силы, которые зависят от вторичных колебаний сенсора, в уравнении (2.2) можно не учитывать. Уравнения (2.1), определяющие колебания гироскопа вдоль осей x или y , являются основными информационными уравнениями, которые используются для определения угловых скоростей объекта Ω_x и Ω_y . Имеются перекрёстные связи между измерительными каналами через угловые скорости поворота объекта, которые вызывают погрешности гироскопа. Для анализа общих закономерностей этими перекрёстными связями можно пренебречь, тогда уравнения сенсора гироскопа примут вид

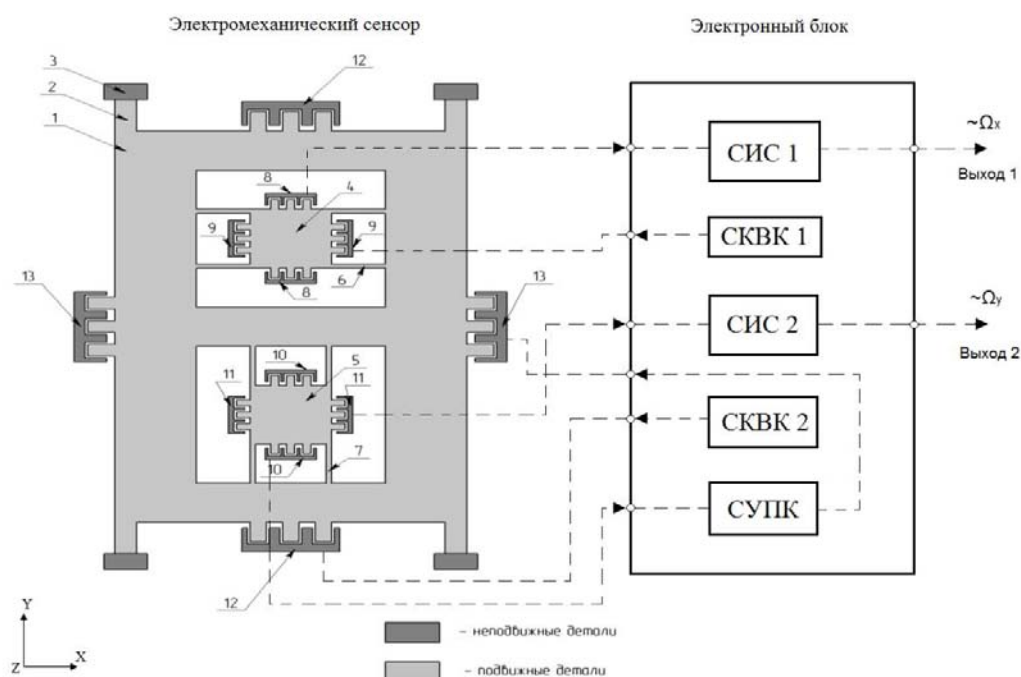
$$\begin{aligned}
 m\ddot{z} + \mu_z \dot{z} + [k_z - m(\Omega_y^2 + \Omega_x^2)]z &= F_{эл} + F_z + ma_z, \\
 (m_1 + m_2)\ddot{x} + \mu_x \dot{x} + [k_x - (m_1 + m_2)(\Omega_y^2 + \Omega_z^2)]x &= -2(m_1 + m_2)\Omega_y \dot{z} + \\
 + F_x + (m_1 + m_2)a_x + F_{эл}^x, \\
 m_1\ddot{y} + \mu_y \dot{y} + [k_y - m_1(\Omega_x^2 + \Omega_z^2)]y &= 2m_1\Omega_x \dot{z} + F_y + m_1a_y + F_{эл}^y,
 \end{aligned} \tag{2.3}$$

где $(m_1+m_2+m_3)=m$; $F_{эл}$ – сила, создаваемая электростатическим виброприводом; $F_{эл}^y, F_{эл}^x$ – электростатические силы, создаваемые емкостными датчиками информативных колебаний гироскопа. Таким образом, сенсор двухкомпонентного гироскопа представляет собой три резонатора, причём резонатор первичного канала не зависит от резонаторов информативных колебаний.

2.2.2 Двухкомпонентный гироскоп с общей осью первичных колебаний и независимыми измерительными осями

Конструктивная схема и принцип действия данного гироскопа поясняются рисунком 2.3. Гироскоп включает в себя электромеханический кремниевый сенсор и электронный блок. Сенсор содержит рамку 1, установленную на упругом подвесе 2 в основании 3. В рамке установлены две чувствительные массы 5 и 4 с взаимно перпендикулярными осями подвеса 6, 7. Рамка вместе с чувствительными массами совершает первичные колебания вдоль оси Z , которые

возбуждаются гребенчатым виброприводом 13 или планарным виброприводом, расположенным под данной инерционной массой и представляющим собой два плоских электрода.



СИС 1, СИС 2 – системы измерения скоростей Ω_x , Ω_y ;

СКВК 1, СКВК 2 – системы коррекции вторичных колебаний;

СУПК – система управления первичными колебаниями

Рисунок 2.3 – Сенсор ММГ с общей осью первичных колебаний

В этом случае один из электродов в виде напыления металла расположен на основании, другим является рамка 1. При наличии угловых скоростей поворота объекта возникают силы Кориолиса, пропорциональные этим угловым скоростям, которые вызывают вторичные информативные колебания чувствительных масс вдоль осей X и Y. Амплитуда колебаний чувствительной массы 4 вдоль оси Y пропорциональна угловой скорости объекта вокруг оси X.

Амплитуда колебаний чувствительной массы 5 вдоль оси X пропорциональна угловой скорости объекта вокруг оси Y. Гребенчатые структуры 8, 11 используются для определения информации об угловых скоростях объекта. Гребенчатые структуры 9, 10 используются для коррекции погрешностей гироскопа. Гребенчатые структуры 12 используются в системе

управления первичными колебаниями (СУПК) гироскопа для измерения амплитуды первичных колебаний.

Уравнения движения сенсора гироскопа имеют вид [9]

$$m\ddot{z} + \mu_z \dot{z} + [k_z - m(\Omega_y^2 + \Omega_x^2)]z = F_{эл} + 2m_2\Omega_y \dot{x} - 2m_3\Omega_x \dot{y} - m_2x\Omega_x\Omega_z - m_3\Omega_y\Omega_z y + F_z + ma_z, \quad (2.4)$$

$$m_2\ddot{x} + \mu_x \dot{x} + [k_x - m_2(\Omega_y^2 + \Omega_z^2)]x = -2m_2\Omega_y \dot{z} - m_2z\Omega_x\Omega_z + F_x + ma_x, \\ m_3\ddot{y} + \mu_y \dot{y} + [k_y - m_3(\Omega_x^2 + \Omega_z^2)]y = 2m_3\Omega_x \dot{z} - m_3z\Omega_y\Omega_z + F_y + ma_y, \quad (2.5)$$

где $m=m_1+m_2+m_3$; m_1, m_2, m_3 – массы тел 1, 5 и 4 соответственно; F_x, F_y, F_z – силы, обусловленные статической несбалансированностью сенсора гироскопа; $F_{эл}$ – сила, создаваемая виброприводом.

Уравнение (2.4) характеризует первичные колебания сенсора гироскопа, уравнения (2.5) определяют его информативные колебания.

Амплитуда первичных колебаний гироскопа должна поддерживаться стабильной при помощи системы управления первичными колебаниями. Кроме того, амплитуды информативных колебаний $x \ll z$ и $y \ll z$, следовательно, в уравнении (2.4) можно опустить слагаемые, характеризующие эти связи, тогда уравнения сенсора гироскопа примут вид

$$m\ddot{z} + \mu_z \dot{z} + [k_z - m(\Omega_y^2 + \Omega_x^2)]z = F_{эл} + F_z + ma_z, \\ m_2\ddot{x} + \mu_x \dot{x} + [k_x - m_2(\Omega_y^2 + \Omega_z^2)]x = -2m_2\Omega_y \dot{z} - m_2z\Omega_x\Omega_z + F_x + ma_x, \quad (2.6) \\ m_3\ddot{y} + \mu_y \dot{y} + [k_y - m_3(\Omega_x^2 + \Omega_z^2)]y = 2m_3\Omega_x \dot{z} - m_3z\Omega_y\Omega_z + F_y + ma_y,$$

Из уравнений (2.6) видно, что сенсор гироскопа представляет собой сочетание трёх резонаторов: один по оси Z первичных колебаний и два резонатора по осям X, Y информативных колебаний, причём измерительные оси не зависят друг от друга.

2.2.3 Двухкомпонентный гироскоп с изолированными измерительными осями

Принцип действия гироскопа поясняет схема, представленная на рисунке 2.4. Микромеханический гироскоп содержит кремниевый сенсор 1 (механическая структура) и электронный блок (ЭБ). Сенсор выполнен в виде структуры стекло-кремний-стекло и содержит два чувствительных элемента (ЧЭ1, ЧЭ2), установленные на стеклянной подложке 2.

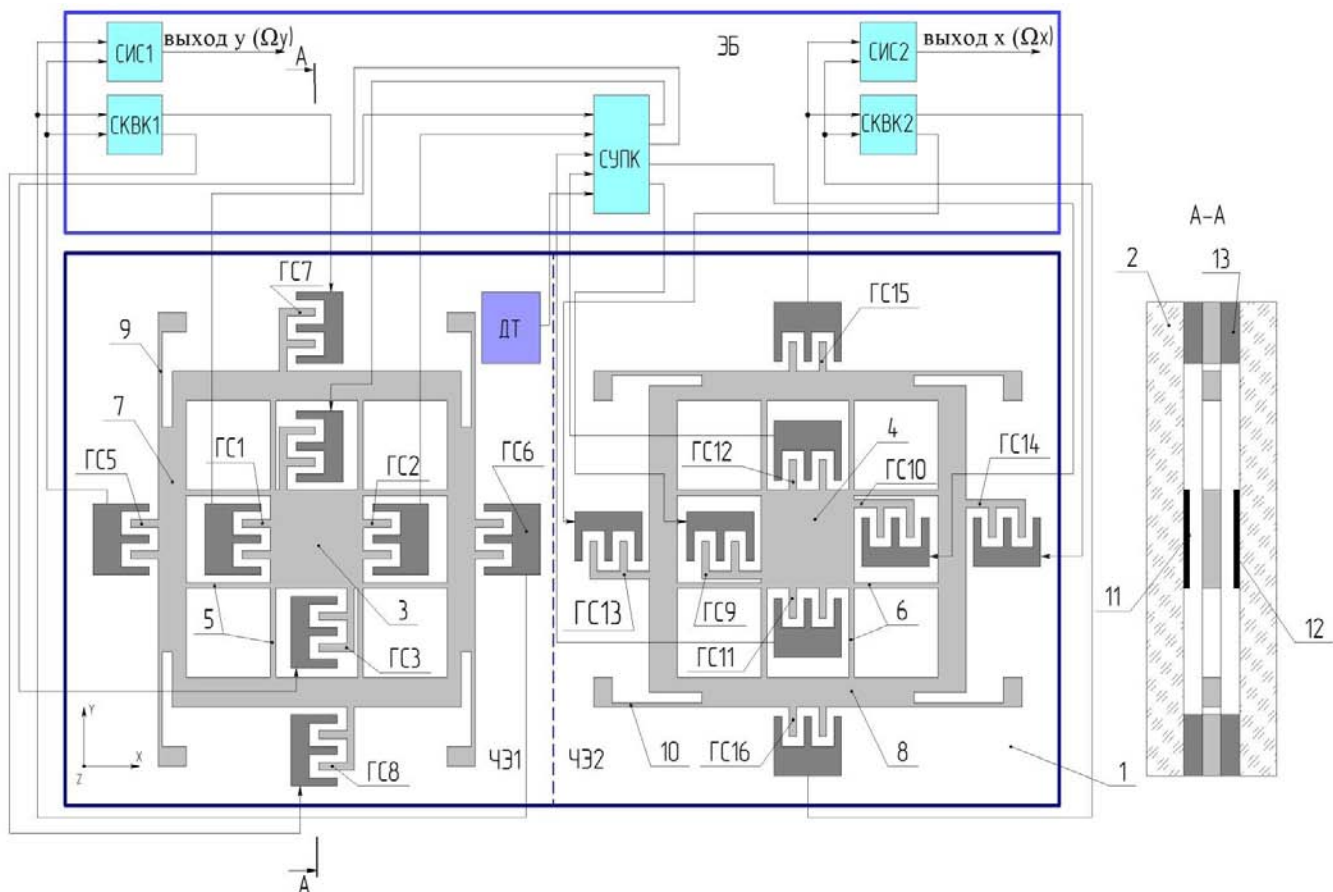


Рисунок 2.4 – Принципиальная схема ММГ

Оба ЧЭ имеют одинаковую электромеханическую структуру, но их измерительные оси развёрнуты относительно друг друга на 90^0 . Каждый ЧЭ содержит инерционное тело 3 (или 4), которое имеет свободу перемещения вдоль оси Z относительно корпуса.

Инерционные тела чувствительных элементов сенсора установлены на упругих элементах 5, 6 в активных кремниевых рамках 7, 8, первая из которых имеет свободу перемещения вдоль оси X вместе с инерционным телом 3, а вторая – свободу перемещения вдоль оси Y вместе с инерционным телом 4. Жёсткость

упругого подвеса 9 рамки 7 вдоль оси X намного меньше жёсткости во всех других направлениях. Жёсткость упругого подвеса 10 рамки 8 вдоль оси Y намного меньше его жёсткости во всех других направлениях.

С инерционным телом 3 связаны подвижные электроды гребенчатых структур ГС1, ГС2, ГС3, ГС4. С рамкой 7 чувствительного элемента ЧЭ1 связаны подвижные электроды гребенчатых структур ГС5 ÷ ГС8. Первичные колебания инерционных тел каждого чувствительного элемента задаются при помощи электростатических планарных виброприводов, подвижными электродами которых являются инерционные тела 3, 4, неподвижные электроды 11 и 12 расположены на подложке 2 и крышке 13.

При наличии угловой скорости Ω_y вокруг оси OY возникает знакопеременная кориолисова сила, направленная вдоль оси OX и возбуждающая колебания рамки 7 вместе с инерционным телом 3 вдоль оси OX. Частота этих колебаний совпадает с частотой первичных колебаний инерционного тела, амплитуда колебаний рамки пропорциональна угловой скорости Ω_y объекта и измеряется емкостными датчиками перемещения, в состав которых входят гребенчатые структуры ГС5, ГС6. Для коррекции параметров вторичных колебаний ЧЭ1 применяются емкостные корректирующие устройства, образованные гребенчатыми структурами. ГС7, ГС8.

С инерционным телом 4 связаны подвижные электроды гребенчатых структур ГС9, ГС10, ГС11, ГС12. С рамкой 8 чувствительного элемента ЧЭ2 связаны подвижные электроды гребенчатых структур ГС13 ÷ ГС16.

При наличии угловой скорости Ω_x вокруг оси OX возникает знакопеременная кориолисова сила, направленная вдоль оси OY и возбуждающая колебания рамки 8 вместе с инерционным телом 4 вдоль оси OY. Частота этих колебаний совпадает с частотой первичных колебаний инерционного тела, амплитуда колебаний рамки пропорциональна угловой скорости Ω_x объекта и измеряется емкостными датчиками перемещения, в состав которых входят гребенчатые структуры ГС15, ГС16.

Для коррекции параметров вторичных колебаний ЧЭ2 применяются емкостные корректирующие устройства, образованные гребенчатыми структурами ГС13, ГС14.

Амплитуды первичных колебаний ЧЭ1 и ЧЭ2 вдоль оси Z измеряются емкостными датчиками, в состав которых входят гребенчатые структуры ГС1, ГС2 и ГС11, ГС12. Гребенчатые структуры ГС3, ГС4 и ГС9, ГС10 используются для коррекции параметров первичных каналов чувствительных элементов.

Электронный блок каждого чувствительного элемента включает в себя:

- систему управления каналом первичных колебаний (СУПК);
- систему коррекции параметров вторичных колебаний (СКВК1, СКВК2);
- систему измерения скоростей Ω_x , Ω_y (СИС_x, СИС_y).

Математическая модель сенсора гироскопа имеет вид

$$(m_1 + m_2)\ddot{x} + \mu_x \dot{x} + x[k_x - (m_1 + m_2)(\Omega_z^2 + \Omega_y^2)] = -2m_2 \dot{z} \Omega_y + -m_2 \Omega_x \Omega_z z + F_1 - (m_1 + m_2)a_x, \quad (2.7)$$

$$m_2 \ddot{z} + \mu_z z + z[k_z - m_2(\Omega_y^2 + \Omega_x^2)] = F_{эл} + F_2 - m_2 \Omega_y \dot{x} - m_2 \Omega_x \Omega_z z - m_2 a_z, \quad (2.8)$$

$$(m_1 + m_2)\ddot{y} + \mu_y \dot{y} + y[k_y - (m_1 + m_2)(\Omega_z^2 + \Omega_x^2)] = 2m_2 \dot{z} \Omega_x - m_2 \Omega_y \Omega_z + + F_3 - (m_1 + m_2)a_y, \quad (2.9)$$

$$m_2 \ddot{z} + \mu_z z + z[k_z - m_2(\Omega_y^2 + \Omega_x^2)] = F_{эл} + F_4 - m_2 \Omega_x \dot{y} - m_2 \Omega_y \Omega_z y - m_2 a_z, \quad (2.10)$$

где $F_{эл}$ – сила, создаваемая виброприводом; F_1, F_2, F_3, F_4 – силы, обусловленные статической несбалансированностью ЧЭ сенсора гироскопа.

$$F_1 = (m_1 + m_2)(\Omega_z^2 + \Omega_y^2)\delta_x - (m_1 + m_2)\Omega_x \Omega_z \delta_z + (m_1 + m_2)\Omega_x \Omega_y \delta_y.$$

$$F_2 = m_2(\Omega_y^2 + \Omega_x^2)\delta_{z2} - \Omega_y \Omega_z \delta_{y2} - \Omega_x \Omega_z \delta_{x2}. \quad (2.11)$$

$$F_3 = (m_1 + m_2)(\Omega_z^2 + \Omega_x^2)\delta_y - (m_1 + m_2)\Omega_x \Omega_y \delta_x - (m_1 + m_2)\Omega_z \Omega_y \delta_z$$

$$F_4 = m_2(\Omega_y^2 + \Omega_x^2)\delta_{z2} - \Omega_x \Omega_z \delta_{x2} - \Omega_y \Omega_z \delta_{y2}.$$

Уравнения (2.7), (2.8) описывают колебания первого чувствительного элемента сенсора, уравнения (2.9), (2.10) – второго. Параметры обоих ЧЭ считаем

одинаковыми. Уравнения (2.8), (2.10) характеризуют первичные колебания чувствительных элементов.

Уравнения (2.7), (2.9), определяющие колебания ЧЭ1 и ЧЭ2 вдоль осей X и Y, являются основными информационными уравнениями, которые используются для определения угловых скоростей объекта Ω_x и Ω_y .

Амплитуда первичных колебаний гироскопа поддерживается постоянной, при помощи системы управления первичными колебаниями, следовательно, те силы, которые зависят от угловых скоростей поворота объекта, в уравнениях (2.8), (2.10) можно не учитывать. Тогда уравнения сенсора гироскопа будут иметь вид

$$m\ddot{x} + \mu_x \dot{x} + x[k_x - m(\Omega_z^2 + \Omega_y^2)] = -2m_2 \dot{z} \Omega_y + F_1 - m a_x, \quad (2.12)$$

$$m_2 \ddot{z} + \mu_z \dot{z} + z[k_z - m_2(\Omega_y^2 + \Omega_x^2)] = F_{эл} + F_2 - m_2 a_z,$$

$$m\ddot{y} + \mu_y \dot{y} + y[k_y - m(\Omega_z^2 + \Omega_x^2)] = 2m_2 \dot{z} \Omega_x + F_3 - (m_1 + m_2) a_y, \quad (2.13)$$

$$m_2 \ddot{z} + \mu_z \dot{z} + z[k_z - m_2(\Omega_y^2 + \Omega_x^2)] = F_{эл} + F_4 - m_2 a_z,$$

где $m = m_1 + m_2$. Каждый гироскоп представляет собой два резонатора (ось первичных и вторичных колебаний).

2.3 Микромеханические акселерометры

В соответствии со структурной схемой многокомпонентной микросистемы (рис. 2.1), измерение трёх проекций ускорения поступательного движения объекта можно осуществить при помощи трёх однокомпонентных акселерометров или одного трёхкомпонентного (рис. 2.5).

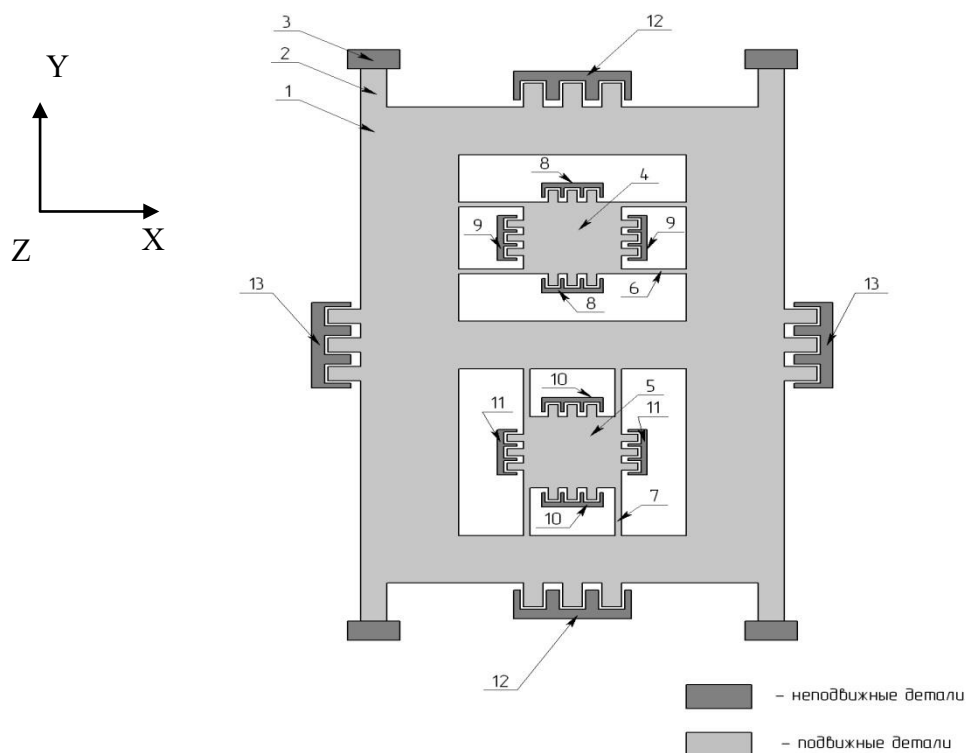


Рисунок 2.5 – Трёхкомпонентный осевой микроакселерометр

Конструктивная схема механического сенсора акселерометра аналогична схеме сенсора микромеханического гироскопа.

Чувствительным элементом для измерения ускорения вдоль оси X является инерционное тело 5, которое при наличии ускорения перемещается относительно корпуса. Это перемещение измеряется емкостными датчиками 11. Электродные структуры 10 используются для коррекции и реализации обратной связи в этом измерительном канале.

Чувствительным элементом для измерения ускорения вдоль оси Y является инерционное тело 4, которое при наличии ускорения перемещается относительно корпуса. Это перемещение измеряется емкостными датчиками 9. Электродные структуры 8 используются для коррекции и реализации обратной связи в этом измерительном канале.

Чувствительным элементом для измерения ускорения вдоль оси Z является рама 1, которая при наличии ускорения перемещается относительно корпуса вместе с телами 4 и 5. Это перемещение измеряется емкостными датчиками 12. Электродные структуры 13 используются для коррекции и реализации обратной связи в этом измерительном канале.

Движение инерционных тел определяют силы инерции, силы вязкого трения, силы упругости подвеса, силы электростатического взаимодействия вследствие разности потенциалов между обкладками конденсатора. Уравнения микроакселерометра имеют вид

$$\begin{aligned}
 m\ddot{z} + \mu_z \dot{z} + [k_z - m(\Omega_y^2 + \Omega_x^2)]z &= ma_z + F_{эл}^z + 2m_2\Omega_y \dot{x} - 2m_3\Omega_x \dot{y} - m_2x\Omega_x\Omega_z - \\
 &- m_3\Omega_y\Omega_z y, \\
 m_2\ddot{x} + \mu_x \dot{x} + [k_x - m_2(\Omega_y^2 + \Omega_z^2)]x &= ma_x - m_2z\Omega_x\Omega_z + F_{эл}^x, \\
 m_3\ddot{y} + \mu_y \dot{y} + [k_y - m_3(\Omega_x^2 + \Omega_z^2)]y &= ma_y + 2m_3\Omega_x \dot{z} - m_3z\Omega_y\Omega_z + F_{эл}^y,
 \end{aligned} \tag{2.14}$$

где $m=m_1+m_2+m_3$; m_1, m_2, m_3 – массы тел 1, 5 и 4 соответственно.

Из уравнений (2.14) видно, что акселерометр представляет собой три осциллятора с силами вязкого трения.

2.4 Микромеханический резонатор

МЭМС резонаторы, обладая повышенной устойчивостью к внешним механическим воздействиям, могут применяться вместо кварцевых в качестве задающего элемента для формирования колебаний со стабильной частотой [32]. Однако характеристики микрорезонатора зависят от температуры, что вызывает необходимость применения дополнительных схем температурной компенсации, а также дорогостоящих корпусов для герметизации.

В то же время зависимость характеристик резонатора от температуры можно использовать для её измерения, располагая резонатор на одной кремниевой пластине вместе с микрогиротропами и акселерометрами.

В качестве датчика температуры предлагается использовать резонатор, схема которого представлена на рисунке 2.6.

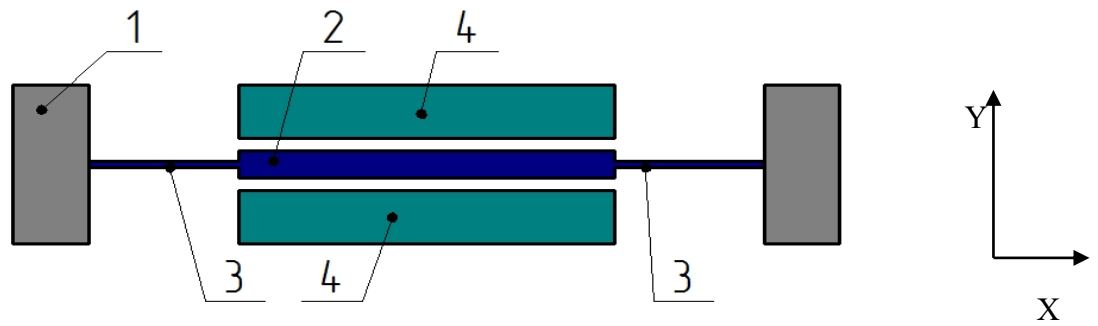


Рисунок 2.6 – Микромеханический резонатор

В общем случае микромеханический резонатор состоит из неподвижных управляющих электродов 4, на один из которых подается постоянное управляющее напряжение, на другие – переменный входной сигнал, и подвижной резонирующей части 2, установленной в корпусе на упругих элементах 3. При этом резонирующая часть и неподвижные электроды образуют емкостные зазоры. При воздействии на электроды переменного входного сигнала образуется переменное во времени электростатическое поле, вызывающее колебание подвижной части конструкции.

Топология микрорезонаторов, реализуемых с помощью MEMS-технологии, разнообразна. Выбор топологии диктуется частотным диапазоном и стабильностью. Резонансная частота MEMS-резонатора зависит от свойств материала структуры и ее геометрии. Различия в устройстве электромеханических преобразователей, конфигурациях и размерах резонирующего элемента, его заземлениях позволяют варьировать основные параметры эквивалентного колебательного контура, такие, как резонансная частота, добротность, эквивалентное последовательное сопротивление и уровень фазовых шумов.

Уравнение, описывающее динамику микрорезонатора, имеет вид

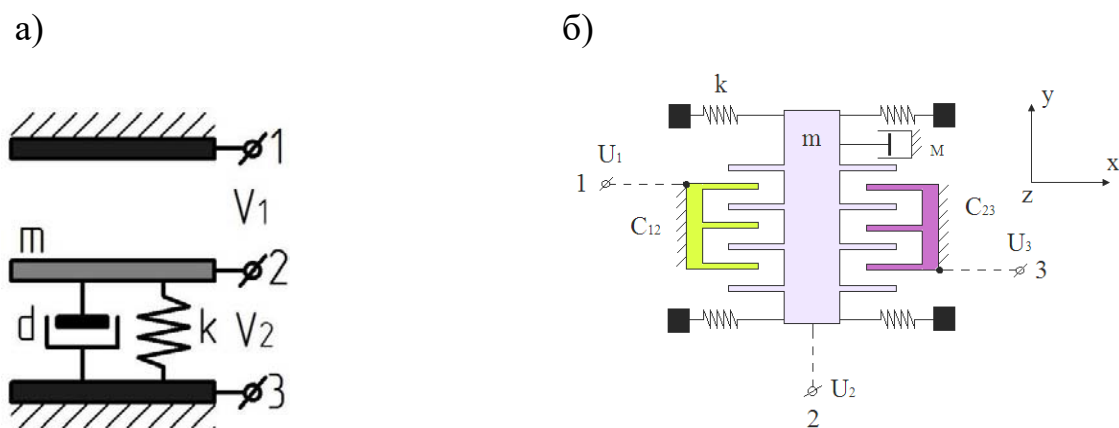
$$m\ddot{y} + \mu_y \dot{y} + ky = F_{эл} - ma_y, \quad (2.15)$$

При приложении между электродами электрического напряжения возникает электростатическая сила и компенсирующая её сила упругости. Кроме того, на систему может действовать внешняя сила, например, из-за ускоренного движения объекта.

2.5 Принцип высокоуровневого проектирования микромеханических систем

Большинство САПР, которые используются для проектирования микромеханических систем, при построении математической модели используют метод конечных элементов. Однако в этом случае возникает проблема – огромные размеры математических моделей, достигающие сотни тысяч уравнений. Единственным возможным выходом из этой ситуации является сокращение размерности математической модели МЭМС и получение ее схемного аналога в виде макромоделей. Поэтому разработка и исследование эффективности методов построения схемных эквивалентов неэлектрических составляющих макромоделей МЭМС является актуальной проблемой в наше время.

Все сенсоры многокомпонентной микросистемы можно представить в виде колебательных систем (осцилляторы) с электростатическими силами, эквивалентная обобщенная схема которых изображена на рисунке 2.7.



а – осциллятор с планарными электродами;

б – осциллятор с гребенчатыми электродами

Рисунок 2.7 – Эквивалентные схемы сенсоров микросистемы

Динамическое уравнение, описывающее осциллятор, возбуждаемый электростатическими силами, в модальных координатах для i -той моды, имеет вид

$$m_i \ddot{q}_i + d_i \dot{q}_i + f_i^y = f_i^э + f_i^{ex}, \quad (2.16)$$

где m_i – модальная масса; d_i – модальный коэффициент демпфирования; q_i – модальные амплитуды (смещение i -моды); f_i^{ex} – внешние силы, обусловленные вибрацией, ускоренным движением объекта, технологическим дефектами.

При приложении между электродами электрического напряжения возникают электростатическая сила притяжения $f_i^э$ и компенсирующая её сила упругости f_i^y . Кроме того, на систему может действовать внешняя сила f_i^{ex} . Сила упругости определяется как

$$f_i^y = \frac{\partial \Pi_i}{\partial q_i},$$

где Π_i – энергия деформации упругого элемента системы.

Электростатическая сила вычисляется как производная от функции ёмкости

$$f_i^э = \frac{1}{2} \sum_r \frac{\partial C_{kl}}{\partial q_i} (V_k - V_l)^2,$$

где V_k, V_l – соответственно электрические потенциалы на обкладках k и l , $r = n(n-1)/2$ – число емкостей n -электродной системы. Межэлектродная ёмкость связывает механическое и электрическое взаимодействие в системе. Ток I_j через электрод j определяется количеством заряда Q_j , протекающим по нему в единицу времени

$$I_j = \frac{\partial Q_j}{\partial t} = \sum_r \left[\left(\sum_m \frac{\partial C_{kl}}{\partial q_m} \dot{q}_m \right) (V_k - V_l) + C_{kl} (\dot{V}_k - \dot{V}_l) \right]. \quad (2.17)$$

Дифференциальные уравнения (2.16), (2.17) определяют макромодель, которая описывает динамическую микромеханическую систему с электростатическим управлением. На каждую моду i и каждый электрод j приходится по одному уравнению, следовательно, редуцированная система содержит $(m+r)$ уравнений. Обычно для расчёта достаточно использовать 2-3 моды.

Структурные смещения u могут быть вычислены из модальных амплитуд q_i следующим образом

$$u(x, y, z, t) = u_0 + \sum_{i=1}^m \phi_i(x, y, z) q_i(t), \quad (2.18)$$

где u_0 – начальное смещение структуры; $\{\phi_i\}$ – собственные вектора, используемые в макромодели.

Модальная жесткость k_i определяется как вторая частная производная от энергии деформации, по соответствующей модальной координате

$$k_i = \frac{\partial^2 \Pi}{\partial q_i \partial q_i}. \quad (2.19)$$

Модальные массы m_i вычисляются из соотношения собственных частот и модальных жесткостей k_i ,

$$m_i = \frac{k_i}{\omega_i^2}. \quad (2.20)$$

Модальные коэффициенты d_i определяются из модальных коэффициентов затухания ξ_i

$$d_i = 2\xi_i \omega_i m_i.$$

Коэффициенты затухания $\xi_i = 1/2Q_i$ в случае воздушного демпфирования могут быть получены с помощью аналитических методов расчета поведения газа в малых зазорах между стенками, которые движутся нормально (сжатие) или тангенциально (скольжение) [33, 34]; из результатов численного моделирования гидрогазодинамических процессов (CFD) или непосредственно из измерений.

Таким образом, энергия деформации, межэлектродные ёмкости и коэффициенты демпфирования являются основными параметрами, характеризующими электромеханическую систему.

Эти параметры макромодели могут быть получены из КЭ модели МЭМС. Генерация макромодели производится числовой выборкой данных и последующей аппроксимацией результатов [9]. На каждом шаге последовательно

выполняются структурный, электростатический и газодинамический анализы системы.

Анализ собственных форм колебаний (мод) упругого элемента резонатора применяется для определения динамических характеристик на основе результатов анализа вынужденных механических колебаний.

Чтобы вычислить энергию деформации $\Pi(q_1, q_2, \dots, q_m)$ в структурной области, к микроструктуре прикладываются смещения в виде линейной комбинации выбранных собственных форм. Например, в случае k точек для каждой переменной q_i , общее число ортогональных точек выборки k_m . На каждом шаге r раз выполняется линейный электростатический анализ, чтобы вычислить межэлектродные емкости $C_r(q_1, q_2, \dots, q_m)$ в деформированной межэлектродной области.

Рабочий диапазон каждой моды зависит от полного диапазона перемещения структуры D_{\max} и пропорционален её модальному фактору

$$q_i^{\max} = \frac{D_{\max}}{\omega_i^2} \left(\sum_{j=1}^m \omega_j^{-2} \right)^{-1}$$

Выбор необходимых для макромодели мод требует определенной квалификации от разработчика, поэтому для автоматического выбора рекомендуется использовать статическую тестовую нагрузку упругого элемента. Для упрощения, в качестве тестовой нагрузки можно использовать эквивалентное электростатическое давление

$$P_e = \frac{\varepsilon}{2} \left(\frac{V}{\text{gap}} \right)^2. \quad (2.21)$$

Систему уравнений для вычисления модальных факторов k_i можно записать в виде

$$\begin{bmatrix} \phi_1^1 & \phi_1^2 & \dots & \phi_1^m \\ \phi_2^1 & \phi_2^2 & \dots & \phi_2^m \\ \phi_3^1 & \phi_3^2 & \dots & \phi_3^m \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \phi_n^1 & \phi_n^2 & \dots & \phi_n^m \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ \vdots \\ k_m \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ \vdots \\ u_n \end{Bmatrix}, \quad (2.22)$$

где $\{\phi^i\}$ – i -ый собственный вектор, $\{u\}$ – вектор механических перемещений системы, полученный из тестовой нагрузки, m – число мод, n – общее число степеней свободы системы. Для уменьшения размерности системы (2.22) можно использовать только узлы нейтрального слоя, который при изгибных колебаниях упругого элемента не подвержен деформациям растяжения.

Основанная на детальной КЭ модели, редуцированная модель имеет всего несколько степеней свободы, но позволяет адекватно описывать нелинейную динамику МЭМС из-за нелинейных электростатических сил, геометрической нелинейности, повышение жёсткости из-за механических напряжений. Макромодель поддерживает многоэлектродные системы и обладает масштабируемостью на системном уровне. Например, позволяет моделировать механический контакт на системном уровне, нелинейные эффекты воздушного демпфирования, вызванные изменением зазора.

Используя полученные зависимости, решается система уравнений в схемотехническом пакете, в качестве которого используется MATLAB/Simulink, который широко применяется для быстрого прототипирования. Пользовательские функции MATLAB/Simulink используются для расчёта вектора сил упругости $\{f_i^y\}$, емкостей и их производных на каждом временном шаге. Связь между механическим и электрическим доменами осуществляется посредством вектора электростатических сил $\{f_i^e\}$, вызванного вектором модальных перемещений $\{q_i\}$. Вектор электростатических сил прикладывается через сумматор к механическому домену.

В системе выделяются отдельные элементарные материальные элементы, рассматриваемые как носители определенных физических свойств с точки зрения генерации, накопления, передачи и преобразования энергии. Их можно определить как энергетические домены. Каждый из доменов получает из окружающей среды и передает в нее мощность. Во всех случаях домены являются моделями простых физических устройств и отражают основные физические свойства технических объектов любой физической природы – инерционные,

упругие и диссипативные. С точки зрения преобразования энергии это соответствует аккумуляции кинетической энергии, аккумуляции потенциальной энергии и рассеиванию энергии. Домены составляют основу любой физической модели, но их недостаточно для создания модели. Нужны еще модели источников энергии и преобразователей энергии.

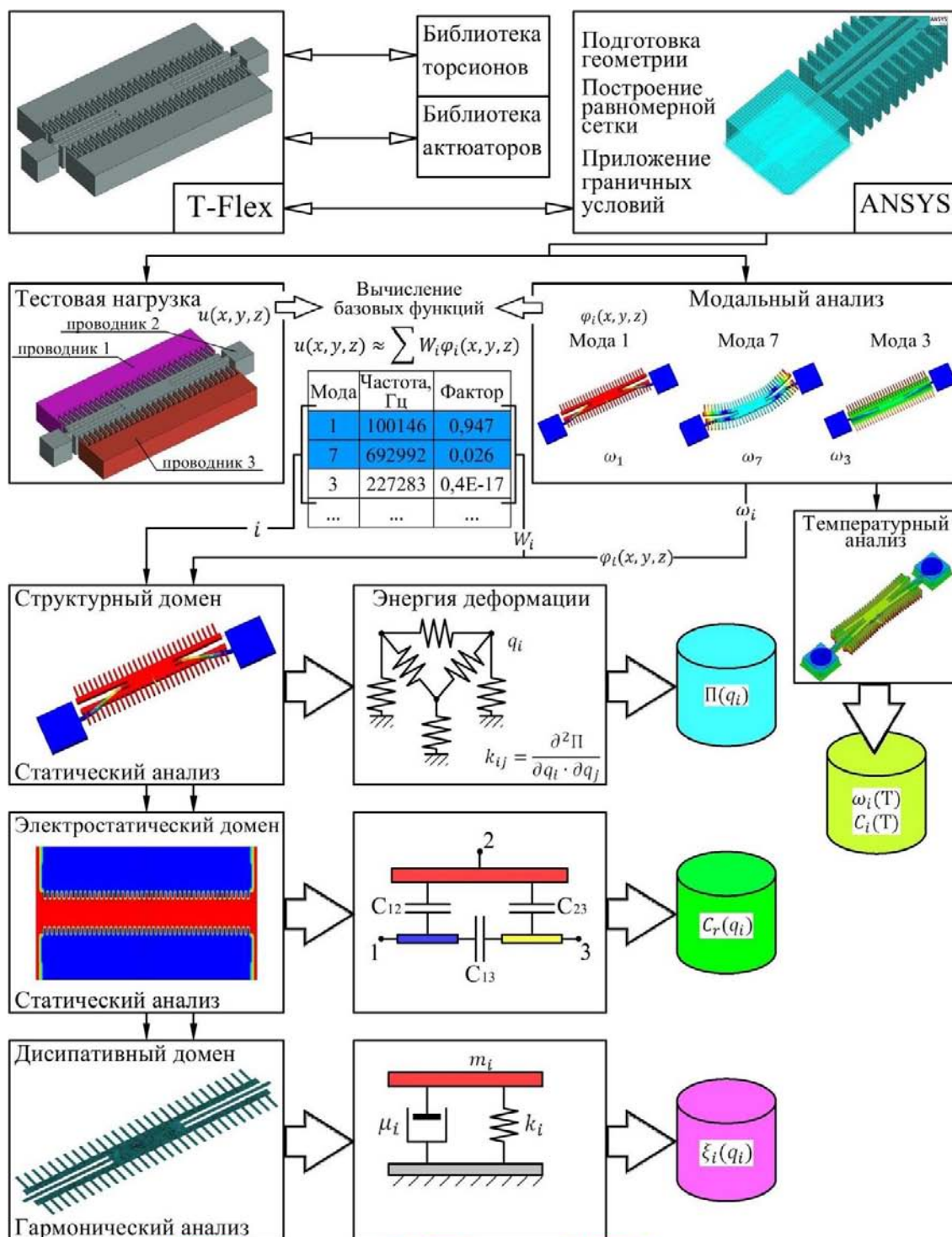
Физические свойства домена описываются математической моделью, отражающей зависимость между переменными с окружающей средой. Из доменов нижнего уровня могут формироваться более сложные компоненты, характеризующие не одно, а несколько свойств объекта, описываемые системами уравнений, у которых переменные носят векторный характер. Процедура построения математической модели технического объекта представляет собой последовательную интерпретацию свойств этого объекта в форме некоторой структуры, в которую включаются типовые компоненты – носители этих свойств.

Достоинство такого подхода состоит в прозрачности процедуры, в простоте и наглядности самой модели, в легкости внесения в модель изменений, связанных с учетом или не учетом тех или иных свойств объекта. Для получения полной аналитической математической модели технической системы необходимо объединить все уравнения в общую систему уравнений, осуществляется на основе физических законов.

Этот подход основан на определении энергии механического и электрического домена конечно-элементной модели микросистемы. Все силы определяются как градиенты энергии. Такой подход делает этот процесс модульным и проектировщик может включить другие домены энергии в модель на любой стадии анализа и конструирования. Процесс может быть практически автоматическим, требуя только конструктора макромодели устройства.

На рисунке 2.8 представлен схема, в соответствии с которой происходит процесс разработки и моделирования микромеханических устройств. Принцип моделирования построен таким образом, чтобы имея любую геометрию можно было быстро и легко производить изменения конструкции с последующим циклом моделирования микромеханического устройства на системном уровне.

Для проведения одного из представленных типов анализа необходимо иметь файл геометрии в формате Parasolid, мас-файл подготовки геометрии и мас-файл нужного анализа.



$$m_i \ddot{q}_i(t) + 2\xi_i(q_i) \omega_i m_i \dot{q}_i(t) + \frac{\partial \Pi(q_i)}{\partial q_i} = \frac{1}{2} \sum_r \frac{\partial C_{ki}(q)}{\partial q_i} (V_k(t) - V_l(t))^2$$

$$I_j = \frac{\partial Q_j}{\partial t} = \sum_r \left[\left(\sum_i \frac{\partial C_{kl}}{\partial q_i} \dot{q}_i \right) (V_k(t) - V_l(t) + C_{kl}(\dot{V}_k(t) - \dot{V}_l(t))) \right]$$

Рисунок 2.8 – Схема генерации макромоделли МЭМС

Разработка конструкции ведется в T-Flex CAD 3D. Из существующей библиотеки торсионных подвесов и актюаторов строится геометрия. Далее посредством импорта в формате Parasolid (файл Model.xmt_txt) последняя импортируется в Ansys Mechanical APDL. С помощью подготовленных макросов Import.mac (приложение А.1) и Geom.mac (приложение А.2) происходит подготовка модели к различным типам анализа (препроцессинг). Макрос Import.mac разбивает 3D-модель на элементарные объемы для построения качественной структурированной КЭ-сетки. Макрос Geom.mac служит для наложения граничных условий в виде закреплений, построения структурированной КЭ-сетки и определения свойств материала. *Mac*-файл подходит для любых конструкции микромеханических устройств, единственное что необходимо изменить – места закреплений в файле Geom.mac. Эти файлы Model.xmt_txt, Import.mac, Geom.mac являются базовыми. Для проведения любого типа анализа необходимо иметь эти три файла и, добавляя к ним файлы нужного анализа производить необходимые расчеты.

На первом этапе с базовыми файлами и макросом Modal.mac (Приложение А.3) производится цикл модального анализа для подбора собственных частот микромеханического устройства. Меняются параметры геометрии в T-Flex – подготавливается импортируемая модель в Ansys – производится модальный анализ. Цикл повторяется до получения необходимых значений собственных частот. После подбора собственных частот можно параллельно производить статический, электростатический, температурный анализы, добавляя к трем базовым файлам соответствующие файлы необходимого анализа.

Для определения энергии деформации используется набор макросов статического анализа Modal.mac, Save.mac, save_node.mac, Read.mac, read_node.mac (Приложение А.4). На выходе статического анализа в автоматическом режиме получаем текстовые файлы с матрицей зависимости энергии деформации от перемещения, модальных масс и participation factor для каждой моды колебаний.

В температурном анализе получаем файл с таблицей зависимости собственных частот по модам от температуры в заданном температурном диапазоне. Используется макрос Tempmodal.mac (Приложение А.5).

В электростатическом анализе, используя макрос Electrost.mac (Приложение А.6), получаем файл с таблицей зависимости емкости от перемещения для различных емкостных структур для данной конструкции. Выбором различных комбинаций соответствующих объемов производится расчет полезных и паразитных емкостей конструкции.

Далее полученные таблицы загружаются в программу SigmaPlot для построения графиков и в автоматизированном режиме на выходе получают аппроксимированные функции соответствующих зависимостей.

По полученным функциям определяются частные производные по перемещению и вставляются в MathLab для последующего моделирования. В общем случае порядок у функций остается тем же, следовательно, в MathLab для моделирования другой конструкции необходимо поменять только значения нескольких коэффициентов, что ускоряет процесс моделирования. Коэффициенты полученных функций макромодели прописаны в виде переменных и прилагаются в дополнительном файле Para.m. Изменяя численные значения переменных в данном файле, получаем новую макромодель для другой конструкции.

Для оценки напряжений деформации в конструкции используются набор макросов из Приложения А.8. Конструкция перемещается на заданное расстояние в соответствии с формой собственных колебаний и определяется значения напряжений деформации.

Метод понижения размерности системы это метод, с помощью которого можно достичь баланса между скоростью, гибкостью и точностью моделирования. Посредством этого подхода модель большой размерности уменьшается до модели младшего разряда без большой потери точности. Кроме того упрощенная модель может быть непосредственно вставлена в модель для моделирования на системном уровне. Параметрическая модель может быть

извлечена с помощью конечно-элементной технологии при сохранении геометрических параметров.

Комплексное моделирование характеристик, основанное на понижении размерности системы, представляет хорошую платформу для проектирования различных МЭМС устройств, таких как гироскопы, акселерометры, резонаторы, микрозеркала, коммутаторы и другие.

3 Моделирование микрорезонатора на системном уровне

3.1 Библиотека торсионных подвесов

Библиотека торсионных подвесов разрабатывалась, исходя из возможностей и требований BDRE-технологии: стекло-кремний или кремний-кремний. Процесс травления кремния должен проходить через всю высоту структуры, структура не должна иметь скруглений и углов, отличных от 90° .

Разработана библиотека наиболее распространенных, параметрически изменяющихся торсионных подвесов. Библиотека строилась таким образом, чтобы была возможность гибко изменять параметры торсиона, места и способы их закреплений в составе механической структуры.

На рисунке 3.1 приведен внешний вид торсиона в программе T-Flex CAD 3D [35]. Далее описание будет проводиться для этого типа торсиона.

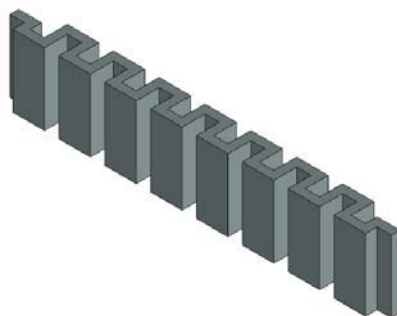


Рисунок 3.1 – Общий вид торсиона

Для того чтобы поместить торсион в предварительно подготовленную структуру, на последней необходимо создать 3D-узлы и системы координат, за которые будет осуществляться привязка торсиона, как показано на рисунке 3.2.

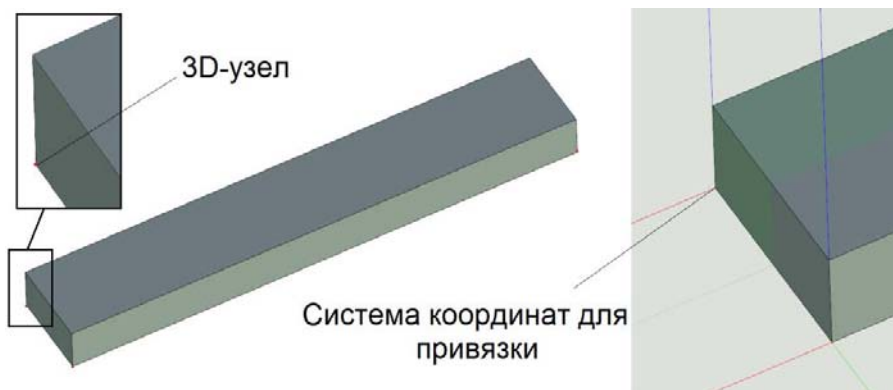


Рисунок 3.2 – 3D узлы в местах прикрепления торсиона

При вставке торсиона можно выбрать исходную систему координат торсиона, за которую будет осуществляться его вставка - левый, правый край или центр (рисунок 3.3).

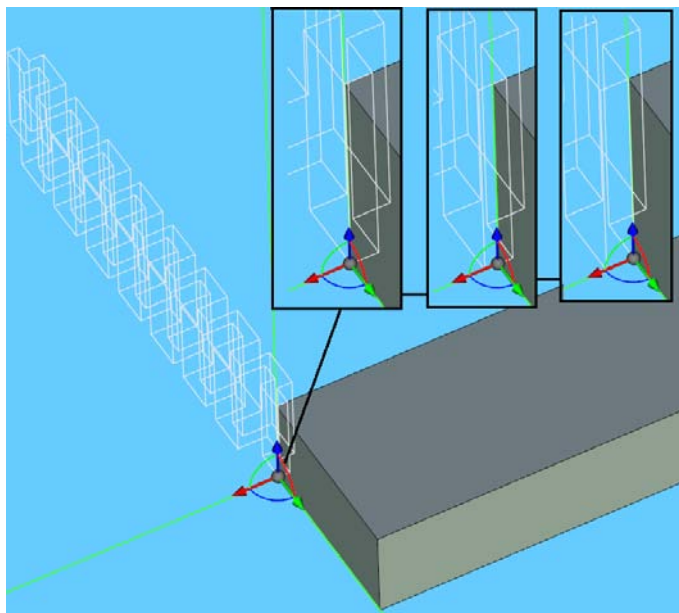


Рисунок 3.3 – Системы координат торсиона

При вставке фрагмента появляется диалоговое окно с подсказками, в котором задаются геометрические параметры торсиона, как показано на рисунке 3.4. Для удобства выводится также информация о максимальных габаритах торсиона.



Рисунок 3.4 – Диалоговое окно геометрических параметров торсиона

Достаточно произвести вставку одного торсиона, остальные копируются либо симметрично, либо по координатам. Таким образом, изменяя параметры

одного торсиона, происходит автоматический пересчет остальных. Вставленные торсионы в составе механической структуры показаны на рисунке 3.5.

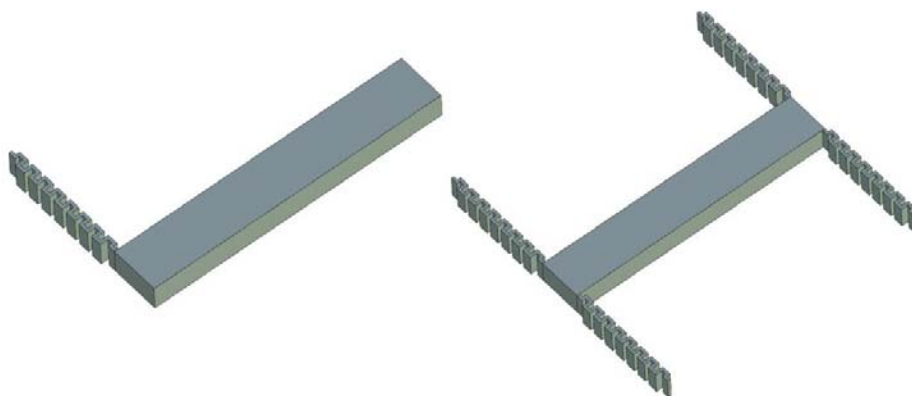


Рисунок 3.5 – Торсионный повес, созданный из библиотечных элементов в составе сборки

В результате были созданы 9 параметрических 3D-моделей торсионных подвесов, представленных на рисунке 3.6.

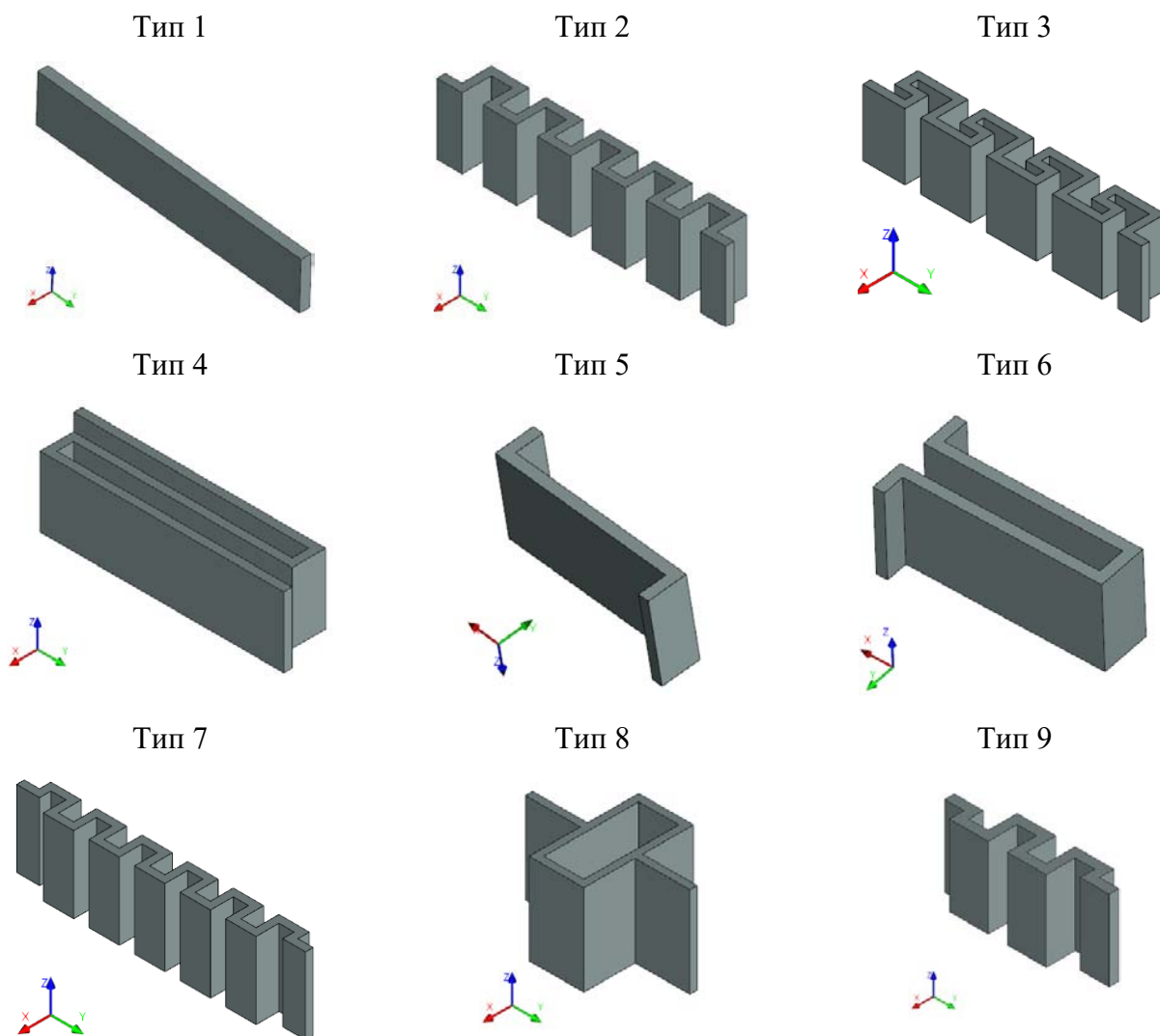


Рисунок 3.6 – Виды торсионных подвесов

3.2 Моделирование в среде ANSYS торсионных подвесов микросистем с учётом технологических дефектов

3.2.1 Методика определения технологических погрешностей торсионных подвесов

Одной из причин невысокой точности микромеханических структур является то, что в настоящее время еще нет технологий, с помощью которых можно производить микроскопические объекты одной и той же формы, сохраняя при этом заданные размеры. В таких микроскопических размерах при производстве невозможно гарантировать, что все экземпляры будут иметь одинаковую форму и размеры. Таким образом, технологические погрешности изготовления микромеханических структур представляют собой возмущающие воздействия, которые необходимо учитывать при анализе МЭМС [36, 37, 38, 39].

Моделирование влияния технологических дефектов изготовления торсионных подвесов, представленных в библиотеке, проводилось по методике, которая изображена на рисунке 3.7.



Рисунок 3.7 – Алгоритм анализа влияния типовых дефектов торсионных подвесов

Шаг 1. Основой для проведения конечно-элементного анализа является 3D-модель конструкции торсионного подвеса. Изменения размеров торсиона задаются в некотором диапазоне, поэтому создаётся его параметрическая модель, для построения которой был выбран Российский программный продукт T-Flex Parametric CAD [35], который позволяет описать конструкцию объекта различным набором размерных характеристик, определяющих геометрию объекта, условия взаимосвязей и взаимоотношений отдельных элементов между собой.

Параметрическая 3D-модель позволяет максимально быстро изменить один или несколько размеров конструкции, что значительно сокращает время на проведение расчётов. Каждому элементу построения присваивается своё уникальное имя параметра, а затем этому параметру присваивается численное значение. При изменении значения данного параметра будет автоматически пересчитываться 3-D модель торсиона.

Поскольку 9 тип торсиона является разновидностью торсиона 7 типа, то их результаты анализа будут идентичны. Результаты будут приведены для восьми типов торсионов. Все исследуемые торсионы с одной стороны закреплялись полностью, а с другой стороны закреплялись только по оси Y, давая степень свободы движения по осям X и Z. Такое закрепление позволяет имитировать поведение торсионного подвеса при использовании его в реальной конструкции, в которой торсион одним концом крепится к неподвижному основанию, а вторым концом к подвижному элементу. Начальные значения собственных частот торсионов подбирались таким образом, чтобы они имели близкие значения для последующего сравнения результатов. Длина каждого торсиона остаётся неизменной (таблица 3.1). Материал торсионов – монокристаллический кремний.

Таблица 3.1. – Длина исследуемых торсионов

Тип торсиона	1	2	3	4	5	6	7	8
Длина, мкм	360	260	288	210	350	225	234	300

Шаг 2. Для определения влияния технологических дефектов изготовления на собственные частоты и на коэффициенты жёсткости торсионного подвеса,

поочерёдно осуществляется изменение одного размера при постоянстве всех остальных (рисунок 3.8) и определяются соответствующие им изменения собственных частот, форм колебаний и коэффициентов жёсткостей торсионных подвесов.

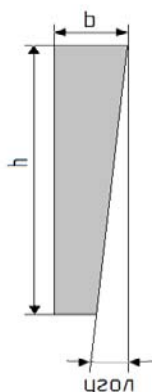


Рисунок 3.8 – Варьируемые размеры торсионных подвесов

Параметр h отвечает за высоту торсиона, начальное значение равняется 50 мкм, варьирование производится в пределах -20 до +10 мкм. Параметр b связан с толщиной торсиона, начальное значение равно 4 мкм, варьирование производится в пределах ± 100 нм. Параметр «угол» отвечает за вертикальность профиля торсиона, начальное значение 0° , варьирование производится в пределах от 0° до 1° . Для моделирования технологических погрешностей изготовления использовался КЭ анализ, реализованный в прикладном пакете ANSYS [33, 40, 41]. Конечно-элементная модель строилась следующим образом. Сначала на поверхность накладывался конечный элемент PLANE 182 (рисунки 3.9, 3.10).

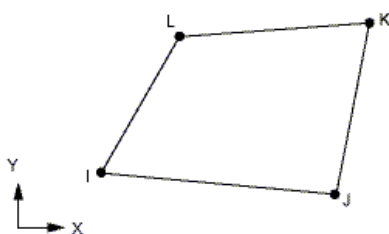


Рисунок 3.9 – Геометрия КЭ PLANE 182

Элемент PLANE182 используется для двухмерного (2D) моделирования объемных конструкций. Элемент может использоваться для моделирования плоского напряженного, плоского деформированного, обобщенного плоского деформированного или осесимметричного состояния. Данный КЭ определяется четырьмя узлами, имеющими две степени свободы в каждом узле: перемещения в

направлении осей X и Y узловой системы координат. В данном случае КЭ PLANE 182 будет служить основой создания равномерной КЭ сетки для всего объёма тела торсиона 1.

Далее происходит создание объёмного тела при помощи вытягивания сформированной на основании КЭ сетки торсиона 1 в направлении оси Z на необходимое расстояние (рисунок 3.10).

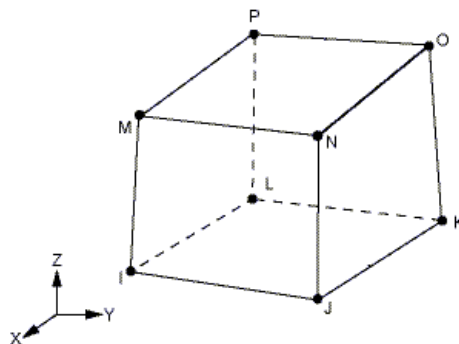


Рисунок 3.10 – Геометрия КЭ SOLID 185

Элемент SOLID185 используется для трехмерного (3D) моделирования объемных конструкций. Элемент определяется узлами, имеющими три степени свободы в каждом узле: перемещения в направлении осей X, Y и Z узловой системы координат. Элемент имеет свойства пластичности, гиперупругости, изменения жесткости при приложении нагрузок, ползучести, больших перемещений и больших деформаций.

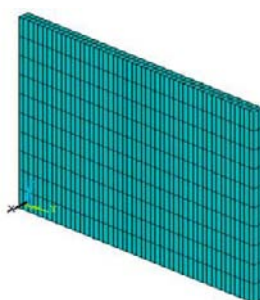


Рисунок 3.11 – Объёмное тело с наложенной КЭ сеткой

На рисунке 3.11 показана 3D-модель торсиона 1 с наложенной на него сеткой, состоящей из КЭ SOLID 185. Аналогичным образом КЭ сетка строилась и для остальных типов торсионов.

В результате получается объёмная КЭ модель с равномерно наложенной сеткой, что позволяет точнее определить требуемые параметры.

3.2.2 Изменение высоты торсионов

В гироскопах и акселерометрах обычно рабочей является первая форма колебаний, все остальные частоты должны быть существенно выше. На рисунках 3.12 ÷ 3.19 приведены рисунки выбранных собственных форм колебаний торсионов.

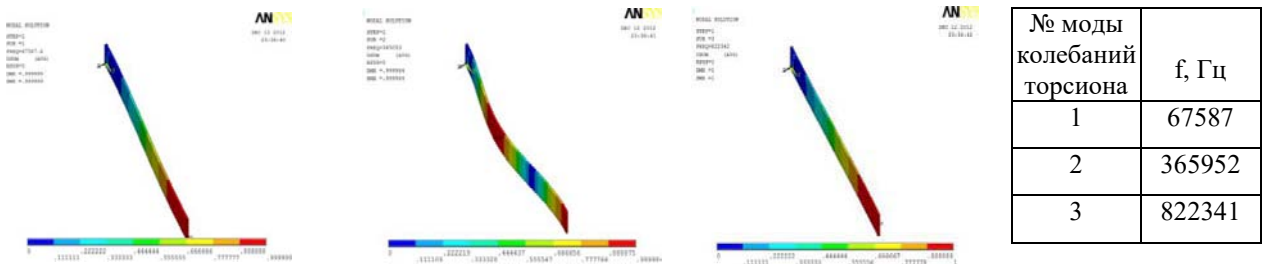


Рисунок 3.12 – Собственные формы колебаний торсиона 1

При первой форме колебаний торсион 1 совершает поступательные перемещения вдоль оси X. Вторая форма соответствует изгибным колебаниям, при третьей форме торсион начинает совершать перемещения по оси Z.

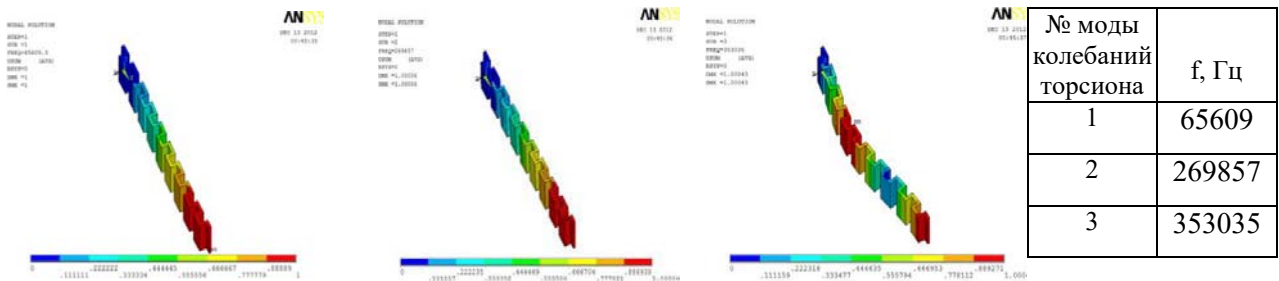


Рисунок 3.13 – Собственные формы колебаний торсиона 2

При первой форме колебаний торсион 2 совершает поступательные перемещения вдоль оси X. При второй форме торсион 2 начинает совершать перемещения по оси Z, третья форма колебаний соответствует изгибным колебаниям по оси X.

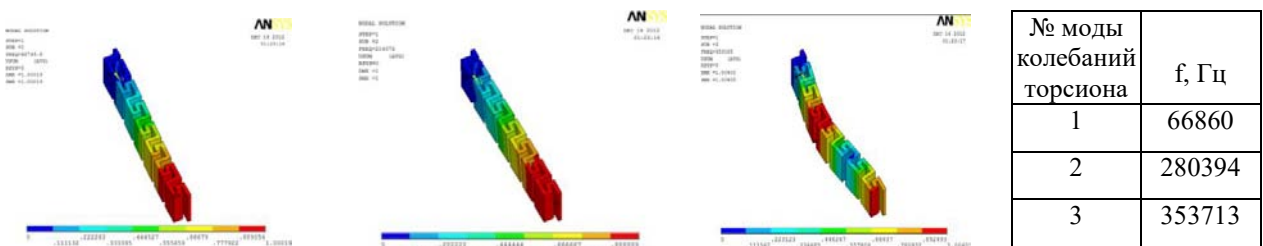
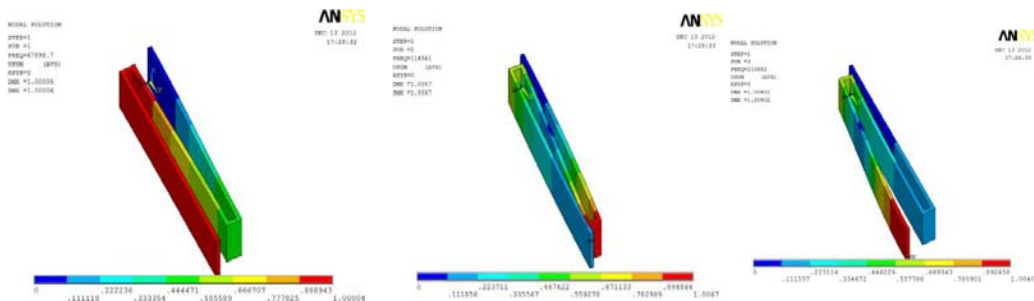


Рисунок 3.14 – Собственные формы колебаний торсиона 3

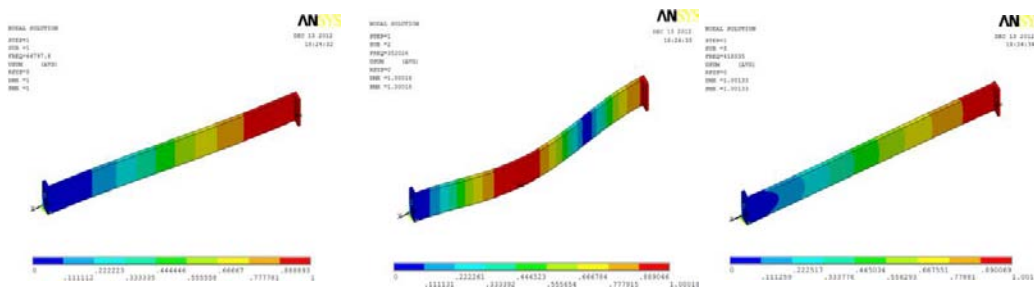
При первой форме колебаний торсион 3 совершает поступательные перемещения вдоль оси X. При второй форме торсион 3 начинает совершать перемещения по оси Z, третья форма соответствует изгибным колебаниям по оси X.



№ моды колебаний торсионa	f, Гц
1	67898
2	114561
3	210882

Рисунок 3.15 – Собственные формы колебаний торсионa 4

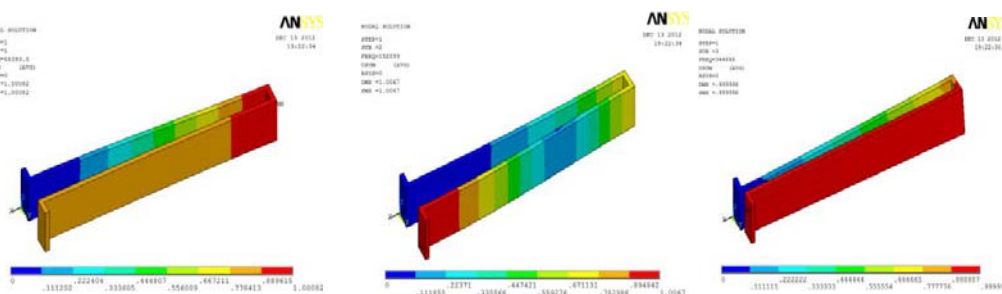
При первой и второй форме колебаний торсион 4 совершает поступательные перемещения вдоль оси X, при третьей форме колебаний, торсион 4 совершает перемещения по оси Z.



№ моды колебаний торсионa	f, Гц
1	64798
2	352026
3	418035

Рисунок 3.16 – Собственные формы колебаний торсионa 5

При первой форме колебаний торсион 5 совершает поступательные перемещения вдоль оси X. При второй форме торсион 5 совершает изгибные колебания по оси X, при третьей форме колебаний торсион 5 начинает совершать перемещения по оси Z.



№ моды колебаний торсионa	f, Гц
1	68393
2	152098
3	344686

Рисунок 3.17 – Собственные формы колебаний торсионa 6

При первой форме колебаний торсион 6 совершает поступательные перемещения вдоль оси X, при второй форме торсион 6 совершает изгибные колебания по оси X, при третьей форме колебаний, торсион 6 начинает совершать перемещения по оси Z.

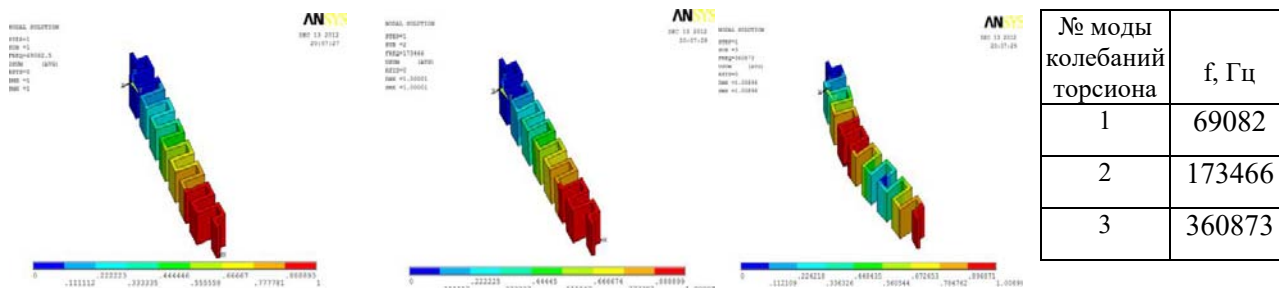


Рисунок 3.18 – Собственные формы колебаний торсион 7

При первой форме колебаний торсион 7 совершает поступательные перемещения вдоль оси X. При второй форме торсион 7 начинает совершать перемещения по оси Z, при третьей форме колебаний торсион 7 совершает изгибные колебания по оси X.

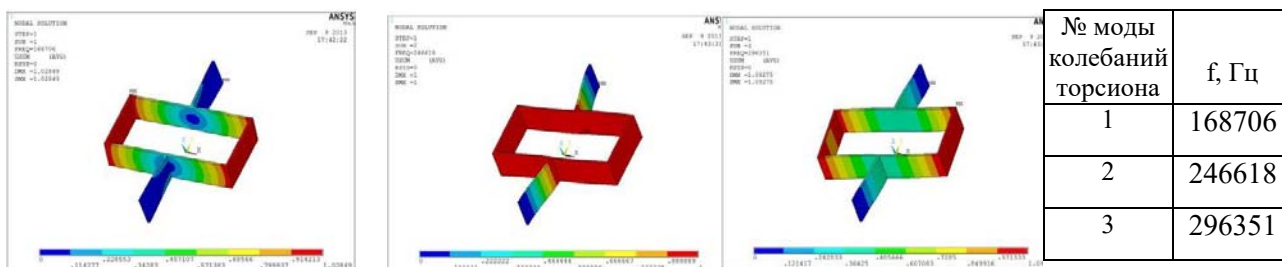


Рисунок 3.19 – Собственные формы колебаний торсион 8

При первой форме колебаний торсион 8 совершает вращательное движение вокруг оси Y. При второй форме – поступательные движения вдоль оси X. При третьей форме торсион 8 совершает вращательное движение вокруг оси Z.

Изменения собственных частот и коэффициентов жёсткости всех типов торсионов при изменении их высоты представлены на рисунках 3.20 – 3.21.

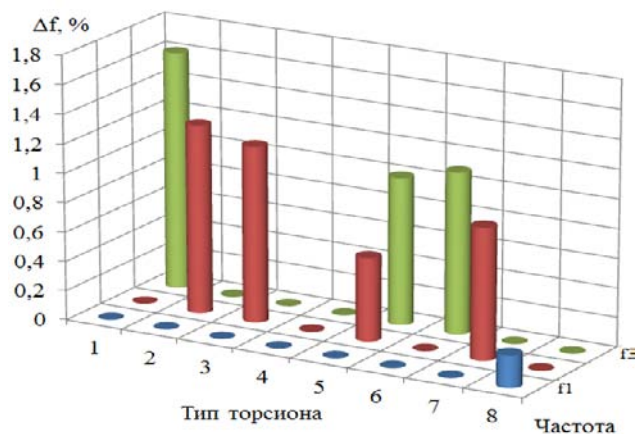


Рисунок 3.20 – Влияние изменения высоты торсионов на их собственные частоты f_1 , f_2 , f_3

Проведённые исследования показали, что изменение высоты торсионов практически не оказывает влияния на изменение частоты f_1 первой формы колебаний (максимальное изменение частоты f_1 составляет 1 Гц). Максимальное изменение частоты f_3 наблюдается у 1-го торсиона. Наибольшей стабильностью обладают частоты 4-го торсиона. Но у данного типа торсиона есть существенный недостаток по сравнению с остальными, он имеет наибольшую длину (360 мкм), что существенно может увеличить габаритные размеры конструкции, в которой он будет применяться.

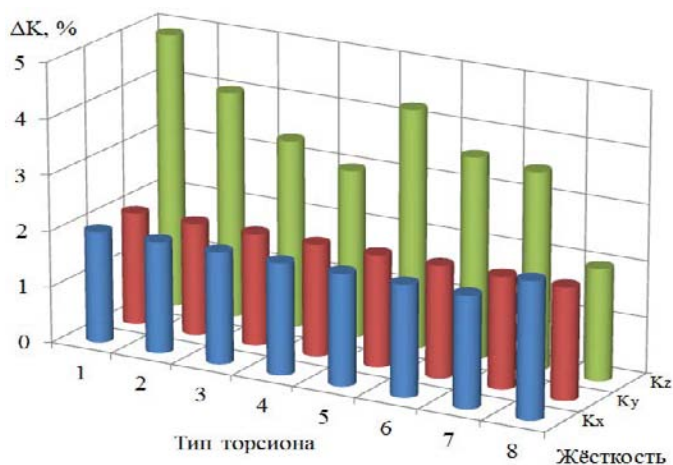


Рисунок 3.21 – Влияние изменения высоты торсионов на их коэффициенты жёсткости по осям X, Y, Z

Из рисунка 3.21 можно сделать вывод, что изменение высоты оказывает одинаковое влияние на коэффициенты K_x , K_y для всех торсионов. В большей

степени изменяется жёсткость K_z , причём наибольшее изменение имеет 1-ый торсион. Наибольшую стабильность характеристик имеет торсион 4.

3.2.3 Изменение толщины торсионов

При технологической операции «травление» возможно отклонение от номинальных размеров кремнивой структуры. На рисунках 3.22 ÷ 3.23 приведены графики изменения частот и коэффициентов жёсткостей в зависимости от изменения толщины торсионных подвесов.

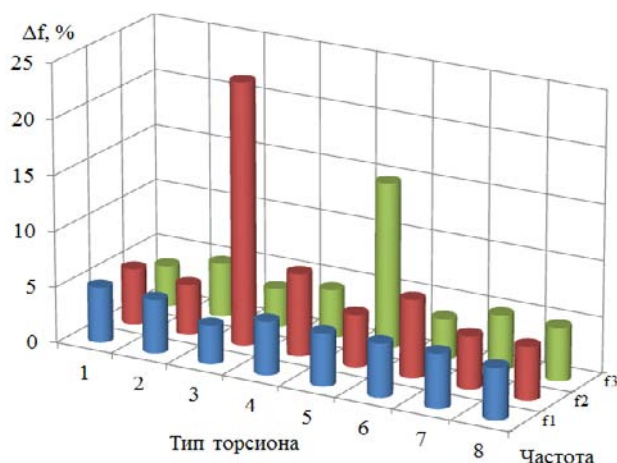


Рисунок 3.22 – Влияние изменения толщины торсионов на их собственные частоты f_1 , f_2 , f_3

Из данного рисунка видно, что наибольшее влияние изменение толщины торсионов оказывает на частоту f_2 торсиона 3, разница от номинального значения составляет 22%. У остальных торсионов изменение частот происходит в пределах 10% от их номинальных значений.

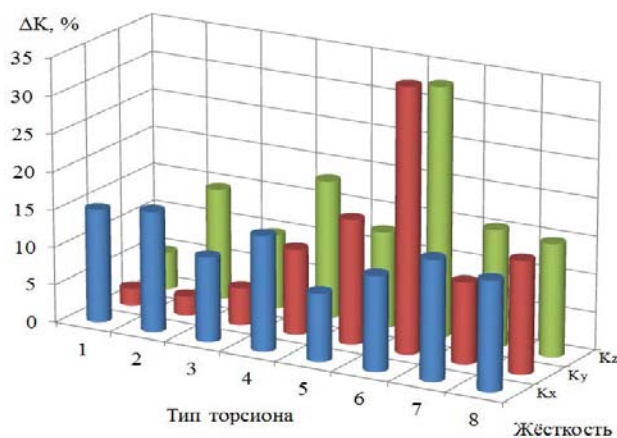


Рисунок 3.23 – Влияние изменения толщины торсионов на их коэффициенты жёсткости

В большей степени изменяется жёсткость торсиона 6 (32%). Наименьшее влияние изменение толщины оказывает на изменение жёсткости торсионов 1, 2, 3 (в пределах 15%).

3.2.4 Изменение вертикальности профиля торсионов

Данный технологический дефект возникает при технологической операции «травление», происходит подтравливание профиля микромеханических структур.

На рисунках 3.24÷ 3.25 приведены графики изменения частот трёх форм колебаний и коэффициентов жёсткостей в зависимости от изменения вертикальности профиля торсионных подвесов.

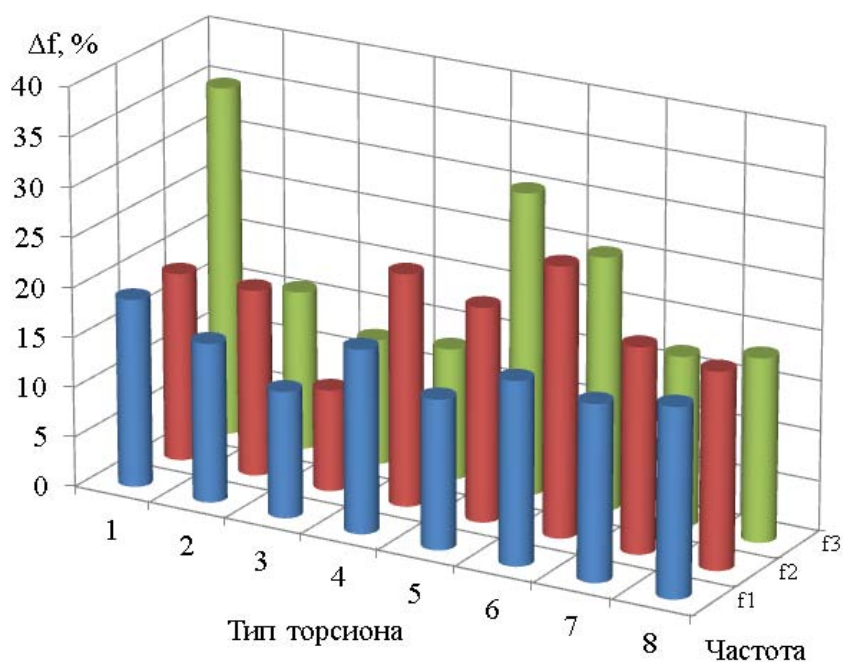


Рисунок 3.24 – Влияние изменения вертикальности профиля торсионов на их собственные частоты

Изменение вертикальности профиля наименьшим образом влияет на изменения частот торсиона 3, которое происходит в пределах 10%. Наибольшее влияние изменение вертикальности профиля оказывает на торсион 1, отклонение от номинального значения частоты f_3 составляет 35%. У остальных типов исследуемых торсионов изменение вертикальности профиля вызывает отклонение от номинальных значений частотот в пределах от 13% до 30%.

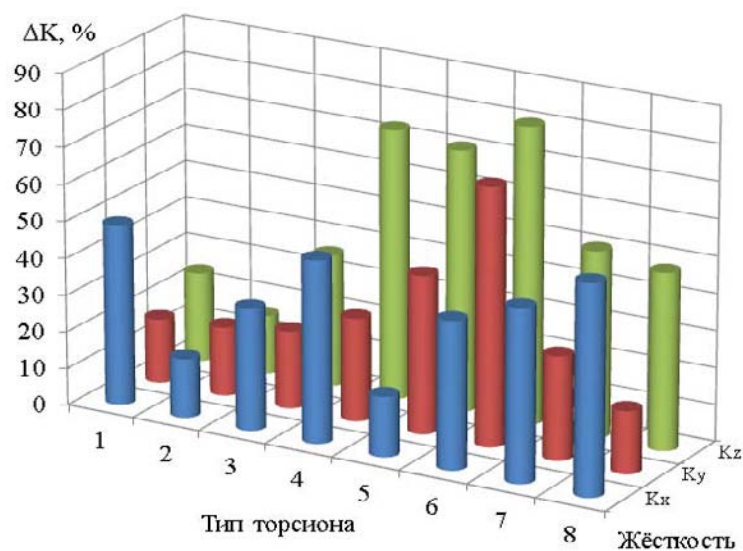


Рисунок 3.25 – Влияние изменения вертикальности профиля торсионов на их коэффициенты жёсткости

Из рисунка 3.25 видно, что изменение вертикальности профиля меньше всего влияет на жёсткость торсиона 2, что составляет около 10% от номинального значения. Наибольшим образом отклонение от вертикальности профиля торсионных подвесов влияет на торсионы 4, 5, 6, более 70% от номинального значения жёсткости.

Исходя из проведённых исследований о влиянии технологических погрешностей на торсионные подвесы, можно сделать вывод, что наименьшим образом на собственные частоты и жёсткость торсионов влияют технологические погрешности, вызванные отклонением от номинального значения их высоты.

Наибольшим образом на собственные частоты и жёсткости торсионных подвесов оказывают влияние технологические погрешности, вызванные изменением толщины стенок и отклонением от вертикальности профиля торсионов при технологической операции «травление».

Таким образом, несовершенства технологии изготовления микромеханических структур могут оказывать существенное влияние на характеристики торсионных подвесов, что должно учитываться на этапе разработки и проектирования их конструкции при выборе типа торсионов, представленных в библиотеке.

3.3 Параметрические модели и библиотека электростатических актюаторов микросистем

Любое микромеханическое устройство можно представить состоящим из отдельных элементов. Примером этого может служить библиотека параметрических 3D-моделей электростатических актюаторов (рисунок 3.26).

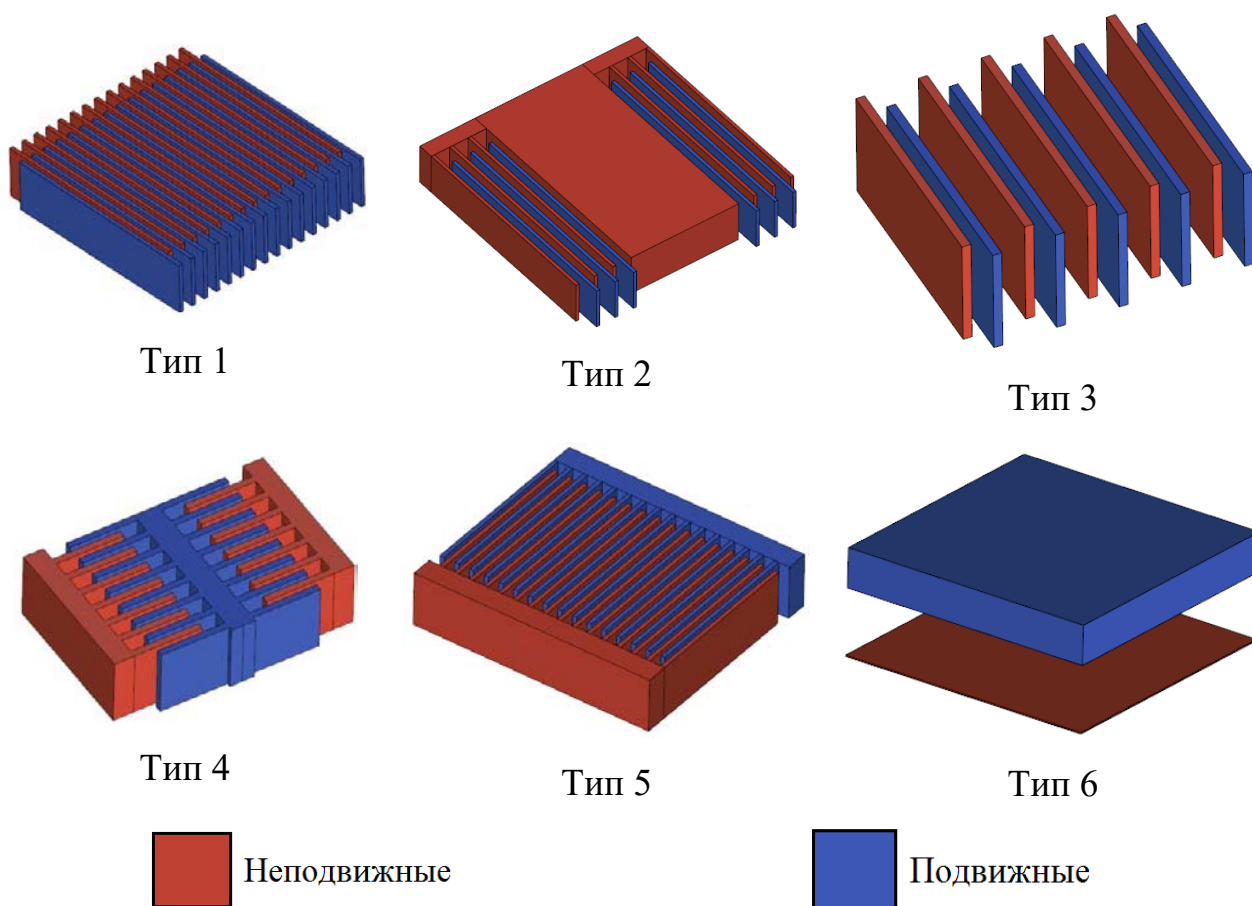


Рисунок 3.26 – 3D модели параметрических электростатических актюаторов

При вставке любого из шести библиотечных элементов в общую сборку микромеханического устройства пользователю открывается диалоговое окно с двумя вкладками (рисунки 3.27, 3.28).

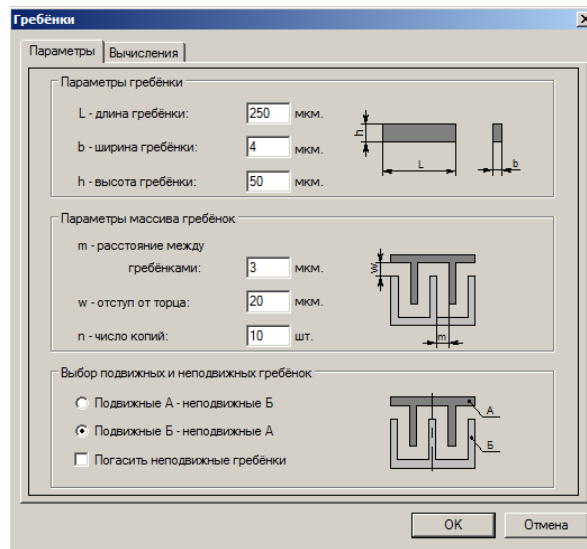


Рисунок 3.27 – Вкладка «Параметры» диалогового окна настройки гребёнок

Во вкладке «Параметры», настраиваются геометрические параметры гребёнок, варьируя которыми подбираются необходимые размеры, а также их общее количество.

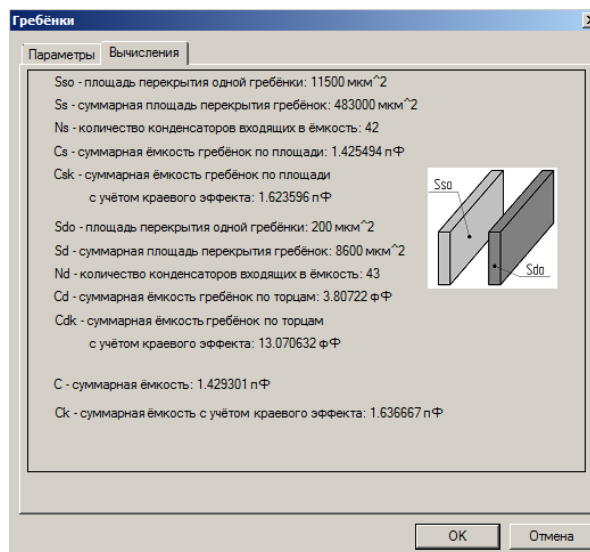
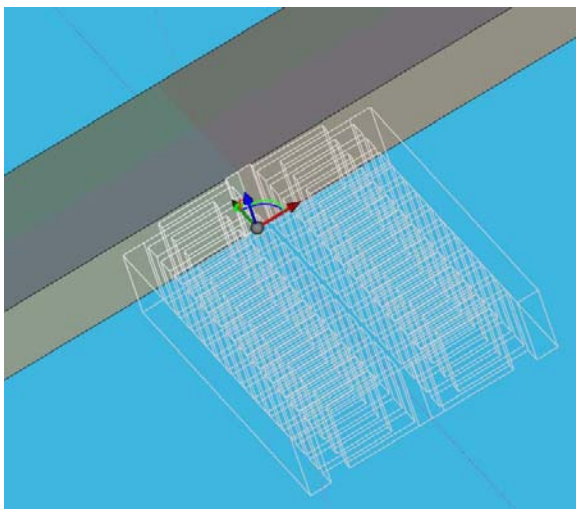


Рисунок 3.28 – Вкладка «Вычисления» диалогового окна настройки гребёнок

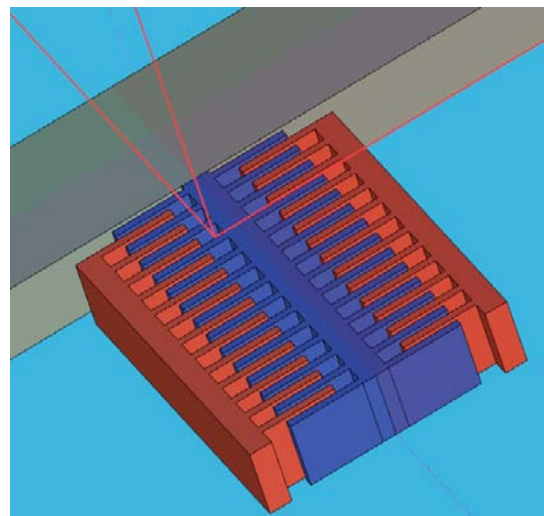
Во вкладке «Вычисления» рассчитывается начальное значение ёмкости электростатического актюатора с учётом краевого эффекта. Это даёт возможность разработчику уже на стадии проектирования оценить начальную ёмкость гребенчатых структур и, варьируя геометрическими параметрами, добиться необходимой величины ёмкости.

Далее будет показано применение библиотеки электростатических актюаторов для построения микромеханического устройства на основе построенной модели основания с торсионным подвесом, представленным на рисунке 3.5.

К уже построенной модели необходимо добавить 4-ый и 5-ый типы электростатического актюатора. Первым вставляем 4-ый тип электростатического актюатора. В данной модели 4-ый тип необходимо расположить в середине модели и поэтому нет необходимости создавать дополнительные 3D-узлы, рисунок 3.29.



а – Выбор места вставки



б – Вставленный актюатор

Рисунок 3.29 – Вставка электростатического актюатора 4-го типа

Для вставки 5-го типа электростатического актюатора необходимо создать 3D узел и уже к нему привязывать библиотечный элемент (рисунок 3.30).

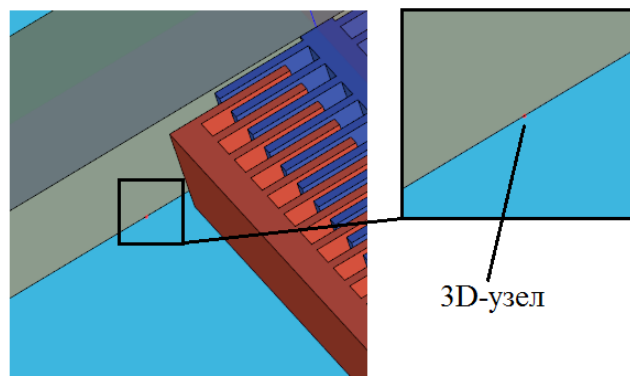
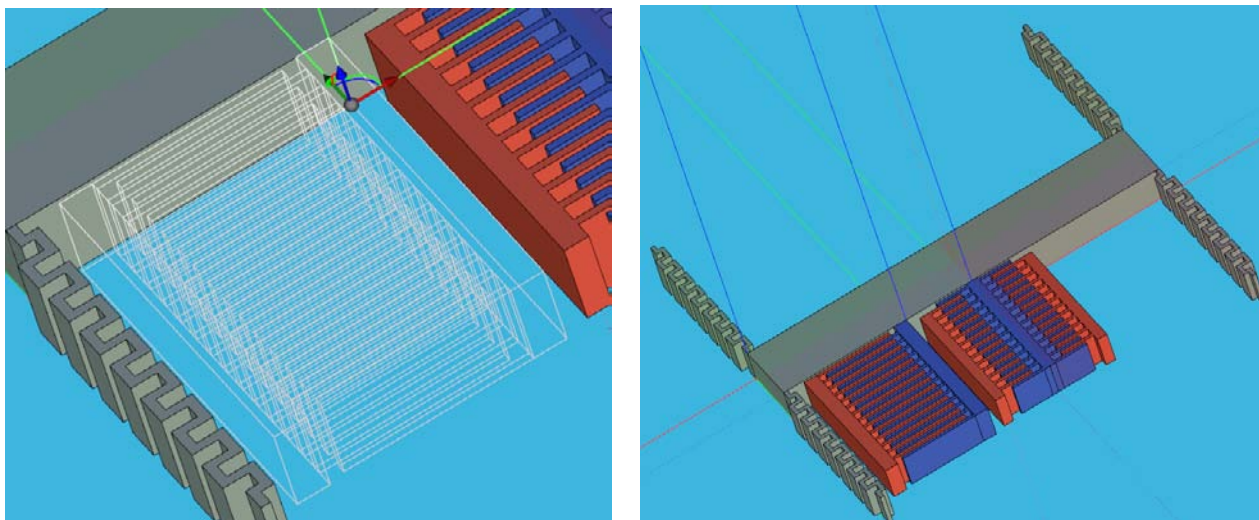


Рисунок 3.30 – 3D узел для вставки 4-го типа электростатического актюатора

Затем из библиотеки выбирается 5-ый тип электростатического актюатора и привязывается к созданному 3D узлу (рисунок 3.31).

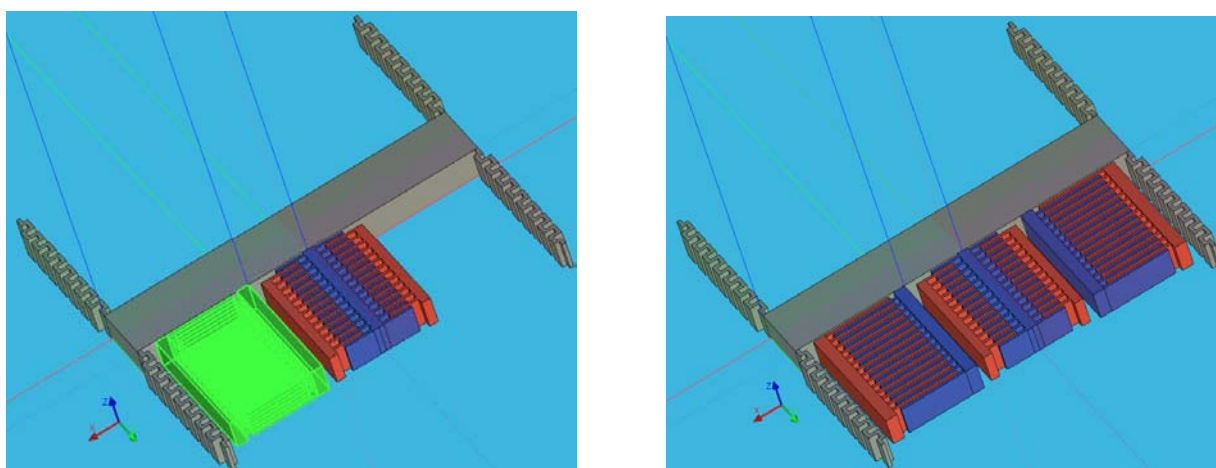


а – Выбор 3D узла для вставки

б – Вставленный актюатор

Рисунок 3.31 – Вставка 5-го типа электростатического актюатора

Далее необходимо вставить один 4-й тип и три 5-х типа электростатического актюатора, для этого используется операция «Симметрия». Сначала выбирается 3D элемент, симметрию которого необходимо выполнить (рисунок 3.32, а), затем выбирается плоскость симметрии, в данном случае это плоскость YZ. В результате получается модель, представленная на рисунке 3.32, б.

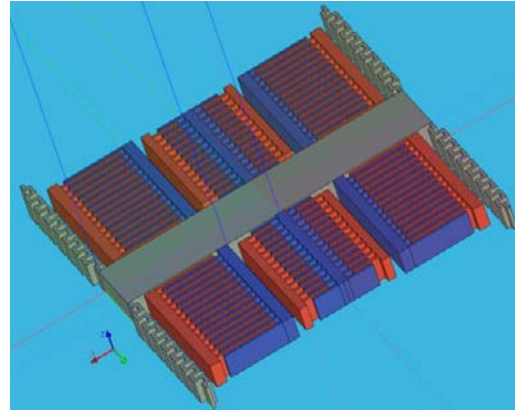
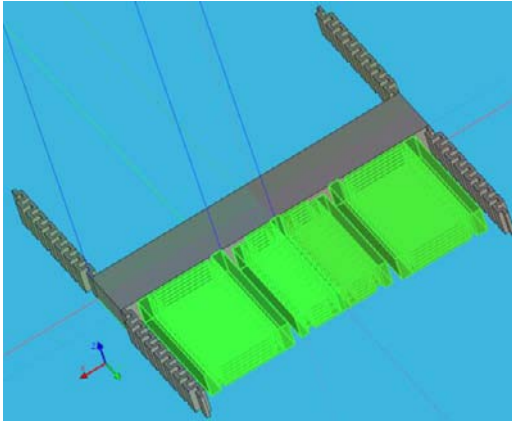


а – Выбор элемента для симметрии

б – Результат операции «Симметрия»

Рисунок 3.32 – Операция «симметрия» для 4-го типа актюатора

Аналогичным образом выбираются необходимые элементы, а затем выполняется симметрия относительно плоскости XZ (рисунок 3.33).



а – Выбор элементов для симметрии б – Результат операции «Симметрия»

Рисунок 3.33 Операция симметрии для 4-го и 5-го типа актюаторов

В результате использования библиотечных элементов значительно сокращается время, необходимое на разработку 3D моделей новых микромеханических устройств. Так как библиотечные элементы являются параметрическими, то, варьируя их параметрами, автоматически перестраивается вся 3D модель микромеханического устройства, что также сокращает время на разработку.

3.4 Твёрдотельное моделирование микрорезонатора

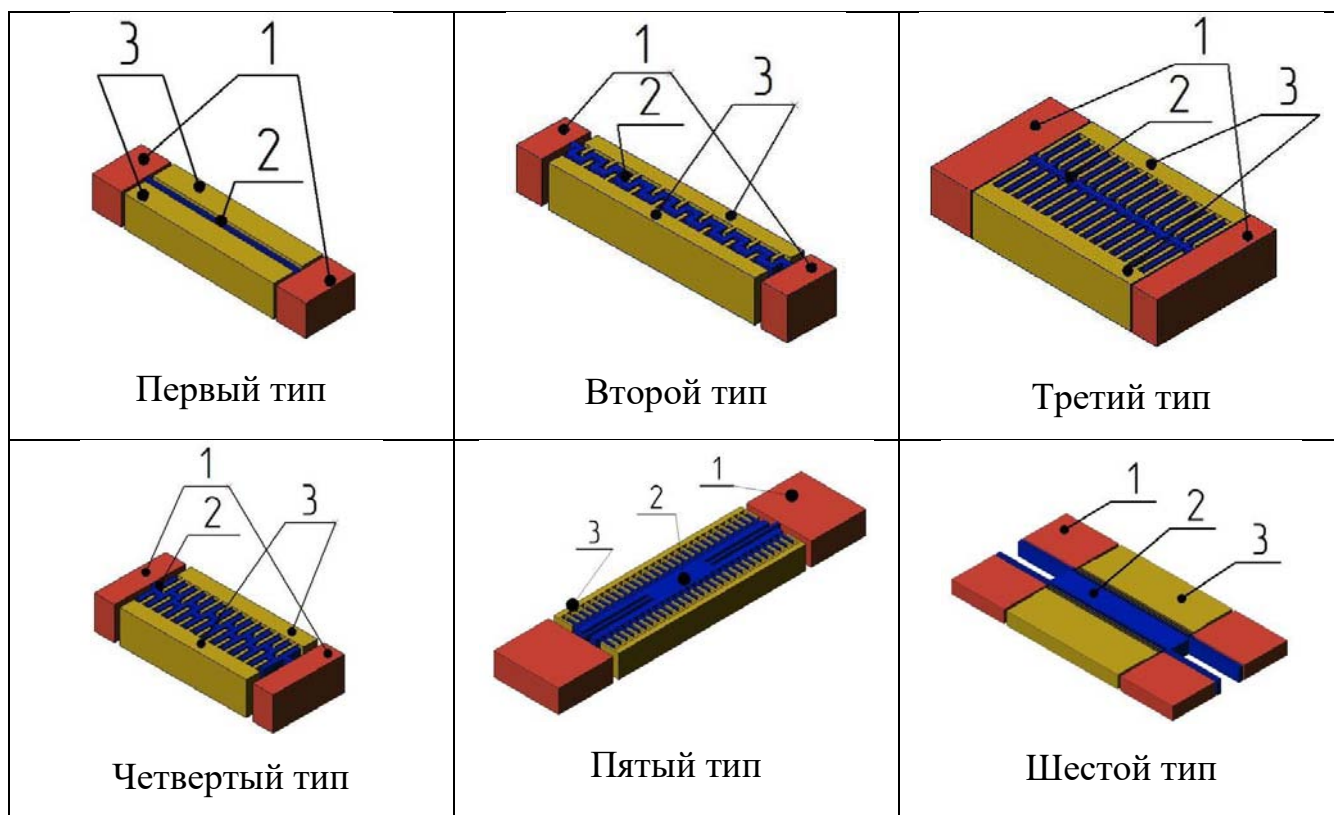
3.4.1 Разработка конструкций микрорезонаторов, модальный анализ

В соответствии с принципом создания макромоделей (рис. 2.8) на первом этапе для оценки динамического поведения резонатора применяется модальный анализ. Рассмотрим микрорезонаторы различных форм, которые могут быть использованы для моделирования сенсоров датчиков многокомпонентной микросистемы (микрогироскопов, акселерометров, датчиков температуры).

Разработка конструкций и модальный анализ микрорезонаторов производилась в Ansys/Multiphysics. [41]. Геометрические размеры резонаторов подбирались таким образом, чтобы частоты первых форм их колебаний были близки друг к другу. В таблице 3.2 представлены различные типы резонаторов, каждый из которых состоит из подвижной массы 2, закрепленной в неподвижном основании 1. Возбуждение колебаний подвижной массы производится за счет

электростатического привода 3, который может быть гребенчатым (резонаторы 2, 3, 4 и 5 типа) или планарным (первый тип резонатора).

Таблица 3.2 – Типы конструкций резонаторов



Геометрические характеристики и размеры подвижных частей резонаторов отражены на рисунке 3.26 и таблице 3.3.

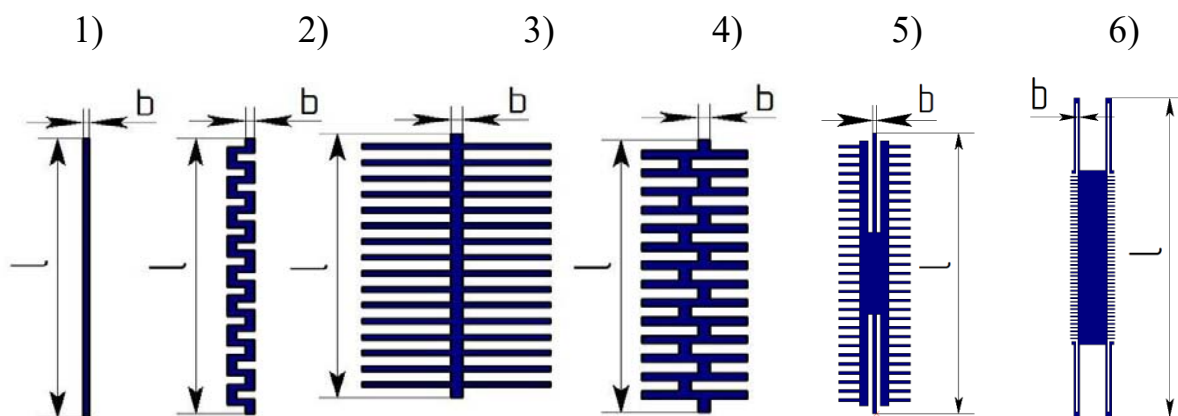


Рисунок 3.34 – Геометрические характеристики подвижных частей резонаторов

Таблица 3.3 – Размеры подвижных частей резонаторов

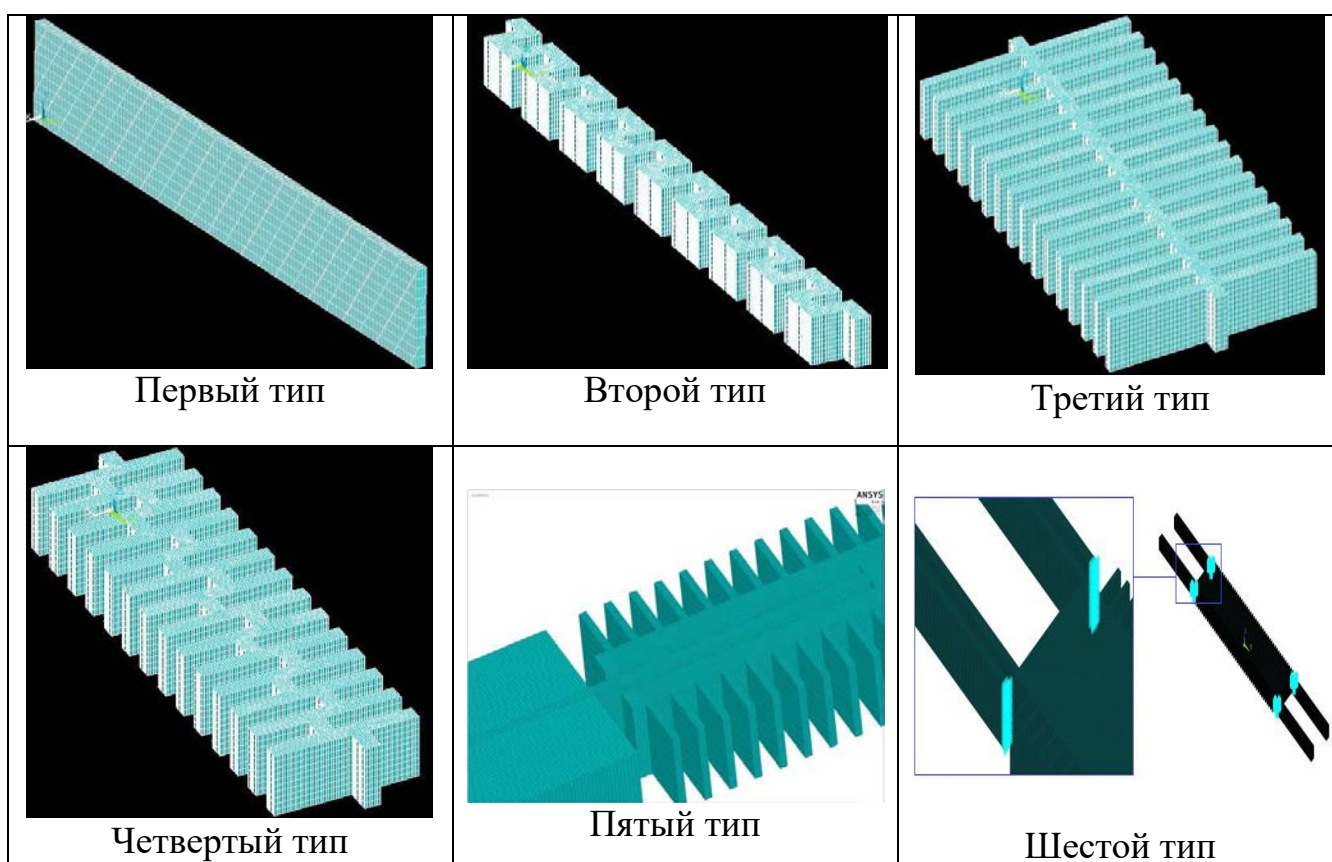
Вид подвижной части резонатора	1	2	3	4	5	6
Длина l , мкм	264	260	200	206	434	867
Толщина b , мкм	4	6	6	6	6	5
Высота h , мкм	50	50	50	50	50	50

Поскольку геометрия резонаторов в объеме является простой, то построение сетки конечных элементов производится на основе 2D профиля, затем вытягивается в объеме на нужную высоту 50 мкм методом протягивания (sweep).

При построении конечно-элементной модели используется модель упругого анизотропного материала – монокристаллический кремний.

Конечно-элементные модели резонаторов, построенные в Ansys, представлены в таблице 3.4. Размер сетки выбран величиной 1 мкм, разбиение в высоту производилось на 8 частей.

Таблица 3.4 – Конечно-элементные модели резонаторов



Решение производилось для первых десяти собственных частот колебаний. Закрепление производилось за концы торсионов, тип закрепления – жесткое, ограничивающее перемещение по всем степеням свободы.

В таблицах 3.5-3.10 представлены результаты расчетов для шести типов резонаторов.

Таблица 3.5 – Формы колебаний первого резонатора

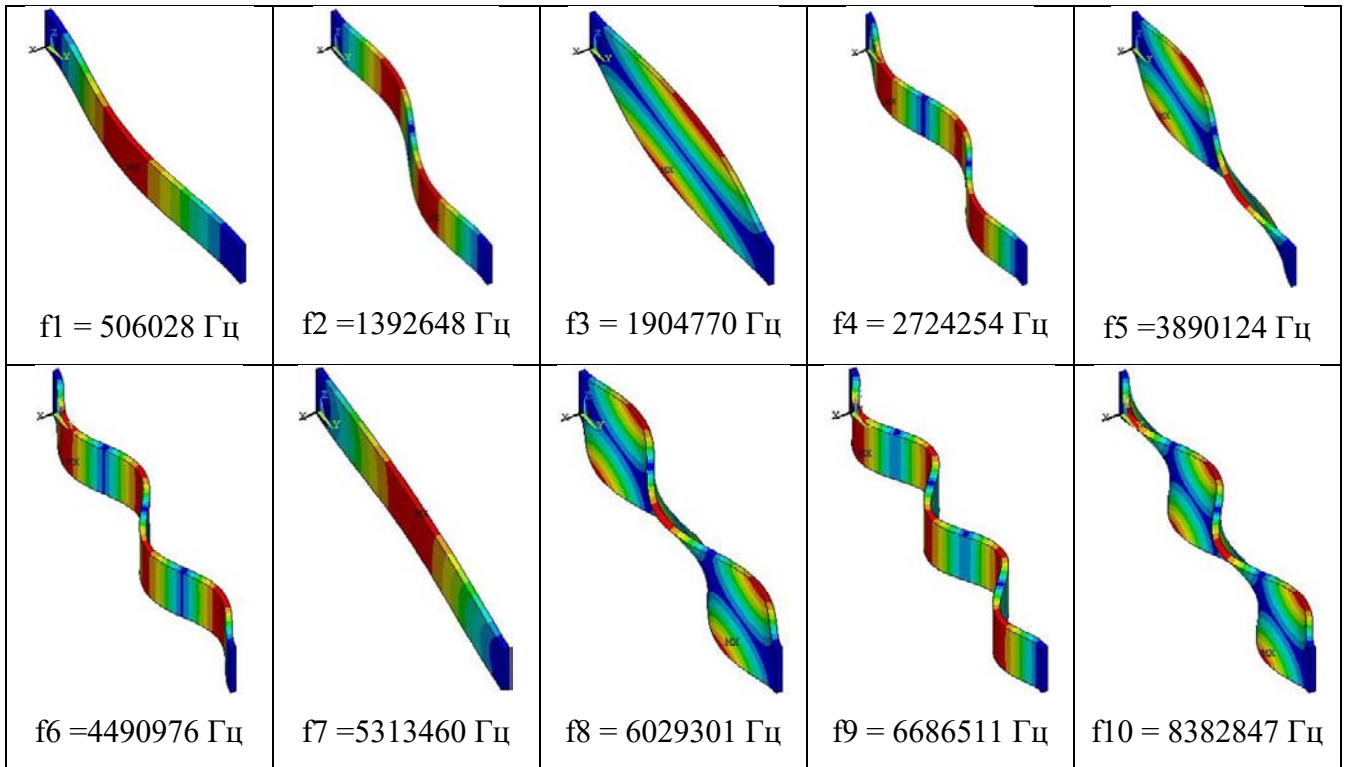


Таблица 3.6 – Формы колебаний второго резонатора

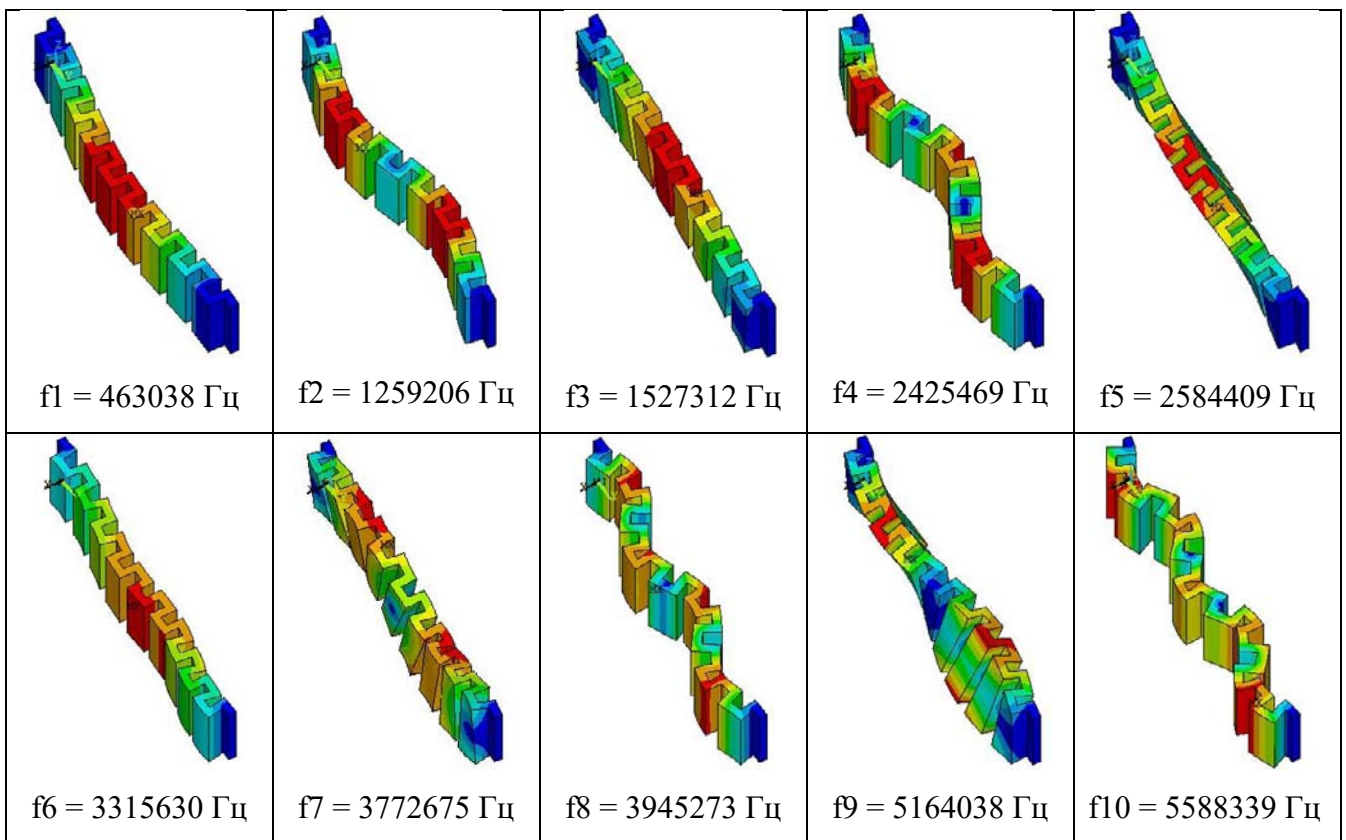


Таблица 3.7 – Формы колебаний третьего резонатора

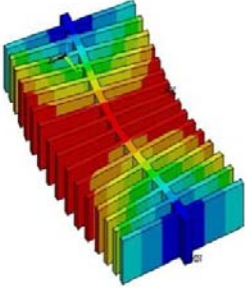
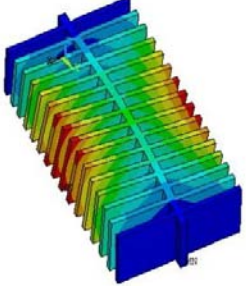
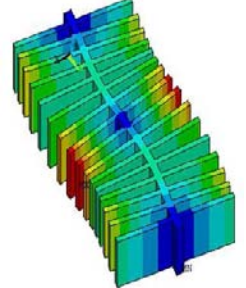
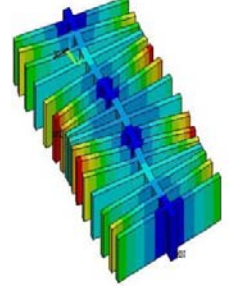
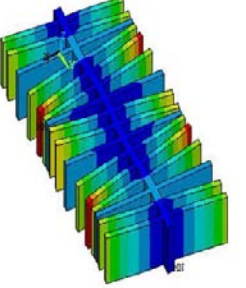
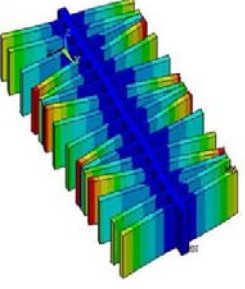
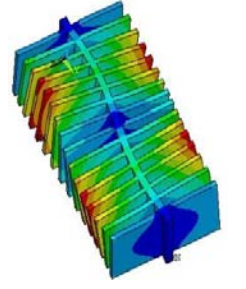
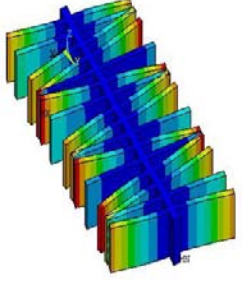
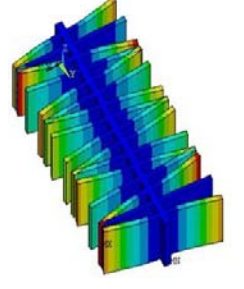
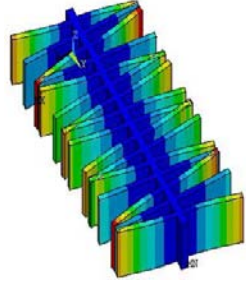
				
$f_1 = 500600 \text{ Гц}$	$f_2 = 935795 \text{ Гц}$	$f_3 = 1060993 \text{ Гц}$	$f_4 = 1486700 \text{ Гц}$	$f_5 = 1735982 \text{ Гц}$
				
$f_6 = 1887942 \text{ Гц}$	$f_7 = 1895139 \text{ Гц}$	$f_8 = 1983724 \text{ Гц}$	$f_9 = 2048977 \text{ Гц}$	$f_{10} = 2093961 \text{ Гц}$

Таблица 3.8 – Формы колебаний четвертого резонатора

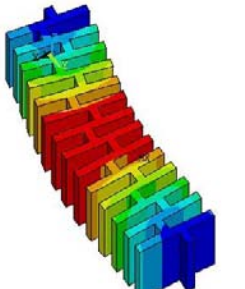
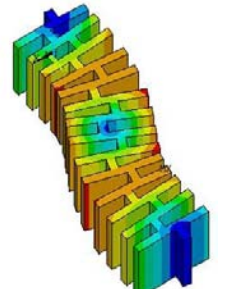
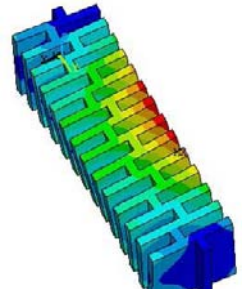
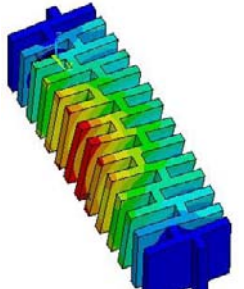
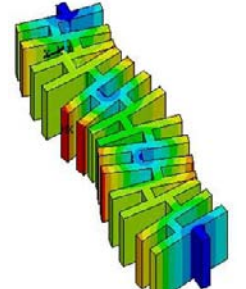
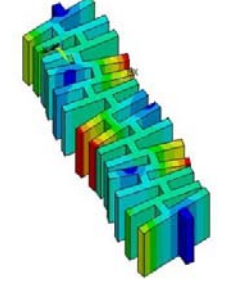
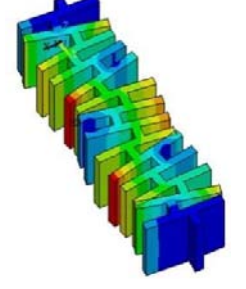
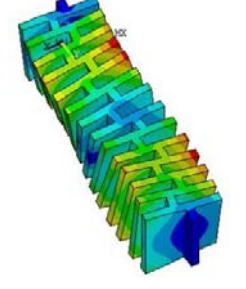
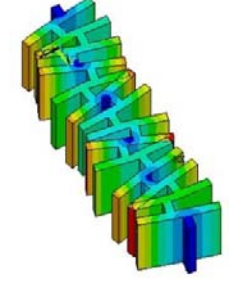
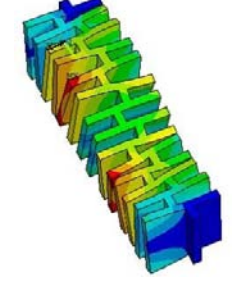
				
$f_1 = 487168 \text{ Гц}$	$f_2 = 1222133 \text{ Гц}$	$f_3 = 1848182 \text{ Гц}$	$f_4 = 2061949 \text{ Гц}$	$f_5 = 2136705 \text{ Гц}$
				
$f_6 = 2938209 \text{ Гц}$	$f_7 = 3267291 \text{ Гц}$	$f_8 = 3788366 \text{ Гц}$	$f_9 = 3976099 \text{ Гц}$	$f_{10} = 4554783 \text{ Гц}$

Таблица 3.9 - Формы колебаний пятого резонатора

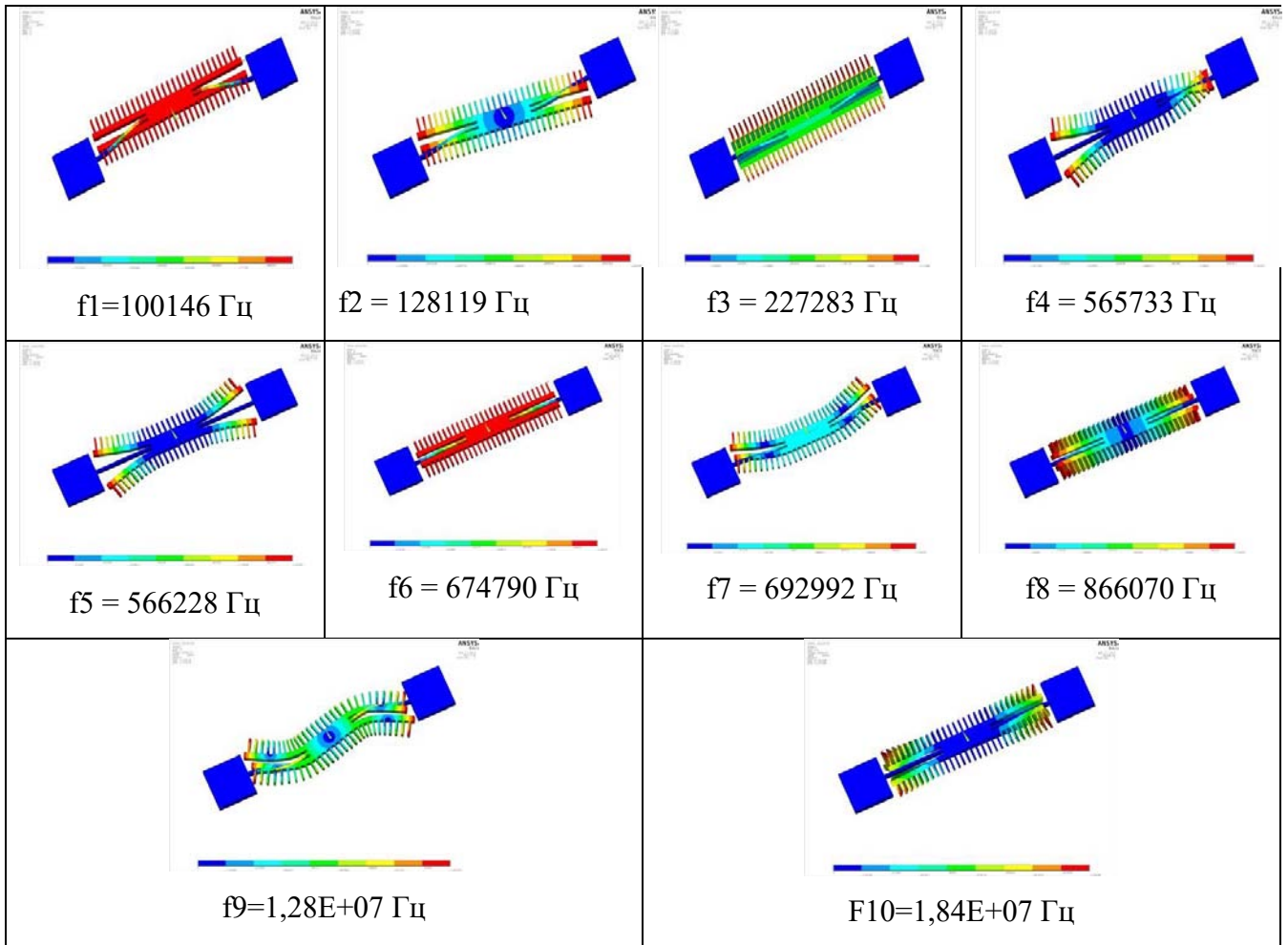
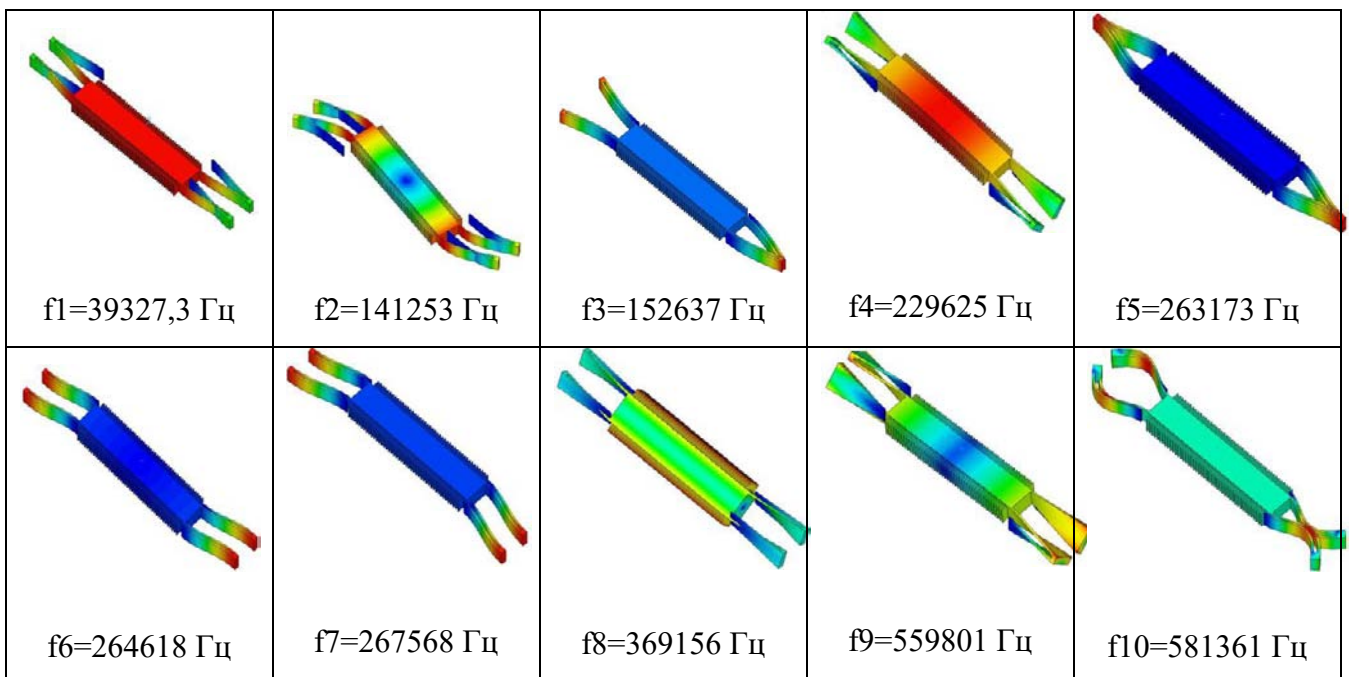


Таблица 3.10 - Формы колебаний шестого резонатора



В резонаторе датчика температуры и микрогироскопа полезной является первая форма колебаний, частоты остальных форм должны быть больше, что и было выполнено при создании их геометрии.

3.4.2 Температурный анализ

При использовании резонатора в качестве датчика температуры, его характеристики должны максимально изменяться при изменении температуры. При использовании же резонатора в качестве сенсора гироскопа, акселерометра, задающего элемента генератора его характеристики должны минимально реагировать на изменение температуры [42, 43, 44,].

Поэтому температурный анализ является важным типом анализа с целью выявления собственных частот, на которые оказывает наибольшее влияние данный тип нагрузки.

Под влиянием температуры возникают изменения линейных размеров конструкции, изменяется модуль упругости кремния, в конструкции возникают внутренние механические напряжения, нарушается геометрическая форма. Всё это повлечет за собой изменение частотных свойств чувствительного элемента. Разработка и исследование резонаторов связаны с решением задач математической физики, к которым относятся задачи теплопроводности, задачи о деформациях твердых тел и взаимосвязанные задачи. Нахождение точного аналитического решения возможно лишь для весьма ограниченного круга одномерных задач и при использовании целого ряда допущений.

С большей точностью анализ систем с распределёнными параметрами, к которым относятся микромеханические конструкции, осуществляется методами конечных элементов с применением компьютерных методов расчёта. На рисунке 3.35 приведён алгоритм моделирования влияния температурных полей на собственные частоты резонаторов.

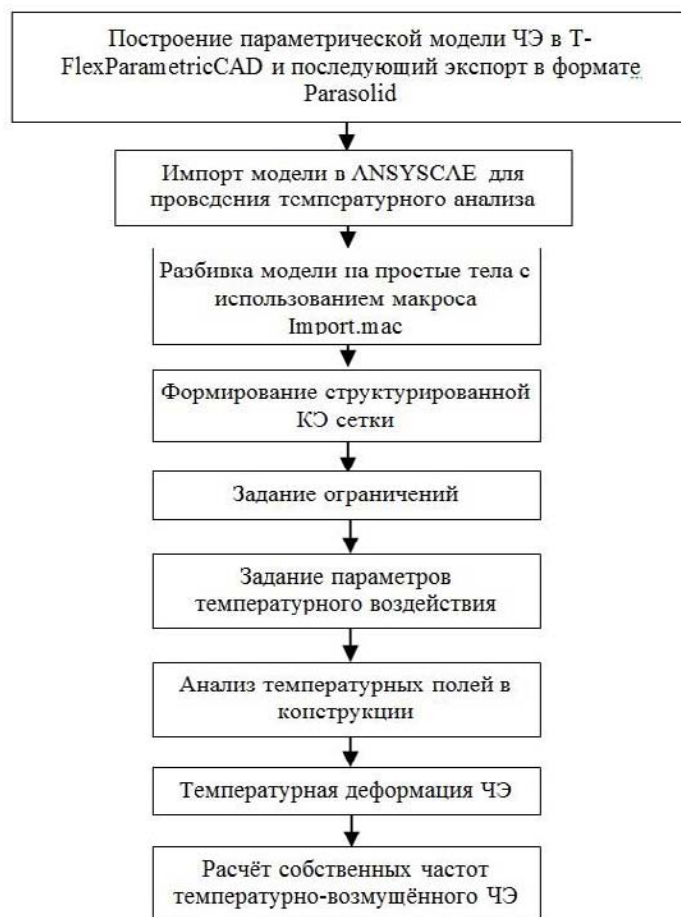


Рисунок 3.35 –Алгоритм анализа влияния температурных воздействий на резонаторы

Воспользуемся возможностью программного продукта Ansys для расчёта связанных задач, в которых результаты расчёта для одной среды (температурного поля) используются в качестве исходных нагрузок для вычисления распределения напряжений и расчёта собственных частот нагретой конструкции чувствительного элемента. При моделировании задаётся первоначально нагрев до определённой температуры, а затем проводится анализ собственной частоты системы при заданных условиях.

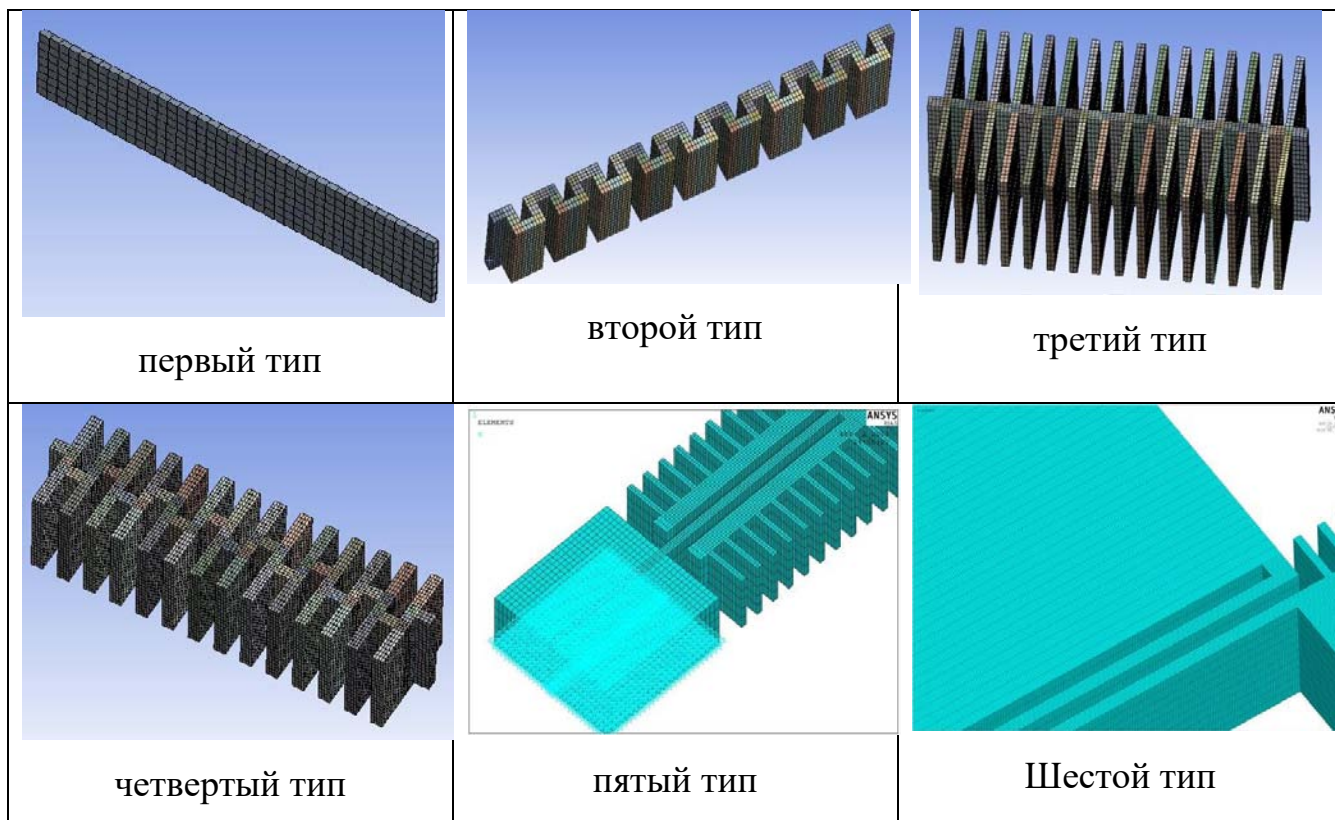
Температура задается как нагрузка в статическом анализе, решением этой части является деформация конструкции сенсора ММГ под действием температуры вследствие линейного расширения материала. Распределение температуры по объёму исследуемой модели равномерно и соответствует заданным условиям. Рабочая температура датчика, соответствующая номинальным размерам резонатора, принята 20°C.

Модели присваивается материал монокристаллический кремний, устанавливается температура, при которой свойства материала имеют справочные значения. Это позволяет настроить модель таким образом, чтобы при изменении температуры окружающей среды происходило изменение свойств кремния.

Наложенная на модели резонаторов структурированная конечно-элементная сетка гексаэдрической формы [40, 44] представлена в таблице 3.11.

Закрепление производилось за концы торсионов, тип закрепления – жесткое, ограничивающее перемещение по всем степеням свободы. Исследование влияния температуры производилось в диапазоне от -40°C до $+80^{\circ}\text{C}$.

Таблица 3.11 - Структурированная сетка в Ansys



В таблицах 3.12-3.17 представлены деформации резонаторов по осям X, Y, Z при температуре $+80^{\circ}\text{C}$ и -40°C . По цветовой шкале можно судить о том, какие части датчика подвержены большей или меньшей деформации при воздействии температуры.

Таблица 3.12 Температурная деформация первого резонатора

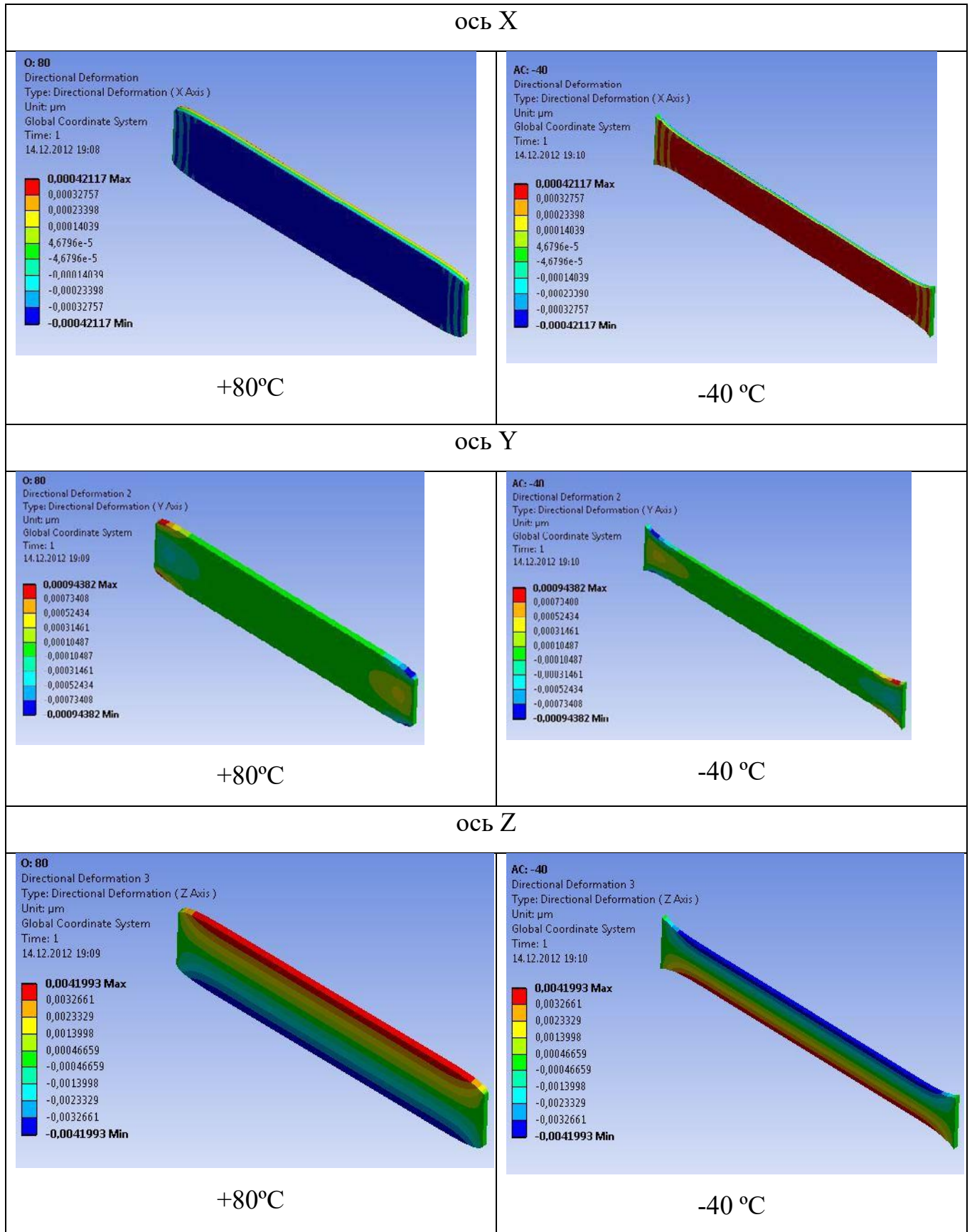


Таблица 3.13 Температурная деформация второго резонатора

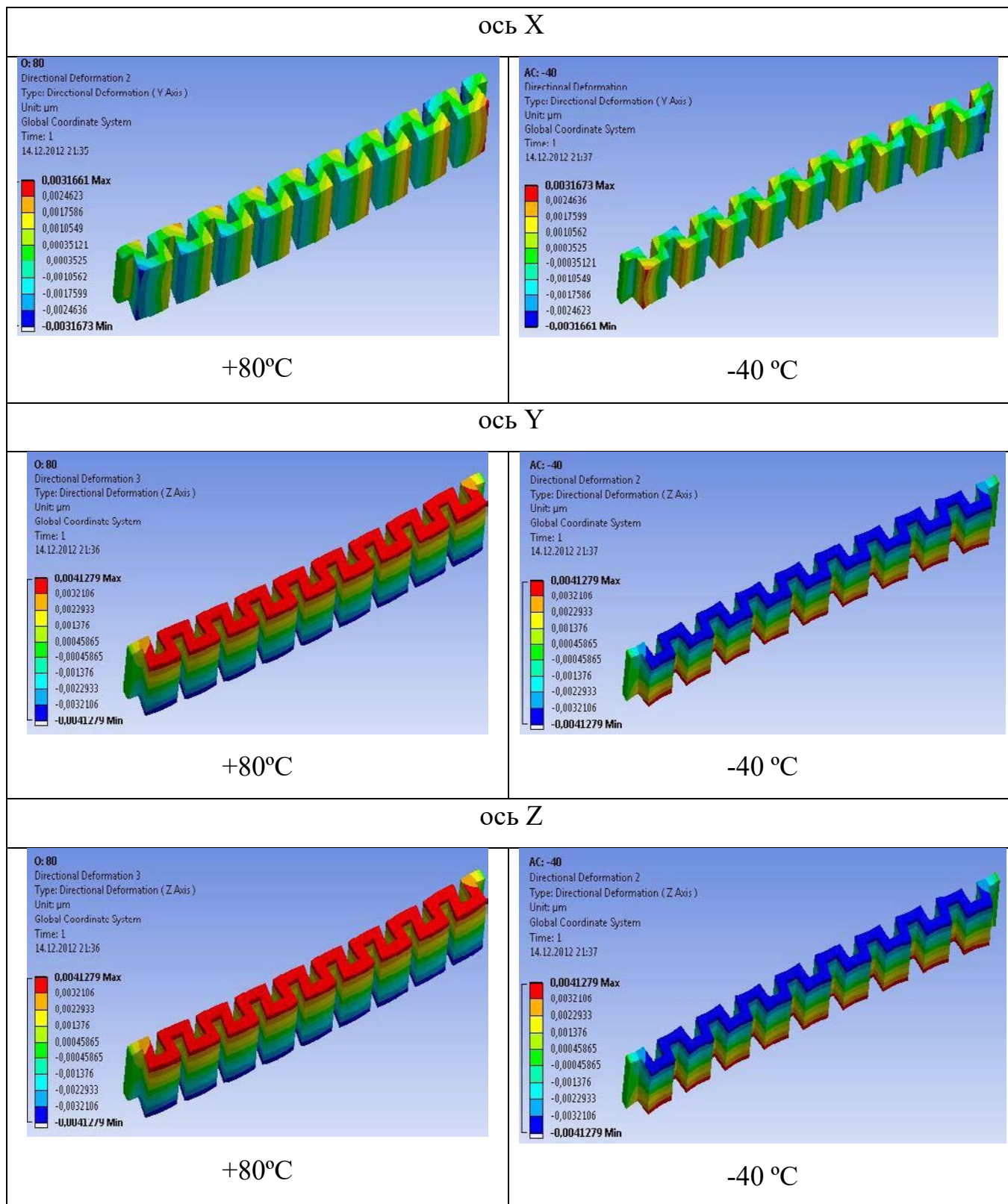


Таблица 3.14 Температурная деформация третьего резонатора

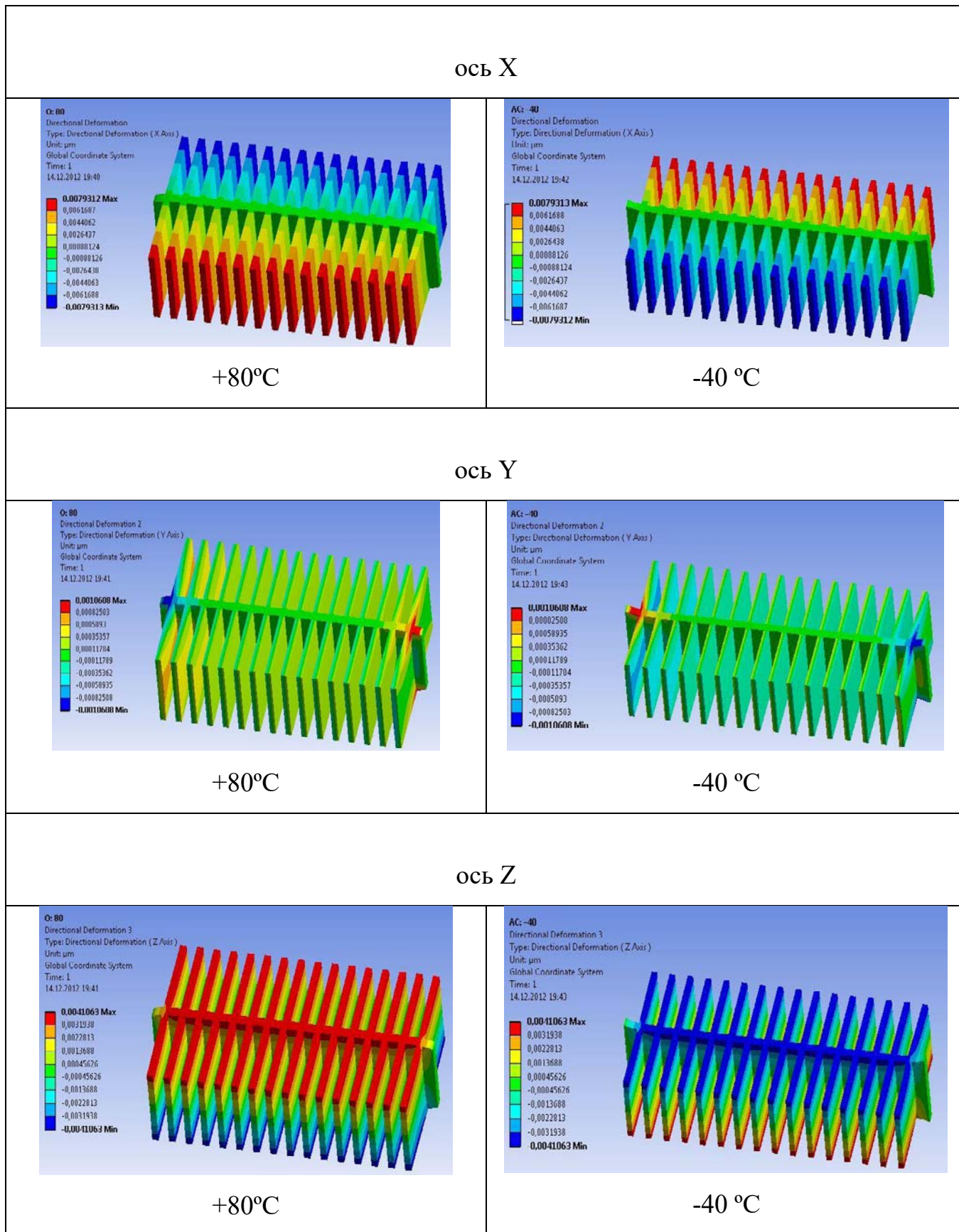


Таблица 3.15 Температурная деформация четвёртого резонатора

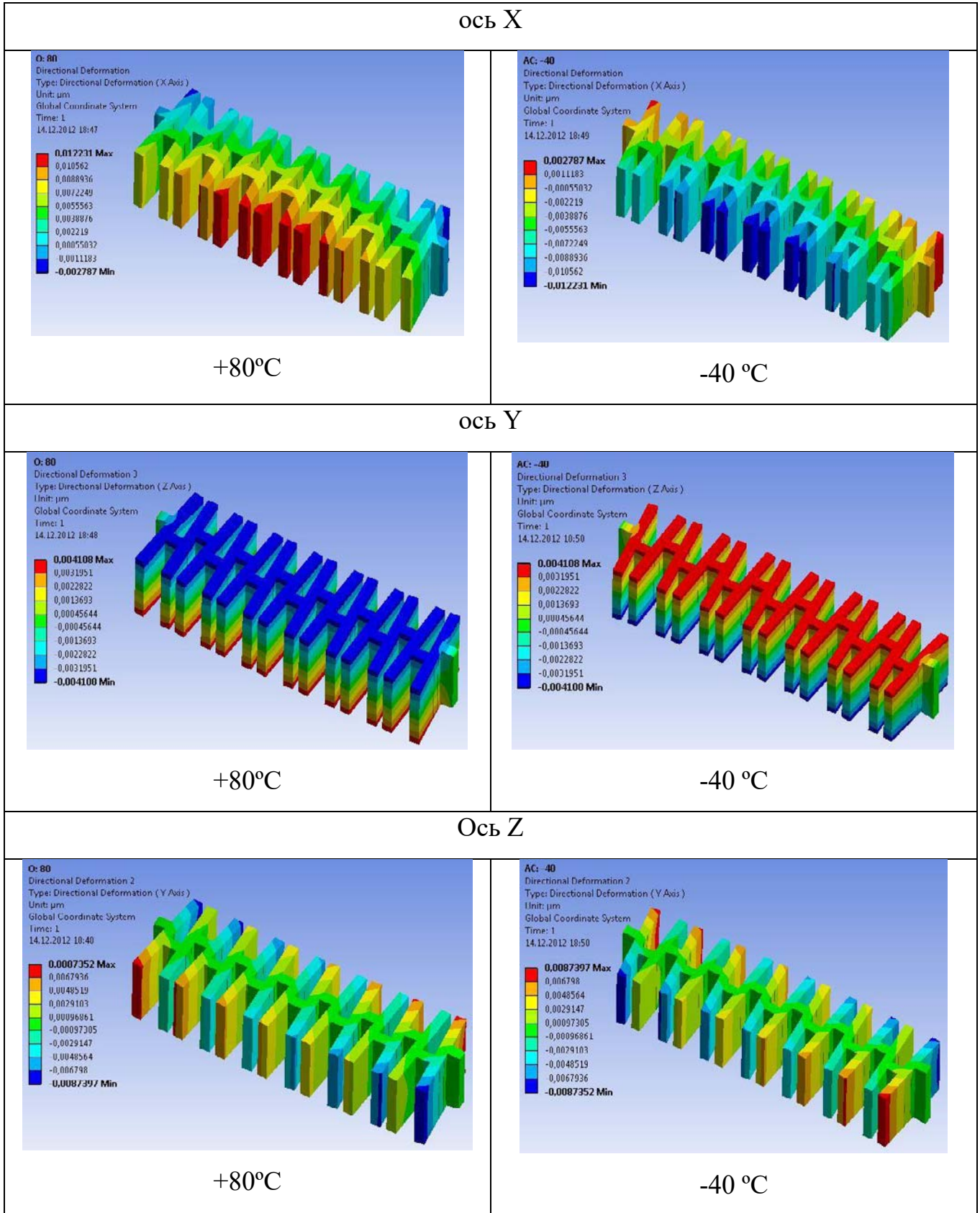
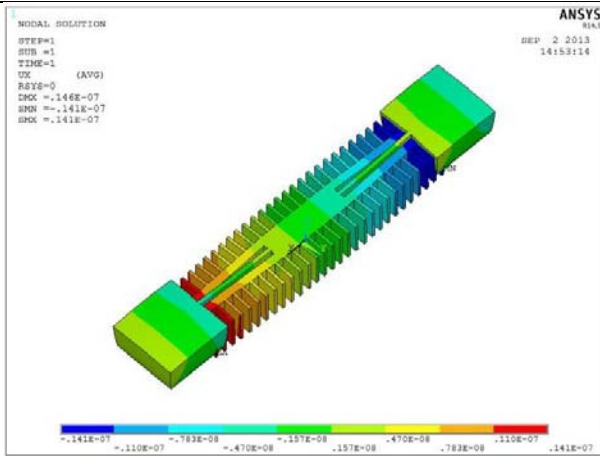
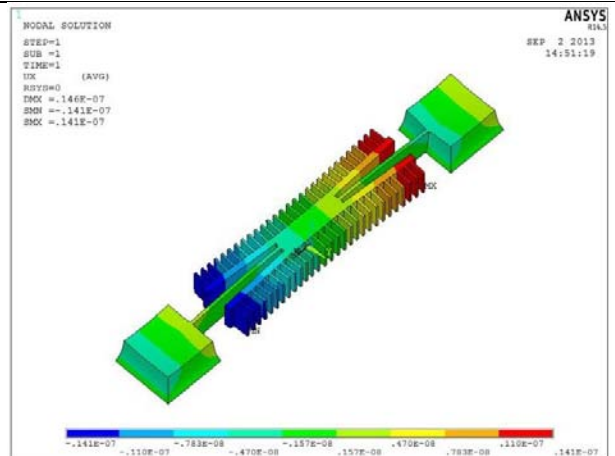


Таблица 3.16 Температурная деформация пятого резонатора

ось X

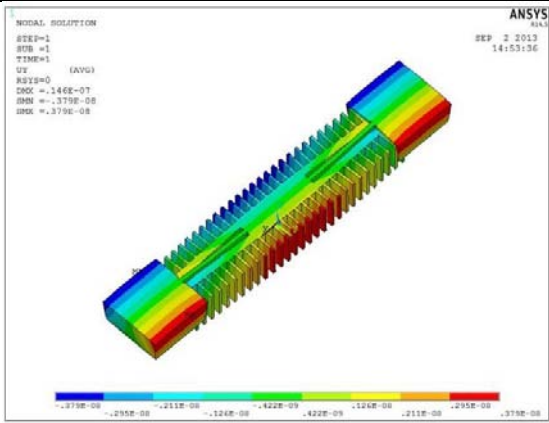


+90°C

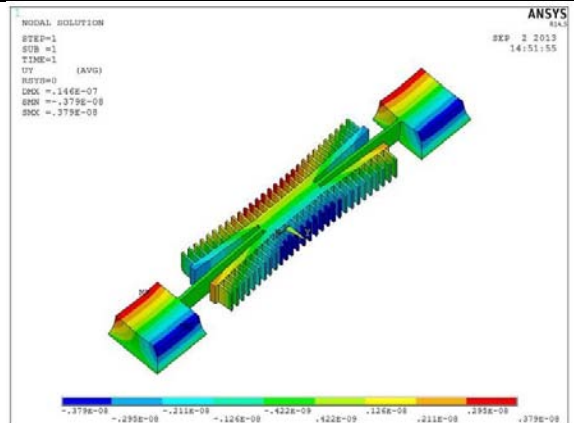


-50 °C

ось Y

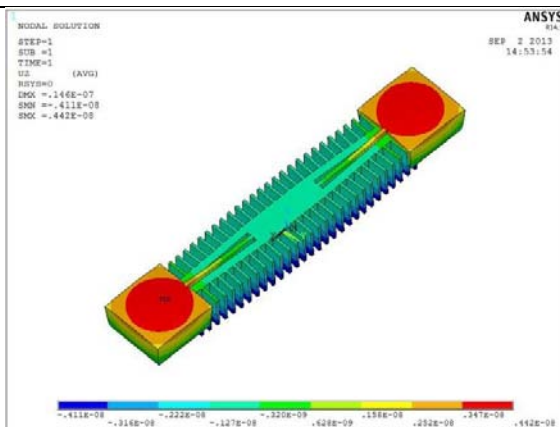


+90°C

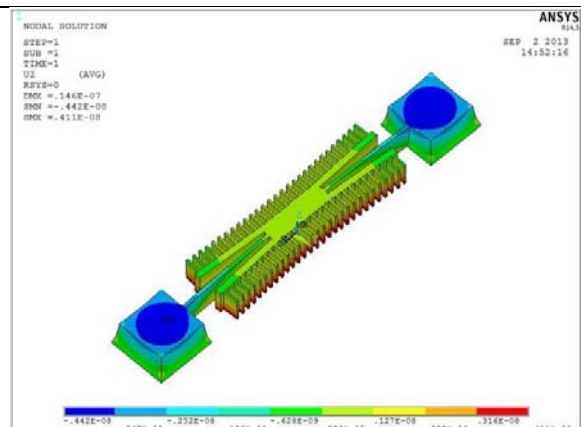


-50 °C

Ось Z

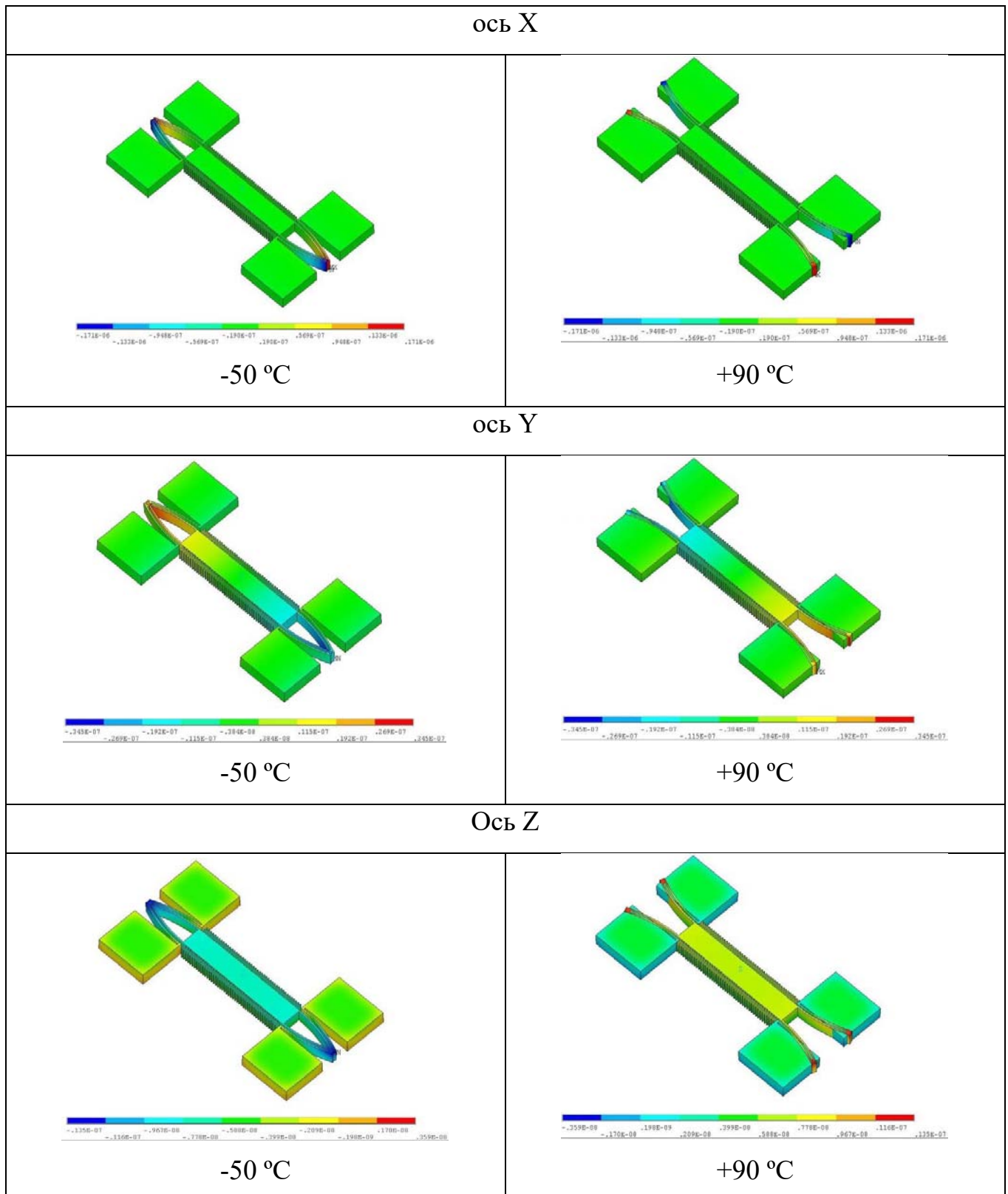


+90°C



-50 °C

Таблица 3.17 Температурная деформация шестого резонатора



Результаты температурного анализа передаются в частотный анализ и определяются частоты десяти форм колебаний резонаторов при заданных температурах окружающей среды. На рисунках 3.36–3.41 представлены

результаты температурного анализа резонаторов – относительные изменения частоты для каждой моды колебаний.

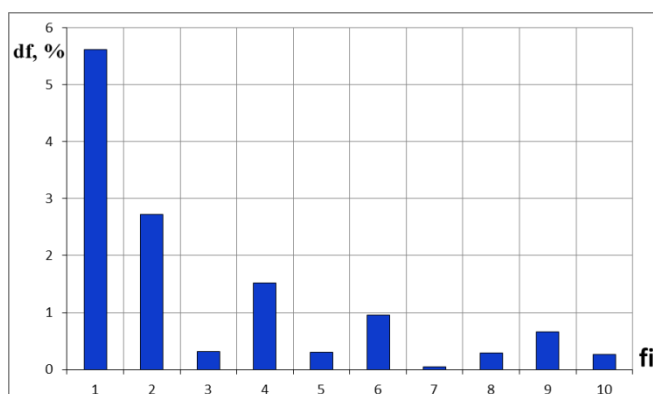


Рисунок 3.36 – Относительные изменения частот первого резонатора

Для первого резонатора наибольшей чувствительностью к температуре обладает первая форма его колебаний, которая является рабочей в режиме датчика температуры. Седьмая форма колебаний резонатора имеет минимальную чувствительность к температуре и является рабочей при использовании резонатора в генераторах.

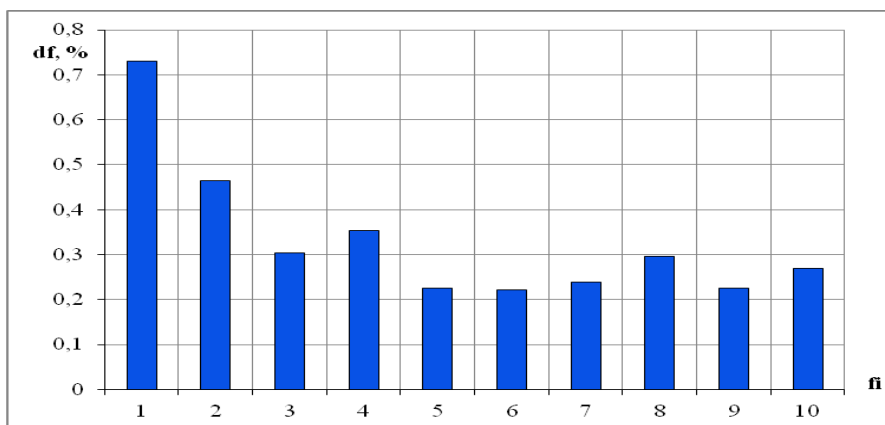


Рисунок 3.37 – Относительные изменения частот второго резонатора

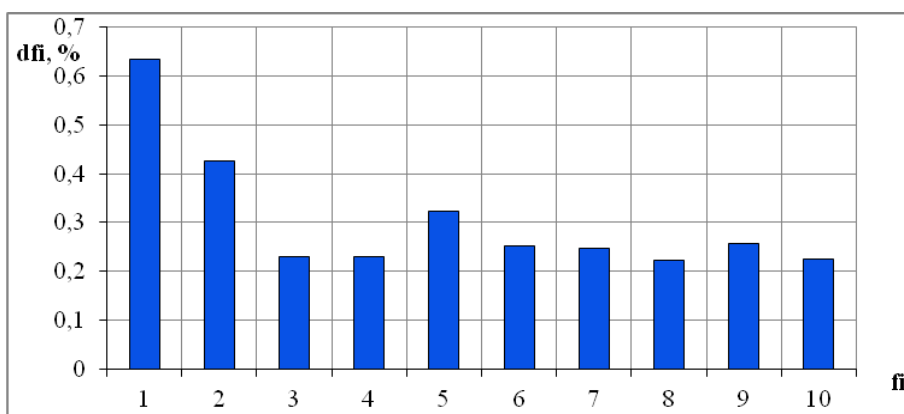


Рисунок 3.38 – Относительные изменения частот третьего резонатора

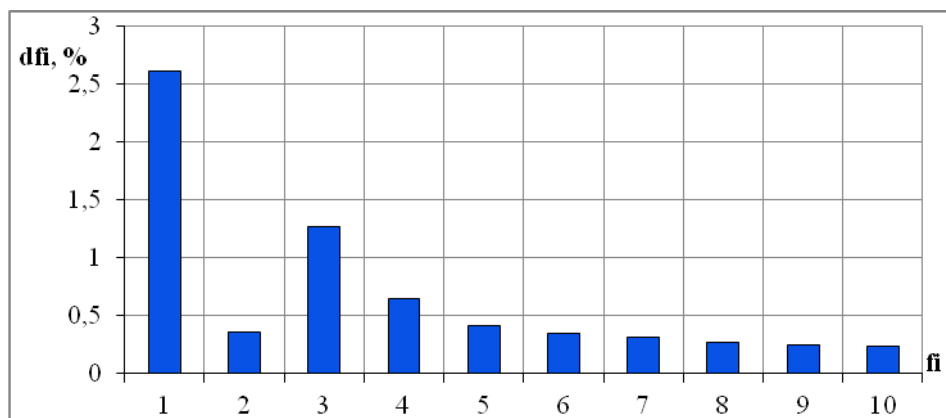


Рисунок 3.39 – Относительные изменения частот четвертого резонатора

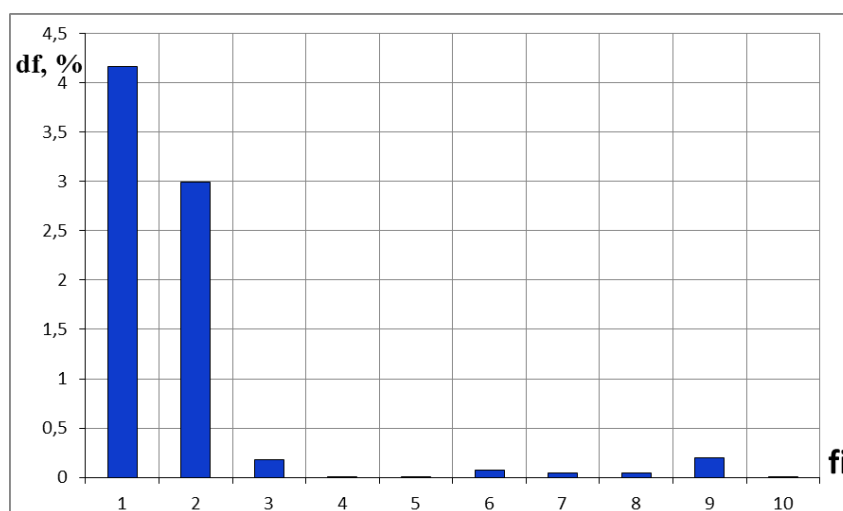


Рисунок 3.40 – Относительные изменения частот пятого резонатора

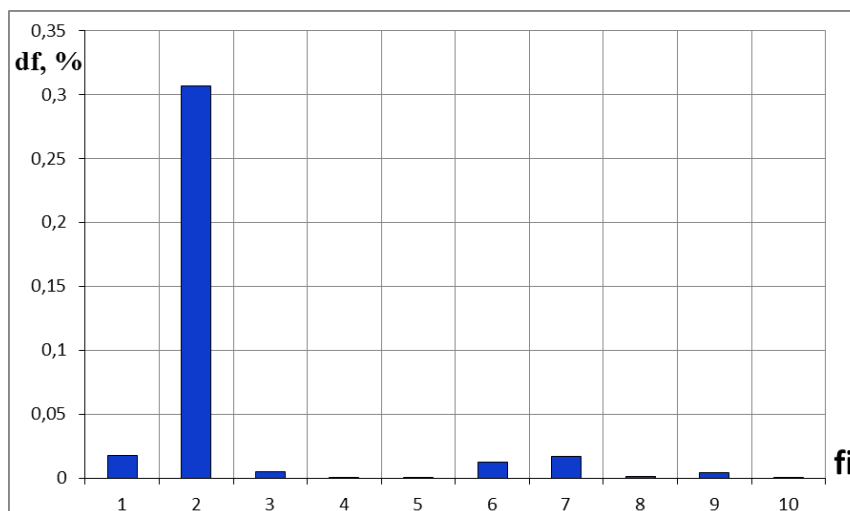


Рисунок 3.41 – Относительные изменения частот шестого резонатора

Наименее чувствительны к изменению температуры 2-ой, 3-ий и 6-ой резонаторы. Наибольшую чувствительность к изменению температуры имеют резонаторы первого и пятого типа, которые будут использоваться в качестве датчика температуры в многокомпонентной системе. Зависимость изменения

частоты первой формы колебаний этих резонаторов, имеет линейный характер (рисунки 3.42, 3.43).

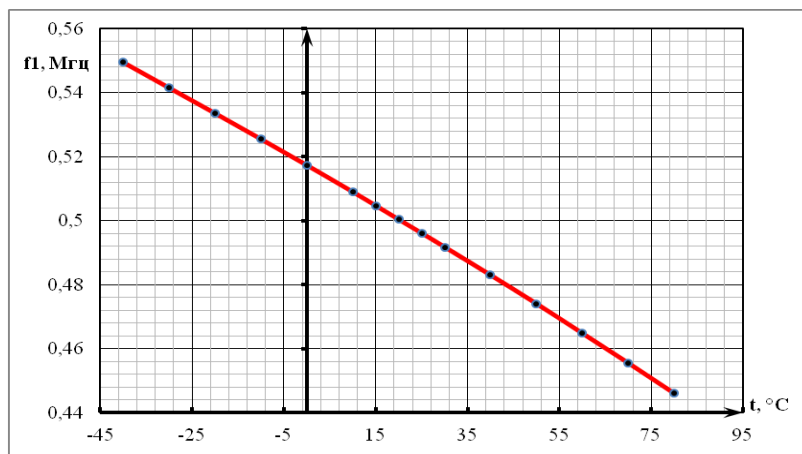


Рисунок 3.42 – Температурная зависимость частоты f_1 резонатора первого типа

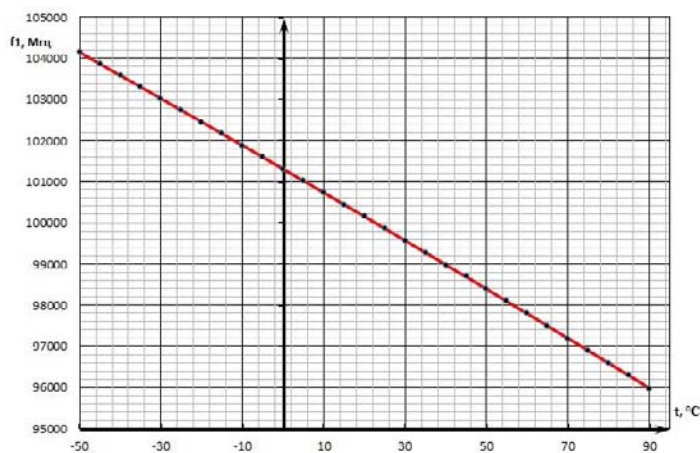


Рисунок 3.43 – Температурная зависимость частоты f_1 резонатора пятого типа

Аппроксимирующая функция для резонатора пятого типа имеет вид

$$f(T) = 101287,8438 - 58,2911 \cdot T$$

Ошибка аппроксимации составляет не более 0,0001%.

3.4.3 Статический анализ

В соответствии с методикой макро моделирования (рисунок 2.8) статический анализ необходим для определения энергии деформации при модальных перемещениях q_i , что позволит определить модальные жесткости.

В статическом анализе используется тот же принцип построения сетки и тип конечных элементов, что и для модального анализа, описанного в подразделе

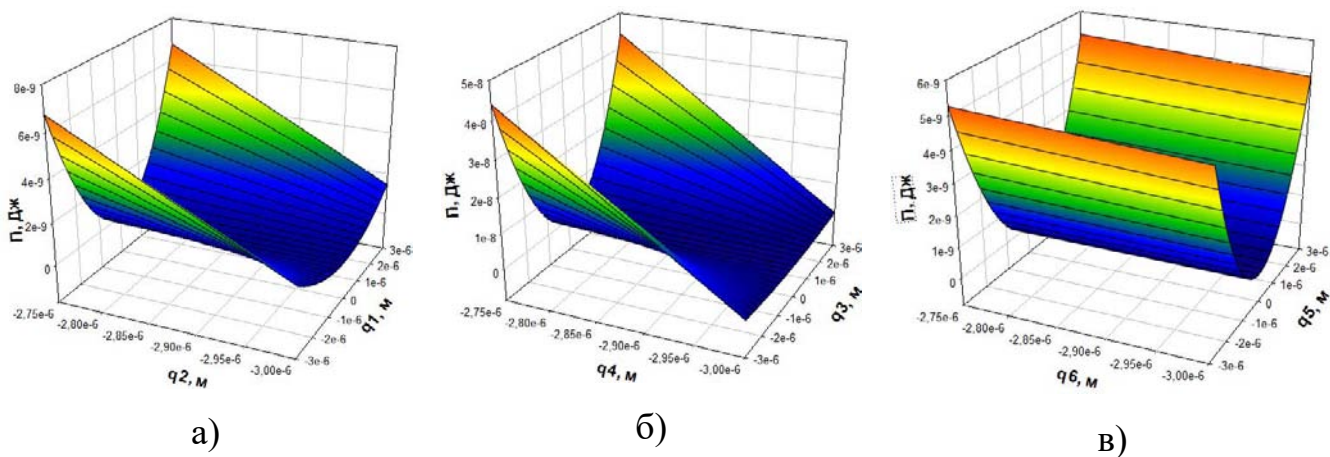
3.3.1. Из модального анализа после выбранных мод, берутся значения структурных смещений, как функции от модальных амплитуд. Макросы для AnsysMechanicalAPDL, решающий задачу нахождения энергии деформации учетом модальных амплитуд приведен в приложении А, раздел А.4.

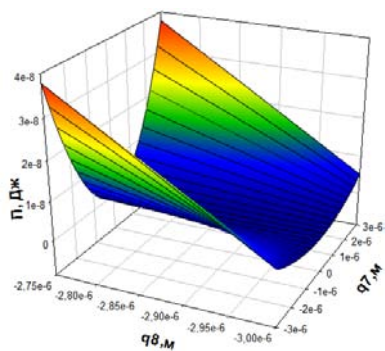
Дальнейшее исследование с применением макро моделирования рассмотрим для резонатора шестого типа, чтобы сравнить результаты макро моделирования с экспериментальными результатами. Для других резонаторов действия будут аналогичны.

В качестве нагрузки в статическом анализе используются модальные перемещения, приложенные к узлам конечно-элементной сетки, рассчитанные на этапе модального анализа. Полный диапазон перемещения резонатора ограничен амплитудой 6 мкм, так как в конструкции резонатора 6 типа при перемещении подвижной части на 6 мкм произойдет её контакт с неподвижной частью.

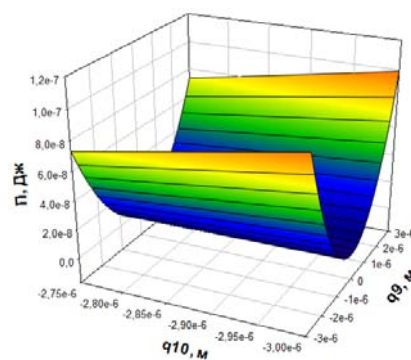
Статический анализ позволяет также осуществить расчёт напряжённого состояния конструкций под действием приложенных к системе постоянных во времени сил.

Рассчитанная зависимость энергии деформации от модальных перемещений q_i представлена на рисунке 3.44.





г)



д)

Рисунок 3. 44 – Зависимость энергии деформации от модальных перемещений q_i

Зависимость аппроксимировалась полиномом второй степени, что соответствует линейной модели

$$P_i = a_i x_i + b_i.$$

Ошибка аппроксимации при этом не превышает 0,01%. По полученной энергии деформации находятся значения модальных жесткостей и модальных масс для выбранных мод.

3.4.4 Электростатический анализ

В соответствие с методикой макро моделирования (рисунок 2.8) межэлектродные ёмкости электродных структур микросистем являются одними из основных параметров, характеризующих электромеханическую систему. Во-первых, электродные структуры выполняют роль вибропривода. Сила, создаваемая виброприводом и возбуждающая колебания подвижной системы, зависит от межэлектродных емкостей

$$f_i^э = \frac{1}{2} \sum_r \frac{\partial C_{kl}}{\partial q_i} (V_k - V_l)^2. \tag{3.1}$$

Электродные структуры выполняют также роль измерительных элементов. Переменные ёмкости генерируют выходной ток, который может быть определён по напряжению на нагрузочном резисторе или с помощью усилителя напряжения, управляемого током

$$I_j = \frac{\partial Q_j}{\partial t} = \sum_r \left[\sum_m \left[\frac{\partial C_{kl}}{\partial t} (V_k - V_l) + C_{kl} (\dot{V}_k - \dot{V}_l) \right] \right]. \quad (3.2)$$

Целью электростатического анализа является определение межэлектродных емкостей. Рассматривается резонатор 6-го типа, для которого необходимо определить ёмкости: C_{12} , C_{23} – между подвижными и неподвижными частями микрорезонатора, C_{13} – ёмкость между неподвижными частями гребенчатых электродных структур (рисунок 3.45).

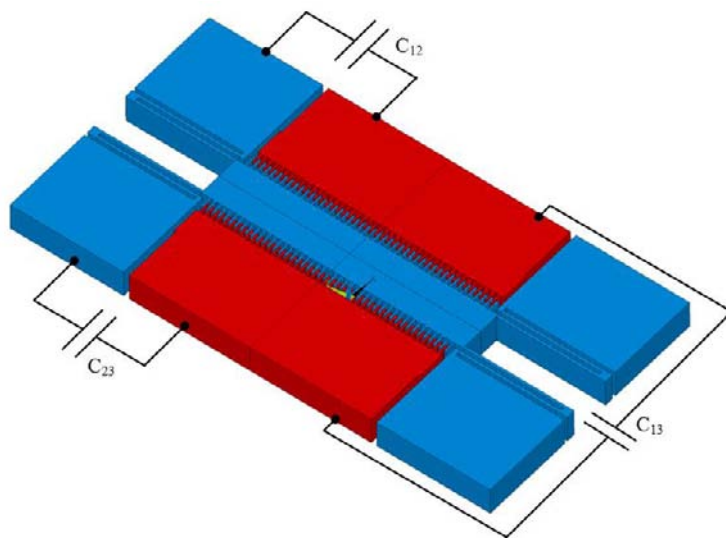


Рисунок 3.45 – Модель исследуемого резонатора

Определение зависимости изменения емкостей от перемещения подвижной части микрорезонатора проводилось двумя методами: аналитически и в программе ANSYS, используя метод конечных элементов.

3.4.4.1 Определение ёмкости гребенчатых электродных структур резонатора аналитическим методом

Для системного моделирования работы микромеханических сенсоров необходимо иметь достоверные и верифицированные модели емкостей электродных структур. На начальном этапе емкостные датчики могут быть представлены в виде конденсаторов с ёмкостью, изменяющейся в зависимости от перемещения подвижной массы. При расчёте емкостей использовалась модель, представляющая собой два плоских параллельных проводящих электрода (рисунок 3.46). В расчётах принималось, что электроды имеют длину a , ширину b , межэлектродный зазор d .

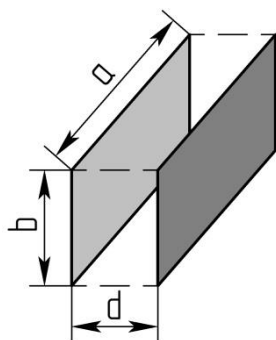
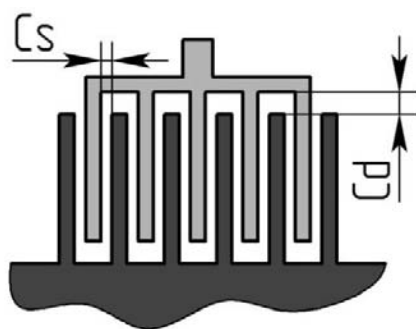


Рисунок 3. 46 – Модель электродов, используемая при расчётах

С учётом краевого эффекта ёмкость может быть рассчитана по формуле [45]

$$C = \frac{\epsilon\epsilon_0 ab}{d} \left(1 + \frac{d}{\pi b} + \frac{d}{\pi b} \ln 2\pi \left(\frac{b}{d} + \frac{3}{4} \frac{(b+a)}{a} \right) + \frac{d}{\pi a} + \frac{d}{\pi a} \ln 2\pi \left(\frac{a}{d} + \frac{3}{4} \frac{(a+b)}{b} \right) \right) \quad (3.3)$$

Ёмкости создаются не только боковыми поверхностями гребёнок, но также и торцевыми поверхностями подвижных и неподвижных гребёнок (рисунок 3.47).



C_s – ёмкость, зависящая от площади перекрытия;

C_d – ёмкость торцевых поверхностей

Рисунок 3. 47 – Ёмкости электродных гребенчатых структур

Суммарная ёмкость гребенчатой структуры по каждой оси определяется выражением: $C = C_s + C_d$.

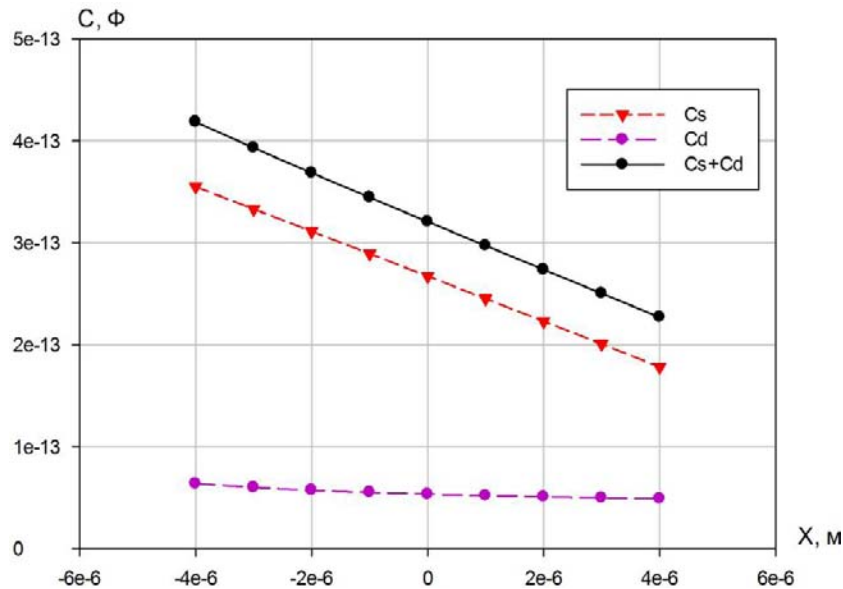
Таблица 3.18 – Геометрические размеры электродных гребенчатых структур

№ контакта	Ёмкость (Обозначение)	Размеры гребёнок для емкостей C_s			Кол-во конденсаторов, входящих в ёмкость, n	Размеры гребёнок для емкостей C_d			Кол-во конденсаторов, входящих в ёмкость (n)
		a , мкм	b , мкм	d , мкм		a , мкм	b , мкм	d , мкм	
1	C_{12}	10	50	2	88	50	3	10	89
2	C_{23}	10	50	2	88	50	3	10	89

На рисунке 3.48 приведён график изменения ёмкости C_{12} при перемещении подвижной части по оси X на ± 4 мкм. При изменении площади перекрытия

гребёнок, изменение ёмкости носит линейный характер, а при изменении расстояния между торцами – нелинейный.

В результате расчёта, начальная суммарная ёмкость получилась равной $3,32 \cdot 10^{-13} \text{Ф}$. Ёмкость C_{23} изменяется аналогичным образом, но в противоположном направлении.



C_s – ёмкость, зависящая от площади перекрытия; C_d – ёмкость, зависящая от расстояния; C_s+C_d – полное изменение ёмкости.

Рисунок 3.48 – Изменение ёмкости C_{12}

3.4.4.2 Определение ёмкости гребенчатых электродных структур КЭ методом

При создании конечно-элементной электростатической модели резонатора используется 3D элемент SOLID122, который представляет собой двадцати узловой КЭ.

Для расчёта использовались следующие характеристики материала и окружающей среды:

$$\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Ф}}{\text{м}} \quad \text{– электрическая постоянная;}$$

$$\epsilon_{\text{si}} = 11,7 \quad \text{- диэлектрическая проницаемость кремния;}$$

$$\epsilon_{\text{air}} = 1 \quad \text{- диэлектрическая проницаемость вакуума.}$$

Следующим шагом является определение начальной ёмкости в зависимости от количества конечных элементов. Необходимо подобрать такое количество КЭ элементов, чтобы оптимально использовать ресурсы компьютера и в тоже время получить более точный результат (таблица 3.19).

Таблица 3.19 – Зависимость начальной ёмкости от количества КЭ

Номер эксперимента	1	2	3	4	5
Кол-во КЭ, n	76264	142520	543536	1662768	2458916
Ёмкость C_{12} , пФ	0,376	0,336	0,337	0,335	0,333

Поскольку микрорезонатор имеет микроразмеры, то наиболее подходящий размер конечных элементов будет равняться 1 мкм. Этому условию соответствует номер эксперимента 5 (таблица 3.19).

На рисунке 3.49 представлена конечно-элементная модель резонатора с размером КЭ сетки 1 мкм, полученная в программе ANSYS. Сетка равномерная.

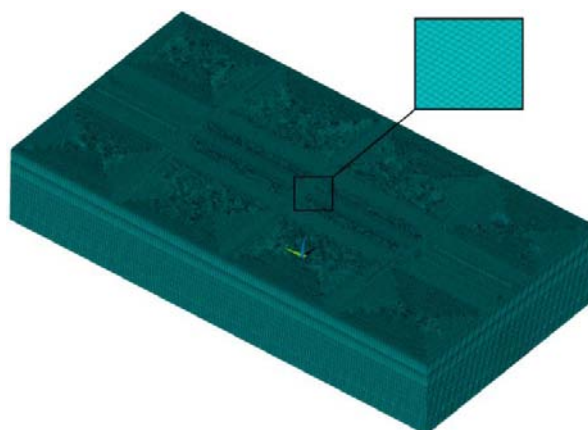


Рисунок 3.49 – Конечно-элементная электростатическая модель резонатора

Распределение электрического потенциала в зазорах электродных структур равномерное (рисунок 3.50)

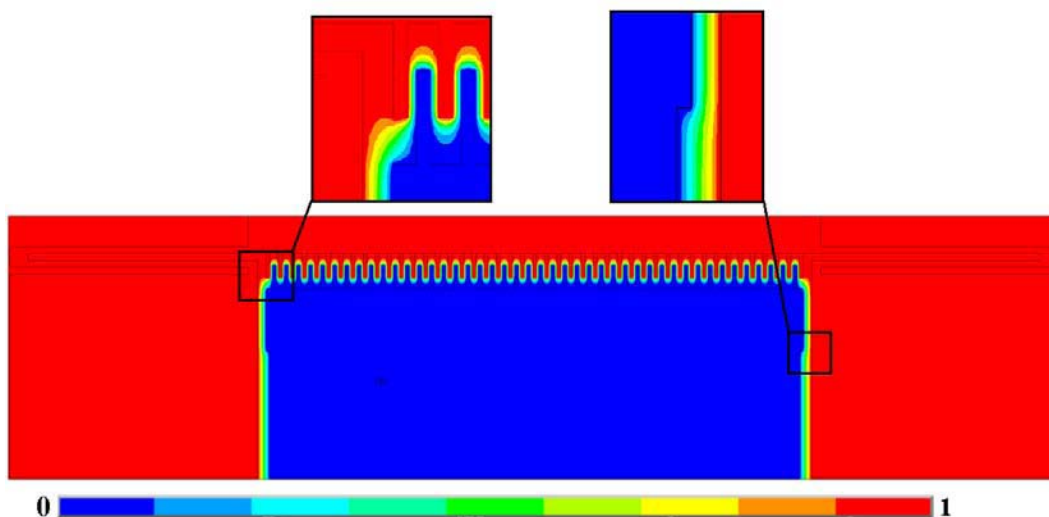
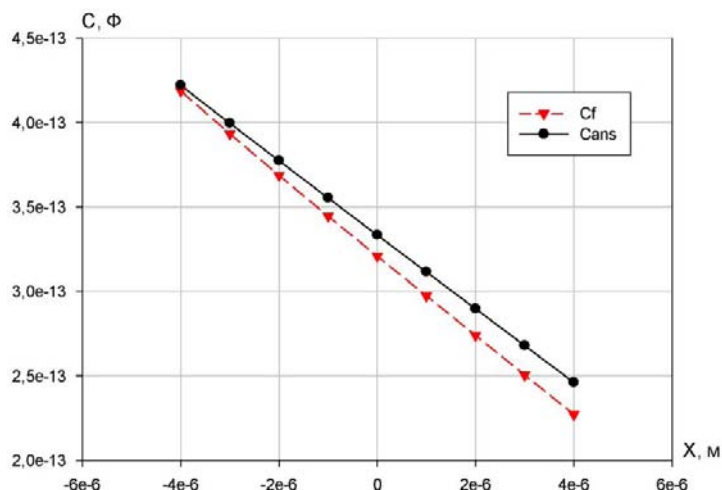


Рисунок 3.50 – Распределение электрического потенциала

На рисунке 3.51 приведены графики изменения ёмкости C_{12} , полученные аналитически и с помощью МКЭ.



C_f – ёмкость, рассчитанная по формуле 3.3; C_{ans} – ёмкость из КЭ анализа.

Рисунок 3.51 – Ёмкости электродных структур резонатора

График изменения ёмкости, рассчитанный с помощью МКЭ является более точным, так как позволяет учесть ёмкости, образованные всеми поверхностями электродных структур микрорезонатора (не только гребенчатыми структурами, но и боковыми поверхностями конструкции).

На рисунке 3.52 показан график изменения ёмкости ΔC_{12} при перемещении резонатора по оси X.

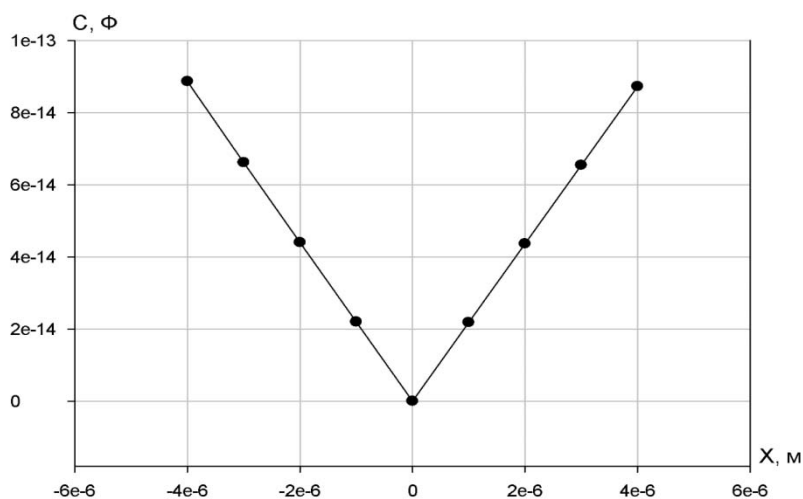


Рисунок 3.52 – График абсолютного изменения ёмкости C_{12}

Для составления макромодели микромеханического гироскопа, зависимость изменения ёмкости C_{12} необходимо аппроксимировать, с целью последующей передачи в Matlab/Simulink. Для этого применяется программный продукт SigmaPlot. Если для аппроксимации воспользоваться линейной функцией $f(x) = a + b \cdot x$,

где a, b – коэффициенты, которые необходимо определить, то получается зависимость, приведённая на рисунке 3.53.

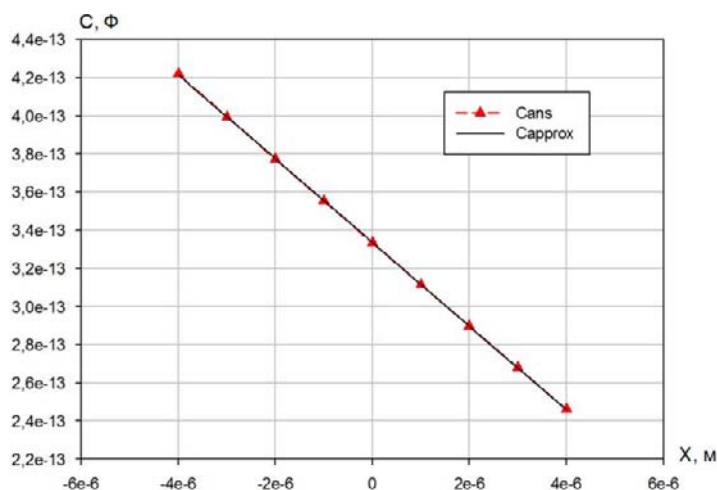


Рисунок 3.53 – Линейная аппроксимация зависимости

Аппроксимирующие функции емкостей имеют вид

$$C_{12} = 3,3366 \cdot 10^{-13} - 2,1964 \cdot 10^{-8} \cdot x ; \quad (3.4)$$

$$C_{23} = 3,3366 \cdot 10^{-13} + 2,1964 \cdot 10^{-8} \cdot x .$$

Погрешность аппроксимации составляет $2,8898 \cdot 10^{-16} \Phi$.

На следующем шаге необходимо определить значение паразитной ёмкости C_{13} , возникающей между неподвижными частями микрорезонатора при перемещении подвижной структуры на ± 4 мкм. Между электродами этой ёмкости находится несколько различных сред (рисунок 3.54).

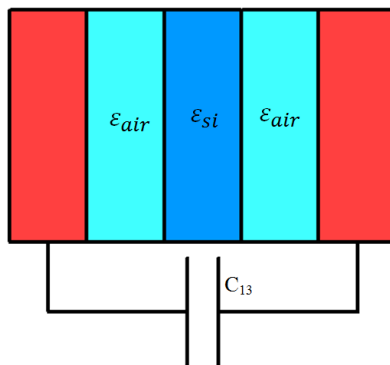


Рисунок 3.54 – Модель паразитной ёмкости

Схема представляет собой вариант последовательного соединения двух конденсаторов: один с диэлектриком air (воздух) ёмкостью C_{air} , другой с диэлектриком si (кремниевая подвижная структура) ёмкостью C_{si} . Полная ёмкость вычисляется по формуле

$$C_{13} = 2 \frac{1}{C_{air}} + \frac{1}{C_{si}}.$$

На рисунках 3.55, 3.54 представлены результаты расчёта паразитной ёмкости.

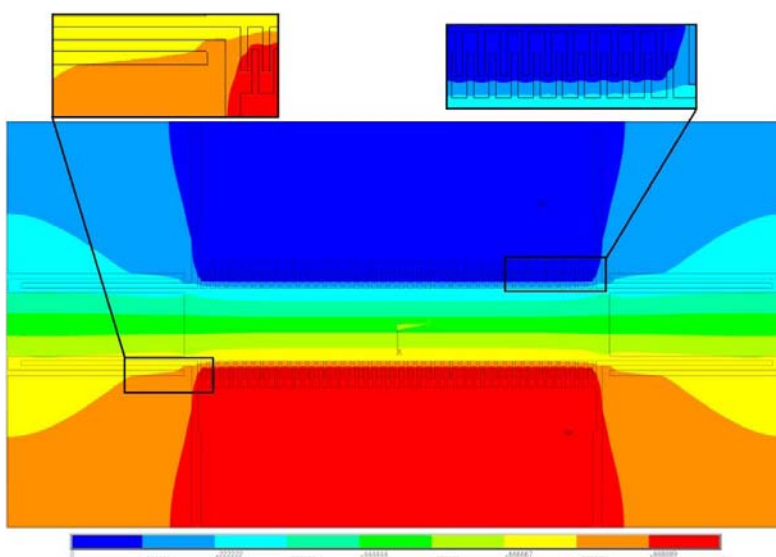


Рисунок 3.55 – Распределение электрического потенциала между неподвижными электродными структурами

Из рисунка видно, что электрическое поле неравномерно пересекает объёмы воздуха и кремния. Это связано с тем, что воздух и кремний имеют различную диэлектрическую проницаемость.

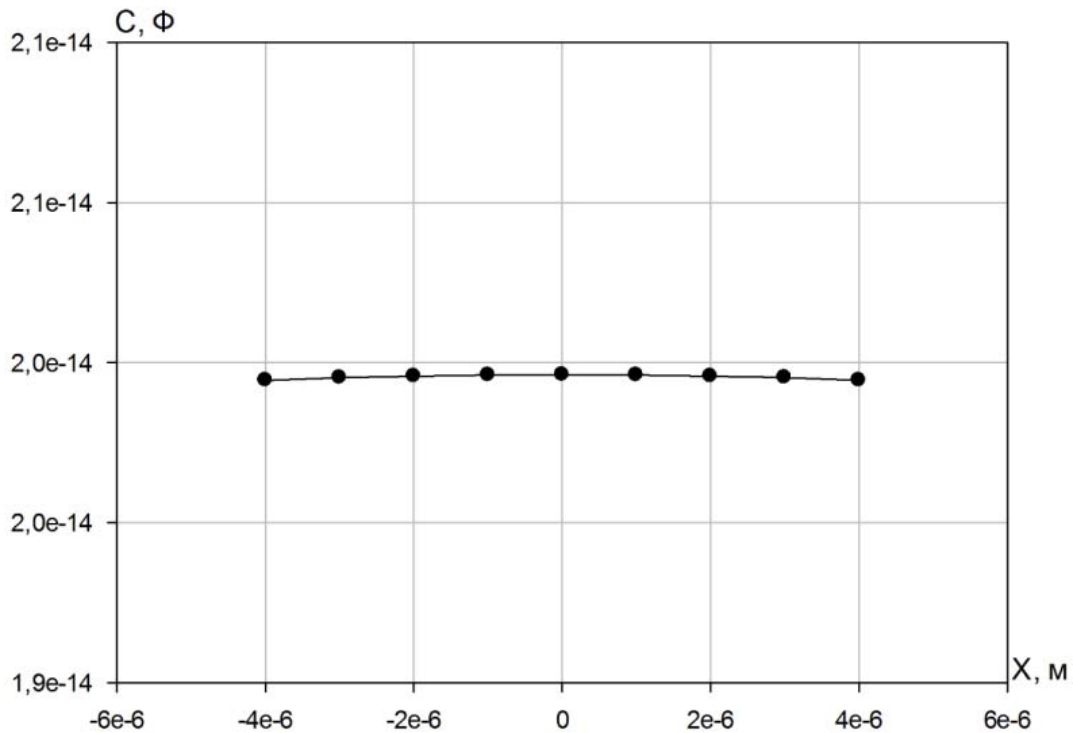


Рисунок 3.56 – График изменения паразитной ёмкости C_{13}

При линейризации паразитной ёмкости получим зависимость

$$C_{13} = 1,9955 \cdot 10^{-14} + 2,5316 \cdot 10^{-14} \cdot x. \quad (3.5)$$

Изменение ёмкости C_{13} из-за перемещения подвижной части на шесть порядков меньше, чем постоянная составляющая ёмкости. Следовательно, паразитную ёмкость можно рассматривать как постоянную.

3.5 Компьютерные модели и результаты моделирования микромеханического резонатора

Системное моделирование проведём для резонатора шестого типа, который представляет собой осциллятор с электростатической системой возбуждения его колебаний (рисунок 3.57).

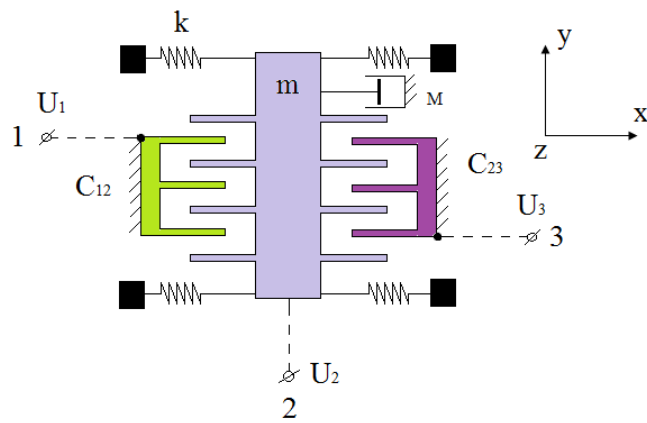


Рисунок 3.57 – Функциональная схема микрорезонатора

Микрорезонатор можно представить состоящим из двух доменов: механического и электрического (рисунок 3.58), которые связаны между собой через межэлектродные ёмкости.

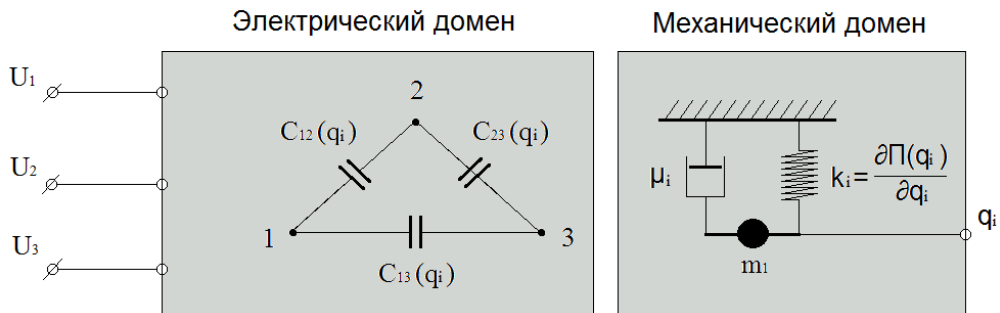


Рисунок 3.58 – Структура микрорезонатора

Из проведённого в разделе 3.3.1 модального анализа микрорезонатора собственные формы колебаний резонатора, имеющие наибольший вклад моды при воздействии сил в рабочем направлении, представлены на рисунке 3.59 .

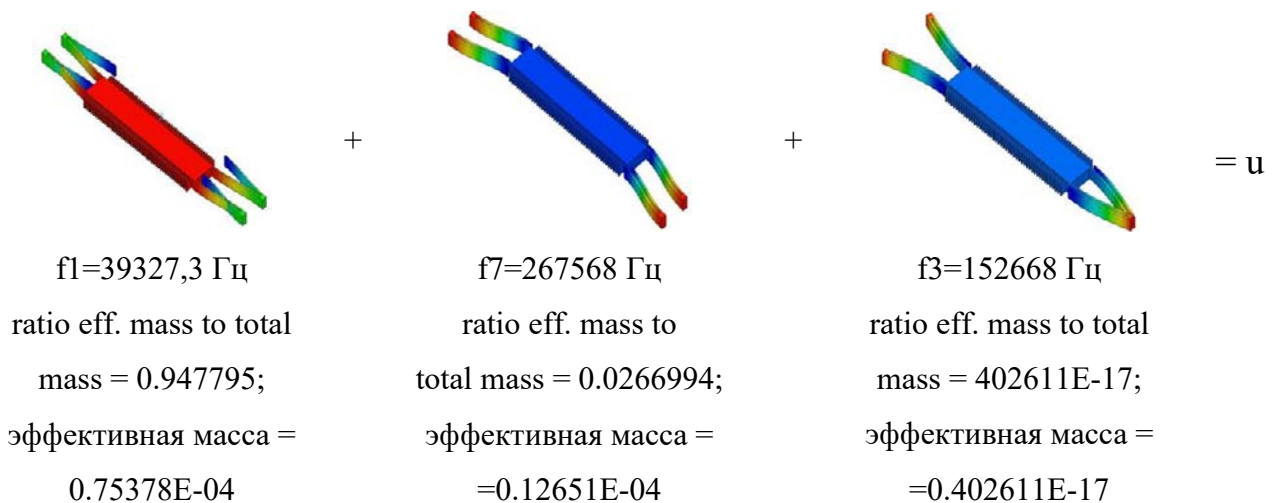


Рисунок 3.59 – Коэффициент участия собственных форм колебаний резонатора

Наибольшее значение имеет эффективная масса и отношение эффективной массы к общей массе системы для первой моды колебаний, у всех остальных эти параметры на несколько порядков меньше. Следовательно, структурное механическое перемещение « $u=x$ » резонатора в основном определяется первой модой колебаний, которая является доминирующей. Для повышения точности моделирования учтём ещё седьмую моду. Редуцированная система при составлении макромоделли резонатора будет содержать две моды колебаний механического домена. Возбуждение микрорезонатора осуществляется на частоте 1-ой моды.

В этом случае динамика механического домена определяется уравнением

$$m_i \ddot{x}_i + d_i \dot{x}_i + \frac{\partial \Pi_i}{\partial x_i} = f_i^{\text{эл}}, \quad (3.5)$$

где номер моды $i = 1, 7$; Π_i – потенциальная энергия i -ой моды деформации резонатора, $f_i^{\text{эл}}$ – электростатическая сила, создаваемая электродными структурами. В статическом КЭ анализе рассчитывается энергия деформации резонатора для первой и седьмой мод колебаний (рис. 3.60, 3.61).

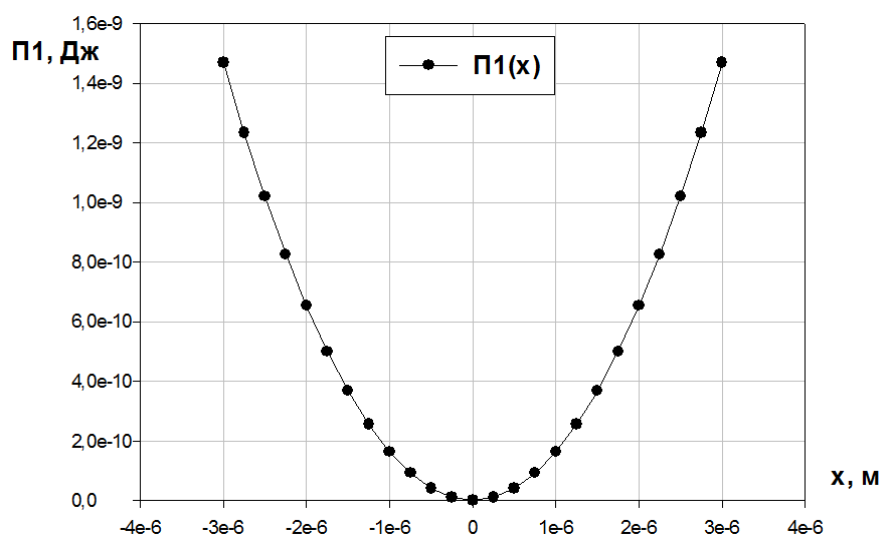


Рисунок 3.60 – Энергия деформации резонатора, соответствующая первой моде колебаний

Эта зависимость аппроксимируется выражением

$$\Pi_1 = -2,1101 \cdot 10^{-16} - 1,8847 \cdot 10^{-20} x_1 + 163,2175 \cdot x_1^2. \quad (3.6)$$

Ошибка аппроксимации не превышает 0,1%.

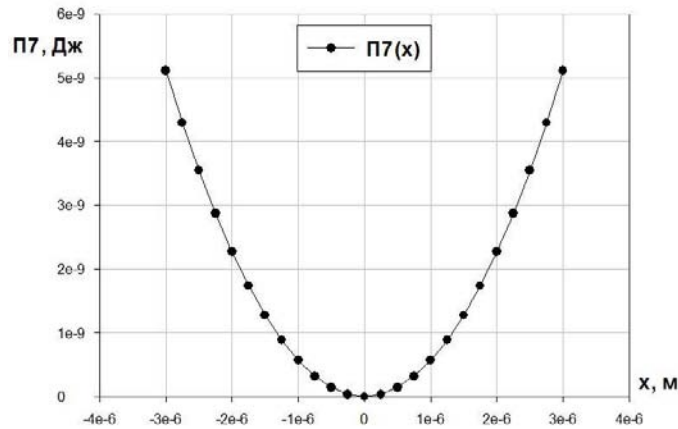


Рисунок 3.61 – Энергия деформации резонатора, соответствующая седьмой моде колебаний

Эта зависимость аппроксимируется выражением

$$\Pi_7 = -4,715 \cdot 10^{-17} - 3,7643 \cdot 10^{-20} x_7 + 567,1291 \cdot x_7^2 \quad (3.7)$$

Ошибка аппроксимации не превышает 0,1%.

Для линеаризации суммарной электростатической силы электроды вибропривода приводятся в движение сочетанием постоянного и переменного напряжения (рисунок 3.62).

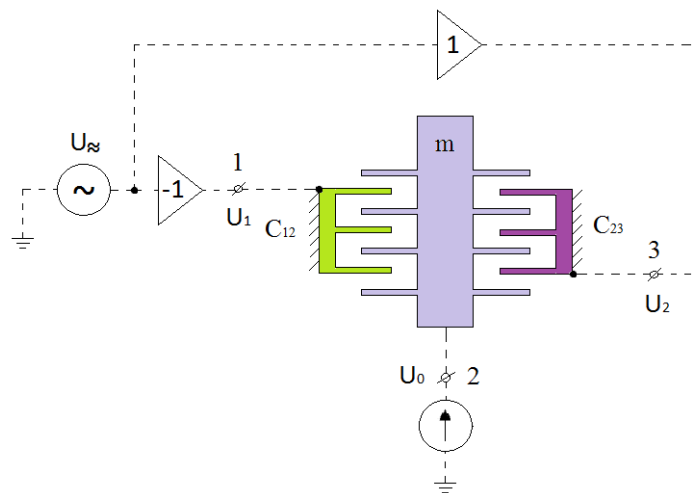


Рисунок 3.62 – Сбалансированная система возбуждения колебаний резонатора

Электростатическая сила вычисляется, как производная от функции ёмкости. При сбалансированной системе возбуждения колебаний резонатора (рисунок 3.62) электростатическая сила определяется выражением

$$f_{эл} = \frac{1}{2} \frac{\partial C_{12}}{\partial x} U_1^2 - \frac{1}{2} \frac{\partial C_{23}}{\partial x} U_2^2, \quad (3.7)$$

где $U_1 = U_0 - U_{\approx}$;

$U_2 = U_0 + U_{\approx}$.

Электрический домен микрорезонатора имеет электрическую схему, представленную на рисунке 3.63.

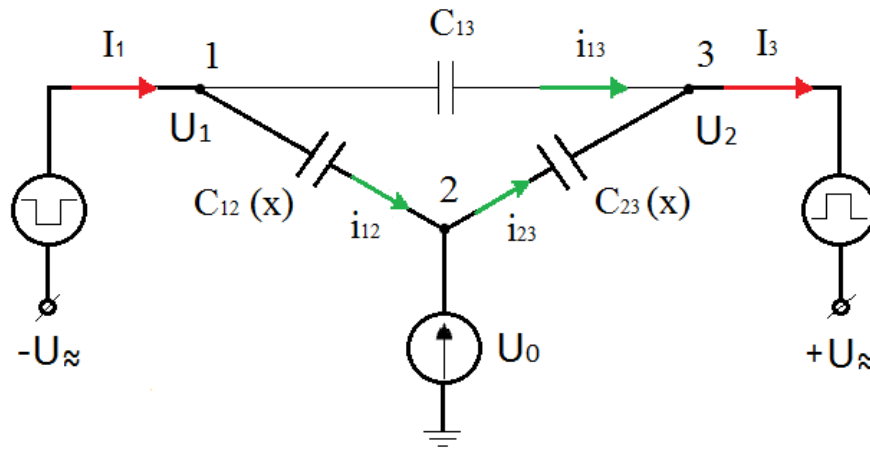


Рисунок 3.63 – Схема электрического домена микрорезонатора

Межэлектродные ёмкости, полученные из КЭ электростатического анализа, определяются выражениями

$$C_{12} = 3,3366 \cdot 10^{-13} - 2,1964 \cdot 10^{-8} \cdot x; \quad (3.8)$$

$$C_{23} = 3,3366 \cdot 10^{-13} + 2,1964 \cdot 10^{-8} \cdot x$$

$$C_{13} = 1,9955 \cdot 10^{-14} + 2,5316 \cdot 10^{-14} \cdot x$$

Уравнения электрического домена имеют вид

$$I_1 = +i_{12} + i_{13}; \quad I_2 = -i_{12} + i_{23}; \quad I_3 = -i_{13} - i_{23};$$

$$i_{23} = \frac{\partial}{\partial t} Q_{23} = \frac{\partial}{\partial t} (C_{23}(U_0 + U_{\approx}));$$

$$i_{12} = \frac{\partial}{\partial t} Q_{12} = \frac{\partial}{\partial t} (C_{12}(U_0 - U_{\approx})); \quad (3.9)$$

$$i_{13} = \frac{\partial}{\partial t} Q_{13} = \frac{\partial}{\partial t} (C_{13}(U_1 - U_2))$$

Ёмкость C_{13} от модальной координаты практически не зависит, следовательно, $i_{13} \approx 0$. Редуцированная модель резонатора примет вид (рисунок 3.64).

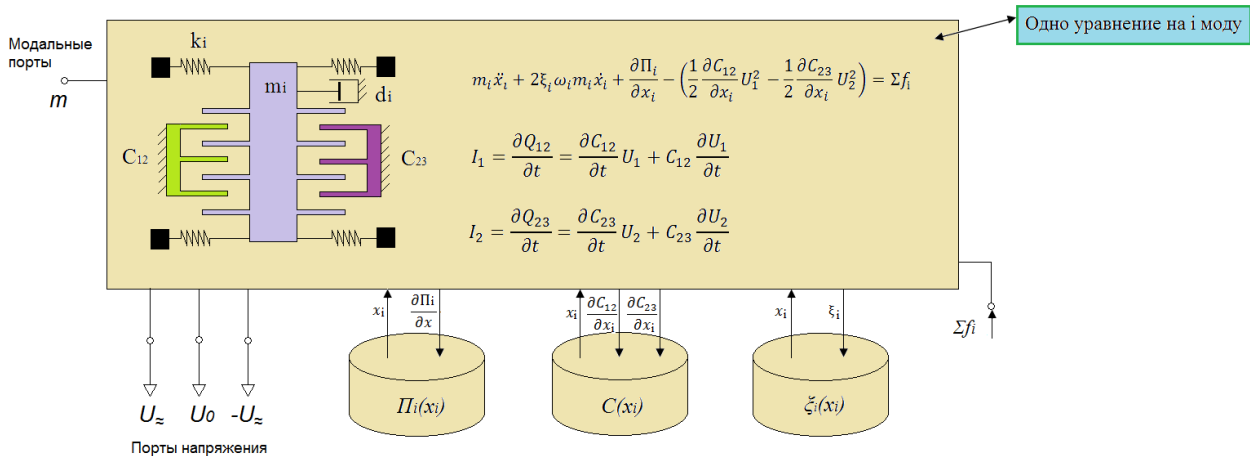


Рисунок 3. 64 – Редуцированная модель резонатора

Используя редуцированную модель резонатора, полученную из КЭ анализа, осуществляется его моделирование на схмотехническом уровне в программном пакете MATLAB/Simulink [46]. На рисунке 3.65 изображена схема модели резонатора, которая описывает его механическую и электрическую часть.

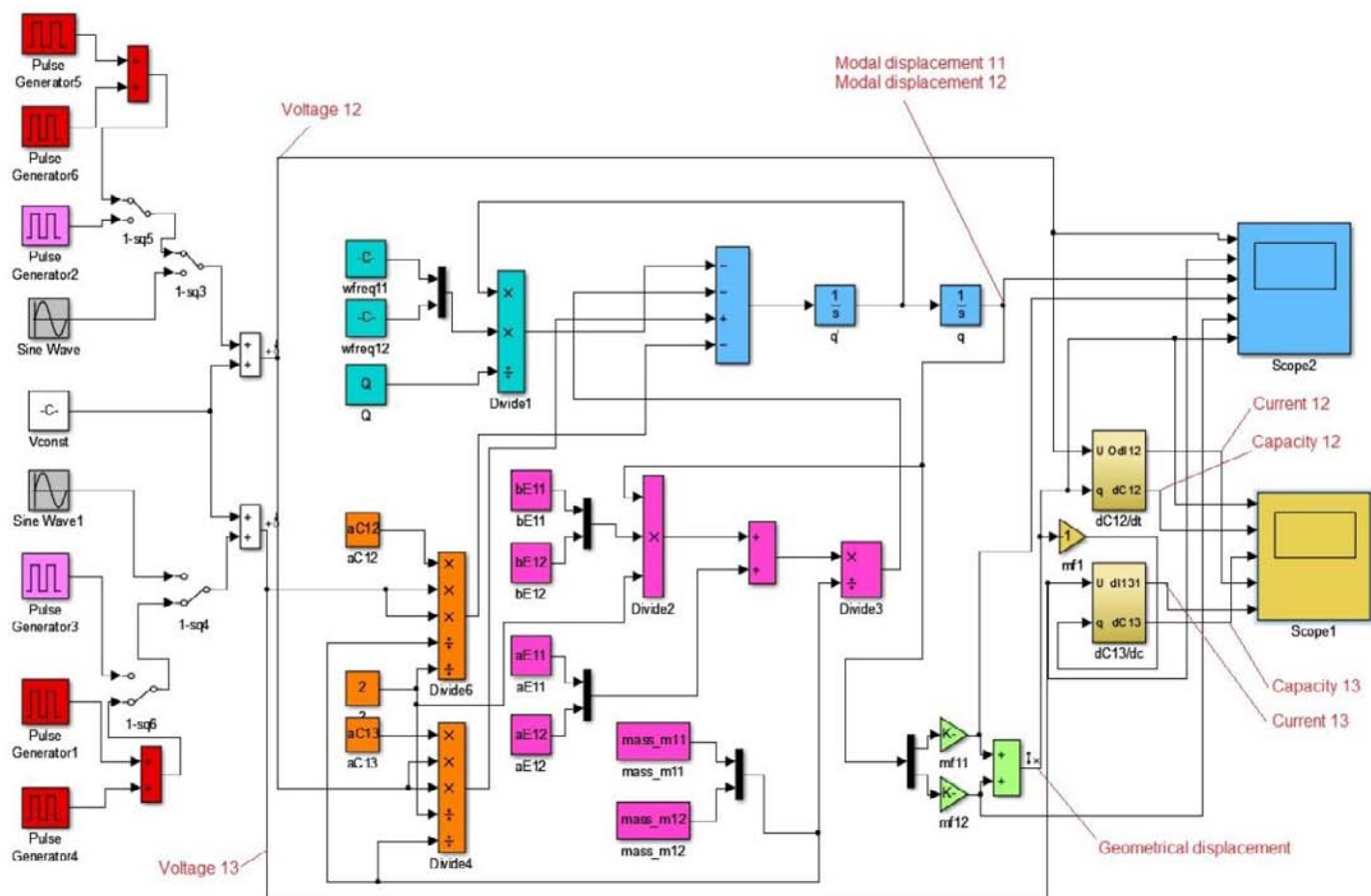


Рисунок 3.65 – Макромодель резонатора в MATLAB/Simulink

Цель моделирования состояла в определении закона управляющего напряжения таким образом, чтобы обеспечить возбуждение колебаний резонатора с максимальной амплитудой, которая, исходя из конструктивных параметров, может составлять не более 5 мкм. Полный диапазон перемещения резонатора ограничен воздушным зазором между торсионом и неподвижными частями. Максимальный зазор в механической структуре составляет 6 мкм, при достижении амплитуды колебаний резонатора 6 мкм произойдёт соударение упругого подвеса с неподвижными частями резонатора. Результаты моделирования приведены на рисунках 3.66–3.68. Первоначально величина переменного напряжения была постоянной, менялась скважность.

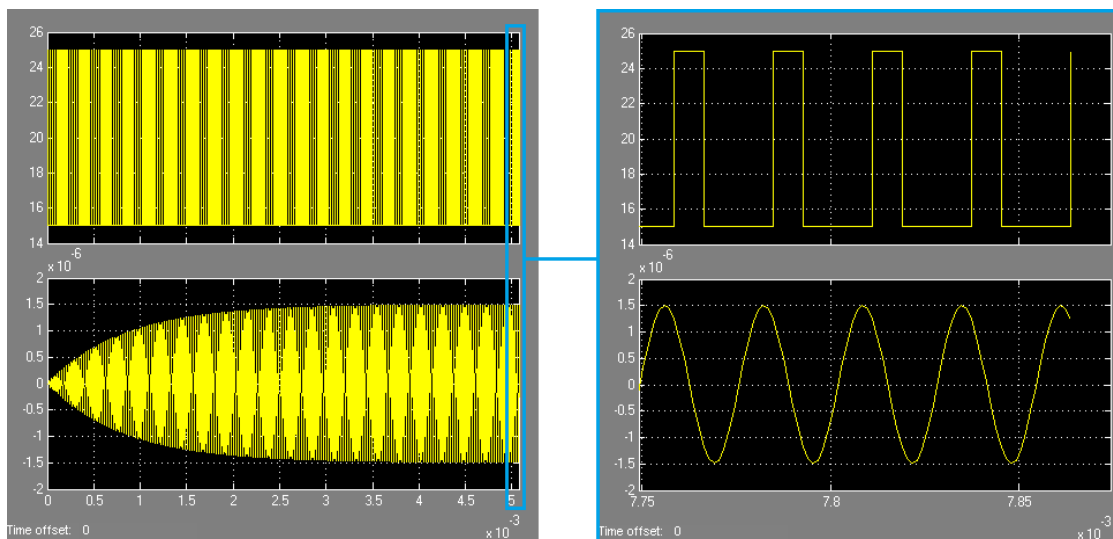


Рисунок 3.66 – Колебания микрорезонатора при скважности 30%

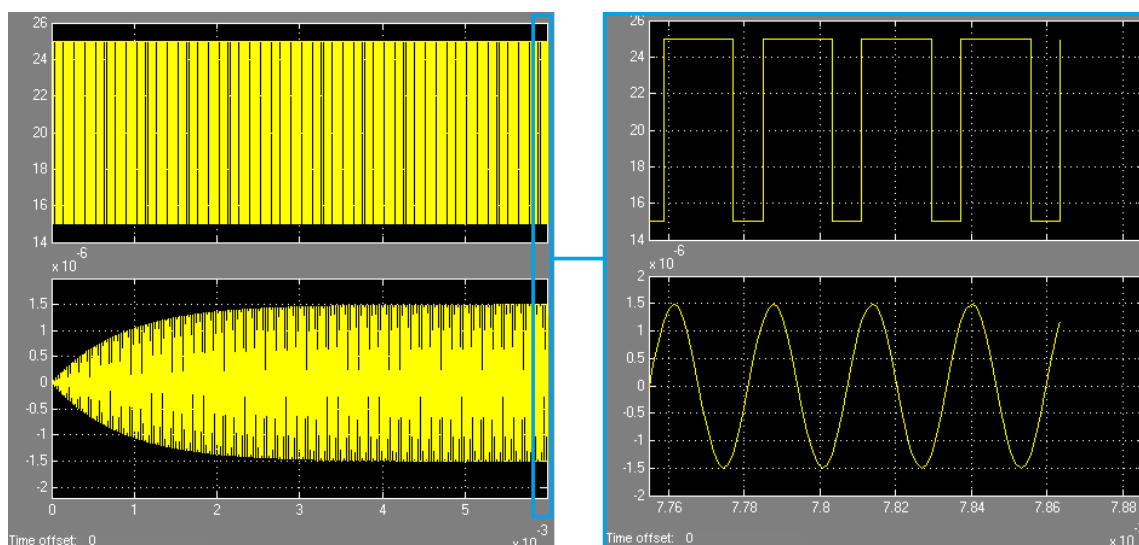


Рисунок 3.67 – Колебания микрорезонатора при скважности 70%

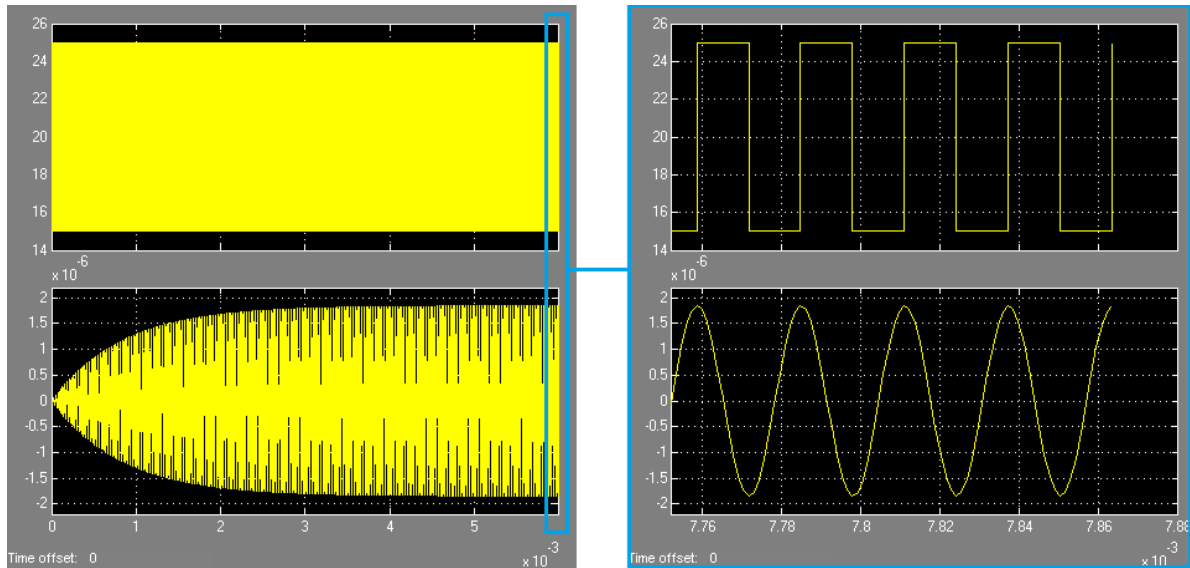


Рисунок 3.68 – Колебания микрорезонатора при скважности 50%

Наибольшая амплитуда колебаний резонатора достигается при скважности управляющего напряжения, равной 50% (рисунок 3.67). Зависимость амплитуды колебаний резонатора от скважности управляющего напряжения представлена на рисунке 3.68. При увеличении и уменьшении скважности напряжения управления амплитуда колебаний резонатора уменьшается.

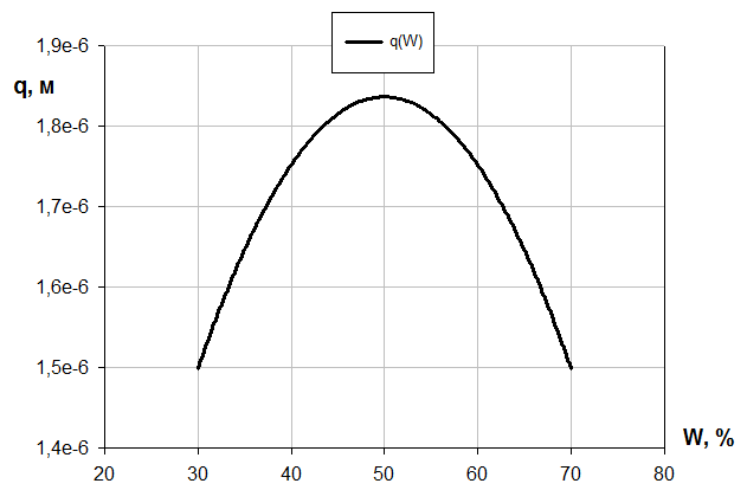
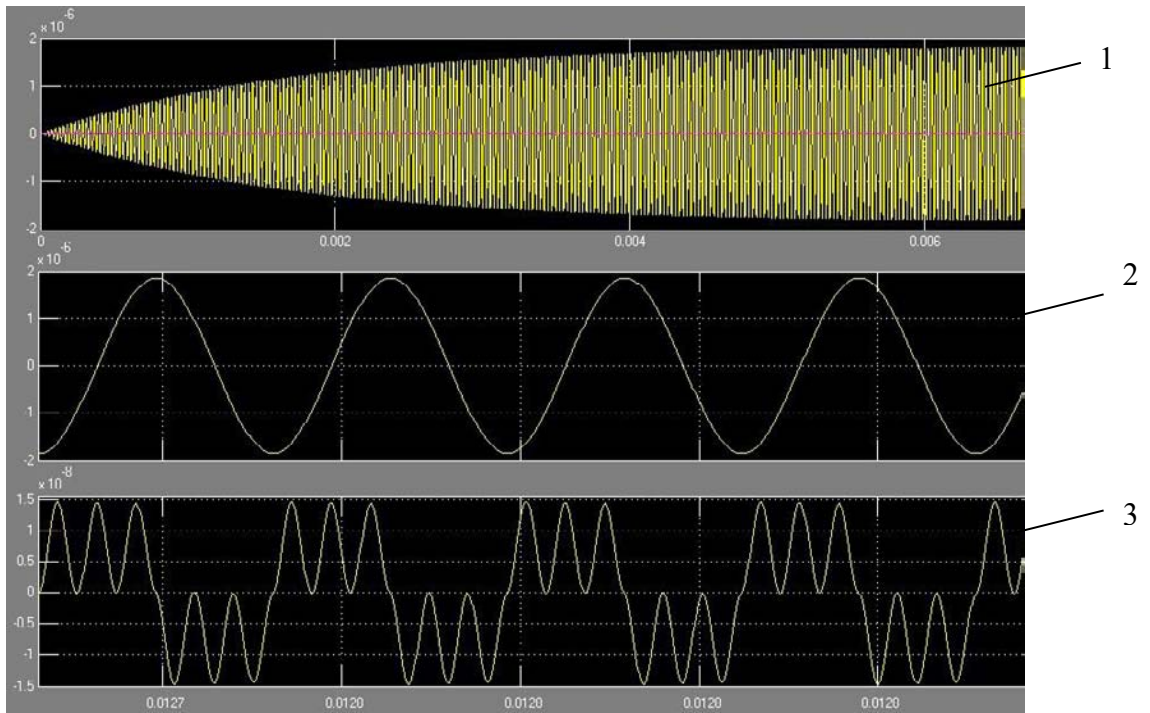


Рисунок 3.68 – Зависимость амплитуды колебаний резонатора от скважности управляющего напряжения

Зависимость структурного перемещения и амплитуд первой и седьмой собственных форм резонатора приведены на рисунке 3.69. Амплитуда седьмой собственной формы колебаний на два порядка меньше амплитуды первой формы и практически не оказывает влияния на структурное перемещение резонатора.



1 – структурное перемещение; 2 – амплитуда первой моды;
3 – амплитуда седьмой моды

Рисунок 3.69 – Модальные перемещения резонатора

По результатам моделирования сделана оценка напряжения $U_{кр}$, при котором происходит механический контакт торсионов с неподвижной частью (рисунок 3.70) для различных значений добротности резонатора.

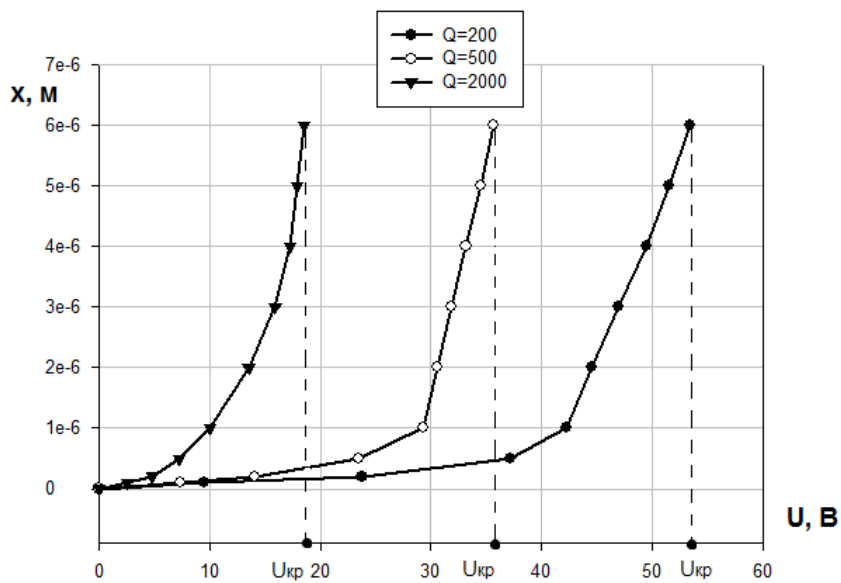


Рисунок 3.70 – Зависимость перемещения резонатора от управляющего напряжения и добротности

При увеличении добротности уменьшается величина напряжения, при котором достигается максимальная амплитуда колебаний резонатора, уменьшается напряжение $U_{кр}$, соответствующее механическому контакту (рисунок 3.70), увеличивается время переходного процесса (рисунки 3.71, 3.72).

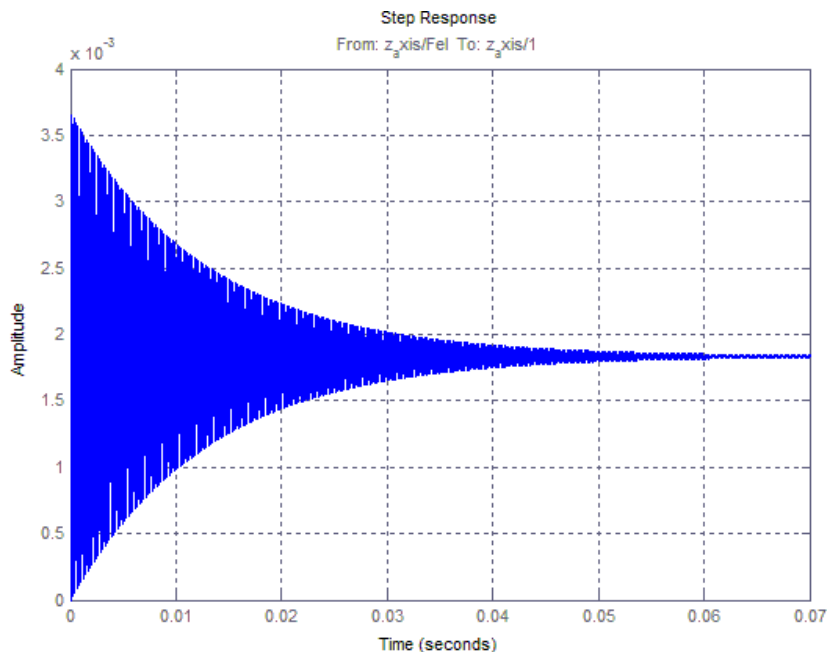


Рисунок 3.71 – Переходная характеристика резонатора

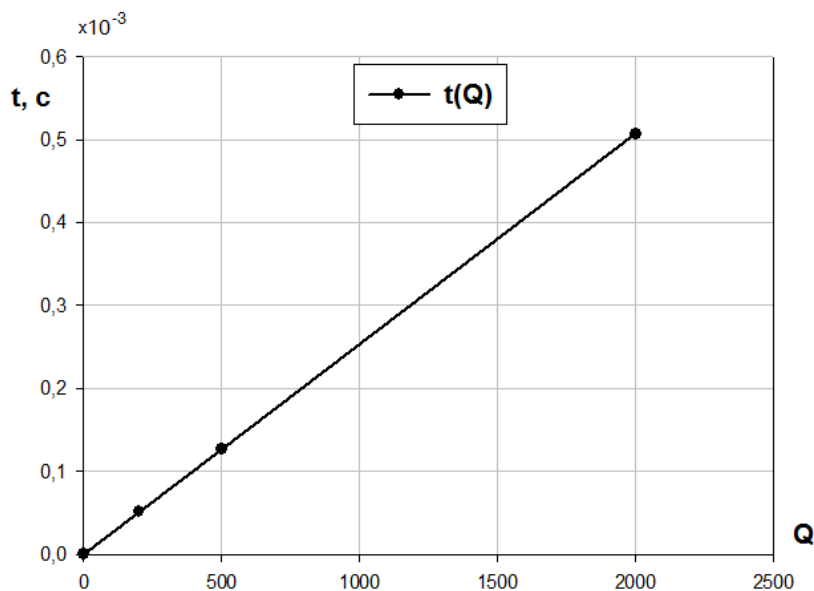


Рисунок 3.72 – Зависимость времени переходного процесса от добротности резонатора

Амплитудно-частотная характеристика резонатора (рисунок 3.73) показывает наличие двух резонансов, на частоте первой и седьмой моды.

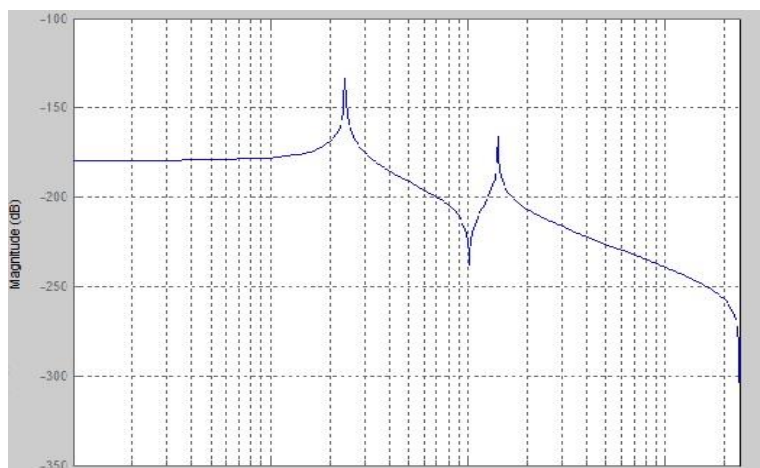


Рисунок 3.73 – Амплитудно-частотная характеристика резонатора

Таким образом, на основании разработанного метода высокоуровневого проектирования разработана компактная макромодель микрорезонатора, учитывающая нелинейные факторы. Описана процедура определения параметров макромодели, показаны возможности ее использования для анализа резонатора. Функции, полученные из результатов анализа в Ansys используются для расчёта сил упругости, емкостей и их производных на каждом временном шаге.

Макромодель может быть использована для:

- определения статических и динамических характеристик (статический прогиб, напряжение механического контакта, вольт-фарадные, амплитудно-частотные и фазочастотные характеристики),
- определения переходных характеристик (отклик на тестовый сигнал),
- моделирования работы в составе измерительной схемы;
- оценки влияния технологических параметров (отклонения геометрических размеров, остаточные механические напряжения и др.).

4 Создание системной модели (макромодели) микрогироскопа

Как показано в разделе 2, в состав многокомпонентной микросистемы могут входить гироскопы различной схемы. Макромоделирование гироскопа будем рассматривать на примере схемы гироскопа с общей осью первичных колебаний и независимыми измерительными осями. Это обусловлено тем, что топология кристалла этого гироскопа и трёхкомпонентного акселерометра одинаковы, что позволяет унифицировать технологический процесс их изготовления и сократить габариты системы. Многокомпонентная микромеханическая система будет состоять из двух одинаковых механических сенсоров с различными электрическими схемами управления. Кроме того, этот гироскоп имеет меньше возмущающих воздействий из-за перекрёстных связей между каналами по сравнению со схемой гироскопа с совмещёнными измерительными каналами.

4.1 Конечно-элементный анализ ММГ

4.1.1 Чертёж кристалла, модальный анализ

Для того чтобы извлечь матрицы параметров сенсора гироскопа в его системную модель, необходимо построить КЭ модель сенсора гироскопа с использованием программ ANSYS и T-Flex. Конструкция сенсора ММГ должна удовлетворять следующим требованиям:

- иметь три степени свободы, то есть элементы сенсора должны иметь возможность перемещения вдоль осей X, Y и Z;
- собственные частоты сенсора по всем трем осям должны совпадать и, в соответствии с техническим заданием, лежать в диапазоне от 3000 Гц до 5000 Гц;
- электродные структуры должны иметь такую конструкцию, при которой создаваемые ими емкости будут наибольшими при минимальных габаритах.

Исходя из принципа работы ММГ, возбуждение первичных колебаний осуществляется на частоте его первой моды. Частоты первичных и вторичных информационных колебаний гироскопа должны быть равны или отличаться на

величину Δf , которая зависит от полосы пропускания гироскопа. Частоты всех остальных мод должны быть существенно больше частоты возбуждения. Габариты ММГ определяются параметрами, указанными в техническом задании. Эти требования были определяющими при создании геометрии микрогироскопа. В соответствии с принципом создания макромоделей (рис. 2.8) на первом этапе для оценки динамического поведения микрогироскопа применяется модальный анализ.

Собственные частоты сенсора зависят от геометрических размеров его элементов, следовательно, построение геометрической модели сенсора осуществляется одновременно с проведением его частотного анализа.

Построение сетки конечных элементов производится на основе 2D профиля, затем вытягивается в объеме на нужную высоту методом протягивания (sweep). При построении конечно-элементной модели используется модель упругого анизотропного материала. Размер сетки выбран величиной 1 мкм, разбиение в высоту производилось на 8 частей.

Обеспечение высокой точности измерения угловой скорости основания требует создания высокочастотных, колеблющихся с большой амплитудой осцилляторов. Поэтому при расчете собственных частот и форм колебаний сенсора необходимо добиться максимального совпадения рабочей собственной частоты модели с заданным значением частоты. Приближение к необходимой частоте осуществляется варьированием геометрических параметров модели и поэтому данный процесс носит итерационный характер. Как известно, собственная частота определяется выражением

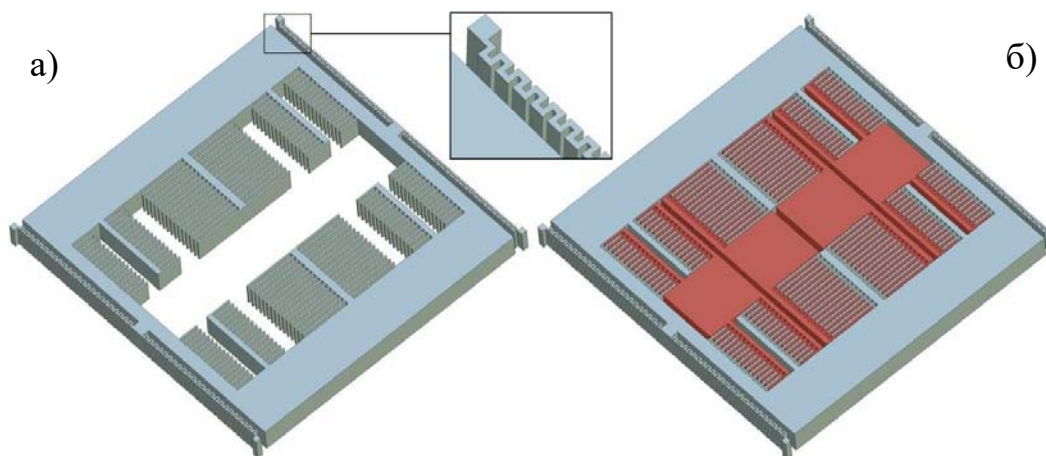
$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (4.1)$$

где k - жёсткость торсионов; m - масса подвижной структуры.

Наилучшим параметром для изменения собственной частоты является жёсткость торсионов. Меняя геометрические размеры торсионов, необходимо добиться максимального приближения к заданной частоте. Конструкция электромеханического сенсора микрогироскопа должна реализовывать его

принципиальную схему, рассмотренную в разделе 2 (рисунок 2.3). Сенсор гироскопа состоит из двух одинаковых инерционных тел, установленных в общей рамке с возможностью их перемещений в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

Построение геометрической модели сенсора начинается с определения его геометрических размеров, которые не должны превышать 3х3х3 мм. Затем определяются допустимые размеры инерционных тел, установленных в одной рамке. Геометрия инерционного тела представлена на рисунке 4.1.



а – без неподвижных электродов; б – с неподвижными электродами

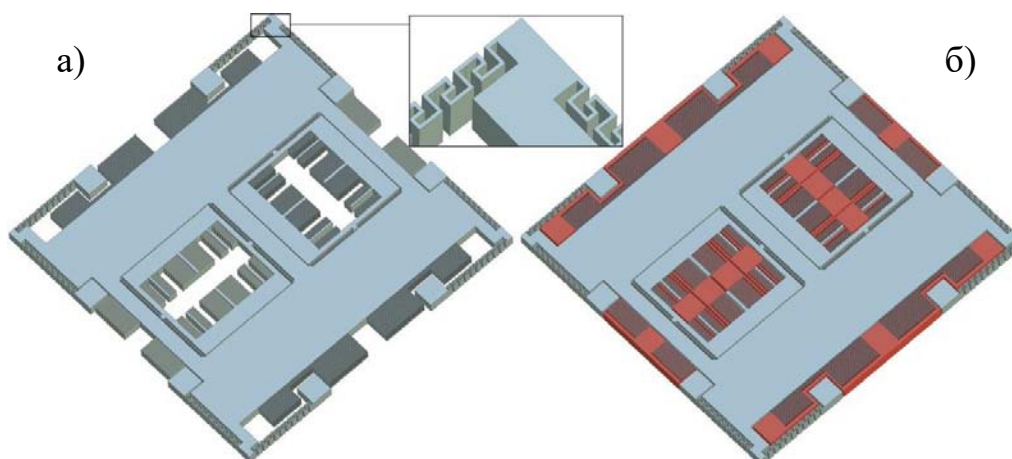
Рисунок 4.1 – Инерционное тело с упругим подвесом

При проектировании необходимо максимально исключить все пустоты, поэтому все боковые поверхности заполняются гребенчатыми структурами, построение которых осуществляется из библиотеки электростатических элементов. Используя библиотеку торсионов, подбираются их размеры и тип. Торсионы должны обеспечить возможность инерционному телу совершать полезные информативные колебания вдоль одной оси, следовательно, жесткости этих торсионов по двум другим осям должны быть значительно больше.

Геометрия микромеханических устройств сильно зависит от технологии их изготовления, поэтому в разрабатываемой конструкции все элементы необходимо получать при травлении материала сенсора на полную глубину, что обусловило использование из библиотеки торсионов 2-ого типа. Высота этих торсионов равна толщине всей кремниевой пластины, что позволяет обеспечить

планарность сенсора. Кроме того, проведённые исследования (раздел 3) показали, что эти торсионы устойчивы к температурным воздействиям, их коэффициент жёсткости при изменении температуры меняется менее одного процента. Упругий подвес инерционного тела в разрабатываемой конструкции сенсора осуществлён при помощи четырёх торсионов (рисунок 4.1).

Затем достраивается рамка (рисунок 4.2) с гребенчатыми структурами и упругим подвесом, который обеспечивает первичные колебания сенсора вдоль оси Z . Упругий подвес выполнен при помощи восьми торсионов 3-его типа, которые также как и торсионы 2-ого типа устойчивы к температурным воздействиям, но жесткость в направлении оси Z имеют меньшую, в сравнении с другими типами торсионов. Внутри рамки установлены два инерционных тела, повернутых относительно друг друга на 90° .

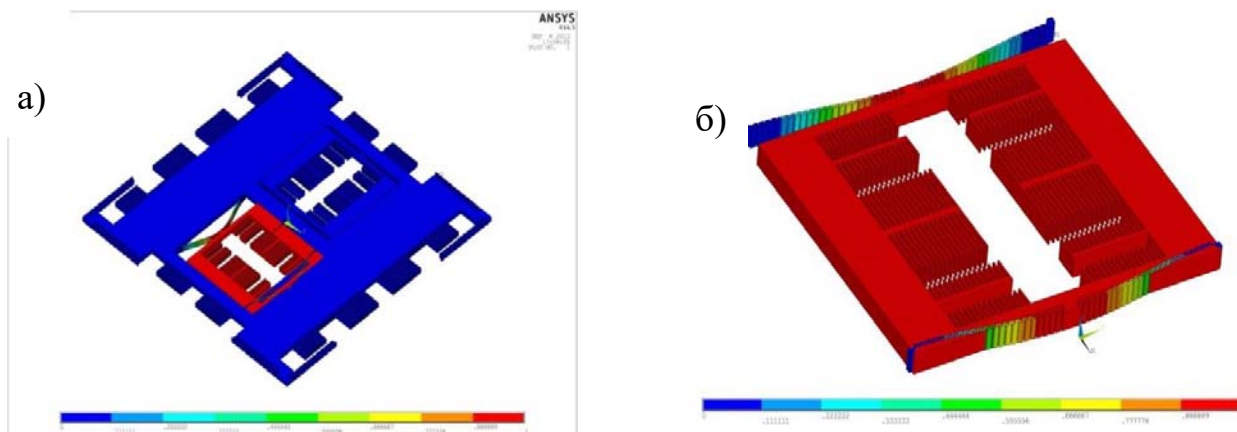


а – без неподвижных электродов;

б – с неподвижными электродами

Рисунок 4.2 – Активная подвижная структура сенсора ММГ

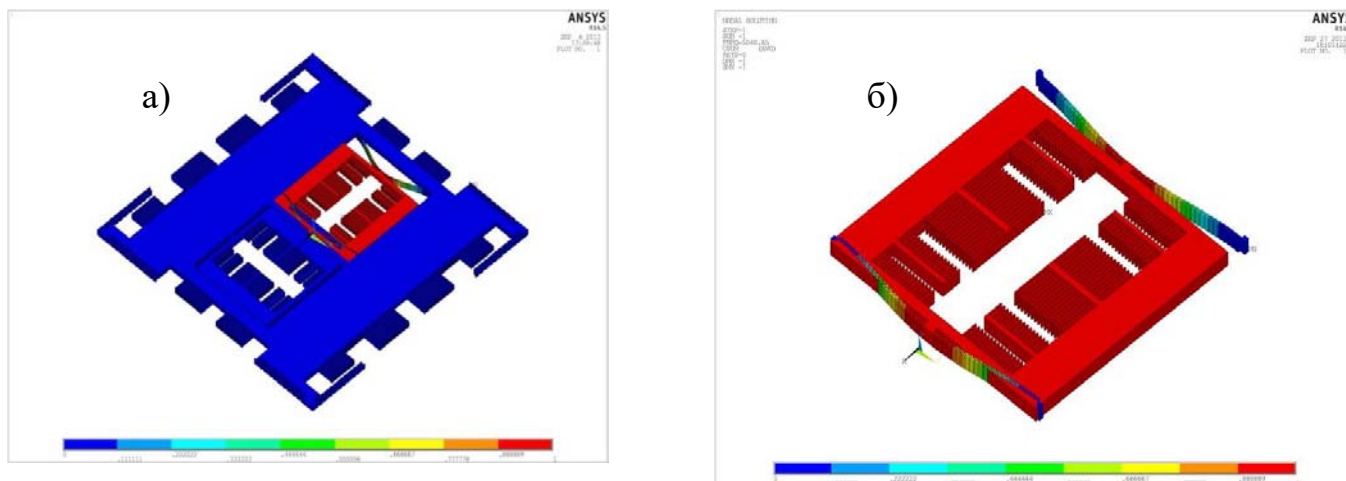
После построения геометрии сенсора проводится модальный анализ всей конструкции. На рисунках 4.3, 4.4, 4.5 представлены первые моды колебаний сенсора, из которых видно, что подвижные структуры сенсора совершают требуемые движения вдоль осей X , Y и Z с частотами, различия которых не превышает 10%.



а – сенсор; б – инерционное тело

Рисунок 4.3 – Первая мода колебаний сенсора ($f_y = 5032,57$ Гц)

Первая форма собственных колебаний сенсора гироскопа соответствует его информативным колебаниям под действием угловой скорости Ω_x . В этом движении инерционное тело 2 совершает поступательное перемещение вдоль оси Y (рисунок 4.3).



а – сенсор; б – инерционное тело

Рисунок 4.4 – Вторая мода колебаний сенсора ($f_x = 5034,36$ Гц)

Вторая форма собственных колебаний сенсора гироскопа соответствует его информативным колебаниям под действием угловой скорости Ω_y . В этом движении инерционное тело 1 совершает прямолинейное перемещение вдоль оси X (рисунок 4.4).

Третья форма собственных колебаний сенсора гироскопа (рисунок 4.5) соответствует его вынужденным колебаниям под действием электростатических сил, создаваемых виброприводом. Вдоль оси Z рамка вместе с инерционными

телами перемещается как единое целое. Различие частот первых трёх форм колебаний составляет не более 1,6%.

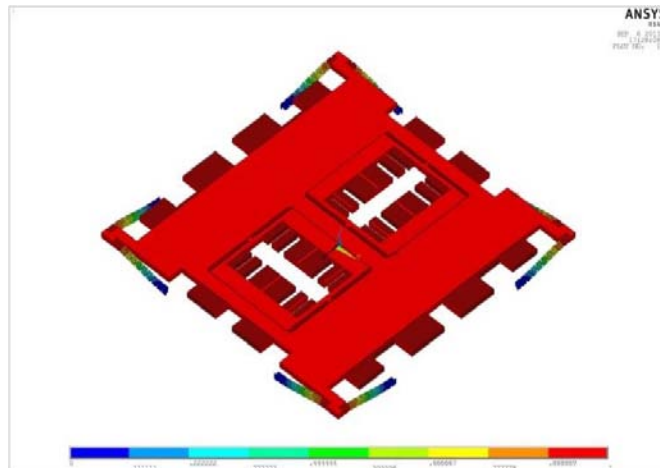
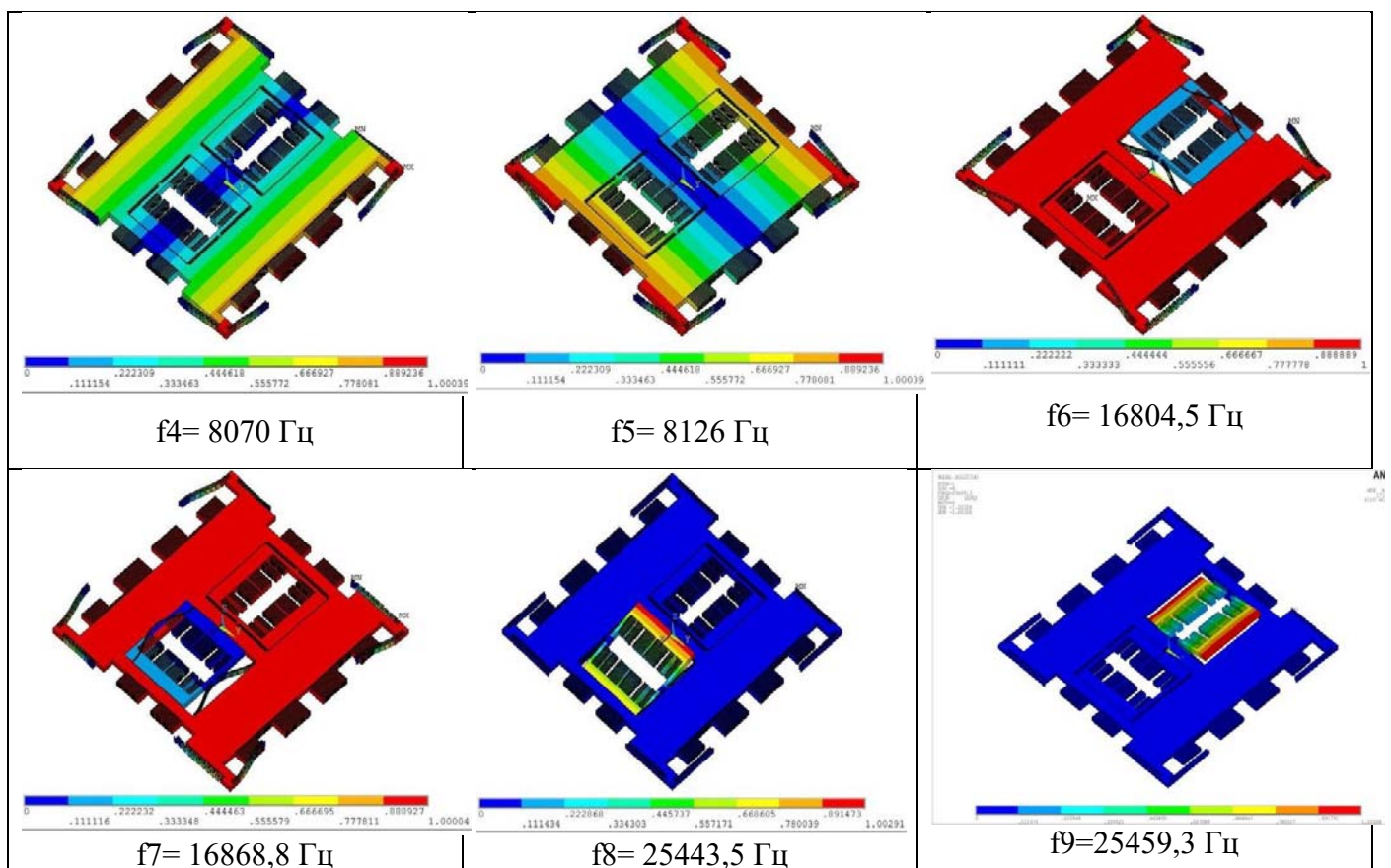


Рисунок 4.5 – Третья мода колебаний сенсора ($f_z=5099.48$ Гц)

Пространственные конфигурации колебаний сенсора, соответствующие остальным модам, представлены в таблице 4.1, откуда видно, что частоты всех остальных мод колебаний сенсора находятся выше его основных рабочих частот.

Таблица 4.1 – Формы колебаний сенсора ММГ



Электроды планарного вибропривода, возбуждающего первичные колебания сенсора, формируются на стеклянной подложке (рисунок 4.6).

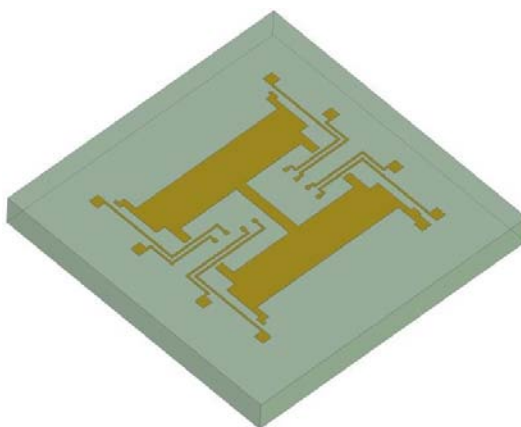


Рисунок 4.6 – Подложка с электродами вибропривода первичных колебаний

Подложка соединяется с анкерами (рисунок 4.7), которые обеспечивают зазор, необходимый для совершения первичных колебаний сенсора. Величина зазора определяется требуемой амплитудой первичных колебаний.

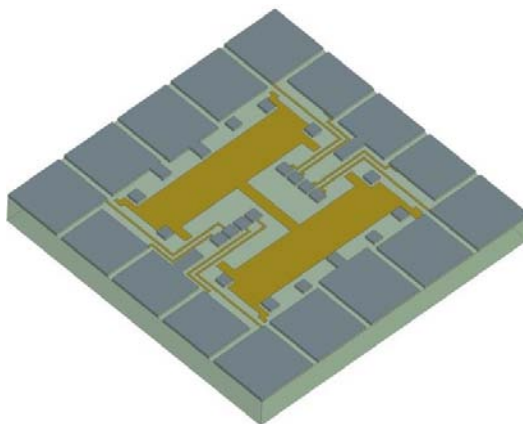


Рисунок 4.7 – Подложка с анкерами

Активная рамка с инерционными телами устанавливается на подложке с анкерами, образуя электромеханический сенсор микрогироскопа (рисунок 4.8).

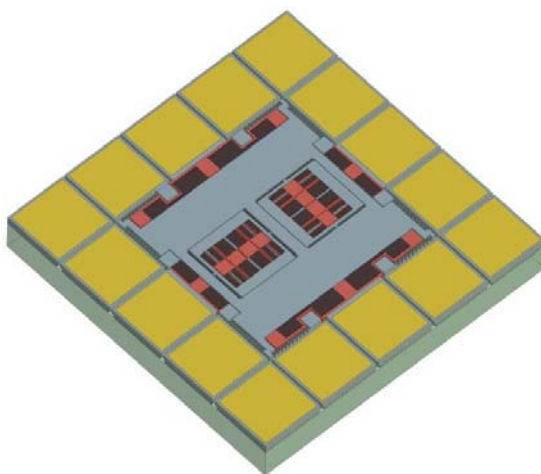


Рисунок 4.8 – Электромеханический сенсор микрогироскопа

4.1.2 Статический анализ

Целью статического анализа является определение энергии деформации при модальных перемещениях q_i , что позволит определить модальные жесткости для системного моделирования гироскопа. Необходимо также провести анализ прочности сенсора ММГ, так как он совершает непрерывные гармонические колебания, вызывающие деформации элементов.

При расчёте на прочность необходимо решить две задачи:

- определить распределение составляющих напряжений по объёму элементов конструкции. По этим данным можно сделать выводы о наиболее уязвимых местах конструкции и оптимизировать изделие еще на этапе проектирования с целью достижения «равнопрочности».
- определить максимальные значения компонентов напряжений в материале и их отношения к максимально допустимому для данного материала.

Сенсор представляет собой трёхосный осциллятор, и его упругие подвесы находятся в режиме переменных деформаций, следовательно, важно оценить возникающие в упругих элементах напряжения. Для полученных перемещений, которые определяются конструктивными особенностями сенсора, рассчитываются напряжения, возникающие при деформации упругих элементов. Полученные величины напряжений сравниваются с допустимым напряжением для выбранного материала конструкции. Коэффициент запаса прочности упругих элементов должен быть не менее 1,5.

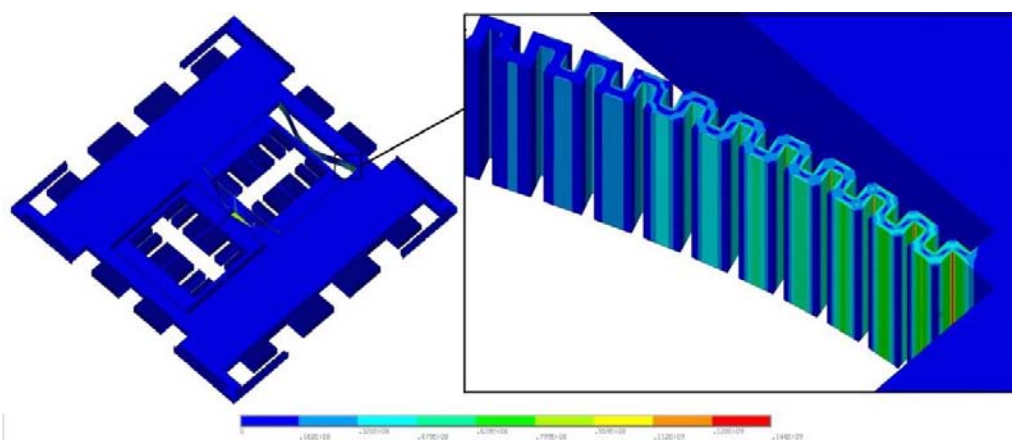


Рисунок 4.9 – Напряжения деформации инерционного тела в упругом подвесе по оси X

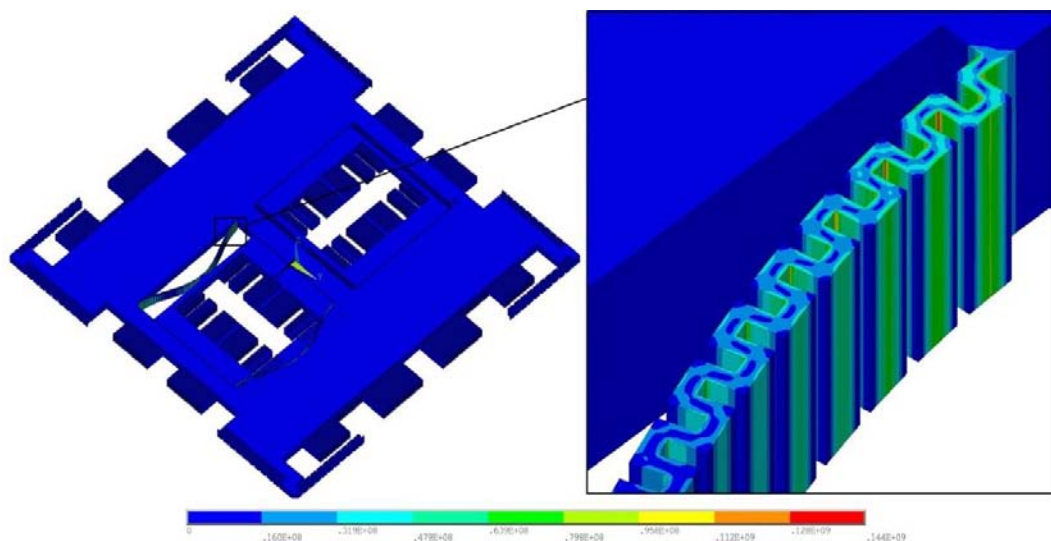


Рисунок 4.10 – Напряжения деформации инерционного тела в упругом подвесе по оси Y

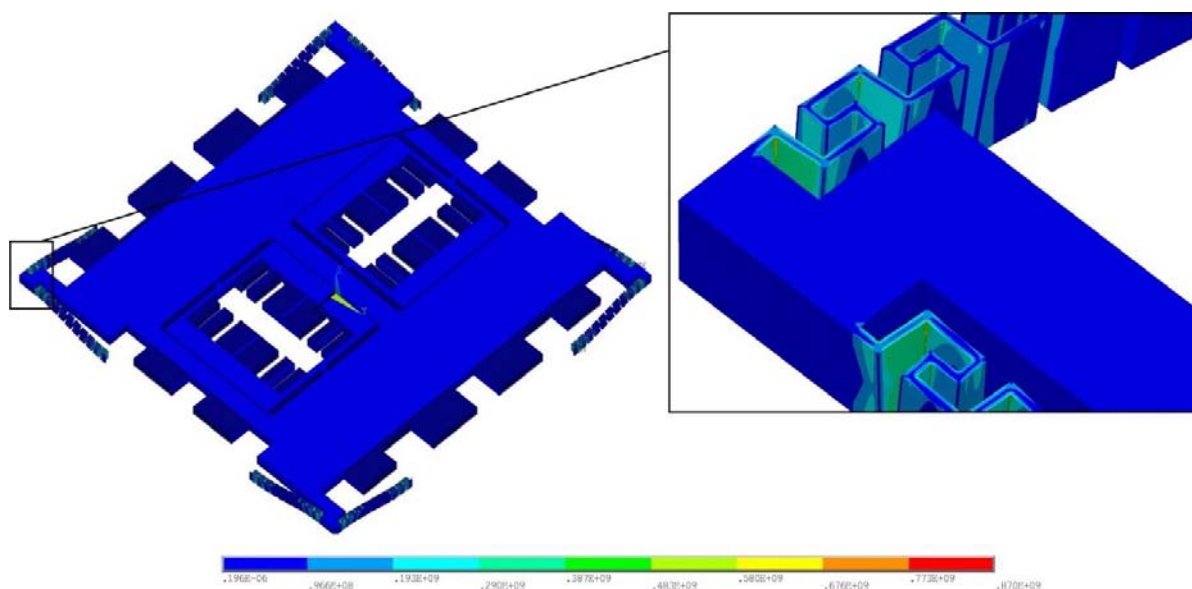


Рисунок 4.11 – Напряжения деформации сенсора по оси Z

Концентраторами напряжения являются прямые углы элементов упругих подвесов (рисунки 4.9, 4.10, 4.11). При разработке технологического маршрута изготовления сенсора вводится скругление углов, что приводит к уменьшению возникающих напряжений. Расчёты показывают, что при имеющихся место амплитудах первичных и вторичных колебаний сенсора возникающие в упругих элементах напряжения меньше допустимых.

Для проведения системного моделирования необходимо знание потенциальной энергии сенсора, которая представлена на рисунках 4.12, 4.13, 4.14.

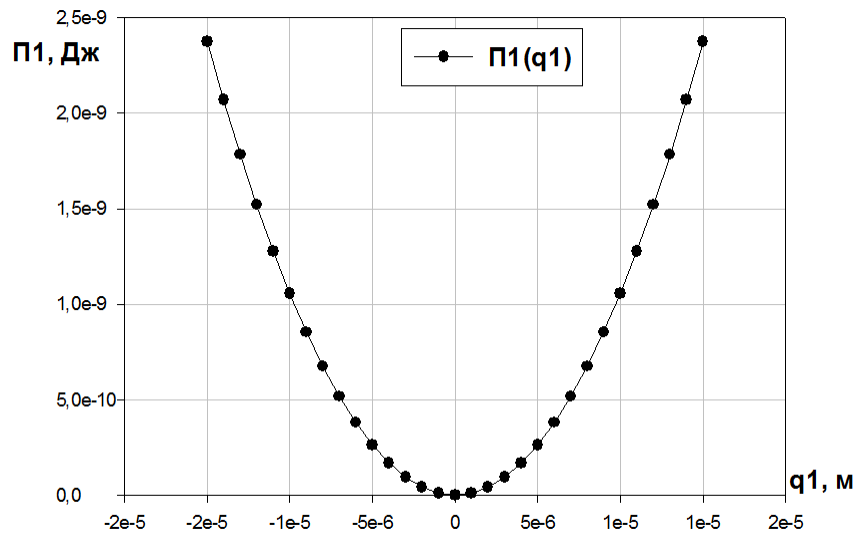


Рисунок 4.12 – Энергия деформации упругих элементов для первой моды

Зависимость энергии деформации аппроксимировалась полиномом второй степени, что соответствует линейной модели

$$P_i = a_{0i} + a_{1i} \cdot x + b_i \cdot x^2.$$

Для первой моды аппроксимирующая функция потенциальной энергии примет вид

$$P_1 = -2,0506 \cdot 10^{-21} + 4,8722 \cdot 10^{-15} \cdot y_1 + 10,5813 \cdot y_1^2 \quad (4.2)$$

Ошибка аппроксимации не превышает $3,1186 \cdot 10^{-16}$.

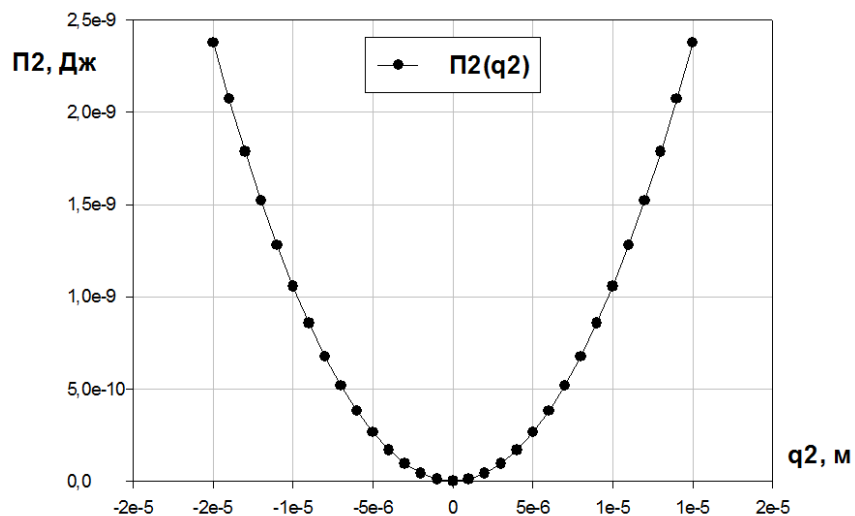


Рисунок 4.13 – Энергия деформации упругих элементов для второй моды

Для второй моды аппроксимирующая функция потенциальной энергии имеет вид

$$П_2 = -2,0506 \cdot 10^{-21} + 4,8722 \cdot 10^{-15} \cdot y_1 + 10,5813 \cdot y_1^2 \quad (4.3)$$

Ошибка аппроксимации не превышает $2,9910 \cdot 10^{-16}$.

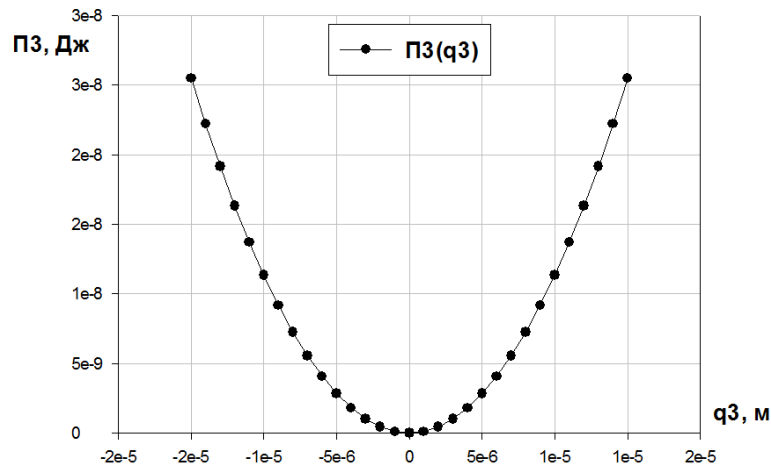


Рисунок 4.14 – Энергия деформации упругих элементов для третьей моды

Для третьей моды аппроксимирующая функция потенциальной энергии имеет вид

$$П_3 = 6,5934 \cdot 10^{-17} + 1,2023 \cdot 10^{-11} \cdot z + 113,3330 \cdot z^2 \quad (4.4)$$

Ошибка аппроксимации не превышает $2,6940 \cdot 10^{-16}$.

По полученной энергии деформации находятся значения модальных жесткостей и модальных масс для выбранных мод.

4.1.3 Температурный анализ

Микромеханические гироскопы должны выполнять свои функции при сохранении технических характеристиках в широком диапазоне температур (от минус 40°C до $+75^{\circ}\text{C}$).

Под влиянием температуры возникают изменения линейных размеров конструкции, изменяется модуль упругости кремния, в конструкции возникают внутренние механические напряжения, нарушается геометрическая форма. Всё это повлечет за собой изменение частотных свойств сенсора, нарушится его резонансная настройка и изменится общий коэффициент передачи гироскопа [6,7,36,47].

Поэтому необходимо оценить влияние температуры на собственные частоты конструкции по каждой из осей микрогироскопа, чтобы определить необходимость автоподстройки частот первичных и вторичных колебаний, а так

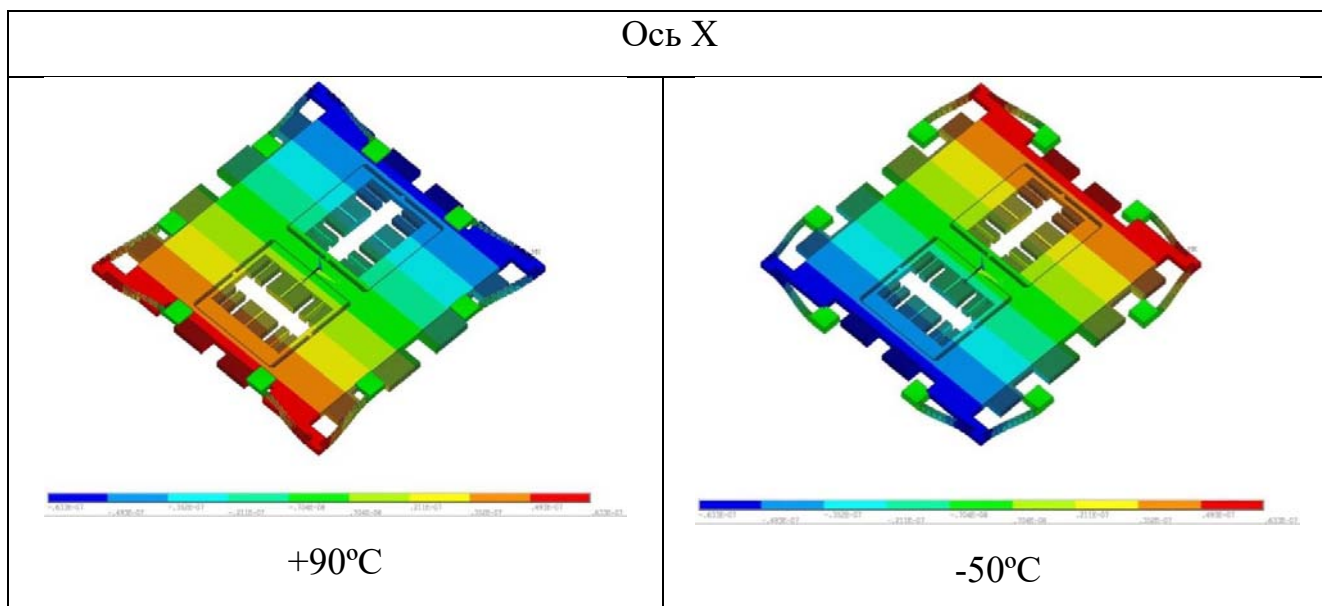
же рассмотреть, как повлияют изменения собственных частот на выходные сигналы сенсора.

Для определения влияния температурного поля на статические деформации ММГ решается связанная электромеханическая задача с учётом температурного воздействия. Температура задается как нагрузка в статическом анализе, решением этой части является деформация конструкции сенсора ММГ под действием температуры вследствие линейного расширения материала. Распределение температуры по объему исследуемой модели равномерно и соответствует заданным условиям. Рабочая температура датчика, соответствующая номинальным размерам резонатора, принята 20°C.

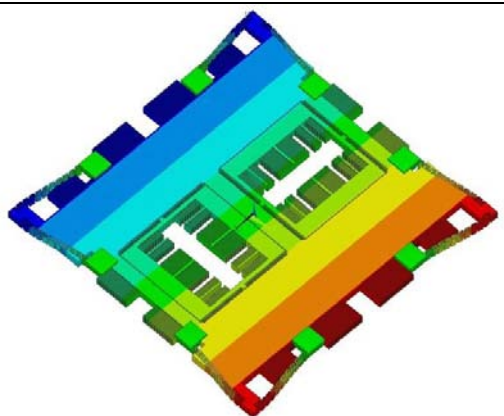
Модели присваивается материал монокристаллический кремний, устанавливается температура, при которой свойства материала имеют справочные значения. Это позволяет настроить модель таким образом, чтобы при изменении температуры окружающей среды происходило изменение свойств кремния.

Закрепление модели проводилось за основание, что исключает его перемещение по всем осям. В таблице 4.2 представлены деформации модели конструкции сенсора по осям X, Y, Z при температуре -50°C, +90°C. По цветовой шкале слева можно судить о том, какие части датчика подвержены большей или меньшей деформации при воздействии температуры.

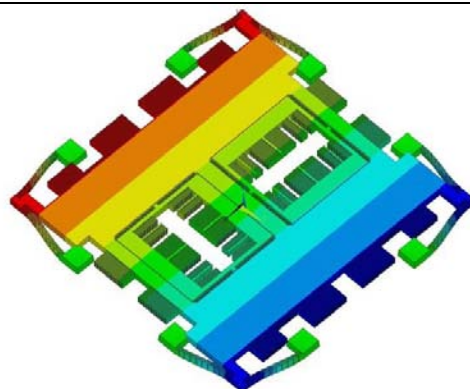
Таблица 4.2 – Температурные деформации сенсора ММГ



Ось Y

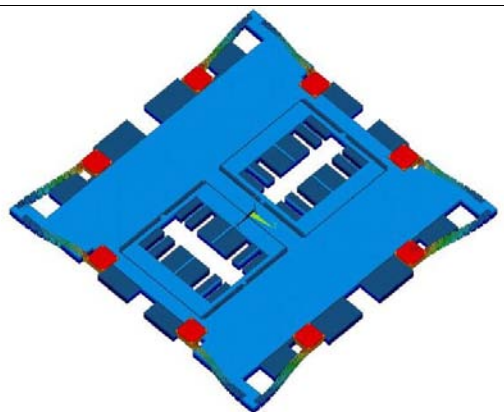


+90°C

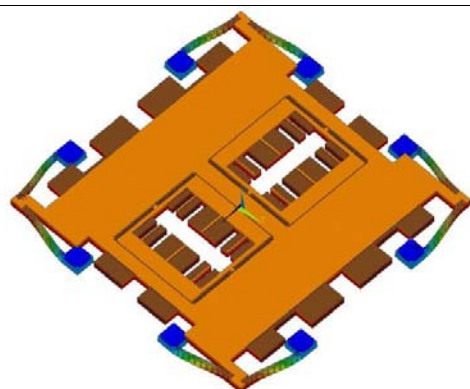


-50°C

Ось Z

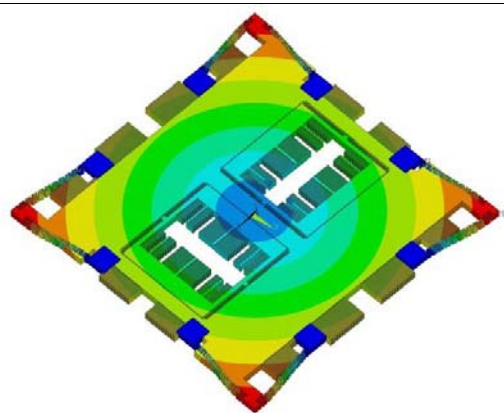


+90°C

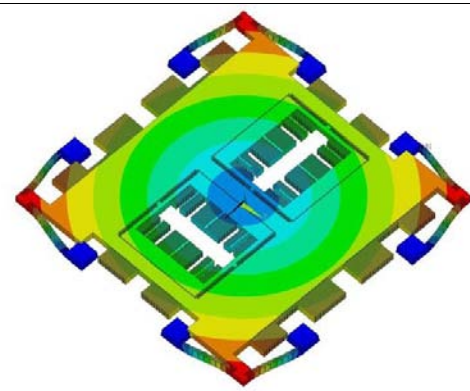


-50°C

Суммарная температурная деформация



+90°C



-50°C

Из рисунков в таблице 4.2 видно, что в меньшей степени при изменении температуры деформируются внутренние части сенсора.

Результаты температурного анализа передаются в частотный анализ и определяются собственные частоты при определенных температурах окружающей среды. На рисунках 4.15÷4.17 представлены графики изменения собственных частот сенсора гироскопа в зависимости от температуры.

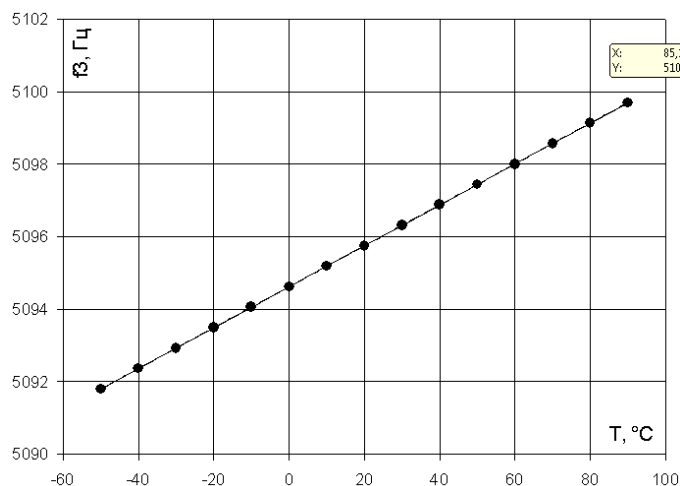


Рисунок 4.15 – Температурное изменение частоты третьей моды сенсора гироскопа (ось Z)

Аппроксимирующая функция изменения частоты в зависимости от температуры: $f_z^T = f_z + b_z \cdot T$,

где f_z - частота первичных колебаний при номинальной температуре; $b_z = 0,0565$; температурное изменение частоты $\Delta f_z = b_z \cdot T$. Ошибка аппроксимации = 0,001.

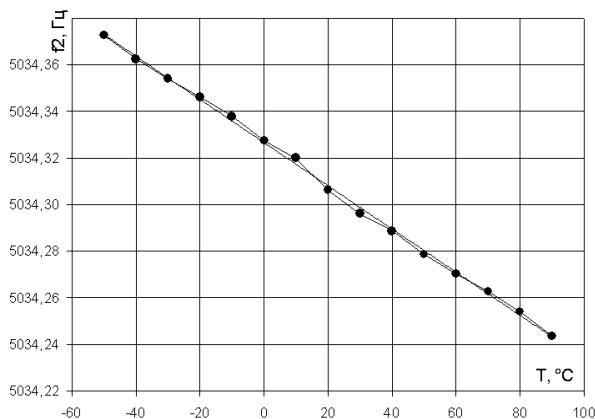


Рисунок 4.16 – Температурное изменение частоты второй моды сенсора гироскопа (ось X)

Аппроксимирующая функция изменения частоты в зависимости от температуры: $f_x^T = f_x - b_x \cdot T$,
 где f_x - частота информативных колебаний при номинальной температуре;
 температурное изменение частоты $\Delta f_x = b_x \cdot T$; $b_x = 0,0009$. Ошибка аппроксимации
 = 0,0016.

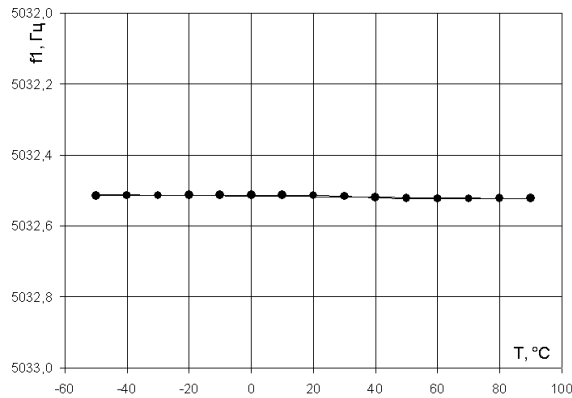


Рисунок 4.17 – Температурное изменение частоты первой моды сенсора гироскопа (ось Y)

Аппроксимирующая функция изменения частоты в зависимости от температуры: $f_y^T = f_y + b_y \cdot T$,
 где f_n - частота информативных колебаний при номинальной температуре;
 температурное изменение частоты $\Delta f_n = b_n \cdot T$; $b_y = 8,2065E-005$. Ошибка
 аппроксимации = 0,0022.

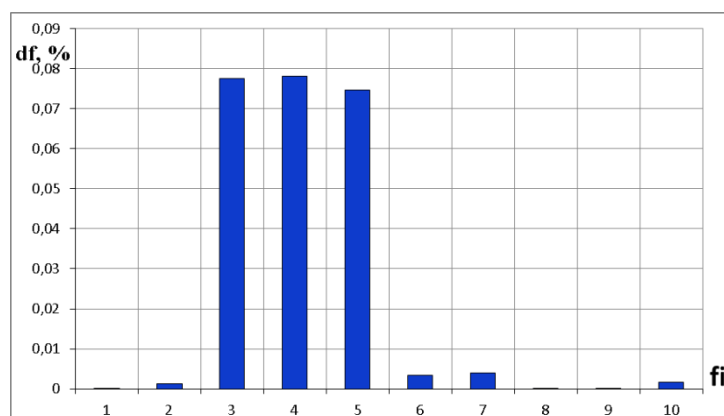


Рисунок 4.18 – Температурные изменения модальных частот сенсора

Из графиков (рисунок 4.18) видно, что в большей степени изменяется собственная частота f_3 первичных колебаний сенсора, собственные частоты f_2 и f_1 , соответствующие информативным колебаниям, изменяются мало. Такая

стабильность частот обусловлена реализованной конструкцией упругих подвесов. При температурном изменении размеров сенсора происходит его перемещение вместе с точками крепления упругих элементов рамы (рисунок 4.19), тем самым практически не вызывая температурных напряжений в упругих подвесах инерционных тел. Упругие элементы подвеса рамы при этом подвергаются деформации растяжения (при нагреве) или сжатия (при охлаждении), что и приводит к большему изменению частоты первичных колебаний.

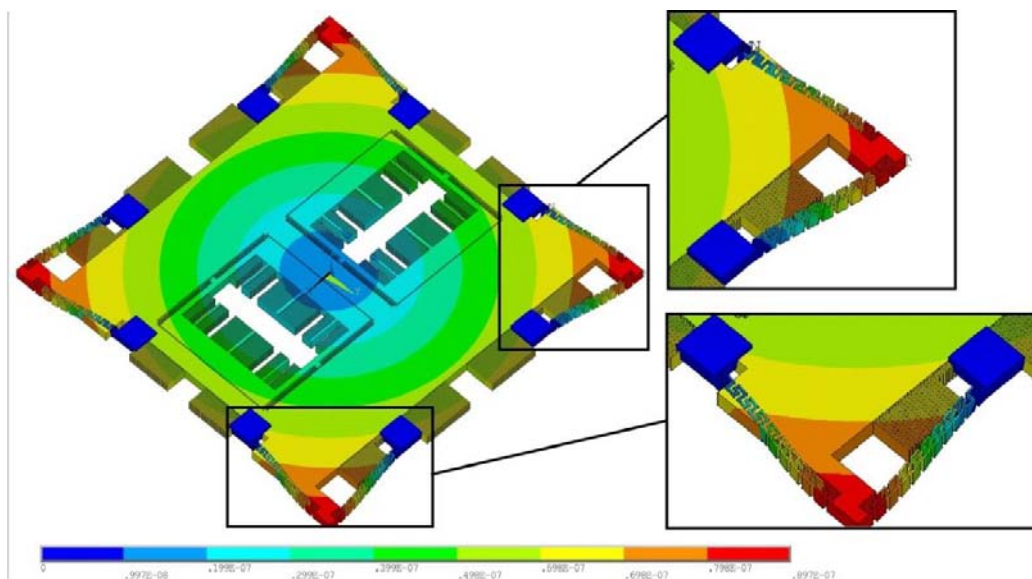


Рисунок 4.19 – Температурная деформация рамы сенсора

Микромеханический гироскоп состоит из двух связанных между собой частей: электромеханического сенсора и электронного блока, следовательно, общий коэффициент передачи гироскопа равен

$$k = k_{эл} \cdot k_m,$$

где $k_{эл}$ – масштабный коэффициент электронного блока, k_m – масштабный коэффициент механического домена сенсора, который определяется выражением

$$k_m = \frac{2z_m q}{\sqrt{(q^2 - \omega_0^2)^2 + \frac{\omega_0^2 q^2}{Q^2}}}, \quad (4.5)$$

где Q – добротность канала информативных колебаний; q , ω_0 – частоты первичных и вторичных колебаний сенсора.

Собственные частоты сенсора ММГ под воздействием температуры изменяются, следовательно, нарушается частотная настройка сенсора ММГ и

изменяется его коэффициент передачи, что приводит к температурной погрешности. На рисунках 4.20, 4.21 показаны зависимости от температуры механических коэффициентов передачи сенсора по осям X и Y.

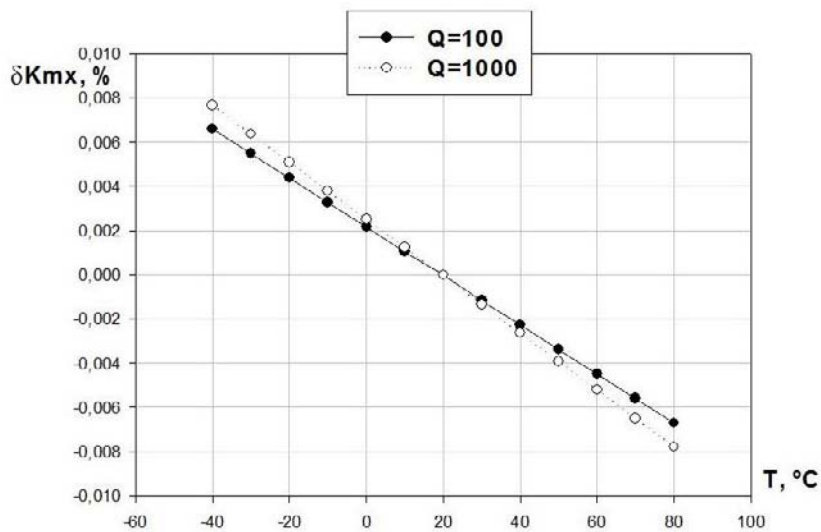


Рисунок 4.20 – Температурное изменение механического масштабного коэффициента гироскопа по оси X

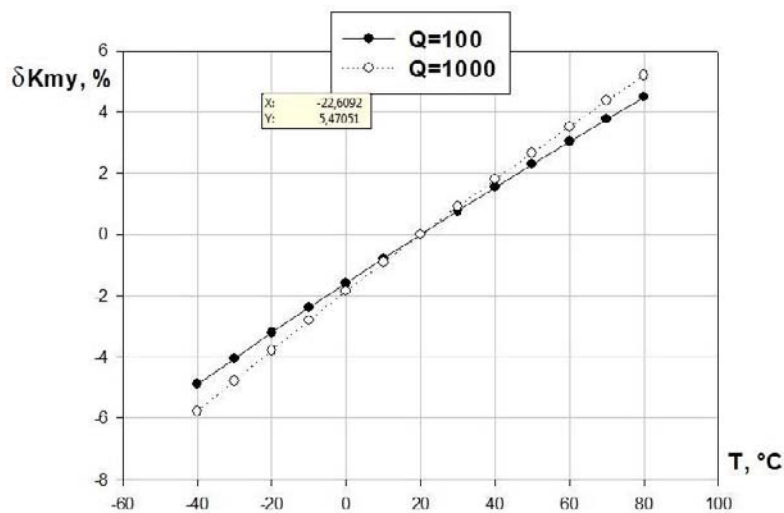


Рисунок 4.21 – Температурное изменение механического масштабного коэффициента гироскопа по оси Y

Полученные зависимости позволили обоснованно выбрать аппроксимирующие функции, которые отображают температурную нестабильность механических масштабных коэффициентов сенсора гироскопа

$$k_{mx}^T = k_{mx} + a_1 \cdot T + b_1 \cdot T^2, \quad (4.6)$$

$$k_{my}^T = k_{my} + a_2 \cdot T + b_2 \cdot T^2, \quad (4.7)$$

где k_{mx} , k_{my} – расчётные механические масштабные коэффициенты сенсора микрогироскопа. Значения коэффициентов аппроксимации приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Аппроксимирующие коэффициенты

Q	k_{mx}	k_{my}	a_1	b_1	a_2	b_2
100	$5,8295 \cdot 10^{-10}$	$5,4741 \cdot 10^{-10}$	$2,9569 \cdot 10^{-11}$	$-2,1026 \cdot 10^{-14}$	$2,7753 \cdot 10^{-11}$	$-1,9121 \cdot 10^{-14}$
1000	$7,3944 \cdot 10^{-10}$	$6,8562 \cdot 10^{-10}$	$3,7651 \cdot 10^{-11}$	$-3,3855 \cdot 10^{-14}$	$3,4882 \cdot 10^{-11}$	$-3,0007 \cdot 10^{-14}$

Для уменьшения температурных погрешностей необходимо осуществлять температурную коррекцию параметров гироскопа, для чего сенсор имеет встроенный датчик температуры. Поскольку изменения частот происходят в небольших пределах, то целесообразней производить коррекцию коэффициента передачи на выходе электронной части, учитывая температуру объекта. Так как общий коэффициент передачи равен произведению масштабных коэффициентов механической и электрической части, то при температурном изменении механического масштабного коэффициента следует корректировать масштабный коэффициент электрической части для поддержания постоянного значения общего коэффициента.

4.1.4 Электростатический анализ

Электродные структуры в микромеханическом гироскопе являются основным связующим звеном между его механической и электрической частями. Они выполняют роль датчиков перемещений, вибропривода (ВП) и корректирующих устройств, создающих силовое воздействие на сенсор с целью коррекции его характеристик.

При системном моделировании гироскопа необходимо иметь достоверные модели его электродных структур и величины емкостей, создаваемых ими. Электродные структуры, независимо от выполняемой роли, могут быть представлены в виде конденсаторов с ёмкостями, изменяющимися в зависимости от перемещений обкладок (рисунок 4.22).

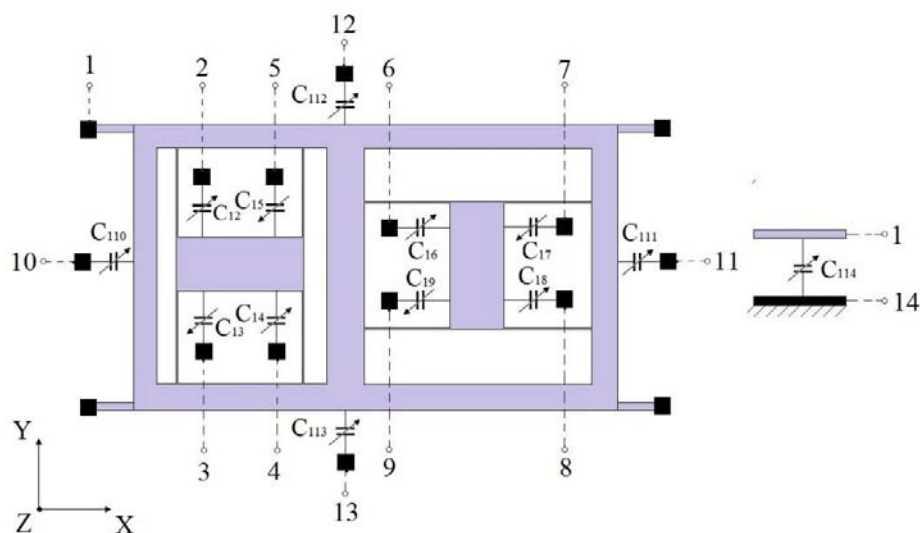


Рисунок 4.22 – Схема емкостей сенсора гироскопа

В каждой гребенчатой структуре ёмкости соединены между собой параллельно, поэтому будем рассматривать суммарные ёмкости, образованные гребенчатыми электродами.

Информация об амплитудах вторичных информативных колебаний сенсора содержится в изменении емкостей C_{12} , C_{15} (по оси X) и C_{16} , C_{19} (по оси Y). Ёмкости C_{12} , C_{15} , C_{16} , C_{19} состоят из одинакового количества гребёнок, следовательно, их ёмкости будут равны, и изменение емкостей можно определить только для емкостей C_{12} , C_{15} . Инерционные тела совершают информативное движение вдоль осей X , Y , а также вместе с рамой участвуют в первичном движении вдоль оси Z . Таким образом, изменение емкостей C_{12} , C_{15} зависит от координат x и z , а емкости C_{16} , C_{19} зависят от координат y и z .

Расчёт емкостей осуществляется методом КЭ анализа при перемещении сенсора по осям X и Y на ± 4 мкм, по оси Z на ± 15 мкм. Результаты расчёта представлены на рисунках 4.23, 4.24.

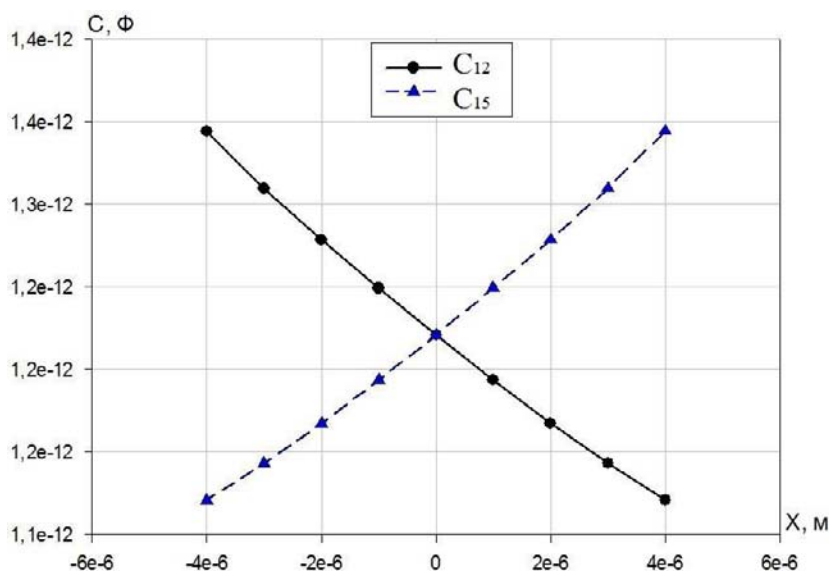


Рисунок 4.23 – Изменение ёмкостей C_{12} , C_{15} при перемещении сенсора по оси X

Аппроксимирующая функция для ёмкостей C_{12} , C_{15} при перемещении сенсора по оси X имеет вид

$$C_{12}(x) = 1,2202982 \cdot 10^{-12} - 2,7877215 \cdot 10^{-8} \cdot x + 0,00074150481 \cdot x^2$$

Погрешность аппроксимации составляет $6,4 \cdot 10^{-16}$ Ф.

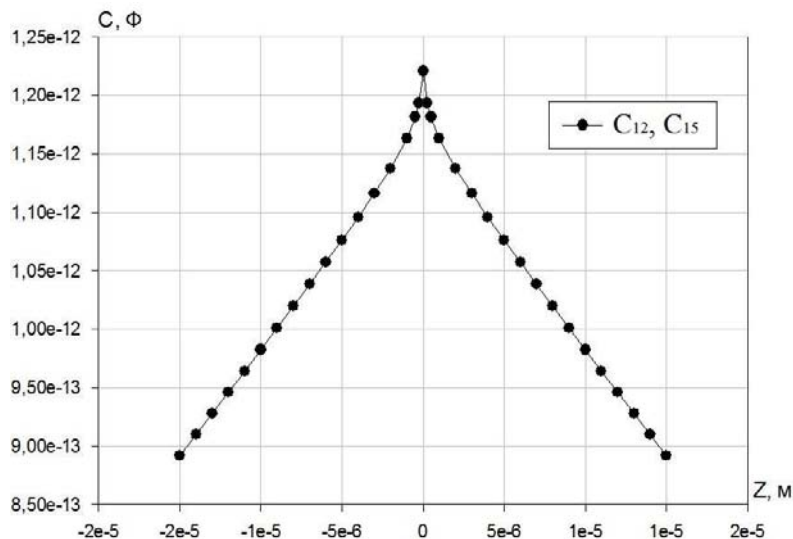


Рисунок 4.24 – Изменение ёмкостей C_{12} , C_{15} при перемещении сенсора по оси Z

Аппроксимирующая функция для ёмкостей C_{12} , C_{15} при перемещении сенсора по оси Z имеет вид

$$C_{12}(z) = 1,210801 \cdot 10^{-12} - 5,3007837 \cdot 10^{-8} \cdot z - 0,014803347 \cdot z^2 - 5,7327099 \cdot z^{2.5} + 635,10349 \cdot z^3$$

Погрешность аппроксимации составляет $4,08 \cdot 10^{-15}$ Ф.

На рисунке 4.25 представлен график полного изменения ёмкостей C_{12} , C_{15} при перемещении сенсора по осям X и Z .

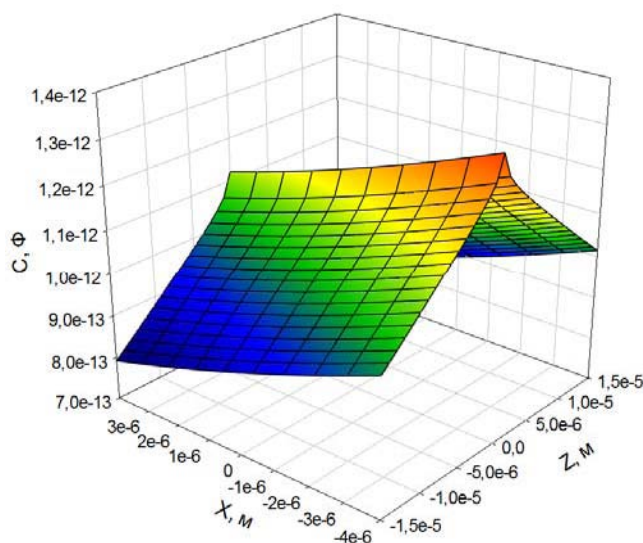


Рисунок 4.25 – Суммарное изменение емкости C_{12}

Результирующая функция, определяющая изменение емкостей C_{12} , C_{15} при одновременном перемещении сенсора по осям X и Z имеет вид

$$C_{12}(x, z) = 1,2202982 \cdot 10^{-12} - 2,7877215 \cdot 10^{-8} \cdot x + 0,00074150481 \cdot x^2 - 5,3007837 \cdot 10^{-8} \cdot z - 0,014803347 \cdot z^2 - 5,7327099 \cdot z^{2.5} + 635,10349 \cdot z^3 \quad (4.8)$$

Ёмкости C_{110} , C_{111} и C_{112} , C_{113} состоят из одинакового количества гребёнок, следовательно, их ёмкости будут равны и изменение емкости необходимо определить только для емкостей C_{110} , C_{112} .

Ёмкости C_{110} , C_{111} используются для измерения амплитуды перемещения сенсора вдоль оси Z . Изменения этих емкостей при колебаниях сенсора вдоль оси Z происходят в одну сторону (либо обе ёмкости увеличиваются, либо уменьшаются). Поэтому они соединяются между собой параллельно и в электронном блоке измерения амплитуды первичных колебаний используется суммарная ёмкость $C_z = C_{110} + C_{111}$.

На рисунках 5, 6 представлены графики изменения емкостей C_{110} , C_{111} .

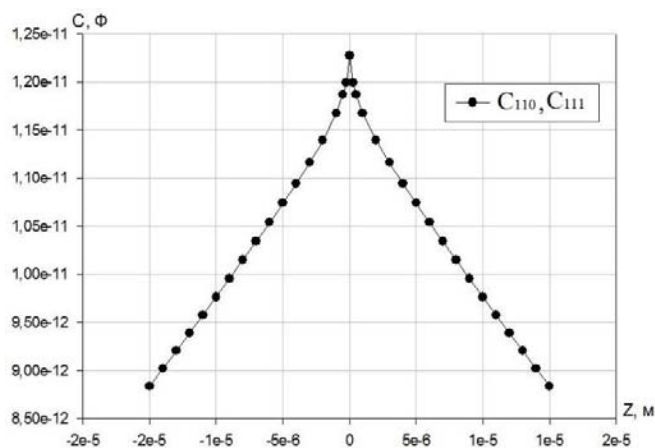


Рисунок 4.26 – Зависимость емкостей C_{110} , C_{111} от перемещения сенсора по оси Z

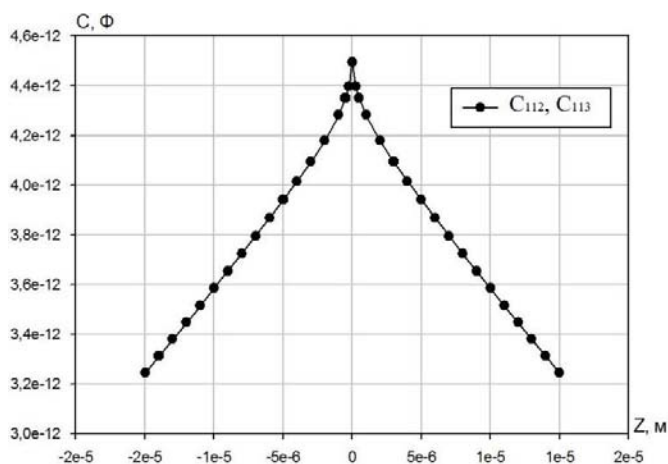


Рисунок 4.27 – Зависимость емкостей C_{112} , C_{113} от перемещения сенсора по оси Z

Аппроксимирующая функция для ёмкостей C_{110} , C_{111} имеет вид

$$C_{110}(z) = 6,1087612 \cdot 10^{-12} - 4,9803599 \cdot 10^{-7} \cdot z + 0,00030856515 \cdot z^{1,5} - 0,087179555 \cdot z^2 + 8,5812791 \cdot z^{2,5} \quad (4.9)$$

Погрешность аппроксимации составляет $1,31 \cdot 10^{-14}$ Ф.

Зависимость ёмкостей C_{112} , C_{113} от перемещения сенсора по оси Z имеет вид

$$C_{113}(z) = 4,4763702 \cdot 10^{-12} - 3,5293755 \cdot 10^{-7} \cdot z + 0,00021600983 \cdot z^{1,5} - 0,060820157 \cdot z^2 + 5,9715998 \cdot z^{2,5} \quad (4.10)$$

Погрешность аппроксимации составляет $8,68 \cdot 10^{-15}$ Ф.

Электростатическая сила, возбуждающая первичные колебания сенсора вдоль оси Z создаётся планарным виброприводом, образованным электродами с ёмкостью C_{114} .

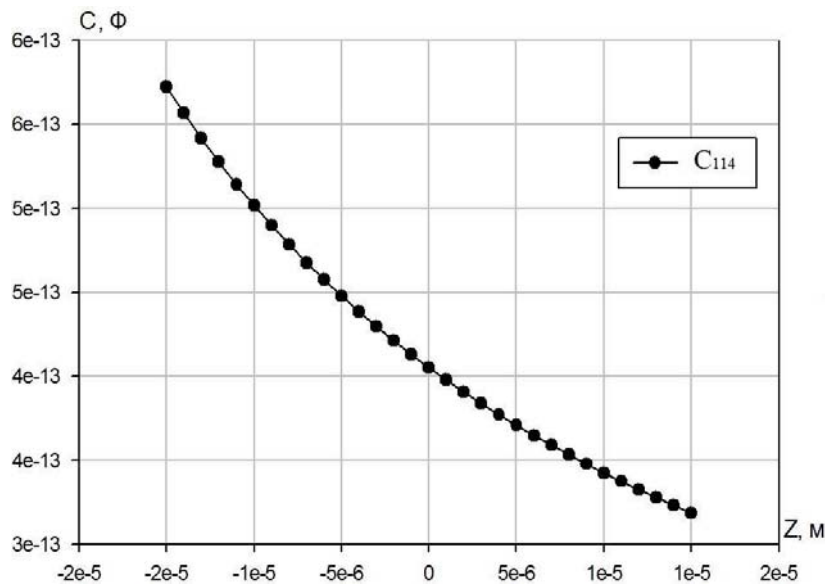


Рисунок 4.28 – Ёмкость C_{114} вибропривода

Аппроксимирующая функция для ёмкости C_{114} при перемещении сенсора по оси Z в рабочем диапазоне имеет вид

$$C_{114}(z) = 0,40493 \cdot 10^{-12} - 7,5639 \cdot 10^{-9} \cdot z + 0,000176511 \cdot z^2 - 3,94663270 \cdot z^3 \quad (4.11)$$

Погрешность аппроксимации составляет $4,19 \cdot 10^{-16}$ Ф.

Ёмкости C_{13} , C_{14} и C_{17} , C_{18} используются в качестве корректирующих устройств, создающих силы, воздействующие на сенсор, причём начальные значения всех емкостей одинаковы.

4.2 Способы возбуждения первичных колебаний микрогироскопа

4.2.1 Принцип построения и задачи системы управления первичными колебаниями

В большинстве МЭМС используются гребенчатые или планарные электростатические виброприводы, которые технологичны, энергоёмки и допускают большую амплитуду перемещения массы.

Структура системы управления первичными колебаниями (СУПК) и заложенные в ней принципы функционирования во многом определяют такие важные характеристики микромеханического гироскопа (ММГ), как:

- время готовности прибора;

- коэффициент преобразования;
- стабильность коэффициента преобразования.

СУПК должна решать следующие основные задачи:

- возбуждение первичных колебаний;
- поддержание заданной амплитуды колебаний за минимальное время с высокой стабильностью.

СУПК может быть реализована с использованием аналоговой или цифровой электроники.

Для достижения требуемой амплитуды первичных колебаний в ММГ необходимо использовать резонансные свойства его механической части. Обеспечение равенства частоты управляющего воздействия и собственной частоты сенсора является главным условием достижения необходимой амплитуды первичных колебаний. Однако, в силу технологических погрешностей изготовления, собственные частоты сенсора изменяются от образца к образцу в достаточно широких пределах. Поэтому на практике используются, различные автоматические системы, обеспечивающие и поддерживающие колебания на резонансной частоте. Наиболее частое применение нашли две схемы возбуждения первичных колебаний на резонансной частоте [48]:

- автогенераторная схема возбуждения;
- схема с опорным генератором, частота которого автоматически настраивается на собственную частоту сенсора.

На рисунке 4.29 представлена упрощенная функциональная схема возбуждения первичных колебаний при помощи планарного вибропривода.

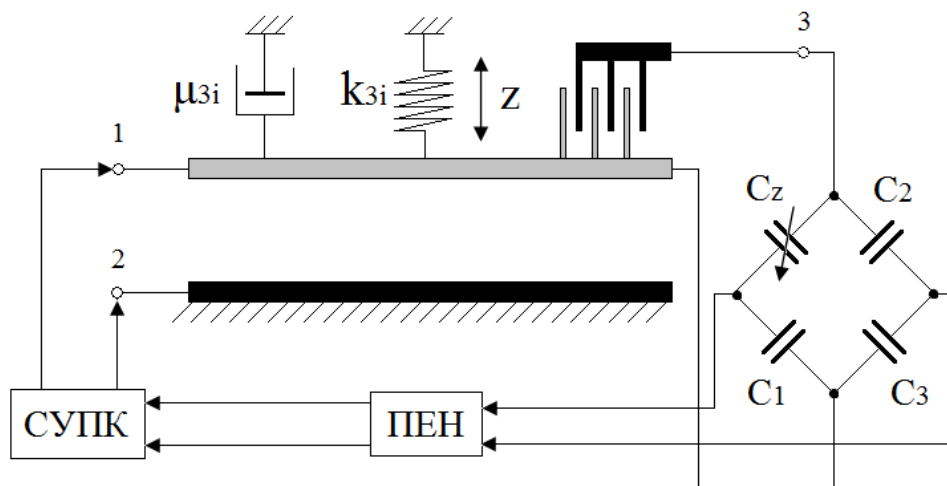


Рисунок 4.29 - Функциональная схема возбуждения
первичных колебаний гироскопа

Схема управления первичных колебаний (СУПК) прикладывает напряжения прямоугольной формы к электродам 1 и 2 сенсора гироскопа, обеспечивая поступательное движение сенсора по оси Z . Гребенчатые электроды 3 образуют переменную емкость C_z . Для контроля первичных колебаний предлагается использовать ток смещения емкости C_z гребенчатых структур, чувствительных к перемещению по оси Z .

$$i = \frac{dC_z}{dt} U \quad (4.12)$$

Причем при параллельном соединении емкостей гребенчатых структур, изменение суммарной емкости пропорционально амплитуде первичных колебаний гироскопа. Таким образом, их можно использовать в качестве информационных датчиков в системе управления гироскопа для измерения амплитуды его первичных колебаний. Для поддержания колебаний сенсора на резонансной частоте вводится обратная связь в СУПК с помощью преобразователя емкость-напряжение (ПЕН), который преобразует изменение емкости C_z в напряжение.

4.2.2 Автогенераторная схема возбуждения

Для возбуждения ММГ может использоваться схема автогенератора, представленная на рисунке 4.30.

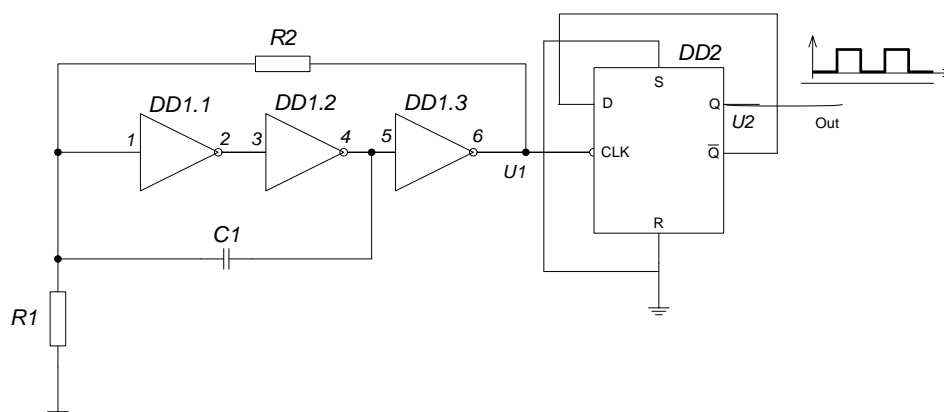


Рисунок 4.30 – Схема автогенератора

Задающий блок автогенератора собран на логических элементах $DD1.1$, $DD1.2$, $DD1.3$, резисторах $R1$, $R2$ и конденсаторе $C1$. При включении электропитания конденсатор $C1$ начинает заряжаться. По мере заряда конденсатора повышается напряжение на его обкладке, соединенной с выводом 1 логического элемента $DD1.1$. Когда оно достигнет ≈ 9 В, на выводе 4 логического элемента $DD1.2$ появится сигнал «логическая единица» ≈ 15 В, а на выводе 6 логического элемента сигнал «логический ноль» $\approx 0,4$ В.

После этого конденсатор $C1$ начнет разряжаться через логический элемент $DD1.3$. В итоге на выводе 4 логического элемента $DD1.2$ будут формироваться прямоугольные импульсы. Такие же импульсы, но сдвинутые по фазе на 180° , будут на выводе 6 логического элемента $DD1.3$ (рисунок 4.31).

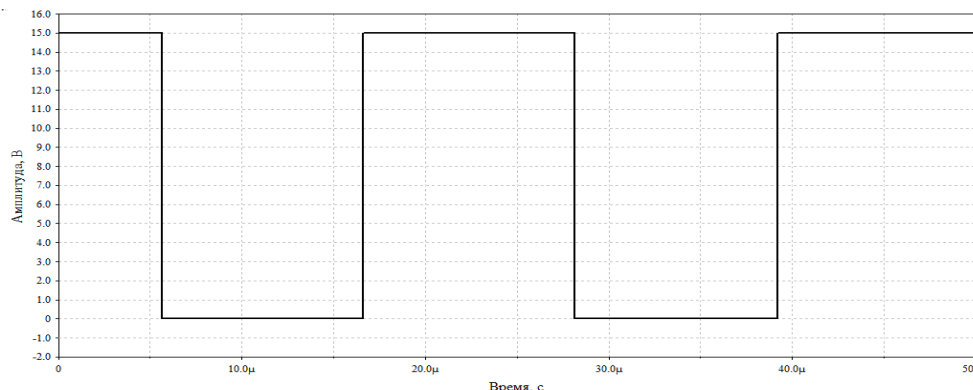


Рисунок 4.31 - Сигнал на выходе логического элемента $DD1.3$

Продолжительность заряда и разряда конденсатора $C1$, а значит, и частота генерируемых импульсов, зависят от емкости конденсатора $C1$ и сопротивления резистора $R1$ и $R2$.

Процесс перезаряда конденсатора $C1$ в сторону уменьшения напряжения на левой обкладке начинается от напряжения $U_{um} + U_{nop}$, в результате чего на это уходит больше времени. Для установления скважности генерируемых импульсов равной двум используется микросхема $DD2$ – D-триггер. В результате работы микросхемы $DD2$ на ее выходе Q формируются униполярные импульсы скважностью два (рисунок 4.32).

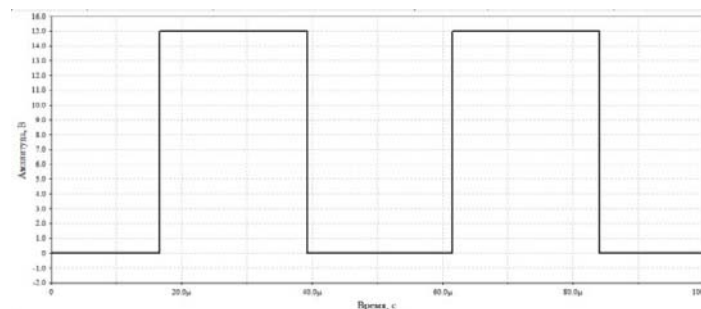


Рисунок 4.32 - Сигнал на выходе D-триггера

Основной проблемой данного генератора является невысокая точность и стабильность задания частоты.

Генераторы на основе сдвига фаз производят меньше искажений, имея ещё и хорошую стабильность частоты. Такой генератор может быть построен с одним ОУ, как показано на рисунке 4.33. Три RC звена соединены последовательно, чтобы получить крутой наклон $d\varphi/d\omega$, необходимый для стабильной частоты колебаний. Применение меньшего количества RC звеньев приводит к высокой частоте колебаний, ограниченной полосой пропускания ОУ.

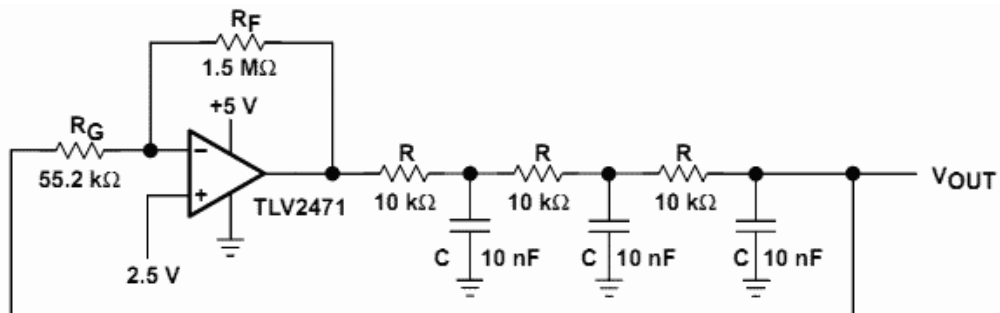


Рисунок 4.33 – Генератор на основе сдвига фаз с одним ОУ.

Выходной сигнал данной схемы представлен на рисунке 4.34.

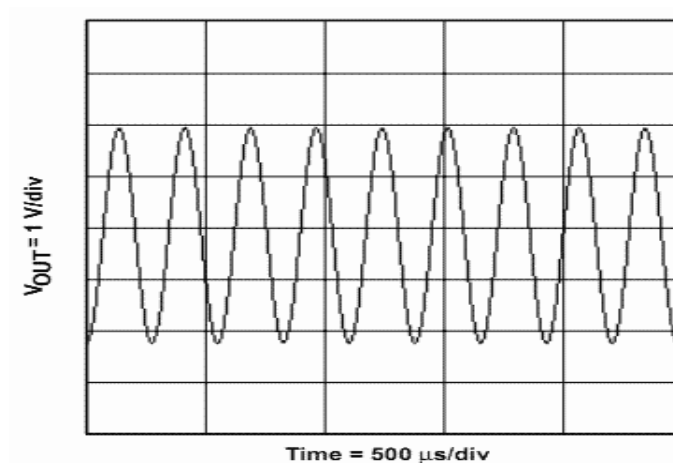


Рисунок 4.34 – Выходной сигнал генератора на основе сдвига фаз

Искажения выходного сигнала составляют 0,46%, что значительно меньше, чем в схеме генератора на основе моста Вина без стабилизации амплитуды.

Для исследования возможности использования в качестве генератора первичных колебаний, схема описанного выше генератора была реализована в пакете Matlab Simulink (toolbox SimScape). Для получения требуемой формы выходных импульсов на выход схемы был добавлен компаратор. Схема и результаты моделирования приведены на рисунках 4.35 и 4.36.

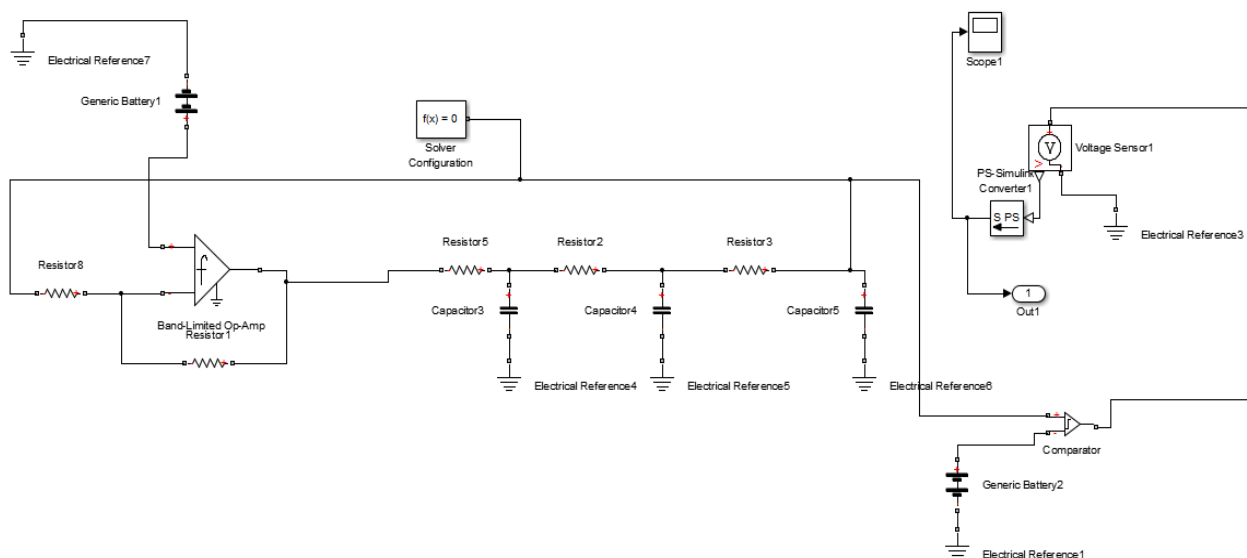


Рисунок 4.35 – Реализация генератора с помощью Matlab Simulink (toolbox SimScape).

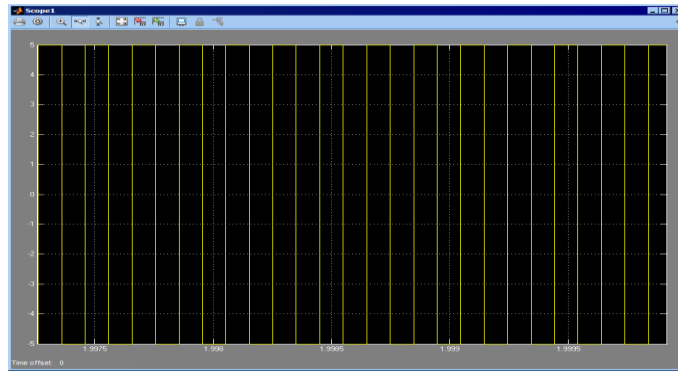


Рисунок 4.36 – Выходной сигнал генератора на ОУ

Для проверки работоспособности системы возбуждения первичных колебаний синтезированный генератор был соединён с моделью механической части гироскопа (рисунок 4.37).

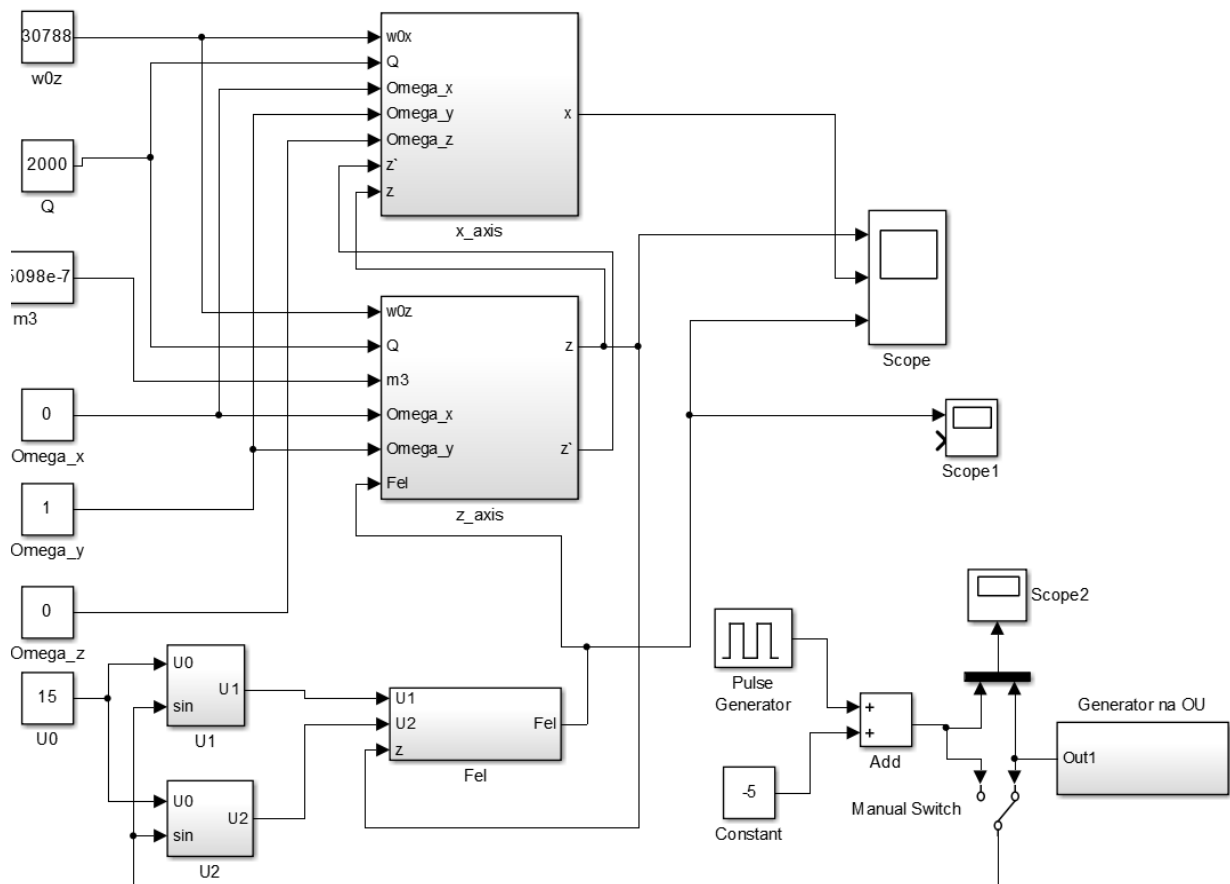
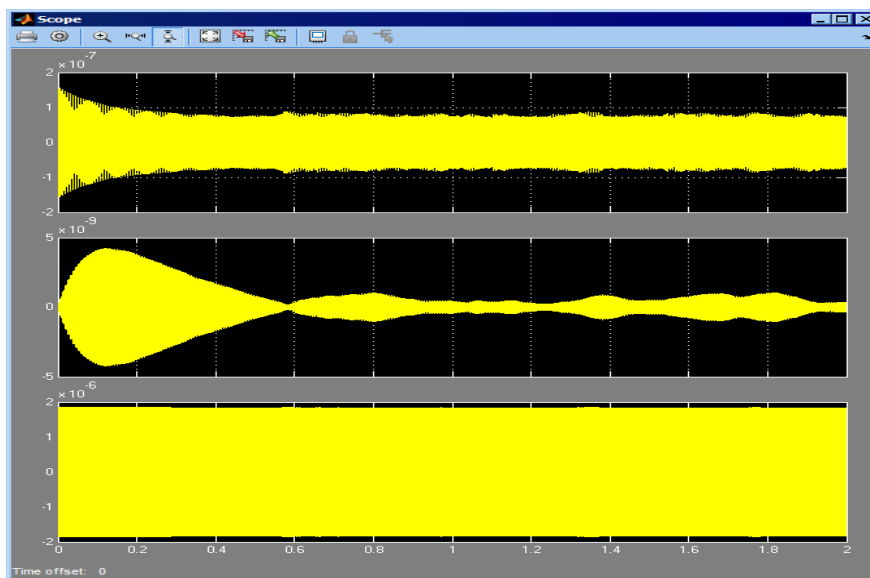


Рисунок 4.37 –Электромеханическая Simulink-модель первичных колебаний с автогенераторной схемой возбуждения

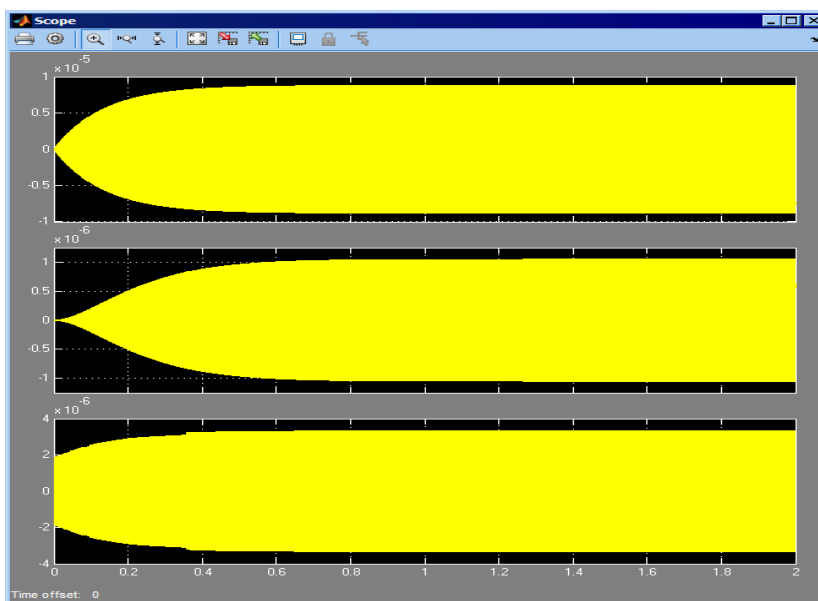
Для увеличения механического масштабного коэффициента передачи гироскопа обеспечивают его высокую механическую добротность, в связи с чем,

даже небольшое отклонение частоты первичных колебаний от резонансной приводит к резкому уменьшению амплитуды колебаний (рисунок 4.38).



1 – первичные колебания сенсора; 2 – вторичные колебания; 3 – генератор
Рисунок 4.38 – Результаты моделирования работы системы возбуждения первичных колебаний с помощью генератора на ОУ

В случае «идеального» генератора, настроенного на резонансную частоту, характеристики будут иметь вид, представленный на рисунке 4.39.



1 – первичные колебания сенсора; 2 – вторичные колебания; 3 – генератор
Рисунок 4.39 – Результаты моделирования работы системы возбуждения первичных колебаний с помощью идеального генератора, настроенного на резонансную частоту

В результате наличия технологических погрешностей резонансные частоты различных образцов гироскопа будут отличаться. Таким образом, необходимо разработать систему настройки частоты на резонансную для достижения максимальной амплитуды первичных колебаний.

4.2.3 Схемы с автоподстройкой частоты

Структурная схема возбуждения с опорным генератором приведена на рисунке 4.40. В данной схеме для формирования сигнала, подаваемого на ММГ, используется генератор, управляемый напряжением (ГУН). Если частота ГУН будет совпадать с частотой механического резонанса ЧЭ, то выходной сигнал с генератора будет находиться в фазе с колебаниями ЧЭ.

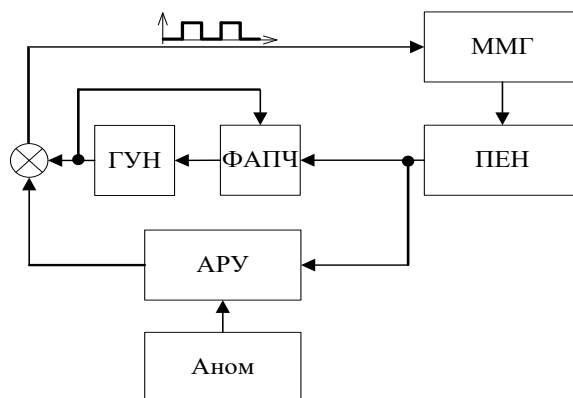


Рисунок 4.40- Структурная схема системы управления первичными колебаниями с ФАПЧ

В случае несовпадения частоты выходного сигнала задающего генератора и механического резонанса ЧЭ будет наблюдаться фазовый сдвиг.

Обязательным условием такой схемы возбуждения является необходимость формирования контура автоматической настройки частоты задающего генератора на частоту механического резонанса сенсора. Такой контур можно построить на основе частотного детектора, который обладает широкой полосой захвата, но относительно низкой точностью. Существенно лучшими характеристиками по точности обладают схемы фазовой автоподстройки частоты на основе фазового детектора (ФАПЧ), которые широко используются в различной радиоэлектронной аппаратуре.

Структурная схема контура ФАПЧ показана на рисунке 4.41.

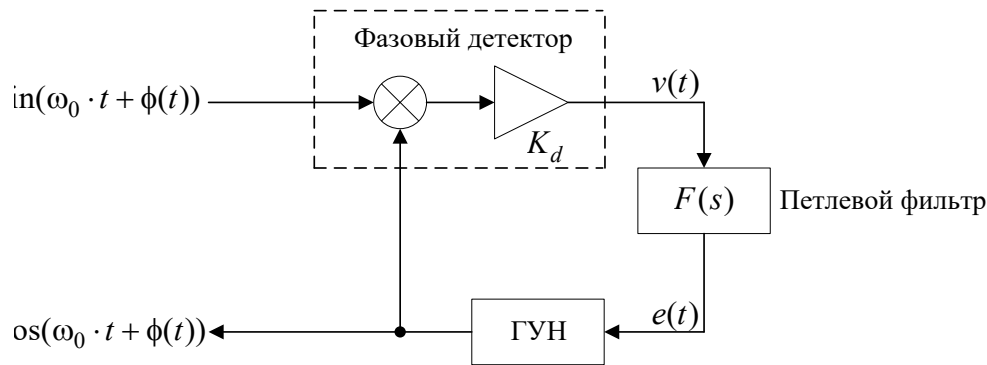


Рисунок 4.41 - Структурная схема контура ФАПЧ

В состав контура входит фазовый детектор, представляющий собой умножитель с коэффициентом усиления K_d , петлевой фильтр $F(s)$ (в англоязычной литературе loop filter), который формирует управляющее напряжение (или сигнал ошибки) $e(t)$ и ГУН.

Следящий контур фазовой автоподстройки частоты должен постоянно вести сопровождение входного сигнала по фазе. Соответственно, генератор, входящий в состав контура, должен «уметь» перестраиваться по фазе. Эту роль выполняет ГУН, или в англоязычной литературе voltage-controlled oscillator (VCO), мгновенная частота сигнала на выходе ГУН зависит от управляющего напряжения как это показано на рисунке 4.42.

$$e(t) \longrightarrow \text{ГУН} \longrightarrow \cos \left(\omega_0 \cdot t + K_0 \cdot \int_0^t e(t) dt \right)$$

Рисунок 4.42 – Генератор, управляемый напряжением

На входе генератора управляющее напряжение (сигнал ошибки) $e(t)$, а на выходе сигнал, полная фаза которого равна

$$\phi(t) = \omega_0 \cdot t + K_0 \cdot \int_0^t e(t) dt$$

Тогда мгновенная частота на выходе генератора представляет собой производную от полной фазы и пропорциональна текущему управляющему напряжению $e(t)$, K_0 – коэффициент пропорциональности.

$$\omega(t) = \frac{d\phi}{dt} = \omega_0 + K_0 \cdot e(t)$$

Проанализируем работу контура ФАПЧ в составе системы управления первичными колебаниями.

Введем следующее обозначение

$$\psi(t) = K_0 \cdot \int_0^t e(t) dt$$

Тогда сигналы на выходе ГУН и на выходе фазового детектора равны $\cos(\omega_0 + \psi(t))$

$$v(t) = \frac{K_d}{2} \sin(2 \cdot \omega_0 \cdot t + \phi(t) + \psi(t)) + \frac{K_d}{2} \sin(\phi(t) - \psi(t))$$

Сигнал на выходе фазового детектора представляет собой сумму сигнала на удвоенной частоте $2\omega_0$ и сигнала, зависящего от разности фаз входного сигнала и ГУН. Петлевой фильтр представляет собой ФНЧ, который подавляет сигнал на удвоенной частоте, тогда на выходе петлевого фильтра получим управляющий сигнал $e(t)$

$$e(t) = \frac{K_d}{2} \sin(\phi(t) - \psi(t)) = \frac{K_d}{2} \sin(\Delta\phi(t)) \quad .$$

Управляющий сигнал на выходе петлевого фильтра пропорционален синусу разности фаз между входным и опорным сигналами.

Для дальнейшего моделирования системы управления первичными колебаниями с ФАПЧ, получим линеаризованную модель контура ФАПЧ, представленную на рисунке 4.43.

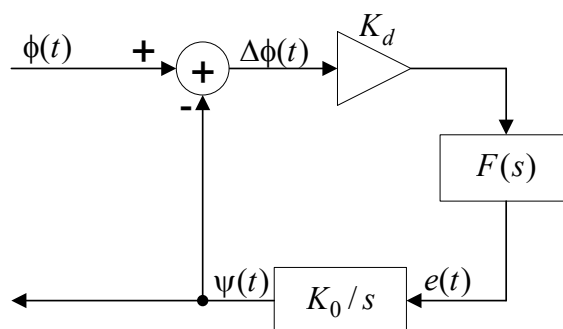


Рисунок 4.43 - Линеаризованная модель контура ФАПЧ

Обозначим $\Phi(s)$ и $\Psi(s)$ - образы по Лапласу $\phi(t)$ и $\psi(t)$ соответственно, тогда уравнение линеаризованного контура ФАПЧ в операторной форме

$$\Psi(s) = (\Phi(s) - \Psi(s)) \cdot \frac{K_d \cdot K_0 \cdot F(s)}{s} .$$

Следовательно, передаточная характеристика контура ФАПЧ

$$H(s) = \frac{\Psi(s)}{\Phi(s)} = \frac{K_d \cdot K_0 \cdot F(s) / s}{1 + K_d \cdot K_0 \cdot F(s) / s} = \frac{K_d \cdot K_0 \cdot F(s)}{s + K_d \cdot K_0 \cdot F(s)} .$$

Будем считать, что передаточная характеристика петлевого фильтра $F(s)$ описывается моделью первого порядка вида

$$F(s) = K_p + \frac{K_i}{s} ,$$

где K_p и K_i - пропорциональный и интегральный коэффициенты. В этом случае сигнал ошибки $e(t)$ будет определяться как

$$e(t) = K_p \cdot K_d \cdot \Delta\phi(t) + K_p \cdot K_i \cdot \int_0^t \Delta\phi(t) dt .$$

Передаточная характеристика контура ФАПЧ

$$H(s) = \frac{K_d \cdot K_0 \cdot K_p \cdot s + K_d \cdot K_0 \cdot K_i}{s^2 + K_d \cdot K_0 \cdot K_p \cdot s + K_d \cdot K_0 \cdot K_i} .$$

Обозначим

$$\omega_p^2 = K_d \cdot K_0 \cdot K_i \text{ и } 2 \cdot \zeta \cdot \omega_p = K_d \cdot K_0 \cdot K_p ,$$

тогда

$$H(s) = \frac{2 \cdot \zeta \cdot \omega_p \cdot s + \omega_p^2}{s^2 + 2 \cdot \zeta \cdot \omega_p \cdot s + \omega_p^2} .$$

Следовательно, линеаризованный контур ФАПЧ представляет собой фильтр второго порядка с резонансной частотой ω_p и коэффициентом затухания ζ .

Комплексный коэффициент передачи контура ФАПЧ равен

$$H(j\omega) = \frac{\omega_p^2 + j \cdot 2 \cdot \zeta \cdot \omega_p \cdot \omega}{\omega_p^2 - \omega^2 + j \cdot 2 \cdot \zeta \cdot \omega_p \cdot \omega} .$$

Тогда амплитудно- частотная характеристика (АЧХ) контура ФАПЧ равна

$$|H(j\omega)| = \sqrt{\frac{\omega_p^4 + 4 \cdot \zeta^2 \cdot \omega_p^2 \cdot \omega^2}{(\omega_p^2 - \omega^2)^2 + 4 \cdot \zeta^2 \cdot \omega_p^2 \cdot \omega^2}} .$$

При $\omega_p = \omega$

$$|H(j\omega_p)| = \sqrt{\frac{\omega_p^4 + 4 \cdot \zeta^2 \cdot \omega_p^4}{4 \cdot \zeta^2 \cdot \omega_p^4}} = \frac{1}{2 \cdot \zeta} \cdot \sqrt{1 + 4 \cdot \zeta^2} .$$

Основные частотные соотношения АЧХ линеаризованного контура ФАПЧ показаны на рисунке 4.44.

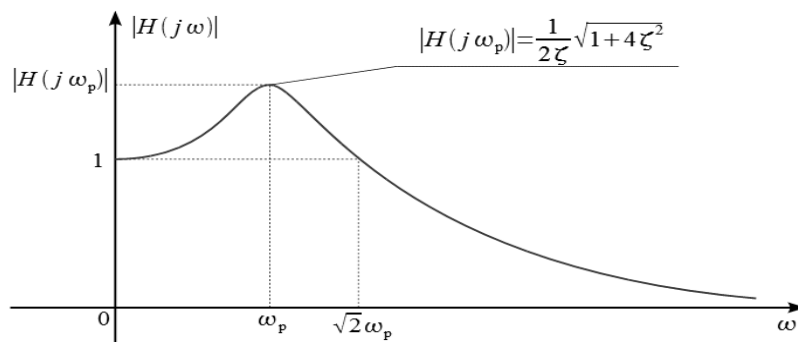


Рисунок 4.44 - Основные частотные соотношения АЧХ линеаризованного контура ФАПЧ

На рисунках 4.45 и 4.46 показаны логарифмические АЧХ и ФЧХ линеаризованного контура ФАПЧ, от частоты, нормированной к резонансной частоте при различных параметрах ζ .

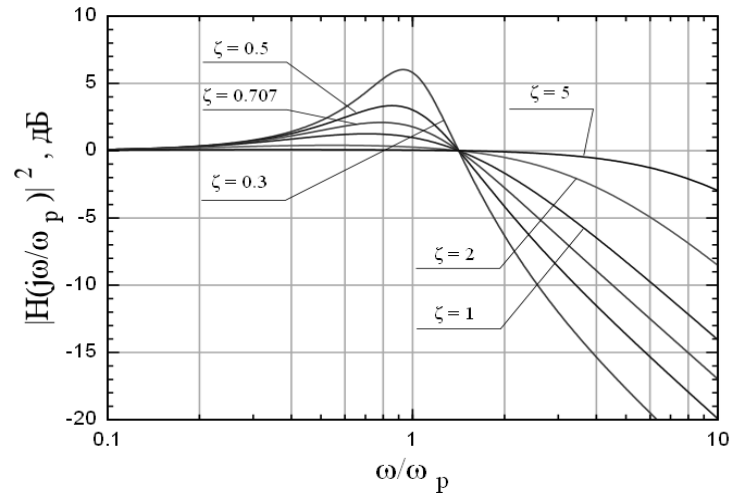


Рисунок 4.45 - Логарифмическая АЧХ

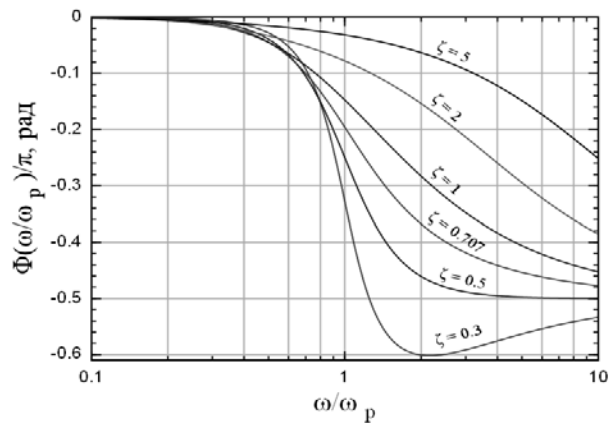


Рисунок 4.46 - Логарифмическая ФЧХ

Для настройки частоты колебаний автогенераторной схемы в соответствии с частотой механического резонанса сенсора резистор $R2$ в схеме дополняется полевым транзистором $VT1$ (рисунок 4.47).

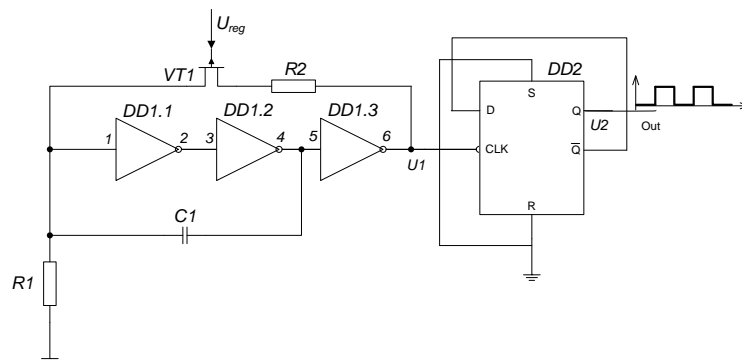


Рисунок 4.47 - Схема автогенератора с автоматической регулировкой частоты

Полевой транзистор используется как переменный электрически управляемый линейный резистор, так как при относительно малых стоковых

напряжения открытые каналы полевого транзистора ведут себя практически как линейные резисторы, проводимость которых зависит от напряжения затвора. При смене полярности стокового напряжения линейность сопротивления (или проводимости) не нарушается, поэтому полевой транзистор может использоваться в цепях постоянного и переменного токов.

В качестве логических элементов $DD1.1$, $DD1.2$, $DD1.3$ может использоваться микросхема $74HCT14$, а D-триггер может быть выполнен на микросхеме $HCF4013$.

Рассмотренная схема автогенератора, как было отмечено выше, обеспечивает возбуждение ММГ униполярными импульсами с фиксированной скважностью равной 50 %. В случае высокой добротности контура возбуждения ММГ, количество подводимой энергии, при использовании данной схемы, может оказаться избыточным, что приведет к уменьшению амплитуды колебаний ЧЭ. Вследствие этого целесообразно рассмотреть схему автогенератора с возможностью регулировки частоты и длительности импульса (рисунок 4.48).

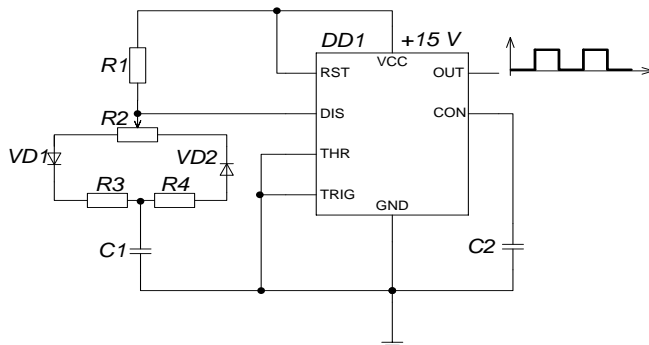


Рисунок 4.48 - Схема автогенератора с регулируемой скважностью

Схема автогенератора с регулируемой скважностью выполнена на интегральном таймере ($DD1$). После включения напряжения питания частотозадающий конденсатор $C1$ начинает заряжаться через резисторы $R1$, $R2$, $R3$ и диод $VD1$ от 0 до $2/3$ напряжения питания микросхемы $U_{п}$, за время t_0 . Напряжение на выходе интегрального таймера $DD1$ в течение этого времени равно $U_{п}$. Когда напряжение на конденсаторе $C1$ достигает значения $2/3 U_{п}$, конденсатор $C1$ начинает разряжаться через резисторы $R4$, $R2$ и диод $VD2$ от $2/3 U_{п}$ до $1/3 U_{п}$. Время t_0 определяет продолжительность выхода интегрального таймера на

автоколебательный режим работы, после чего формируются одинаковые повторяющиеся импульсы (рисунок 4.49). Регулировка скважности следования импульсов осуществляется резистором $R2$.

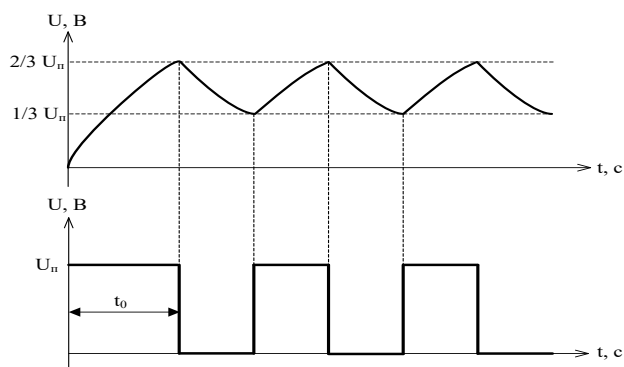


Рисунок 4.49 - Временные диаграммы работы автогенератора

Для обеспечения автоматической регулировки частоты и длительности импульсов схема дополняется полевыми транзисторами $VT1$ и $VT2$ (рисунок 4.50).

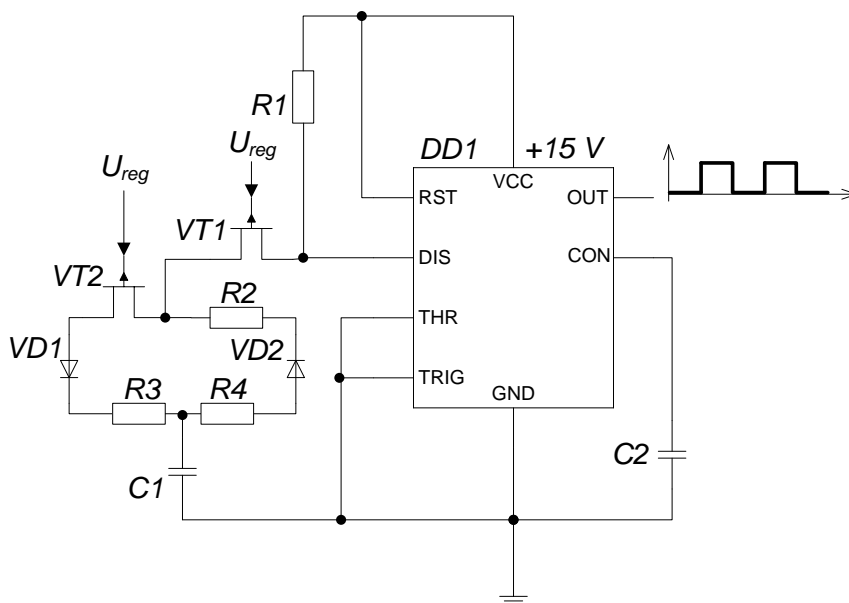


Рисунок 4.50. - Схема автогенератора с автоматической регулировкой частоты и длительности импульса

В настоящее время широкое распространение получили интегральные функциональные генераторы, поэтому для упрощения реализации схемы с ФАПЧ можно использовать высококачественный функциональный генератор MAX038 фирмы MAXIM [49] (рисунок 4.51).

Данная микросхема имеет встроенный фазовый детектор, который может быть использован для синхронизации выхода генератора с внешним сигналом.

Внешний сигнал с механической системы гироскопа подключается к входу фазового детектора PDI, а его выход берется с PDO.

Выход PDO является выходом элемента исключаящее ИЛИ и генерирует прямоугольные импульсы тока на выходной частоте MAX038, даже если вход PDI заземлен. Обычно выход PDO через резистор RPD и конденсатор CPD подключается к входу подстройки частоты FADJ. Резистор RPD задает порог срабатывания фазового детектора, а конденсатор убирает высокочастотные помехи.

Одним из преимуществ данной схемы возбуждения колебаний сенсора гироскопа является ее простота.

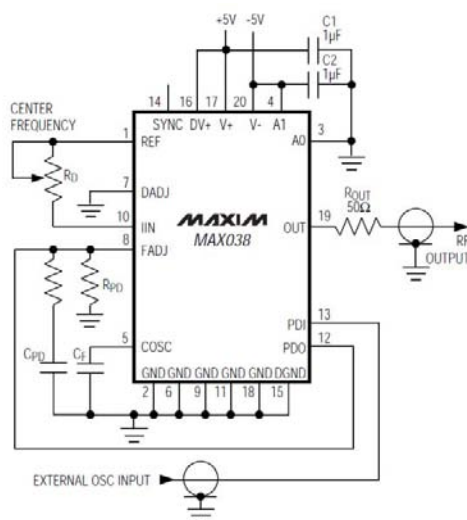


Рисунок 4.51 – Схема ФАПЧ на основе генератора MAX038

Несмотря на такие достоинства данной схемы как скорость реакции и простота реализации, существует ряд «узких» моментов, а именно:

- необходима четкая фиксация выходных колебаний механической системы;
- необходимо знать, насколько фаза, поступающая на вход детектора, отличается от реальной фазы колебаний сенсора (это неизбежно из-за промежуточных цепей детектирования).

4.2.4 Экстремальная система возбуждения первичных колебаний

Схема, планируемая к реализации, должна обеспечивать приемлемое качество первичных колебаний, учитывая разброс параметров самого гироскопа и влияние различных схем детектирования измеряемых сигналов.

Для этого предлагается использовать экстремальную систему, в которой целевым параметром является максимальная амплитуда колебаний. Поясним принцип действия данной системы с помощью рисунка 4.52.

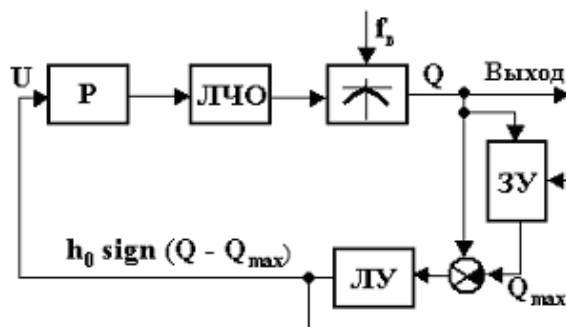


Рисунок 4.52 – Упрощенная схема однокоординатной экстремальной системы

Управляющее воздействие на линейную часть объекта (ЛЧО) системы формируется в результате выявления разности между текущим значением показателя качества и его экстремальным значением. В качестве регулятора (Р) чаще всего используется интегратор (например, сервопривод). Для определения экстремального значения показателя качества используют запоминающее устройство (ЗУ), включаемое параллельно каналу, через который проходит сигнал текущего значения показателя качества. ЗУ реагирует только на увеличение сигнала Q (при максимуме).

До тех пор пока максимум не достигнут, сигналы, поступающие на элемент сравнения, равны, и их разность равна нулю. После достижения экстремального значения Q_{max} показатель качества при дальнейшем увеличении сигнала X на входе экстремального звена будет уменьшаться. В результате этого появится сигнал на входе логического устройства (ЛУ), формирующий сигнал управления $U = h_0 \text{sign}(Q - Q_{max})$ и воздействующий на систему так, чтобы происходило уменьшение сигнала X и возрастание показателя качества Q. После срабатывания ЛУ сигнал поступает на стирание Q_{max} в ЗУ. Далее процесс поиска экстремума повторяется. Система с запоминанием экстремума является релейной, поэтому протекающие в ней процессы будут иметь колебательный характер. Амплитуда колебаний показателя качества определяется величиной зоны

нечувствительности релейного элемента, формирующего сигнал управления в функции разности $Q-Q_{\max}$.

Данные системы имеют следующие недостатки:

- 1 – есть вероятность «застрять» в локальный максимум;
- 2 – из-за динамических свойств объекта система может «потерять» экстремум.

Для борьбы с первым свойством будет использоваться зона нечувствительности регулятора. Для компенсации динамических свойств системы амплитуда корректирующих воздействий будет уменьшаться с выходом системы на рабочий режим.

Имитационная модель гироскопа с экстремальной системой возбуждения первичных колебаний представлена на рисунке 4.53.

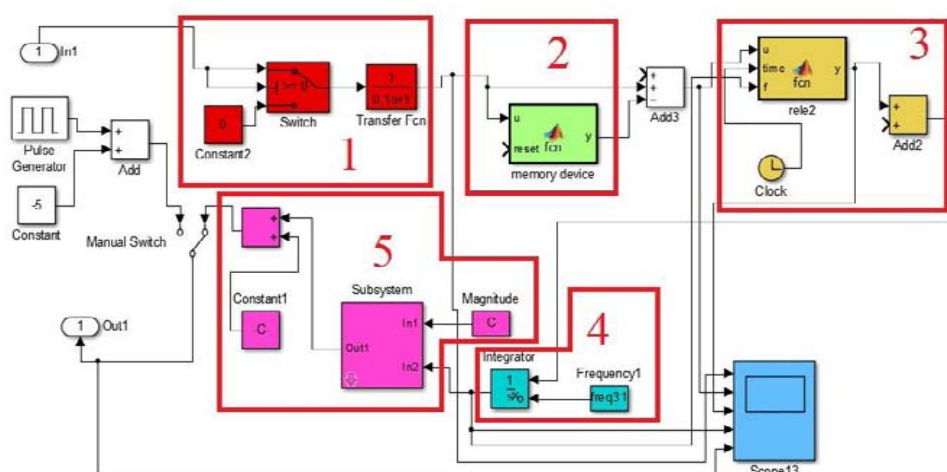


Рисунок 4.53 – Имитационная модель гироскопа с экстремальной системой возбуждения первичных колебаний

Цифрами на рисунке обозначены: 1 – амплитудный детектор; 2 – запоминающее устройство; 3 – регулятор, формирующий закон управления; 4 – интегратор; 5 – генератор, управляемый напряжением (ГУН).

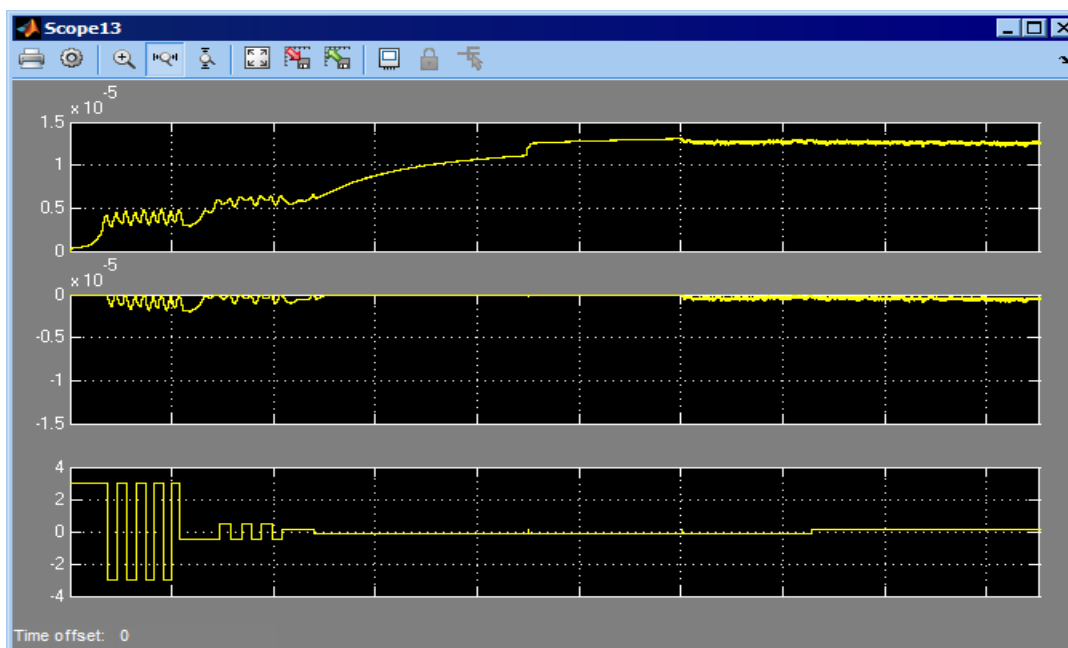
Рассмотрим принцип функционирования данной схемы. Генератор (6) начинает генерировать колебания на частоте, заведомо меньшей резонансной. Сенсор гироскопа начинает совершать вынужденные колебания, амплитуда которых возрастает. Амплитуда колебаний фиксируется амплитудным детектором (2) и подается на устройство сравнения и запоминающее устройство (3).

Запоминающее устройство запоминает максимальную прошедшую амплитуду сигнала и также выдает его на сравнивающее устройство.

Таким образом, после сравнивающего устройства мы имеем либо нулевой сигнал, что соответствует росту максимальной амплитуды, либо отрицательный сигнал, пропорциональный разнице текущего и максимального значений. В случае превышения порогового значения регулятор (4) меняет свой выход на противоположный. Сигнал с регулятора (4) поступает на интегратор (5) и ГУН (6) подстраивает частоту.

Данная система всегда работает в колебательном режиме, что необходимо для поддержания амплитуды в окрестности, вообще говоря, непостоянного экстремума. Чтобы свести к минимуму последствия данной колебательности, после установления экстремума амплитуда выхода регулятора, а также границы срабатывания могут варьироваться с течением времени. Регулятор (4) может реализовывать различные законы управления, поэтому рассмотрим несколько вариантов функционирования системы.

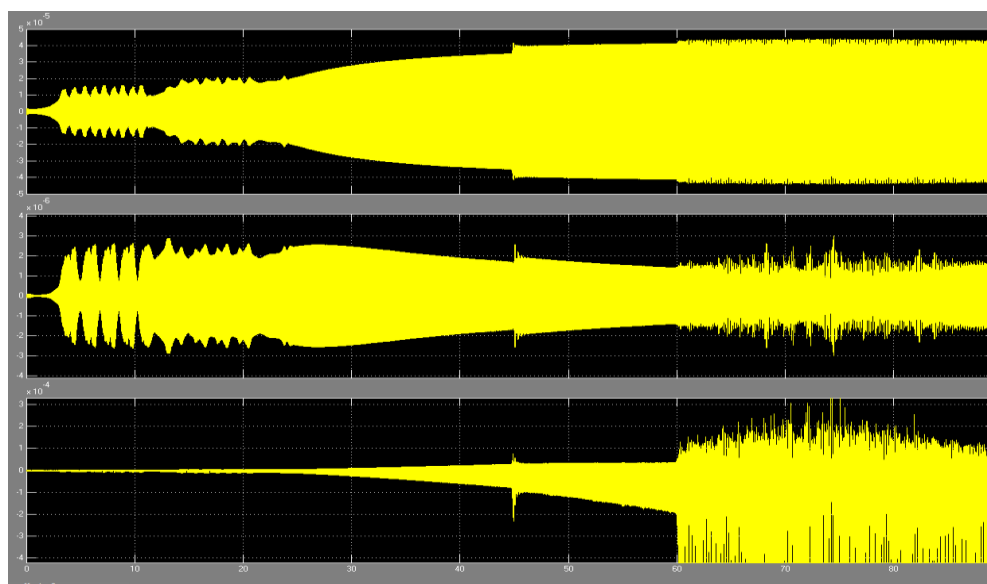
В первом случае (рисунки 4.54, 4.55) происходит постоянное уменьшение амплитуды выхода регулятора и уменьшение порога срабатывания (осциллограмма 3). В результате имеется постоянное значительное возрастание амплитуды первичных колебаний по оси Z (рисунки 4.54, 4.55 – 1-ая осциллограмма).



- 1 – амплитуда первичных колебаний; 2 – сигнал рассогласования;
3 – выходной сигнал регулятора

Рисунок 4.54 – Система возбуждения первичных колебаний

Однако из-за постоянных флуктуаций частоты амплитуда вторичных колебаний по оси X имеет зашумлённый нестабильный вид (рисунок 4.55). Более того, из-за погрешностей детектора при измерении амплитуды колебаний система может ложно срабатывать, потерять экстремум и «развалиться».

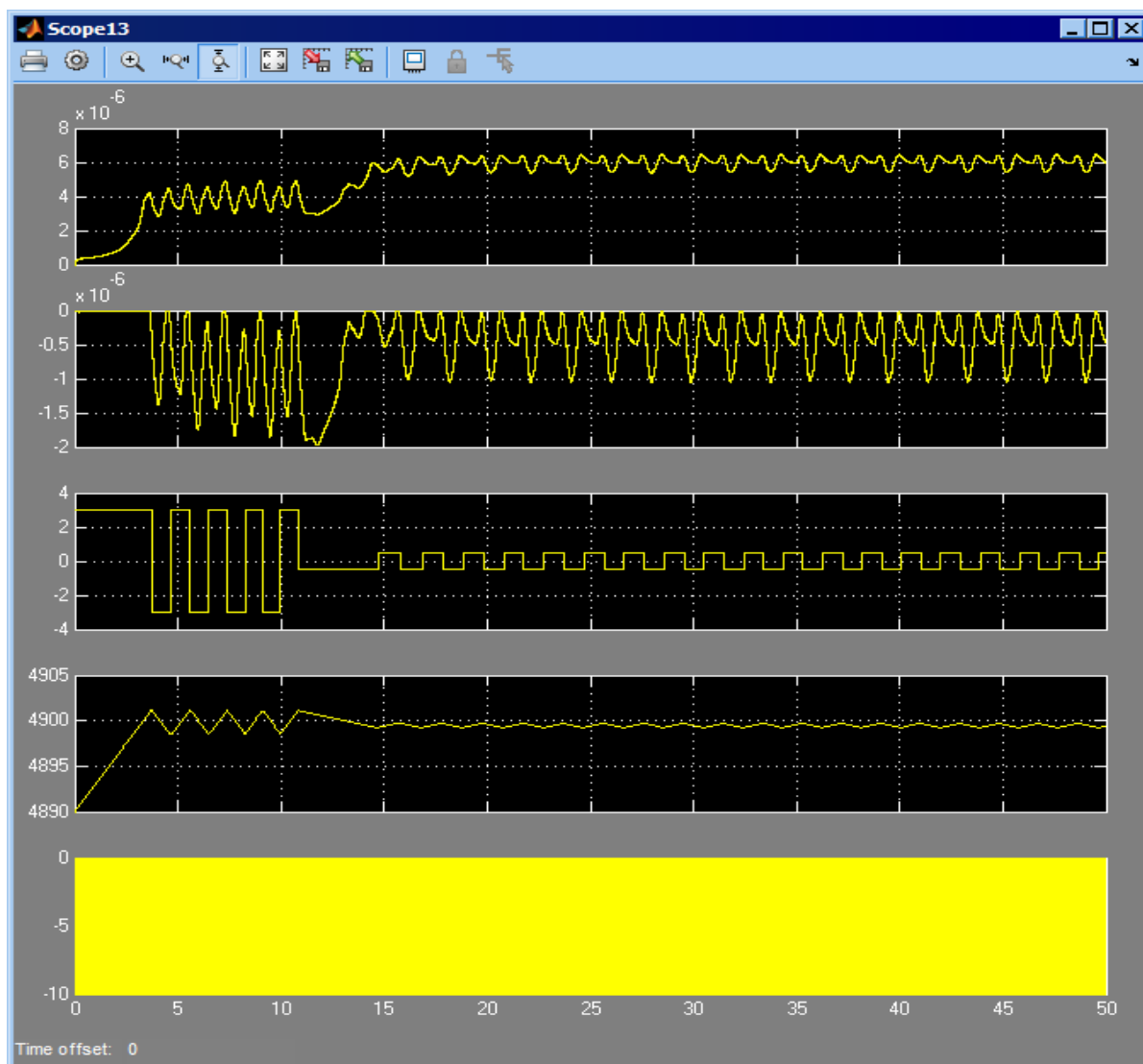


- 1 – первичные колебания (z); 2 – информативные колебания (x);
3 – выход генератора

Рисунок 4.55 – Система возбуждения первичных колебаний

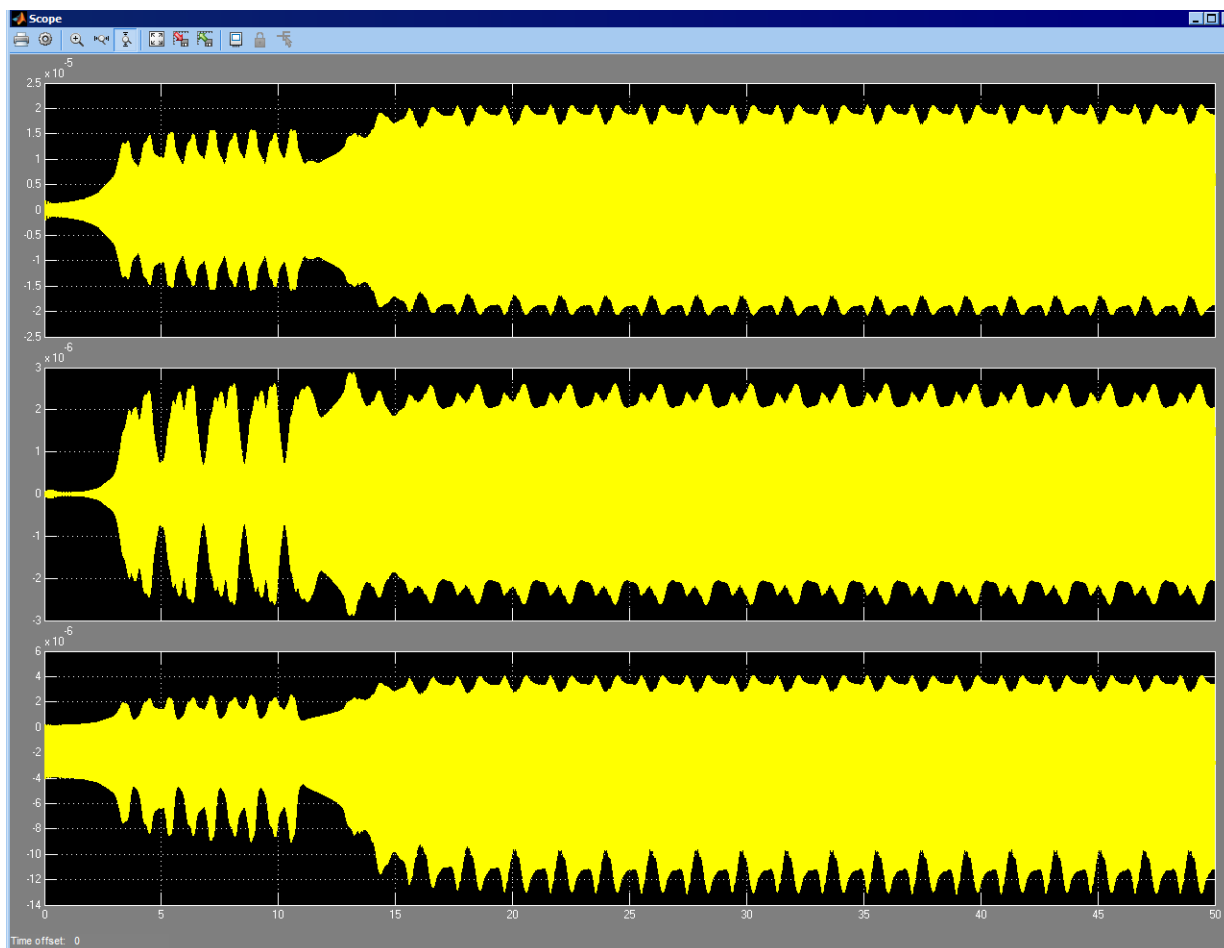
Во втором случае (рисунки 4.56, 4.57) происходит уменьшение амплитуды выхода регулятора и порога срабатывания (рисунок 4.56, 3-я осциллограмма) до определенного предела.

В результате имеется постоянное колебательное изменение амплитуды первичных колебаний по оси Z (рисунок 4.56, 4.57, 1-ая осциллограмма). Из-за постоянного изменения частоты первичных колебаний амплитуда вторичных колебаний по оси X также имеет колебательный вид (рисунок 4.57).



- 1 – амплитуда первичных колебаний; 2 – сигнал рассогласования;
- 3 – выходной сигнал регулятора; 4 – выходной сигнал интегратора;
- 5 – выход генератора

Рисунок 4.56 – Моделирование работы системы возбуждения первичных колебаний



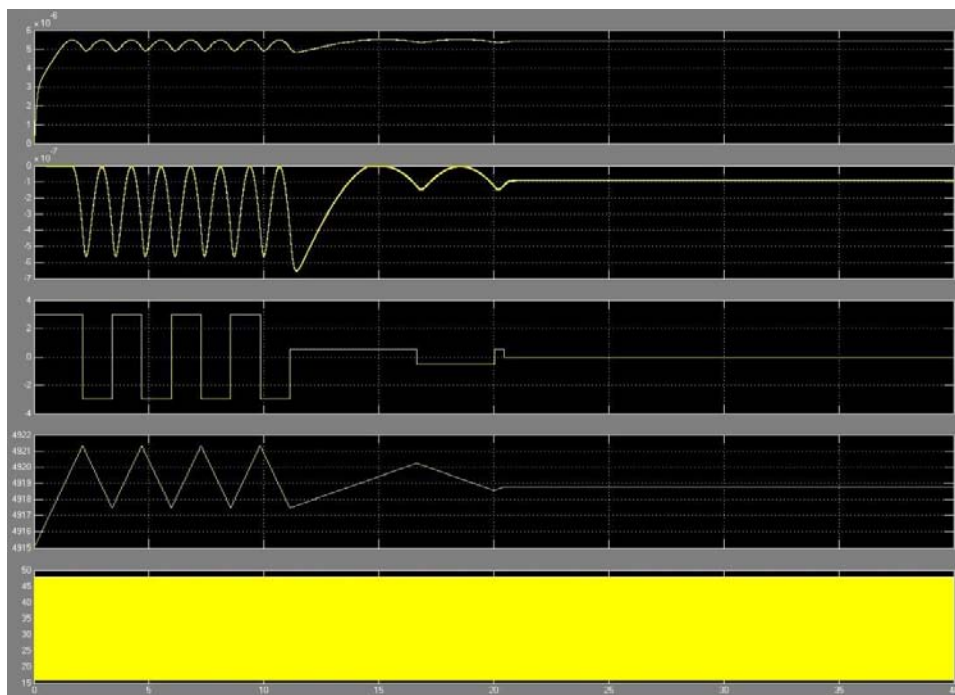
1 – первичные колебания (z); 2 – информативные колебания (x);
3 – выход генератора

Рисунок 4.57 – Моделирование работы системы возбуждения первичных колебаний

Из-за постоянного изменения частоты первичных колебаний амплитуда вторичных колебаний по оси X также имеет колебательный вид (рисунок 4.57). Несмотря на значительную амплитуду, её колебания могут негативно сказаться на измерительной части системы, поэтому был реализован следующий третий вариант.

В этом случае (рисунки 4.58, 4.59) происходит уменьшение амплитуды выхода регулятора и порога срабатывания (рисунок 4.58, 3-я осциллограмма) до определенного предела, а затем регулятор отключается. В результате имеется стабилизация амплитуды первичных колебаний по оси Z (рисунки 4.58, 4.59, осциллограммы 1) на частоте достаточно близкой к резонансной. Амплитуда

вторичных колебаний по оси X также остается постоянной (рисунок 4.59, осциллограмма 2).



1 – амплитуда первичных колебаний; 2 – сигнал рассогласования;
 3 – выход регулятора; 4 – выход интегратора; 5 – выход генератора
 Рисунок 4.58 – Моделирование работы системы возбуждения первичных колебаний



1 – первичные колебания (z); 2 – информативные колебания (x);
 3 – информативные колебания (y)

Рисунок 4.59 – Моделирование работы системы возбуждения первичных колебаний

Несмотря на незначительное уменьшение амплитуды по сравнению с предыдущими двумя вариантами настройки регулятора, она все равно значительно больше случая с идеальным генератором, частота которого задается вручную. Текст последнего варианта функции регулятора (4) приведен в приложении А. Данная программная реализация регулятора не предлагает управленческих решений при значительном изменении точки экстремума при работе в установившемся режиме. Данный вариант предлагается к схемотехнической реализации. Амплитудный детектор (2), запоминающее устройство (3), устройство сравнения, регулятор (4) и интегратор (5) рекомендуется реализовать на микропроцессоре. В качестве ГУН лучше всего использовать генератор MAX038.

4.3 Моделирование на системном уровне микрогироскопа

4.3.1 Генерация системной модели гироскопа

Сенсор гироскопа представляет собой три взаимосвязанных осциллятора (рисунок 4.60). Первичный канал – это осциллятор с электростатической системой возбуждения колебаний сенсора и два осциллятора вторичных информативных колебаний.

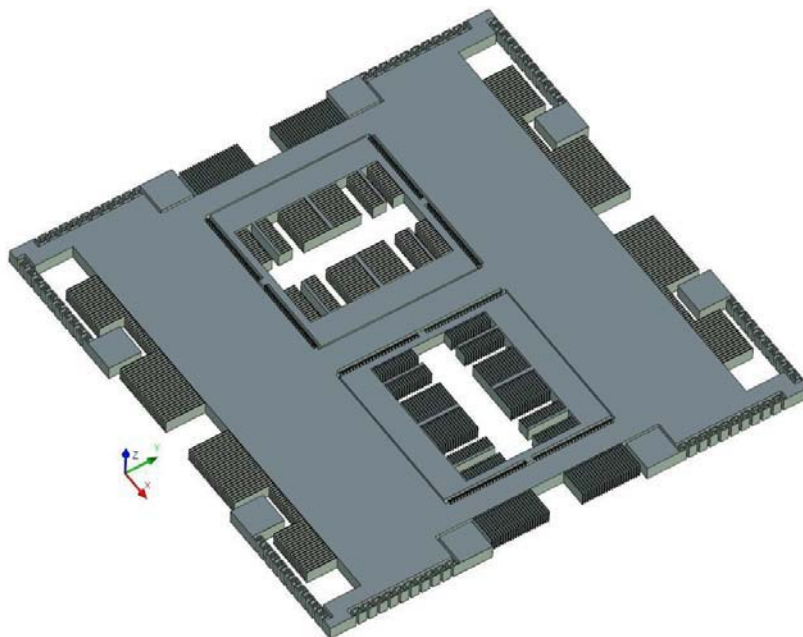


Рисунок 4.60 – Геометрия подвижной части сенсора

Микрогирскоп можно представить состоящим из двух доменов: механического и электрического (рисунок 4.61), которые связаны между собой через межэлектродные ёмкости. Структурное перемещение «x» через ёмкости C_{16} , C_{19} системой измерения скорости (СИС) преобразуется в электрический сигнал, пропорциональный измеряемой скорости Ω_y . Структурное перемещение «y» через ёмкости C_{12} , C_{15} системой измерения скорости (СИС) преобразуется в электрический сигнал, пропорциональный измеряемой скорости Ω_x . Структурное перемещение «z» через ёмкости C_{12} , C_{15} преобразуется в электрический сигнал, используемый в системе управления первичными колебаниями (СУПК).

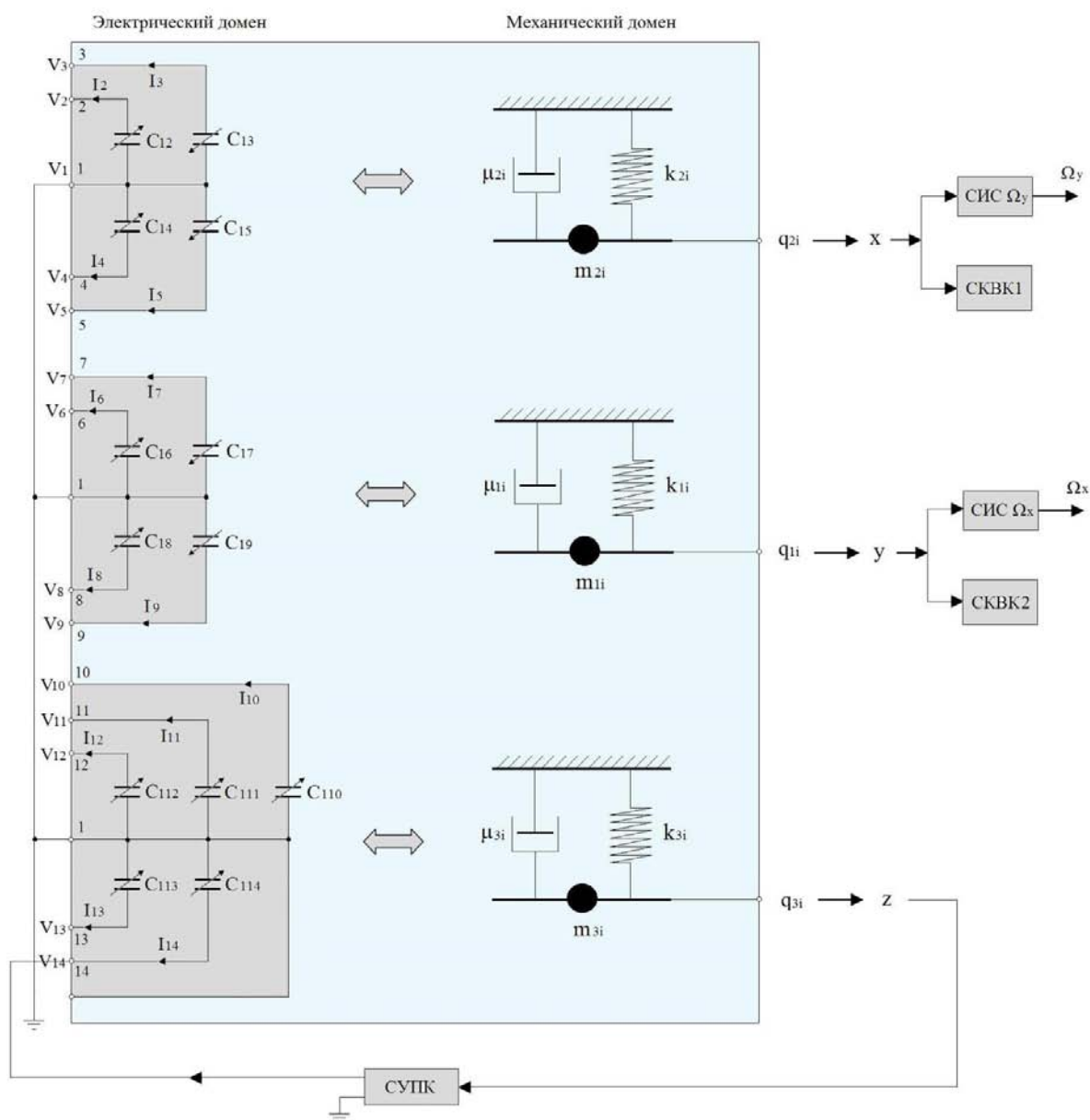
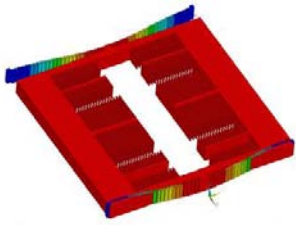

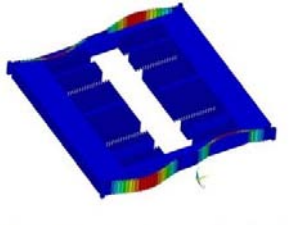
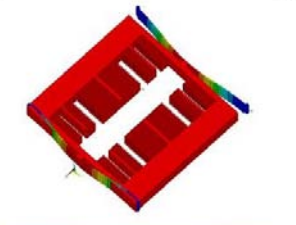
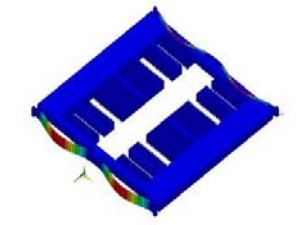
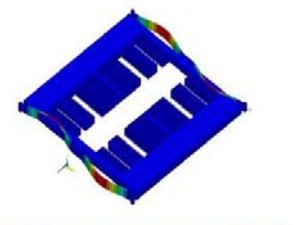
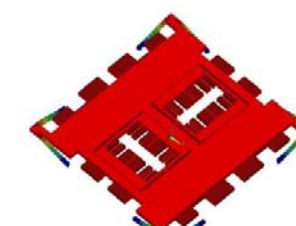
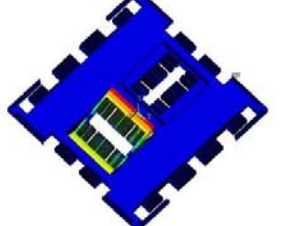
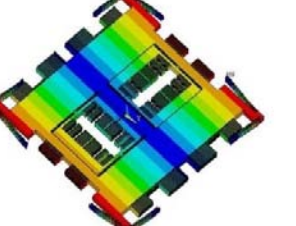


Рисунок 4.61 – Структура микрогирскопа

Из проведённого в разделе 4.1.1 модального анализа микрогироскопа собственные формы его колебаний, имеющие наибольший вклад при воздействии сил в направлении X, Y, Z, представлены таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Выбранные собственные формы колебаний сенсора

Ось X			
 <p>$f_{1x}=5032,57$ Гц ratio eff. mass to total mass = 0.983606; эффективная масса = 0.213225E-07</p>	+	 <p>$f_{9x}=165886$ Гц ratio eff. mass to total mass = 0.0266994; эффективная масса = 0.139735E-09</p>	+
		 <p>$f_{8x}=165839$ Гц ratio eff. mass to total mass = 402611E-17; эффективная масса = 0.148742E-20</p>	= x
Ось Y			
 <p>$f_{y1}=5034,36$ Гц. ratio eff. mass to total mass = 0.983606; эффективная масса = 0.213225E-07</p>	+	 <p>$f_{y9}= 165886$ Гц ratio eff. mass to total mass = 0.644596E-02; эффективная масса = 0.139735E-09</p>	+
		 <p>$f_{y8}= 165839$ Гц ratio eff. mass to total mass = 0.686145E-13; эффективная масса = 0.165239E-20</p>	= y
Ось Z			
 <p>$f_{z1}=5099.48$ Гц ratio eff. mass to total mass = 0.993056; эффективная масса = 0.237008E-06</p>	+	 <p>$f_{z8}= 25000.7$ Гц ratio eff. mass to total mass = 0.478102E-06; эффективная масса = 0.114107E-12</p>	+
		 <p>$f_{z5}= 8078.34$ Гц ratio eff. mass to total mass = 0.148345E-06; эффективная масса = 0.148345E-06</p>	= z

Структурное перемещение сенсора в направлении оси Z в основном определяется модой колебаний с частотой $f_{z1}=5099.48$ Гц (отношение эффективной массы к общей массе составляет 0,993056), вклад остальных мод на несколько порядков меньше (отношение эффективной массы к общей массе составляет $0.478102E-06$ и $0.148345E-06$). Структурное перемещение инерционного тела в направлении оси X в основном определяется модой колебаний с частотой $f_{1x}=5032,57$ Гц, для которой отношение эффективной массы к общей массе составляет 0.983606, вклад остальных мод на несколько порядков меньше.

Структурное перемещение инерционного тела в направлении оси Y в основном определяется модой колебаний с частотой $f_{y1}=5034,36$ Гц, для которой отношение эффективной массы к общей массе составляет 0.983606, вклад остальных мод на несколько порядков меньше. Для повышения точности системного моделирования информативного движения гироскопа в его движении по осям X и Y учтём ещё девятую моду, для которой отношение эффективной массы к общей массе составляет 0.0266994 и $0.644596E-02$, соответственно.

Редуцированная система при составлении макромодели гироскопа будет содержать одну моду колебаний по оси Z и по две моды колебаний механического домена по осям X , Y . Возбуждение первичных колебаний гироскопа осуществляется на частоте f_{z1} .

В этом случае динамика механического домена гироскопа определяется уравнениями

$$\begin{aligned}
 m_{1i}\ddot{y}_i + \mu_{yi}\dot{y}_i + \frac{\partial \Pi_{yi}}{\partial y_i} - \frac{1}{2} \sum_{n=6,7,8,9} \frac{\partial C_{1n}}{\partial y_i} (V_n - V_1)^2 &= 2m_{1i}\Omega_x \dot{z} - m_{1i}z\Omega_y\Omega_z + m_{1i}a_y \ddot{e} \\
 m_{2i}\ddot{x}_i + \mu_{xi}\dot{x}_i + \frac{\partial \Pi_{xi}}{\partial x_i} - \frac{1}{2} \sum_{n=2,3,4,5} \frac{\partial C_{1n}}{\partial x_i} (V_n - V_1)^2 &= -2m_{2i}\Omega_y \dot{z} - m_{2i}z\Omega_x\Omega_z + m_{2i}a_x, \quad (4.15) \\
 m_3\ddot{z} + \mu_z\dot{z} + \frac{\partial \Pi_z}{\partial z} - \frac{1}{2} \frac{\partial C_{14}}{\partial z} (V_{14} - V_1)^2 &= -2m_{1i}\Omega_x \dot{y}_i + 2m_{2i}\Omega_y \dot{x}_i - m_{2i}x_i\Omega_x\Omega_z - \\
 - m_{1i}y_i\Omega_y\Omega_x + m_3a_z, &
 \end{aligned}$$

где номер моды $i = 1, 9$; Π_i – потенциальная энергия i -ой моды деформации сенсора гироскопа. В первых двух уравнениях силы Кориолиса $2m_{1i}\Omega_x\dot{z}$, $-2m_{2i}\Omega_y\dot{z}$ являются полезными, все остальные слагаемые в правых частях уравнений характеризуют помехи. В третьем уравнении первичных колебаний сенсора все слагаемые в правой части определяют помехи, вызывающие отклонения амплитуды первичных колебаний от требуемого постоянного значения. Для реализации системной модели механического домена в статическом КЭ анализе рассчитывается энергия деформации сенсора для первой и девятой мод колебаний, аппроксимирующие функции которых имеют вид

$$\begin{aligned}\Pi_{y1} &= -2,0506 \cdot 10^{-21} + 4,8722 \cdot 10^{-15} \cdot y_1 + 10,5813 \cdot y_1^2. \\ \Pi_{y9} &= 4,0854 \cdot 10^{-20} - 7,7027 \cdot 10^{-14} \cdot y_9 + 176,4696 \cdot y_9^2. \\ \Pi_{x1} &= -2,0506 \cdot 10^{-21} + 4,8722 \cdot 10^{-15} \cdot x_1 + 10,5813 \cdot x_1^2. \\ \Pi_{x9} &= 4,0854 \cdot 10^{-20} - 7,7027 \cdot 10^{-14} \cdot x_9 + 176,4696 \cdot x_9^2. \\ \Pi_z &= 6,5934 \cdot 10^{-17} + 1,2023 \cdot 10^{-11} \cdot z + 113,3330 \cdot z^2.\end{aligned}\tag{4.16}$$

Межэлектродные ёмкости связывают механическое и электрическое взаимодействие в системе через систему измерения скоростей (СИС), систему возбуждения первичных колебаний (СВПК) и систему коррекции вторичных колебаний (СКВК). Ток I_j через электрод j определяется количеством заряда Q_j , протекающим по нему в единицу времени, и может быть вычислен по формуле

$$I_j = \frac{\partial Q_j}{\partial t} = \sum_r [\sum_n (\frac{\partial C_{1n}}{\partial q_i} \dot{q}_i)(V_n - V_1) + C_{1n} \frac{\partial}{\partial t} (V_n - V_1)],\tag{4.17}$$

где V_n, V_1 – электрические потенциалы на обкладках электродов; $q_i = x, y, z$. Для того чтобы учесть поля рассеяния гребенчатых структур, ёмкости вычисляются по серии электростатических вычислений с помощью МКЭ и определяются выражениями

$$\begin{aligned}C_{12}(x, z) = C_{16}(x, z) &= 1,2202982 \cdot 10^{-12} - 2,7877215 \cdot 10^{-8} \cdot x + \\ &+ 0,00074150481 \cdot x^2 - 5,3007837 \cdot 10^{-8} \cdot |z| - 0,014803347 \cdot |z|^2 - \\ &- 5,7327099 \cdot |z|^{2.5} + 635,10349 \cdot |z|^3\end{aligned}\tag{4.18}$$

$$C_{15}(x, z) = C_{19}(x, z) = 1,2202982 \cdot 10^{-12} + 2,7877215 \cdot 10^{-8} \cdot x - \\ -0,00074150481 \cdot x^2 - 5,3007837 \cdot 10^{-8} \cdot |z| - 0,014803347 \cdot |z|^2 - \\ -5,7327099 \cdot |z|^{2,5} + 635,10349 \cdot |z|^3 \quad (4.19)$$

$$C_{110}(z) = C_{111}(z) = 6,1087612 \cdot 10^{-12} - 4,9803599 \cdot 10^{-7} \cdot |z| + \\ +0,00030856515 \cdot |z|^{1,5} - 0,087179555 \cdot |z|^2 + 8,5812791 \cdot |z|^{2,5} \quad (4.20)$$

$$C_{114}(z) = 0,40493 \cdot 10^{-12} - 7,5639 \cdot 10^{-9} \cdot z + 0,000176511 \cdot z^2 - \\ -3,94663270 \cdot z^3 \quad (4.21)$$

$$C_{13}(x, z) = C_{17}(x, z) = 1,4975 \cdot 10^{-12} - 1,4764 \cdot 10^{-8} \cdot x + \\ +6,62494 \cdot 10^{-5} \cdot x^2 - 1,3194432 \cdot 10^{-7} \cdot |z| + 8,9347898 \cdot 10^{-5} \cdot |z|^{1,5} - \\ -0,027033632 \cdot |z|^2 + 2,8472466 \cdot |z|^{2,5} \quad (4.22)$$

$$C_{14}(x, z) = C_{18}(x, z) = 1,4975 \cdot 10^{-12} + 1,4764 \cdot 10^{-8} \cdot x - \\ -6,62494 \cdot 10^{-5} \cdot x^2 - 1,3194432 \cdot 10^{-7} \cdot |z| + 8,9347898 \cdot 10^{-5} \cdot |z|^{1,5} - \\ -0,027033632 \cdot |z|^2 + 2,8472466 \cdot |z|^{2,5} \quad (4.23)$$

Уравнения 4.15 - 4.23 определяют макро модель, которая описывает нелинейную динамическую микро механическую систему с электростатическим управлением. На каждую моду i и каждую электродную структуру j приходится по одному уравнению.

4.3.2 Результаты обработки данных, полученных при моделировании микро гироскопа, рекомендации по созданию прототипа тестовой структуры

4.3.2.1 Макро модель гироскопа в Simulink

Используя уравнения 4.15, 4.16, 4.17 и рассчитанные ёмкости электродных структур (уравнения 4.18-4.23), можно решить их в схемотехническом пакете. На рисунке 4.62. изображена общая модель микро гироскопа, моделирующая уравнения 4.15-4.23, которые описывают динамику механического и электрического домена.

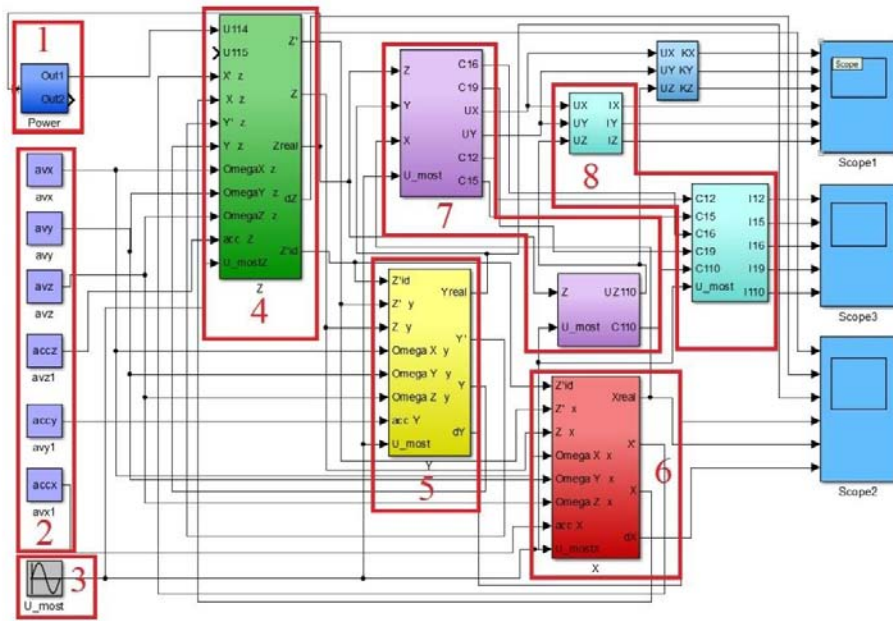


Рисунок 4.62 – Общая модель микрогироскопа

На рисунке 4.62 обозначено: 1 – экстремальная система управления первичными колебаниями гироскопа; 2 – источники возмущающих воздействий; 3 – источник напряжения для съема информации с измерительных мостов; 4 – канал первичных колебаний гироскопа по оси Z; 5 – канал вторичных колебаний по оси Y для измерения угловой скорости Ω_x ; 6 – канал вторичных колебаний по оси X для измерения угловой скорости Ω_y ; 7 – подсистема измерительного моста; 8 – подсистема расчета выходных токов.

Расчёт вектора сил упругости производился на каждом временном шаге. Связь между механическим и электрическим доменами осуществляется посредством вектора электростатических сил, вызванного вектором модальных перемещений z . Вектор электростатических сил прикладывается через сумматор к механическому домену. Моделирование проводилось в несколько этапов, от моделирования отдельных частей к моделированию всей системы. Вначале проведено моделирование механического домена в соответствии с уравнениями 4.15, 4.16 совместно с системой возбуждения первичных колебаний.

4.3.2.2 Система возбуждения первичных колебаний

Первая задача состояла в создании амплитуды колебаний рамки по оси Z до величины не менее 15 мкм. Моделирование проводилось с разными законами

изменения входного сигнала вибропривода. Все помехи, обусловленные движением основания, не рассматривались.

На рисунке 4.63 приведена подсистема канала первичных колебаний. На рисунке обозначено: 1 – подсистема расчета энергии деформации в соответствии с уравнениями 4.16 для канала по оси Z. 2 – подсистема расчета электростатической силы в соответствии с функциями изменения емкости C_{114} ; 3 – подсистема вносимых помех, обусловленных механическими возмущениями; 4 – подсистема вносимых помех, обусловленных электрическими возмущениями; 5 – идеальная система возбуждения первичных колебаний.

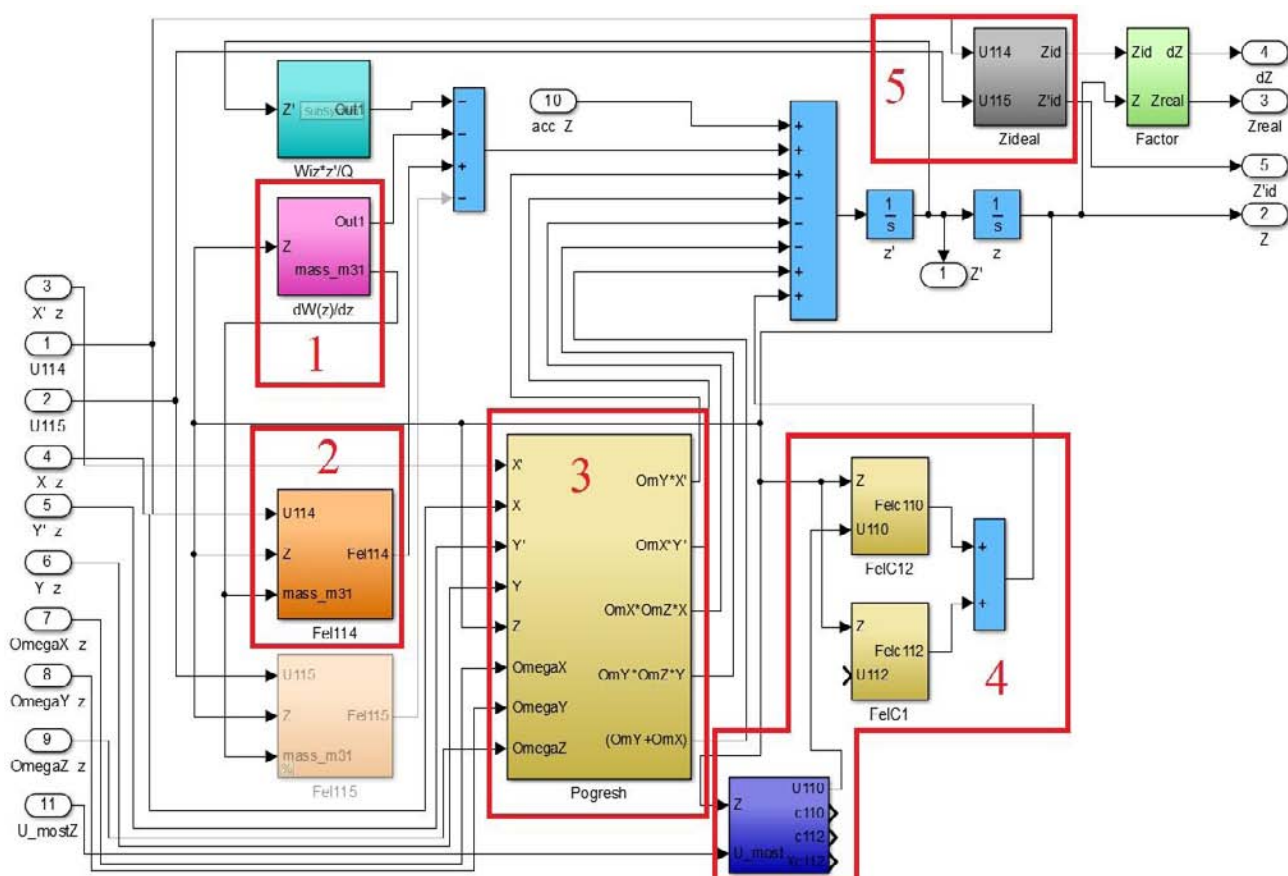


Рисунок 4.63 - Подсистема канала первичных колебаний.

Первый закон управляющего напряжения вибропривода: $U_{\text{вх}} = U_{114} = U_{\approx}$,

где U_{\approx} представляет собой напряжение прямоугольной формы. Результаты моделирования первичных колебаний гироскопа представлены на рисунке 4.64. Частота входного напряжения совпадает с собственной частотой внешней рамки. Добротность первичного канала $Q = 700$.

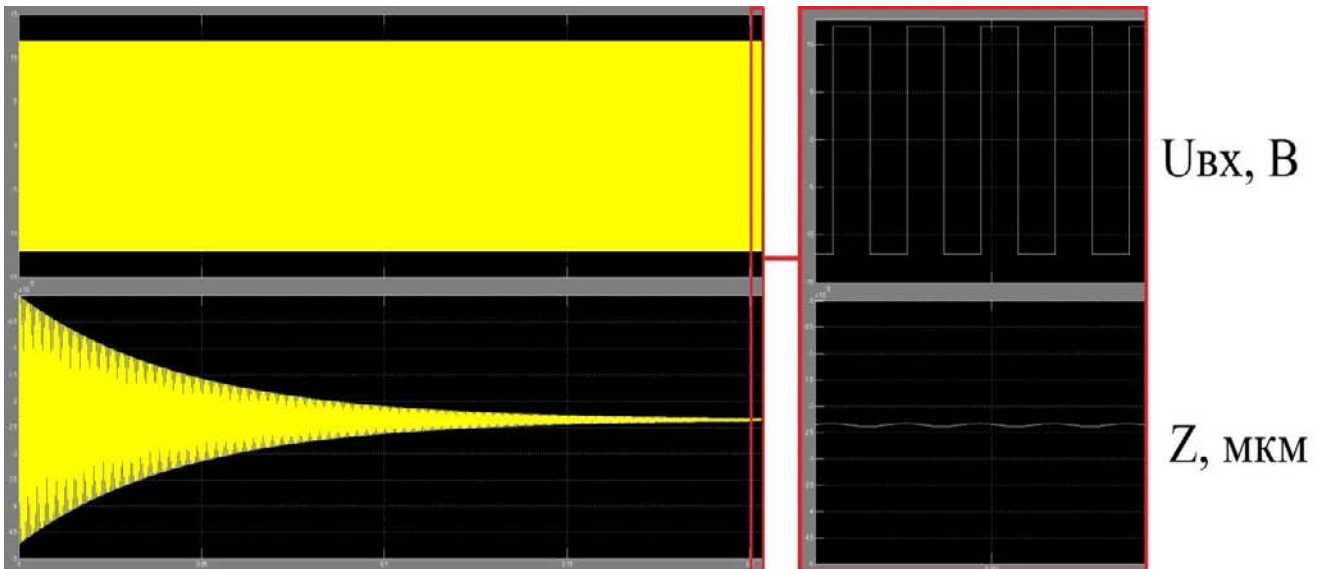


Рисунок 4.64 – Первичные колебания рамки

Как видно из результатов моделирования, при входном напряжении ± 12 В амплитуда первичных колебаний не достигает заданного значения, следовательно, необходимо рассмотреть другие законы возбуждения.

Второй закон управляющего напряжения вибропривода:

$U_{вх} = U_{11} = U_0 + U_{\sim}$, постоянное смещение относительно нуля $U_0 = 24$ В; $U_{\sim} = U_m \sin \omega t$; $U_m = 12$ В. Результаты моделирования представлены на рисунке 4.65.

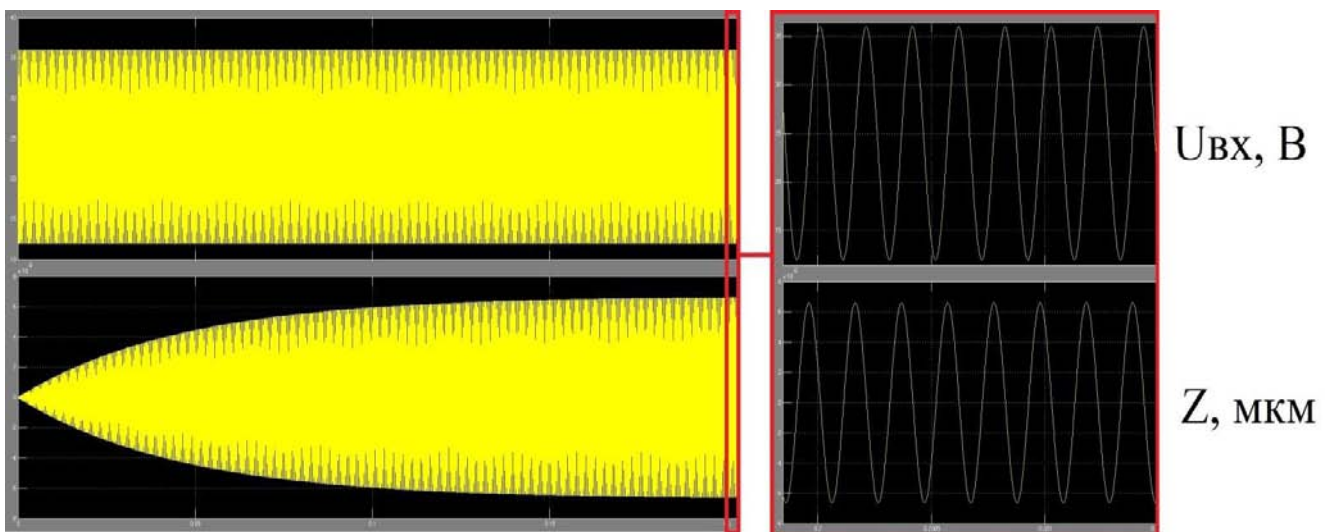


Рисунок 4.65 – Первичные колебания рамки

При таком законе возбуждения рамка раскачивается до амплитуды 7 мкм.

Третий закон управляющего напряжения вибропривода:

$U_{вх} = U_{114} = U_0 + U_{\approx}$, постоянное смещение относительно нуля $U_0 = 24$ В; $U_{\approx} = \pm 12$ В и представляет собой напряжение прямоугольной формы. Результаты приведены на рисунке 4.66.

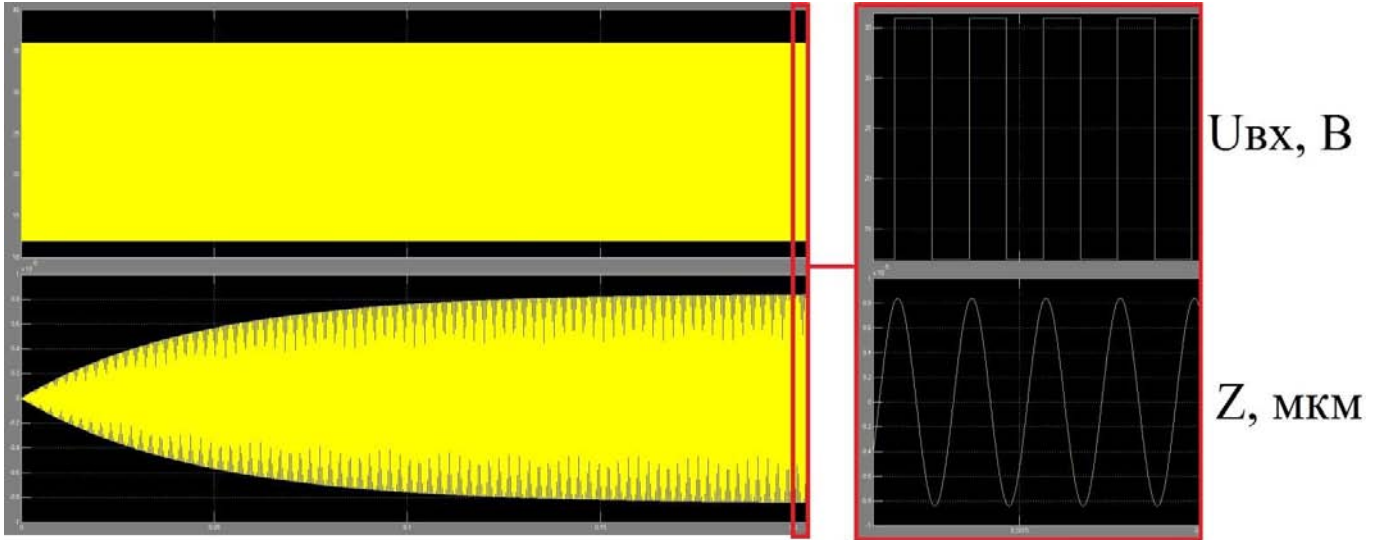


Рисунок 4.66 – Перемещение рамки по оси Z

При тех же параметрах входного напряжения амплитуда перемещения рамки по оси Z возросла до 9 мкм, следовательно, такой закон является наиболее подходящим. Для раскачки рамки до требуемой амплитуды в 15 мкм требуется напряжение $U_0 = 32$ В; $U_{\approx} = \pm 16$ В.

4.3.2.3 Определение напряжения «слипания»

Важным шагом для планарного вибропривода, является определения напряжения «слипания», при котором электростатические силы превысят силы упругости и сенсор потеряет работоспособность [37]. Функция емкости 4.11, не подходит для расчета напряжения слипания, так как она справедлива только на рабочем участке перемещения рамки в пределах ± 15 мкм. С учетом полного диапазона перемещения рамки она имеет вид

$$C(z) = \exp\left(\frac{-28,5338315 - 1,0373 \cdot 10^6 \cdot z - 9,1172 \cdot 10^9 \cdot z^2}{1 + 35697,59147 \cdot z + 3,0367 \cdot 10^8 \cdot z^{2,5} - 5,2749 \cdot 10^{10} \cdot z^3}\right) \quad (4.24)$$

Напряжение слипания рассчитывается с учетом динамики, изначально рамка выводится на рабочий режим, а затем напряжение возбуждения линейно повышается в пропорциональной зависимости. Результаты моделирования

приведены на рисунке 4.69. Слипание электрода происходит при напряжении $U_0 = 50 \text{ В}$; $U_{\approx} = \pm 25 \text{ В}$.

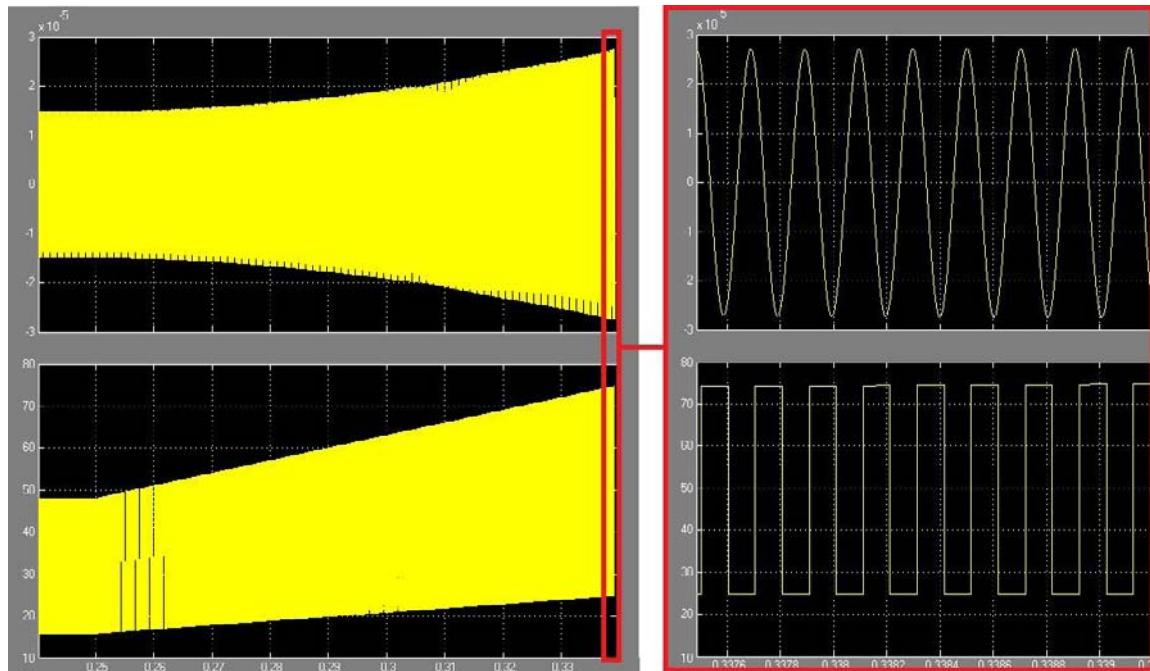


Рисунок 4.67 – Результаты моделирования напряжения слипания.

4.3.2.4 Моделирование идеальной системы

Вторым этапом является моделирование работы идеальной системы в соответствии с уравнениями 4.15, 4.16 без учета помех. В систему вводятся уравнения по осям X , Y для определения скоростей Ω_y , Ω_x . Поскольку каналы измерения абсолютно идентичны, то моделирование будет показано на примере канала определения скорости Ω_y .

На рисунке 4.68 приведена подсистема канала вторичных колебаний по оси X для измерения угловой скорости Ω_y . Для канала измерения угловой скорости Ω_x структура будет аналогичной.

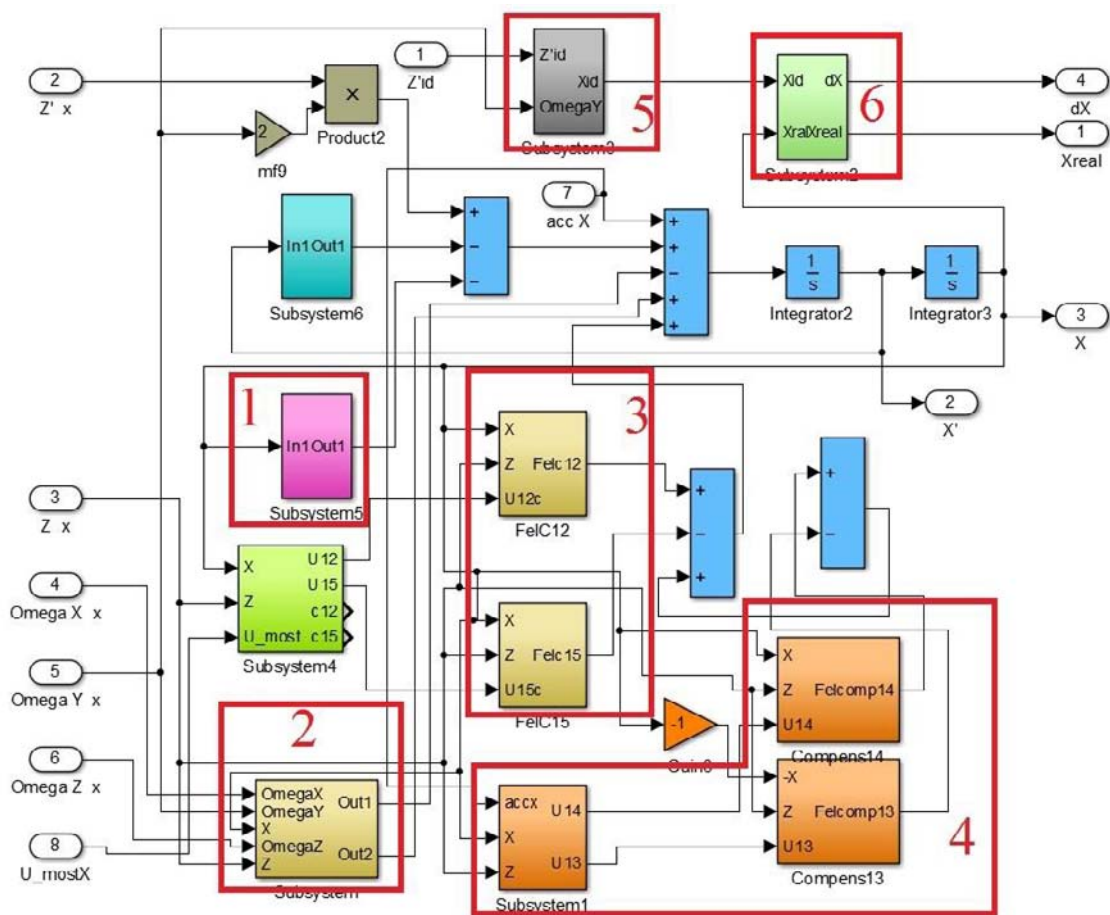


Рисунок 4.68 – Подсистема измерения угловой скорости Ω_y .

На рисунке 4.68 обозначено: 1 – подсистема расчета энергии деформации в соответствии с уравнениями 4.16 для канала по оси X; 2 – подсистема помех, обусловленных механическими возмущениями; 3 – подсистема помех, обусловленных электрическими возмущениями; 4 – подсистема корректирующих устройств для компенсации погрешностей; 5 – идеальная система возбуждения первичных колебаний; 6 – подсистема перевода модальных перемещений в структурные.

Поскольку по каждой из осей информативных колебаний учитываются по две моды собственных колебаний, то уравнения 4.15, 4.16 решаются для двух мод. В качестве примера на рисунке 4.69 приведена реализация параллельного вычисления энергии деформации для 1 и 9 моды.

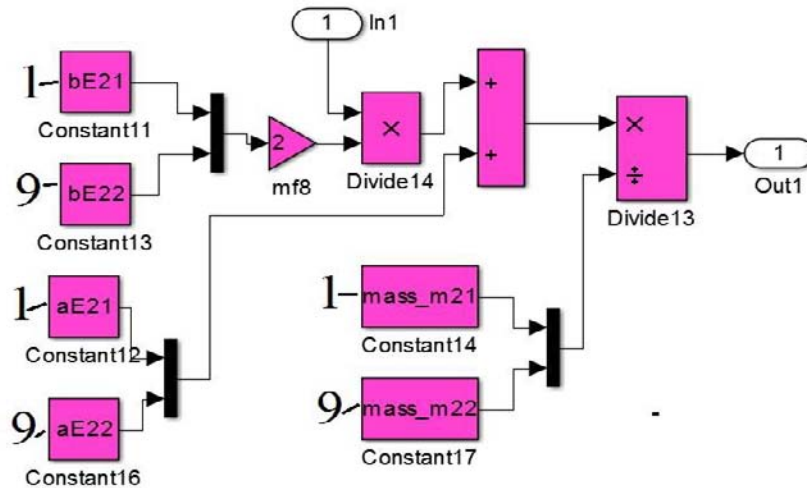


Рисунок 4.69 – Подсистема расчета энергии деформации для двух мод

На выходе канала по оси X получаются модальные перемещения, но фактический интерес представляют именно геометрические перемещения. Переход от модальных перемещений к геометрическим осуществляется разделением сигнала и произведением каждого на соответствующие модальные факторы. Сумма этих сигналов с учетом факторов дает структурное перемещение. Подсистема перехода из модальных координат в геометрические представлена на рисунке 4.70.

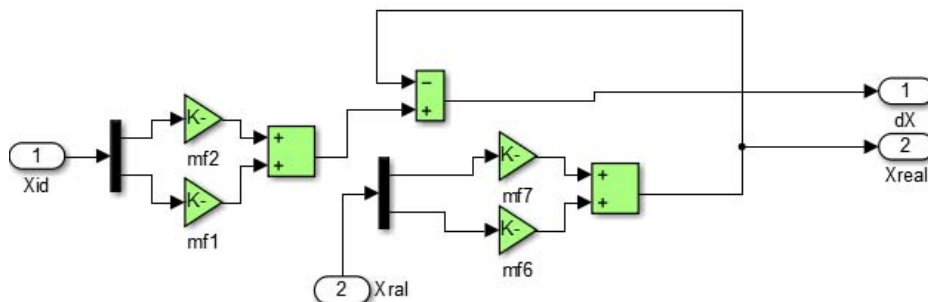
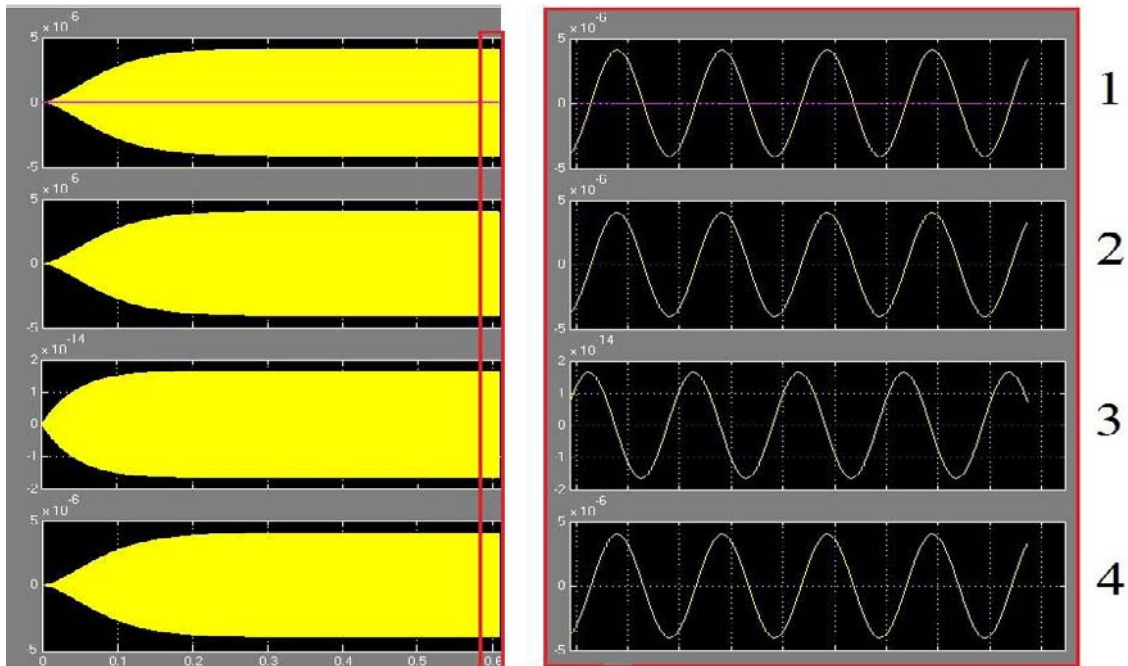


Рисунок 4.70 – Подсистема перехода от модальных координат к геометрическим

Сигнал на выходе канала по оси X представлен на рисунке 4.71.



- 1 – модальные перемещения 1 и 9 моды, идущие по одному «проводу»;
- 2 – модальные перемещения 1 моды; 3 – модальные перемещения 9 моды;
- 3 – структурное перемещение сенсора

Рисунок 4.71 – Модальные и структурные перемещения сенсора по оси X

Как видно из рисунка 4.71 подавляющий вклад в общее перемещение вносит 1 мода, модальное перемещение 9 моды отличается на восемь порядков.

АЧХ микрогироскопа представлена на рисунке 4.72.

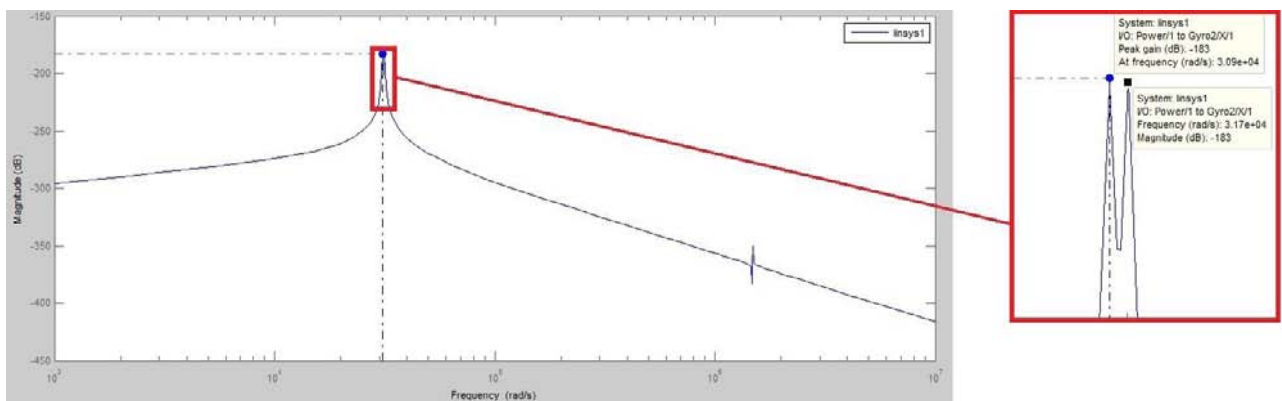


Рисунок 4.72 – АЧХ сенсора

АЧХ имеет три, соответствующие собственным частотам первичных и вторичных колебаний. Первые два максимума соответствуют первым модам первичных и вторичных колебаний. Третий пик – девятой моды вторичных колебаний.

Перемещение рамки преобразуется в выходное напряжение с помощью измерительного моста (рисунок 4.73).

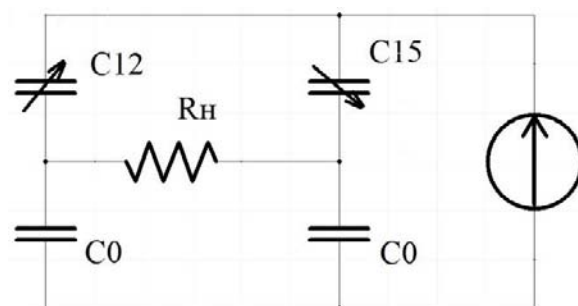


Рисунок 4.73 – Измерительный мост

При расчете напряжения на выходе моста не учитываются помехи, вызванные электронной частью системы, сопротивление нагрузки принимается равным бесконечности. На мост подается синусоидальное напряжение амплитудой 1 В с частотой 100 кГц. Рассчитанные значения выходного напряжения при различных скоростях Ω_y , Ω_x от 0 до 6 рад/с представлены на рисунке 4.74.

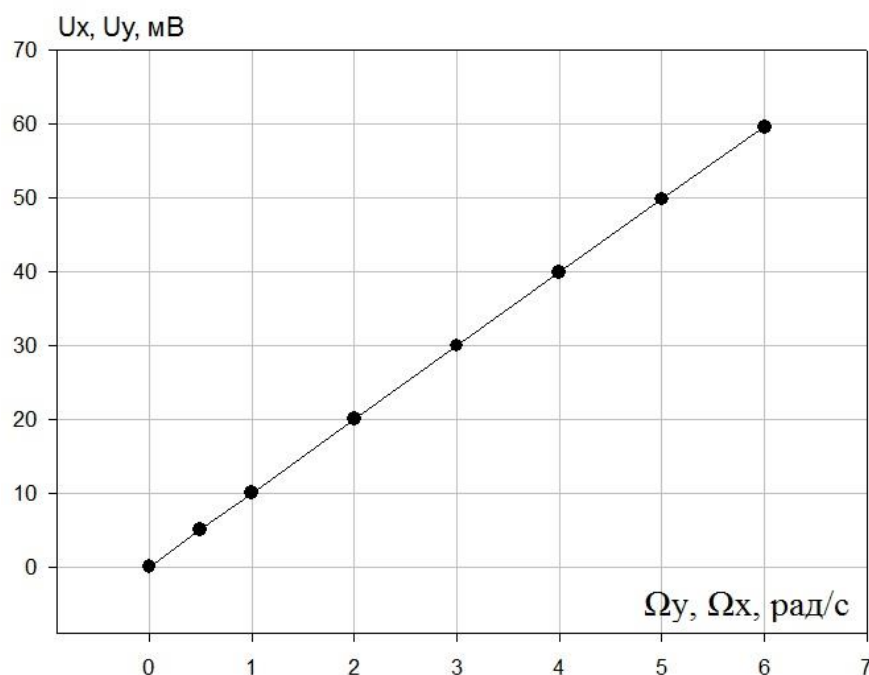


Рисунок 4.74 – Выходное напряжение измерительного моста в зависимости от угловых скоростей Ω_y , Ω_x .

Ёмкости измерительного моста зависят от перемещений сенсора по осям X и Z (формулы 4.18, 4.19, рисунок 4.75).

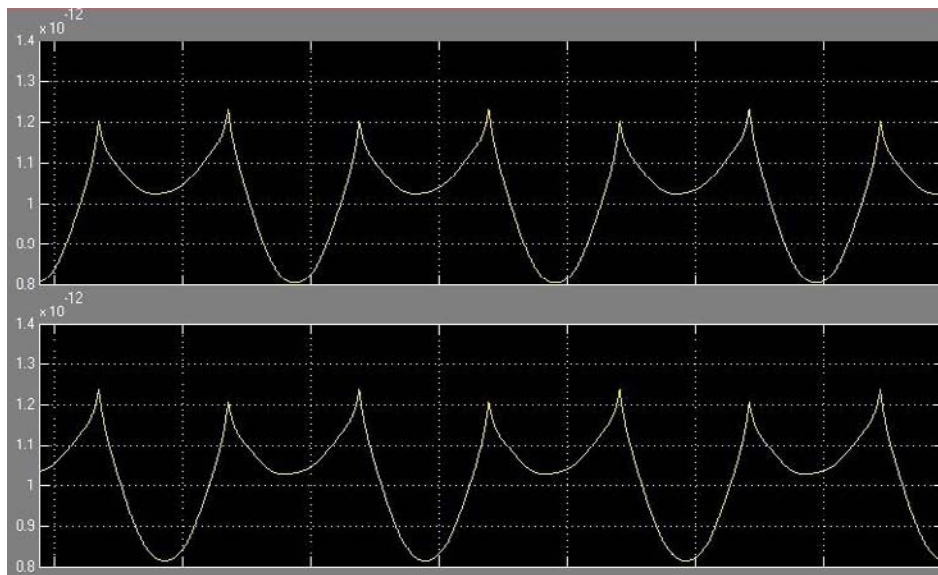


Рисунок 4.75 – Изменения емкостей C_{12} и C_{15}

Поскольку перемещения емкостей C_{12} и C_{15} по оси Z происходит синхронно, то последнее в составе измерительного моста не будет вносить никаких изменений. При угловых скоростях равных нулю, измерительный мост будет оставаться в режиме баланса, а при перемещении рамки вдоль оси X , мост будет чувствовать только составляющую этого перемещения. Сигнал на выходе измерительного моста по оси X приведен на рисунке 4.76.

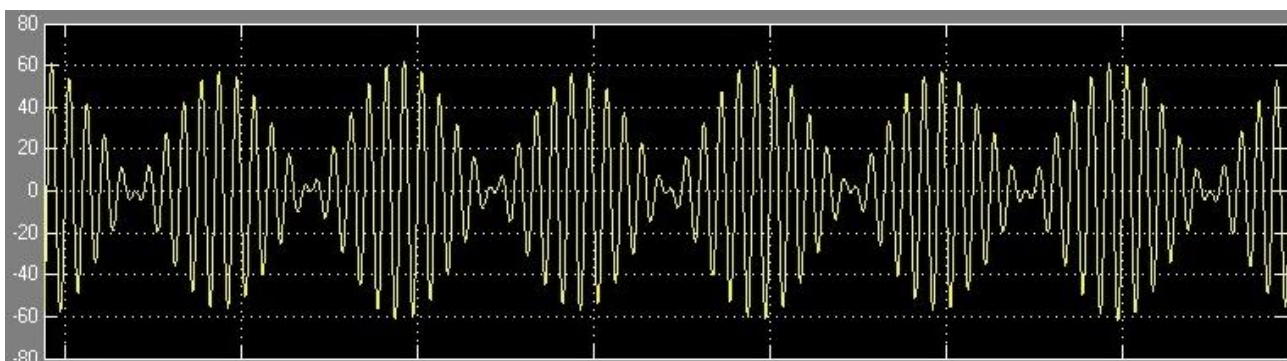


Рисунок 4.76 – Сигнал на выходе измерительного моста

4.3.2.5 Расчет погрешностей из-за перекрестных связей между осями сенсора

Наличие помех из-за перекрёстного влияния между каналами первичных и информативных колебаний приводит к нестабильности амплитуды первичных колебаний, что, в свою очередь, вызывает изменение механических коэффициентов передачи сенсора и появляются погрешности информативного

движения (рисунок 4.77) [50]. Этим подтверждается необходимость наличия в гироскопе системы управления первичными колебаниями.

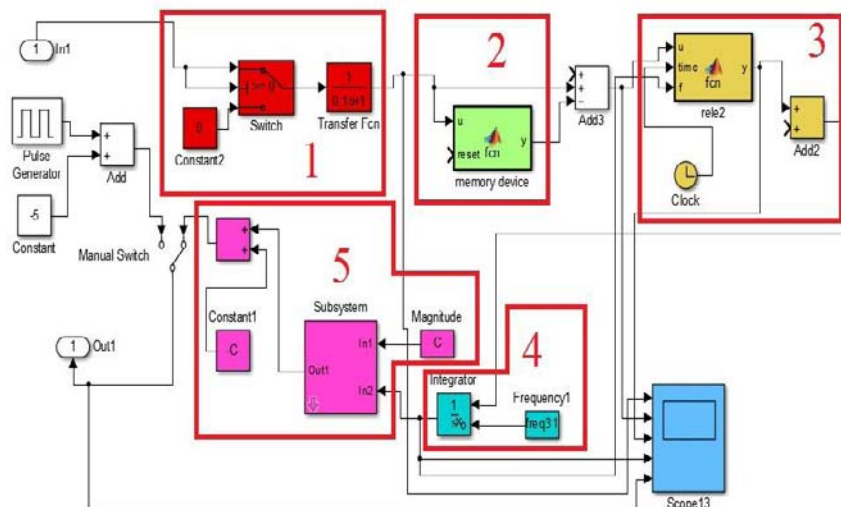


Рисунок 4.77 – Система управления первичными колебаниями

На рисунке 4.77 обозначено: 1 – амплитудный детектор; 2 – запоминающее устройство; 3 – регулятор, формирующий закон управления; 4 – интегратор; 5 – генератор управляемый напряжением (ГУН).

Было проведено моделирование системы с учетом влияния перекрестных связей без системы стабилизации амплитуды первичных колебаний, рассчитана относительная погрешность информативных колебаний в сравнении с идеальной системой. Относительная погрешность первичных колебаний представлена на рисунке 4.78. График зависимости относительной погрешности информативных колебаний показан на рисунке 4.78.

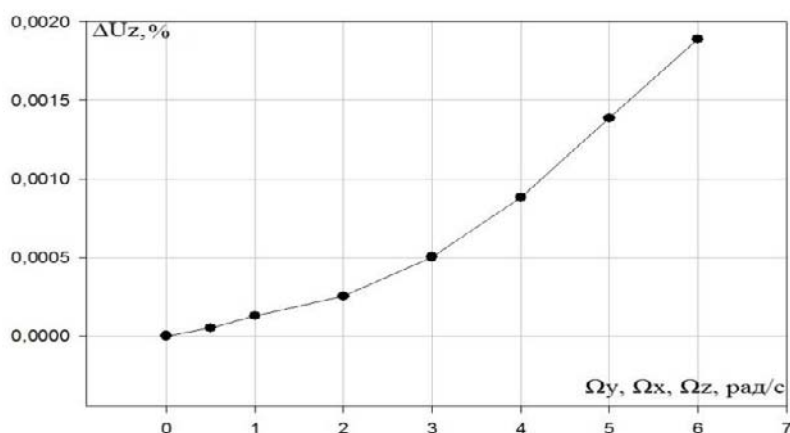


Рисунок 4.78 – Относительная погрешность первичных колебаний с учетом перекрестных связей

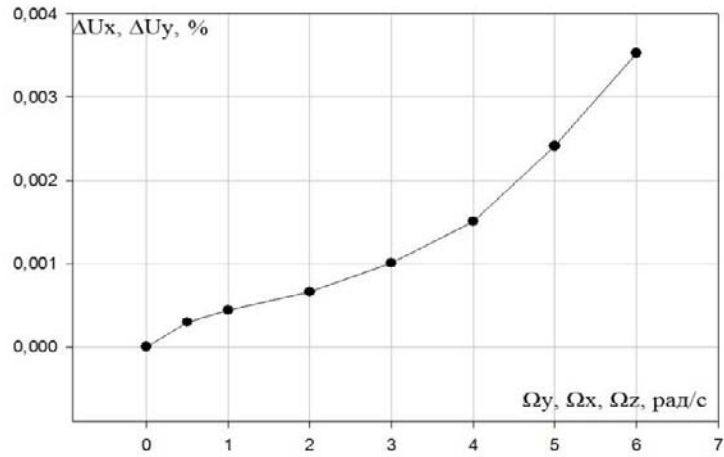


Рисунок 4.78 – Относительная погрешность информативных колебаний с учетом перекрестных связей

Относительная погрешность информативных колебаний при наличии системы стабилизации первичных колебаний представлена на рисунке 4.80. В данной задаче система стабилизации была принята идеальной.

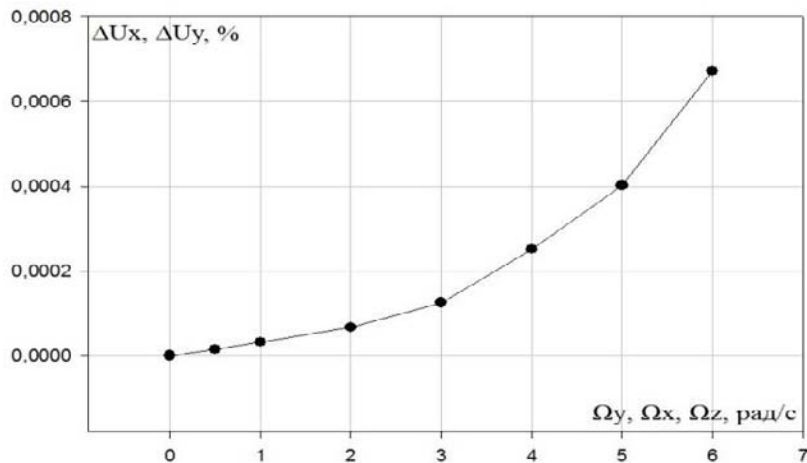


Рисунок 4.80 – Относительная погрешность информативных колебаний при наличии системы стабилизации

Как видно из графиков, представленных на рисунках 4.79, 4.80, с применением системы стабилизации амплитуды первичных колебаний относительная погрешность определения угловой скорости уменьшилась в пять раз.

4.3.2.6 Влияние ускорения поступательного движения объекта

Расчет погрешностей, вызванных ускорением является важным этапом. Под воздействием ускорения изменяются начальные емкости гребенчатых структур, следовательно, измерительный мост выходит из состояния баланса и появляется нулевой сигнал, при отсутствии угловых скоростей объекта. Зависимость нулевого сигнала от ускорения представлена на рисунке 4.81. Погрешность вызванная ускорением объекта представлена на рисунке 4.82. Угловая скорость задавалась по всем осям одинаковая и принималась равной 6 рад/с.

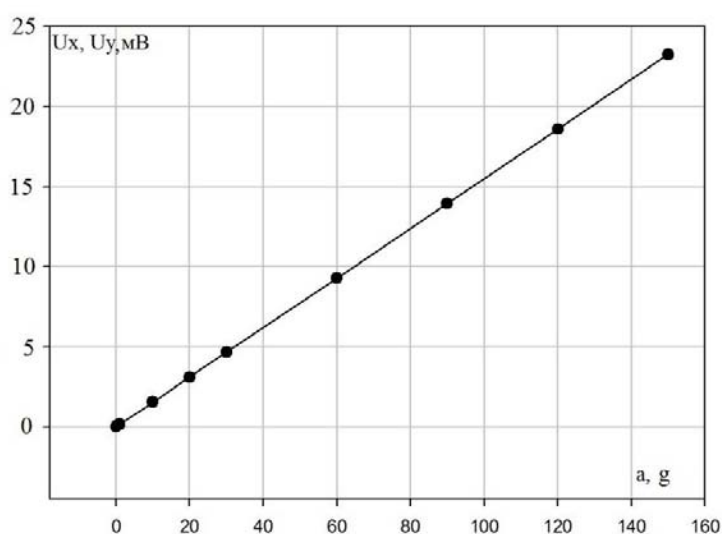


Рисунок 4.81 – Зависимость нулевого сигнала от ускорения

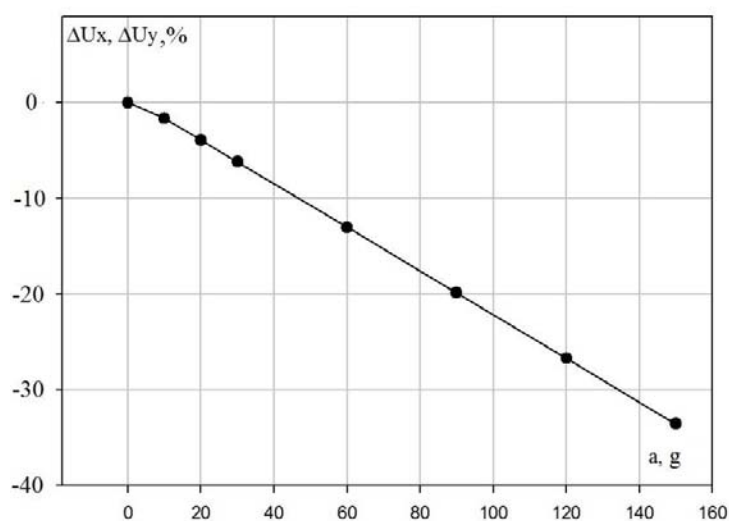


Рисунок 4.82 – Погрешность по информативным осям, вызванная ускорением

Как видно из графика на рисунке 4.82 погрешность, обусловленная ускорением объекта составляет порядка 40%, что является неприемлемым. Для того чтобы компенсировать данную погрешность применяется корректирующее устройство, пример приведен для информативной оси X.

На емкости C_{13} и C_{14} подается постоянное напряжение, пропорциональное ускорению a (рисунок 4.83).

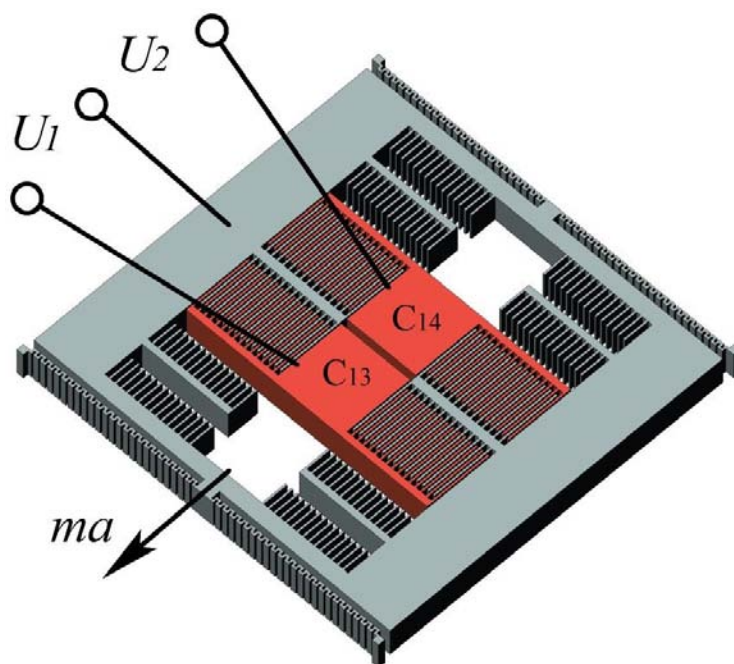


Рисунок 4.83 – Напряжения на обкладках гребенчатых структур

Сумма электростатических сил создаваемых источниками напряжения должна уравновешивать силу, вызванную ускорением объекта

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{\partial C_{13}}{\partial z} \cdot U_1^2 - \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial C_{14}}{\partial z} \cdot U_2^2 = m \cdot a$$

Напряжения, подаваемые на обкладки конденсатора

$$U_1 = U_0 + \Delta U(a)$$

$$U_2 = U_0 - \Delta U(a)$$

Поскольку $\frac{\partial C_{13}}{\partial z} = \frac{\partial C_{14}}{\partial z}$ отсюда следует

$$\Delta U(a) = \frac{m \cdot a}{2 \cdot U_0 \cdot \frac{\partial C}{\partial z}}$$

Нулевой сигнал при работе системы компенсации погрешностей, вызванных ускорением, показан на рисунке 4.84.

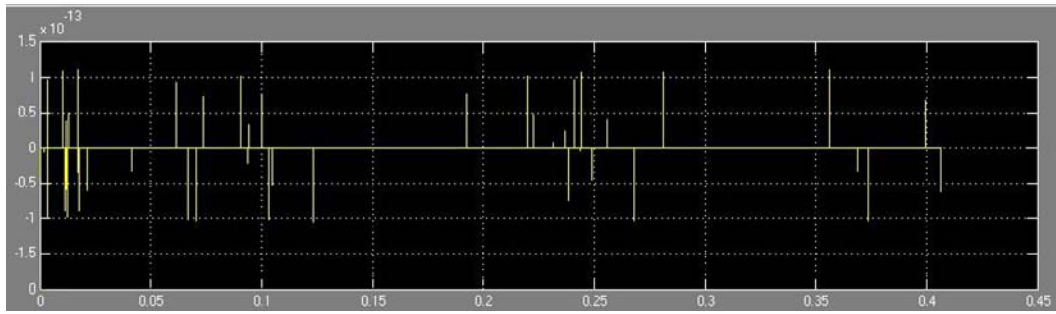


Рисунок 4.84 – Нулевой сигнал при работе системы коррекции

Как видно из рисунка 4.84 нулевой сигнал на выходе моста составляет 10^{-13} мВ. Ускорение, необходимое для расчёта компенсирующих напряжений, измеряется трёхкомпонентным акселерометром, входящим в состав многокомпонентной системы.

4.3.2.7 Погрешности, вызванные съёмом сигнала

Поскольку при съеме сигнала с гребенчатых структур подается синусоидальное напряжение на обкладки конденсаторов, то возникают электростатические силы, которые вносят дополнительную погрешность в выходной сигнал. Для расчета все остальные помехи принимаются равными нулю, добавляется только электростатические силы, вызванные съемом сигнала с гребенчатых структур. Напряжение подаваемое на обкладки – синусоидальное амплитудой 1В и частотой 100 кГц. Зависимость погрешности в информативном сигнале от угловой скорости представлена на рисунке 4.85.

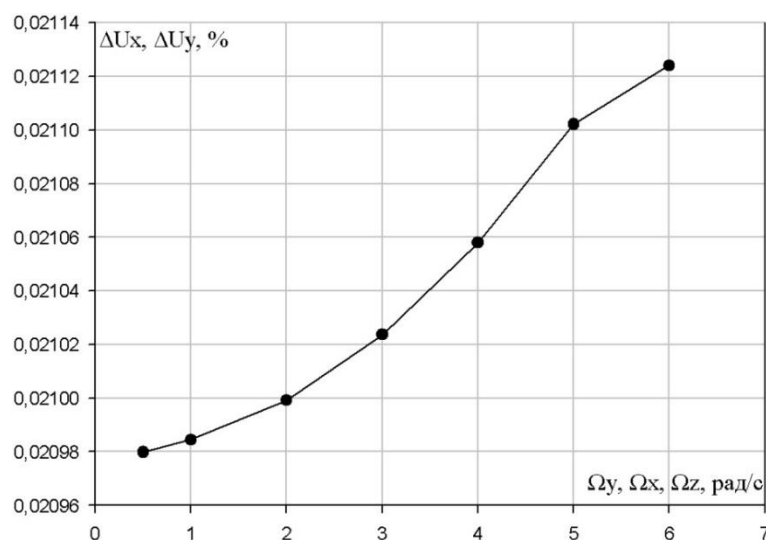


Рисунок 4.85 – Погрешность, вносимая электростатическими силами при съеме сигнала

Как видно из графика на рисунке 4.85 погрешность, вносимая электростатическими силами носит практически постоянный характер, следовательно ее можно компенсировать с помощью введения поправок на выходной сигнал.

Таким образом параметрическая модель гироскопа извлекается из КЭ анализа и геометрические параметры могут быть эффективно сохранены, используя метод модальных суперпозиций. Используя параметры, полученные из КЭ, строится системная модель гироскопа, по которой определяются его статические и динамические характеристики при различных параметрах входных воздействий.

Для того, чтобы верифицировать параметрическую макромодель, необходимо изготовить тестовую структуру сенсора гироскопа в соединении с электроникой. Комплексное моделирование характеристик, основанное на параметрической макромодели представляет хорошую платформу для проектирования МЭМС устройств. Особенности конструкций МЭМС устройств определяются технологией их изготовления. В основу разработанных конструкций гироскопа, акселерометра и резонатора была заложена технология BDRIE процесса. Эскизный технологический процесс их изготовления представлен в приложении В. Необходимые для изготовления топологические чертежи фотошаблонов в GDSII формате представлены в приложении Б.

5 Макромодель микроакселерометра

5.1 Структурная схема микроакселерометра

При разработке геометрии многокомпонентной микросистемы было определено условие, чтобы она состояла из унифицированных сенсоров, которые изготавливаются одновременно на кремниевой пластине. Исходя из этого, сенсоры гироскопа и акселерометра имеют одинаковую конструкцию, и структурная схема акселерометра имеет вид, представленный на рисунке 5.1.

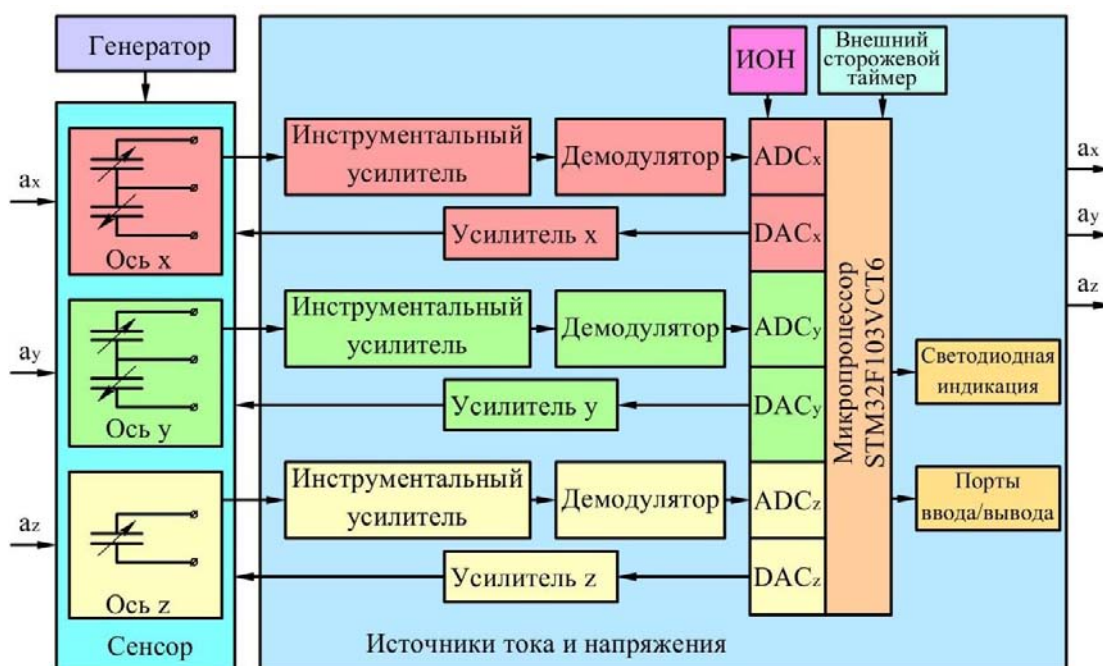
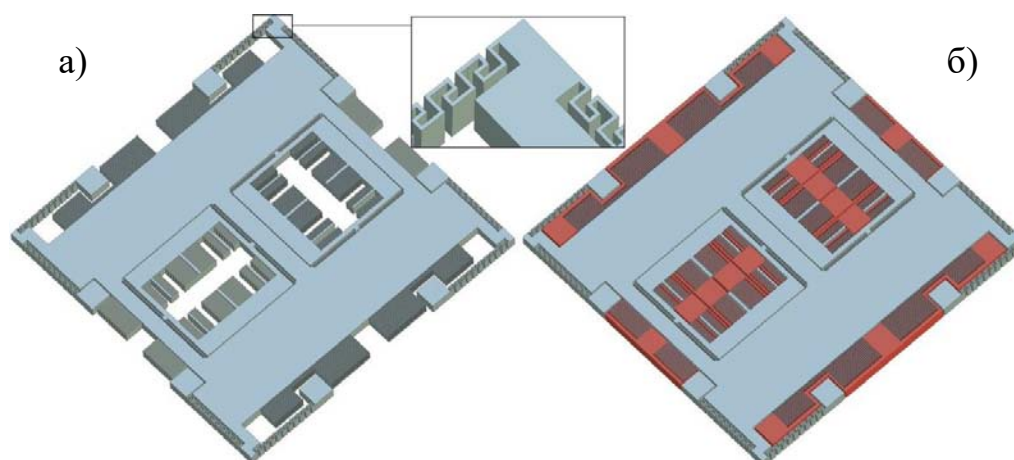


Рисунок 5.1 – Структурная схема акселерометра

Сенсор акселерометра изображён на рисунке 5.2.



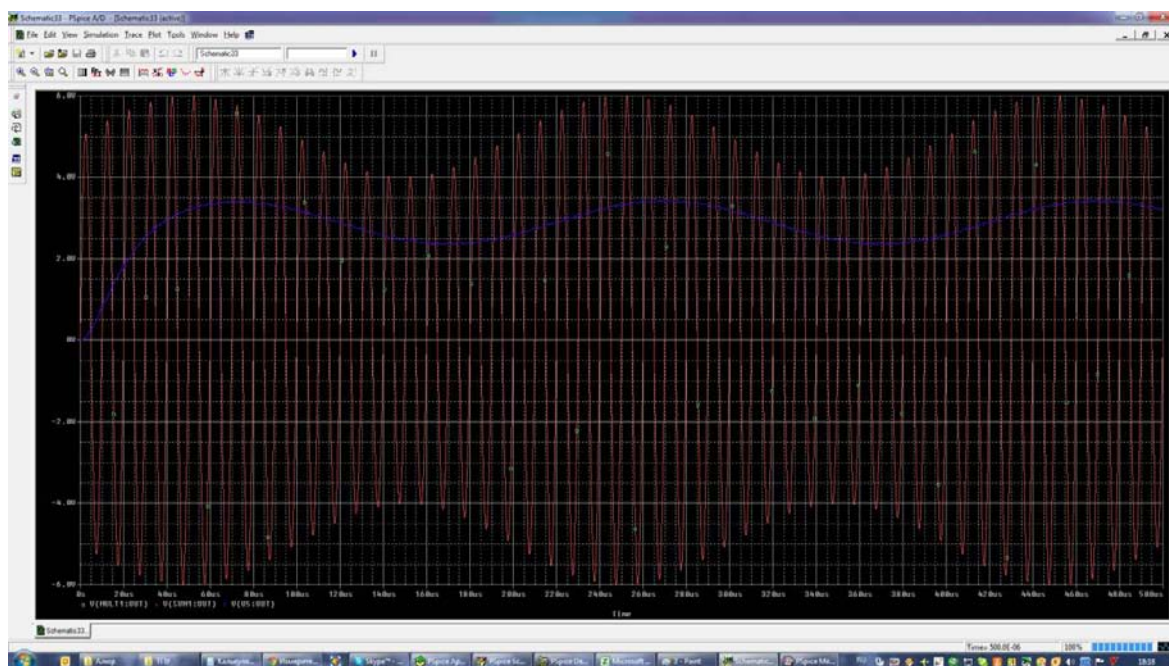
а – без неподвижных электродов;

б – с неподвижными электродами

Рисунок 5.2 – Сенсор акселерометра

Акселерометр имеет три измерительные оси: X, Y, Z. При наличии ускорений вдоль этих осей подвижные системы акселерометра перемещаются. Механическое перемещение вызывает изменения в емкостях чувствительных электродов.

Для измерения ускорений объекта необходимо преобразовать изменения емкостей в выходной электрический сигнал. В каждом канале переменные ёмкости включены по мостовой схеме. Питание моста осуществляется от генератора с частотой 100 кГц и амплитудой 10 В. Таким образом, на входе инструментального усилителя каждого канала формируется сигнал частотой 100 кГц, модулированный колебаниями с частотой, равной частоте измеряемого ускорения с меняющейся амплитудой в зависимости от величины измеряемого ускорения (рисунок 5.3, красный).



красный – на выходе измерительного усилителя;

синий – на выходе демодулятора

Рисунок 5.3 – Электрические сигналы в измерительном канале

Далее полученный сигнал подается на вход демодулятора, настроенного на диапазон частот измеряемого ускорения. Тем самым происходит выделение полезного сигнала и одновременно фильтрация помех (рисунок 5.3, синий).

Полученный полезный сигнал подается на АЦП (ADC) микропроцессора для дополнительной фильтрации, измерения его частоты, амплитуды и расчета ускорения.

Рассмотрим функциональные блоки схемы более подробно. В качестве генератора используется микросхема MAX038 [49], предназначенная для высокочастотного формирования сигнала заданной формы. Выбрана частота 100 кГц, так как при большей частоте возникают негативные высокочастотные эффекты, для которых требуется более сложная схемотехника, более дорогие компоненты и иная разводка печатной платы. Меньшая частота приведет к тому, что изменение напряжения на входе инструментального усилителя при изменении измеряемого ускорения будет слишком мало.

На рисунке 5.4 изображена схема измерительного моста.

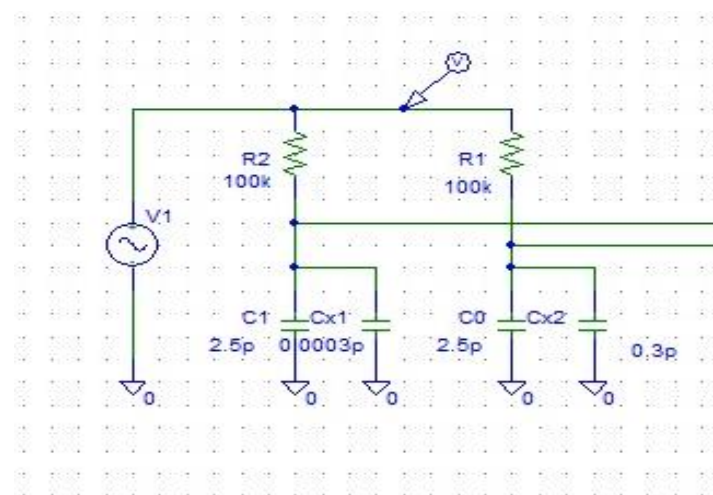


Рисунок 5.4 – Измерительный мост

Электродные гребенчатые структуры акселерометра представлены в виде конденсаторов C1, Cx1, C0, Cx2, причём, C1 и C0 моделируют начальные емкости, а Cx1, Cx2 задают их изменения вследствие наличия ускорения. Для задания рабочей точки моста приблизительно в середине диапазона измерения дополнительно введены подстроечные конденсаторы.

Для преобразования изменения емкости в напряжение выбран измерительный усилитель. Измерительный усилитель (иначе инструментальный усилитель, электрометрический вычитатель) [51] – это тип дифференциального усилителя с характеристиками, подходящими для использования в измерениях и

тестирующем оборудовании. Такие усилители имеют: очень малое смещение постоянного тока, малый дрейф, малый шум, очень высокий коэффициент усиления при разомкнутой обратной связи, очень высокий коэффициент ослабления синфазного сигнала, и очень высокие входные сопротивления. Такие усилители применяются, когда требуются большая точность и высокая стабильность схемы как кратковременно, так и долговременно.

Наиболее часто используемая схема измерительного усилителя показана на рисунке 5.5.

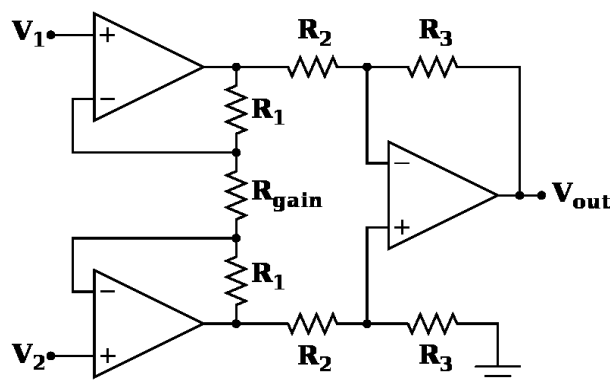


Рисунок 5.5 – Типовая схема измерительного усилителя

Измерительный усилитель представляет собой двухкаскадный усилитель. Первый каскад – дифференциальный усилитель на двух взаимосвязанных неинвертирующих усилителях. Для повышения входного сопротивления входной каскад строят на двух отдельных (невзаимосвязанных) неинвертирующих усилителях. Второй каскад – дифференциальный инвертирующий усилитель [51]. Буферные взаимосвязанные неинвертирующие усилители увеличивают входное сопротивление (импеданс) низкоимпедансного дифференциального инвертирующего усилителя. Резистор R_{gain} – общий для обоих неинвертирующих усилителей.

На выходе первого каскада, на первом операционном усилителе напряжение определяется выражением

$$V_{i1} = V_2 + \left(1 + \frac{R_1}{R_{gain}}\right) \cdot (V_1 - V_2),$$

на втором операционном усилителе

$$V_{i2} = V_1 + \left(1 + \frac{R_1}{R_{\text{gain}}}\right) \cdot (V_2 - V_1).$$

Это следует из того, что за счет обратной связи и собственного бесконечно большого коэффициента усиления операционного усилителя напряжения на инвертирующих входах примерно равны входным напряжениям на неинвертирующих входах и резисторы R_1 и R_{gain} образуют соответствующие делители.

Напряжение на неинвертирующем входе операционного усилителя второго каскада определяется делителем, собранным на резисторах R_2 и R_3 , и равно

$$V_{\text{дп}} = V_{i2} \cdot \frac{R_3}{R_2 + R_3}.$$

Напряжение на его инвертирующем входе так же определяется делителем, собранным на другой паре резисторов R_2 и R_3

$$V_{\text{дн}} = V_{\text{out}} - (V_{\text{out}} - V_{i1}) \cdot \frac{R_3}{R_2 + R_3}.$$

Эти напряжения должны стать примерно равными за счет обратной связи и собственного бесконечно большого коэффициента усиления операционного усилителя

$$V_{i2} \cdot \frac{R_3}{R_2 + R_3} = V_{\text{out}} - (V_{\text{out}} - V_{i1}) \cdot \frac{R_3}{R_2 + R_3}$$

Получим

$$V_{\text{out}} = (V_{i2} + V_{\text{out}} - V_{i1}) \cdot \frac{R_3}{R_2 + R_3}, \quad V_{\text{out}} \left(1 + \frac{R_2}{R_3}\right) = (V_{i2} + V_{\text{out}} - V_{i1}) \cdot$$

$$V_{\text{out}} \left(\frac{R_2}{R_3}\right) = (V_{i2} - V_{i1}) \cdot$$

и, наконец,

$$V_{\text{out}} = (V_{i2} - V_{i1}) \cdot \frac{R_3}{R_2} = \left(V_1 + \left(1 + \frac{R_1}{R_{\text{gain}}}\right) \cdot (V_2 - V_1) - V_2 - \left(1 + \frac{R_1}{R_{\text{gain}}}\right) \cdot (V_1 - V_2)\right) \cdot \frac{R_3}{R_2} = \left(1 + \frac{2 \cdot R_1}{R_{\text{gain}}}\right) \cdot \frac{R_3}{R_2} \cdot (V_2 - V_1)$$

Таким образом, коэффициент усиления инструментального усилителя

$$\text{определяется выражением } K_U = \left(1 + \frac{2R_1}{R_{\text{gain}}}\right) \cdot \frac{R_3}{R_2}$$

Инструментальный усилитель может быть построен из отдельных операционных усилителей и прецизионных резисторов. В разрабатываемой схеме используются прецизионные высокоскоростные ОУ AD744 [52]. Принципиальная схема инструментального усилителя, реализованного в макете, приведена на рисунке 5.6.

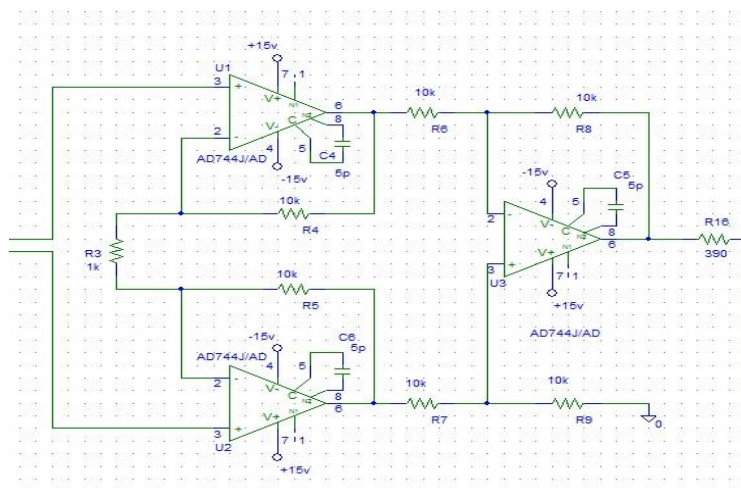


Рисунок 5.6 – Инструментальный усилитель

Реализованная схема была исследована для получения зависимости изменения выходного напряжения от изменения емкости. На рисунке 5.7 представлен вид выходного сигнала при уравновешенном мосте.

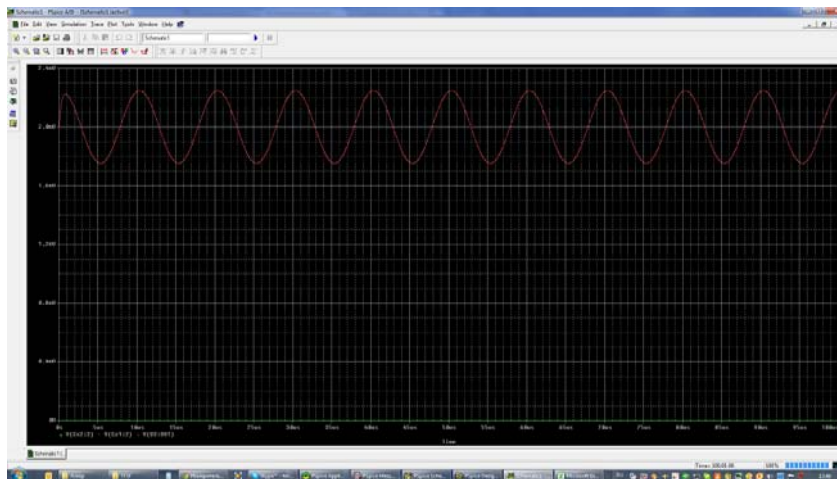


Рисунок 5.7 – Выходной сигнал инструментального усилителя при уравновешенном мосте

Выходной сигнал амплитудой 0,6 мВ обусловлен дрейфом нуля инструментального усилителя. Устранять его необязательно, так как он намного меньше, чем при наличии сигнала с моста.

На рисунке 5.8 представлен вид выходного сигнала при изменении емкостей.

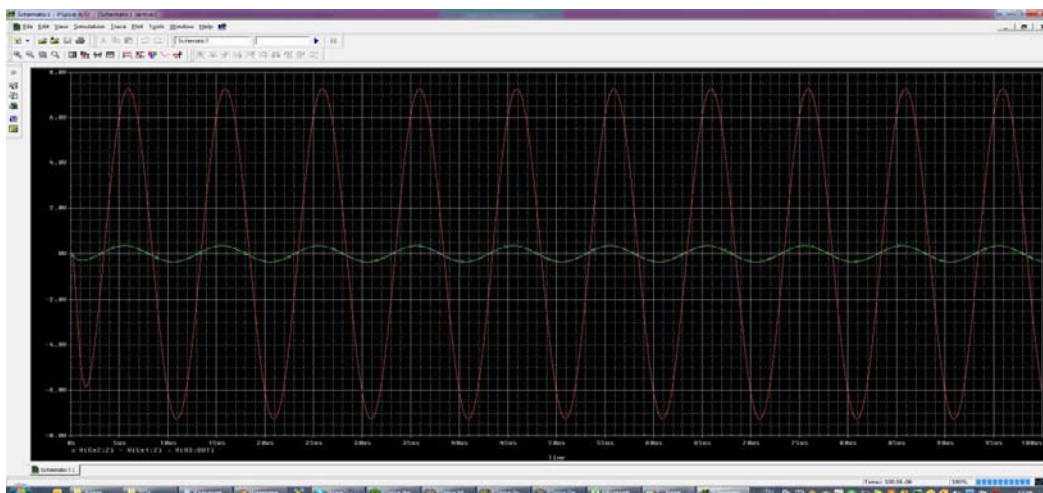


Рисунок 5.8 – Выходной сигнал инструментального усилителя при изменении емкостей

Как видно между сигналами присутствует сдвиг по фазе порядка 3-х мкс, что обусловлено емкостью схемы. Данный сдвиг по фазе не влияет на дальнейшие измерения. Общий вид зависимости изменения выходного напряжения от изменения емкости представлен на рисунке 5.9.

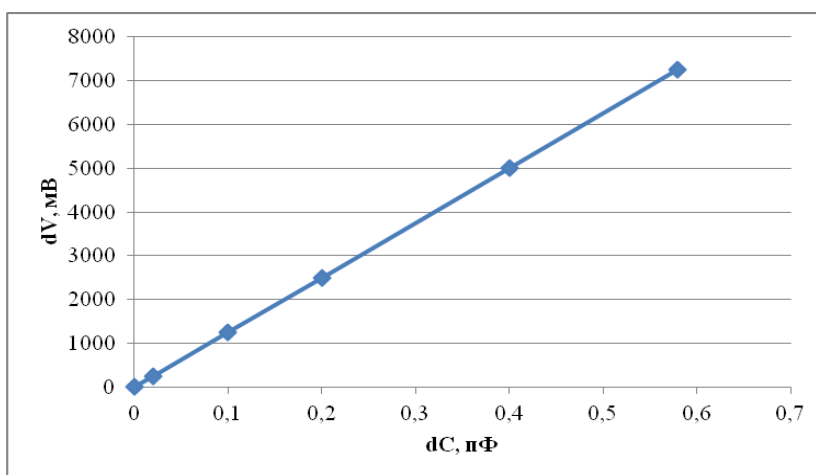


Рисунок 5.9 – Зависимость изменения выходного напряжения от изменения емкости

Зависимость имеет строго линейный характер, поэтому не требуется дополнительной корректировки сигнала.

Демодулятор построен на ОУ (рисунок 5.10). Представленная на рисунке схема может быть полезной при выполнении амплитудной демодуляции или получении усредненного абсолютного значения входного сигнала.

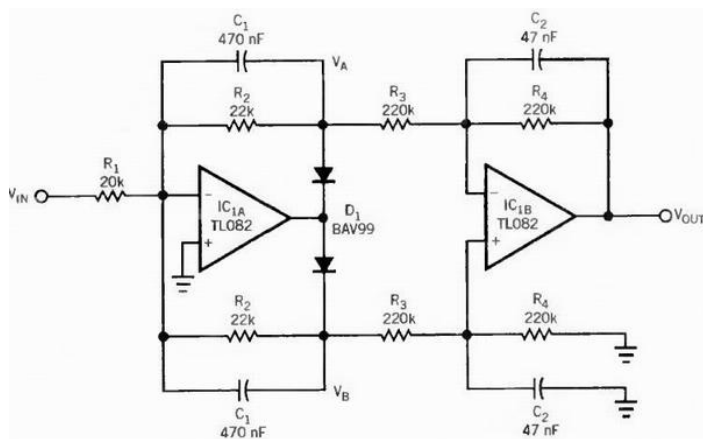


Рисунок 5.10 – Типовая схема демодулятора на ОУ

Схема содержит два каскада, выполненные на операционных усилителях TL062, первый из которых (IC1A) — преобразователь абсолютного значения с дифференциальным выходом. Второй каскад (IC1B), является обычным дифференциальным усилителем. Комбинация из этих двух каскадов формирует однотактный преобразователь абсолютного значения.

Конденсаторы \$C_1\$ выполняют роль интеграторов тока и обеспечивают низкое сопротивление па переменному току в узлах \$V_A\$ и \$V_B\$, когда диоды находятся в состоянии обратного смещения, напряжения \$V_A\$ и \$V_B\$ получаются усредненными. Дополнительные конденсаторы \$C_2\$ параллельно с резисторами \$R_4\$ образуют низкочастотный фильтр второго порядка, который удаляет остатки сигнала переменного тока.

С практической точки зрения, сопротивление \$R_3\$ должно быть в 10 раз выше, чем \$R_2\$. В большинстве приложений выбирают равные постоянные времени фильтров

$$T_1 = \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} C_1, \quad T_2 = R_4 C_2 .$$

Коэффициент усиления демодулятора определяется выражением $K_{\text{дем}} = \frac{R_2 R_4}{R_1 R_2 + R_3}$.

В демодуляторе предлагается использовать ОУ AD744 (рисунок 5.11).

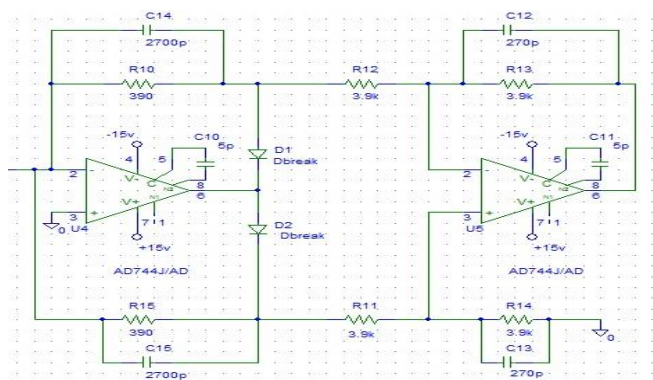


Рисунок 5.11 – Демодулятор измерительных каналов

Устройство собрано по симметричной схеме, усиление регулируется резистором R1, схема имеет одинаковую задержку для сигналов положительной и отрицательной полярности, поэтому не нужны диоды для согласования.

Таким образом, измерительный канал «амплитуда колебаний сенсора – ёмкость – напряжение» при физической реализации имеет незначительную погрешность преобразования. В измерительных каналах акселерометра использовались ОУ AD744. На рисунке 5.12 приведена схема исследования работы демодулятора в программном пакете ORCAD 9.2 [53].

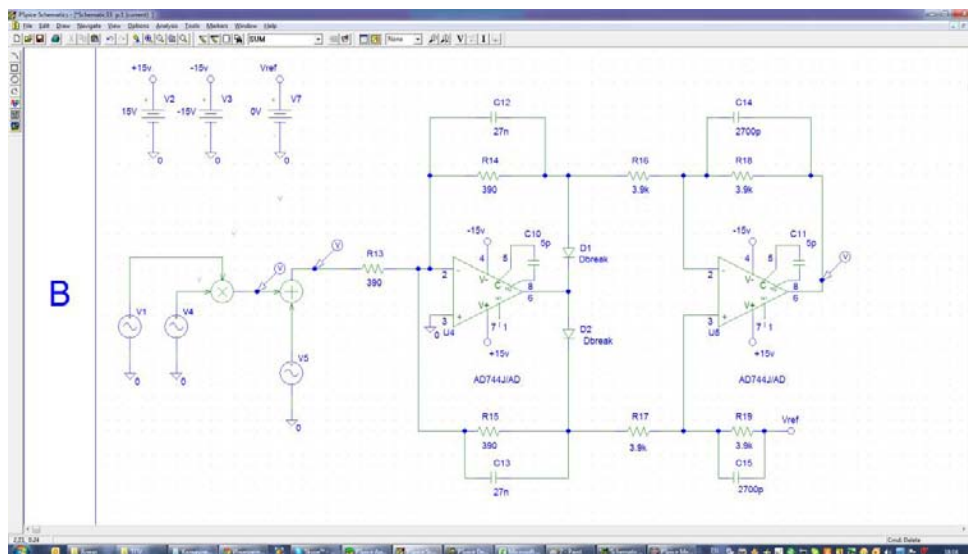
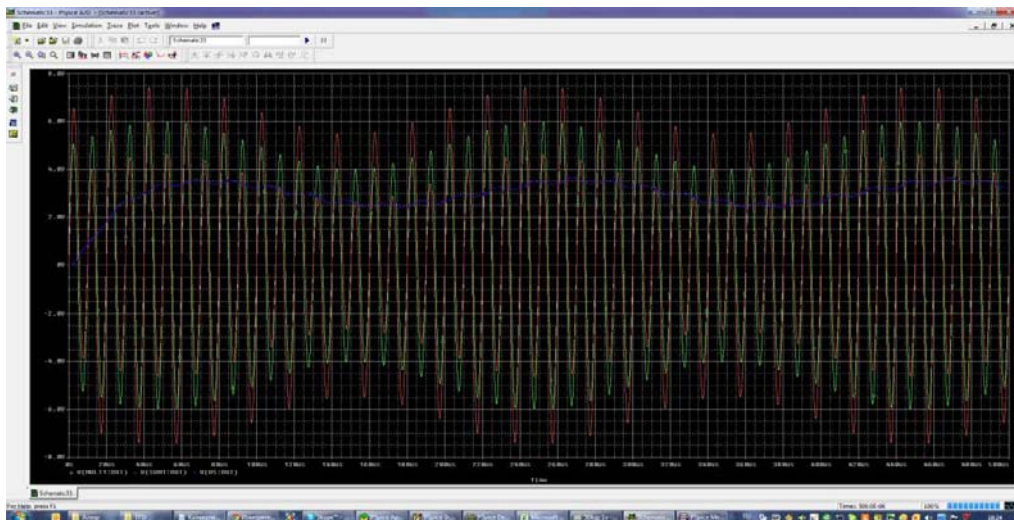


Рисунок 5.12 – Схема исследования работы демодулятора

К основному сигналу, модулированному частотой 100 кГц добавлялась помеха различной частоты, амплитуды и фазы (рисунок 5.13). При отсутствии помех сигнал может быть измерен без дополнительной обработки. При возникновении высокочастотных помех, по амплитуде сопоставимых с измеряемым сигналом, демодулятор частично их отфильтровывает, сигнал может

быть измерен либо без дополнительной обработки, либо дополнительно программно вводится фильтр низких частот.



Красный – выходной сигнал усилителя с помехой; синий – выход демодулятора при наличии помехи; зелёный – выход усилителя без помехи

Рисунок 5.13 – Работа демодулятора, помеха 50 кГц.

При возникновении помех с частотой, равной частоте полезного сигнала, но со сдвигом по фазе 90 градусов работа схемы может стать некорректной. При амплитуде помех меньше или сопоставимой с амплитудой полезного сигнала демодулятор их отфильтровывает. При амплитуде помех намного больше амплитуды полезного сигнала (рисунок 5.14) требуется дополнительная программная корректировка сигнала.

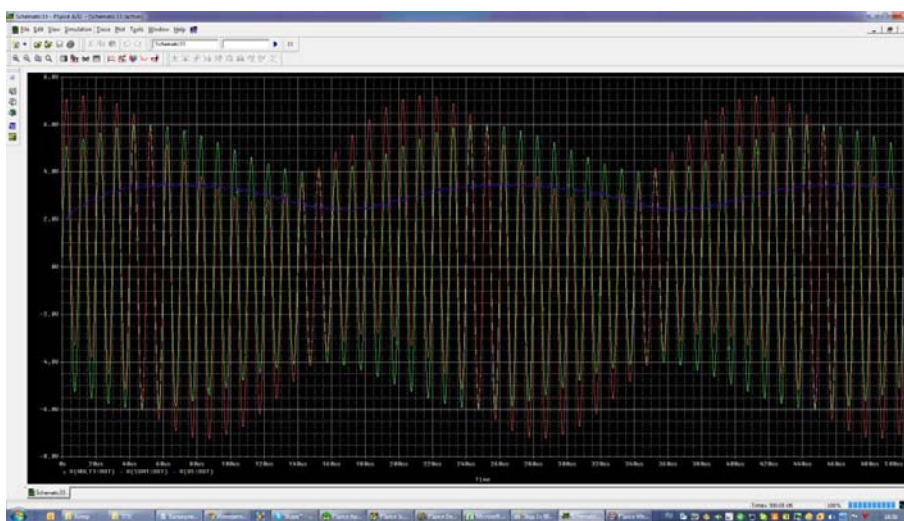


Рисунок 5.14 – Работа демодулятора, помеха 5 кГц, сдвиг по фазе 90°, амплитуда помехи 200% полезного сигнала.

Так как помеха сдвинута относительно полезного сигнала на 90 градусов, то микропроцессор программно реализует синхронный детектор, который ослабляет помеху.

Для обработки всех поступающих данных был выбран микропроцессор STM32F103VCT6 [29]. Данный процессор относится к семейству STM32, базирующемся на модифицированном ядре ARM Cortex M3, предназначенному для встраиваемых систем. С одной стороны процессор имеет низкое энергопотребление, с другой – обеспечивает высокое быстродействие и обладает всей необходимой периферией. Отметим используемые в программном обеспечении возможности процессора, который имеет встроенные ЦАП (2), АЦП (2), таймеры, режим прямого доступа к памяти, УАПЧ.

АЦП работают в режиме прямого доступа к памяти. Задействовано 2 канала. Одно преобразование занимает 1 мкс. Таким образом, частота оцифровки каждого канала составляет 500 кГц, что достаточно для определения формы сигнала. АЦП – 12-ти битный, что позволяет при диапазоне изменения ускорения от 0 до 150g получить разрешение измерений 0,036g на единицу разряда АЦП. Изменение диапазона измерения достигается корректировкой резистора R_8 принципиальной схемы.

Сигнал по каждому каналу дополнительно усредняется (10 отсчетов) для дополнительной фильтрации высокочастотной составляющей (100 кГц) проходящей через демодулятор. Вычисление периода колебаний происходит с помощью таймера (фиксируется переход значений оцифровываемого сигнала через его математическое ожидание). Амплитуда измеряется с помощью программного детектора (находится разница максимального и минимального значений за период). Светодиодная индикация предназначена для визуального определения зависимости между ускорением объекта и регистрируемым сигналом, а также в отладочных целях. Связь с ЭВМ осуществляется на скорости 9600 кбит/с, интерфейс RS-232, протокол ModBus-RTU. Это позволяет работать с устройством с помощью стандартных средств верхнего уровня.

5.2 Чертёж кристалла акселерометра

Сенсор акселерометра (рисунок 5.15) аналогичен сенсору гироскопа.

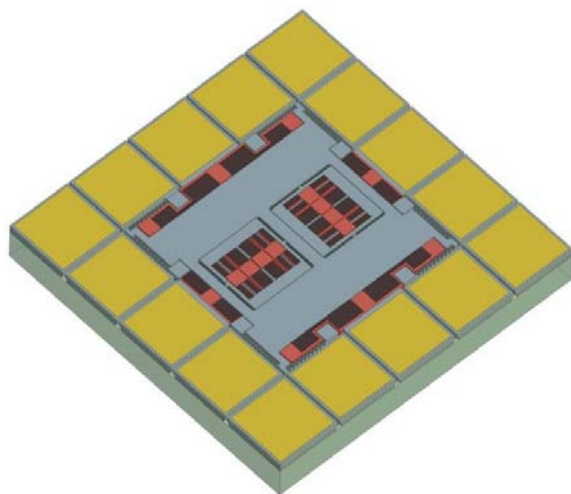
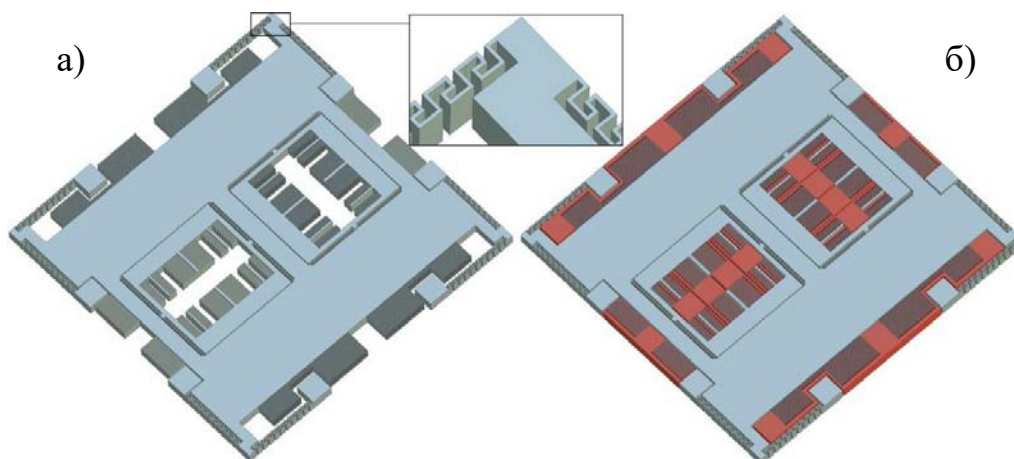


Рисунок 5.15 – Сенсор акселерометра

Активная подвижная пластина сенсора представлена на рисунке 5.16.



а – без неподвижных электродов;

б – с неподвижными электродами

Рисунок 5.16 – Активная подвижная структура сенсора акселерометра

5.3 Компьютерные модели и результаты моделирования

5.3.1 Генерация системной модели акселерометра

В разделе 4 приведены результаты модального, теплового и электростатического анализа этого сенсора, которыми воспользуемся при составлении системной модели акселерометра.

Акселерометр можно представить состоящим из двух доменов: механического и электрического (рисунок 5.17), которые связаны между собой

через межэлектродные ёмкости. Механический домен представляет собой три взаимосвязанных осциллятора. Структурное перемещение «x» через ёмкости C_{1x} , C_{2x} системой измерения ускорения преобразуется в электрический сигнал, пропорциональный измеряемому ускорению a_x . Структурное перемещение «y» через ёмкости C_{1y} , C_{2y} системой измерения ускорения преобразуется в электрический сигнал, пропорциональный измеряемому ускорению a_y . Структурное перемещение «z» через ёмкости C_{1z} , C_{2z} преобразуется в электрический сигнал, пропорциональный измеряемому ускорению a_z .

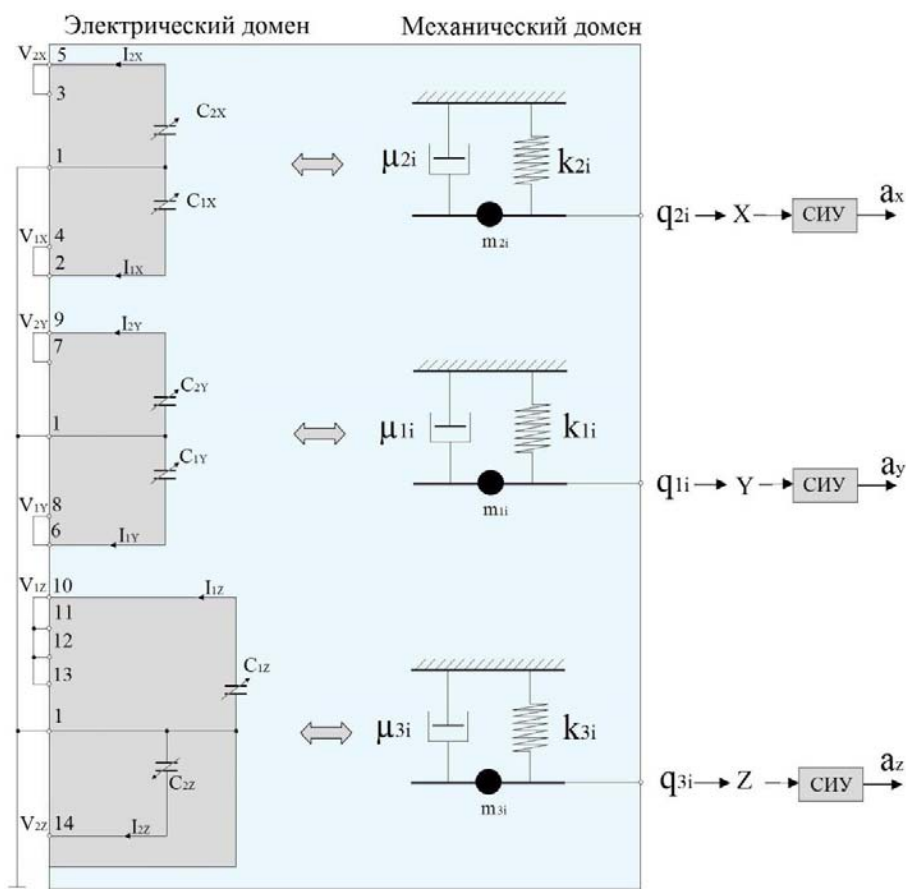


Рисунок 5.17 – Структура микроакселерометра

Проведённый в разделе 4 анализ сенсора показывает, что редуцированная система при составлении макромоделли акселерометра будет содержать одну моду колебаний по оси Z и по две моды колебаний механического домена по осям X, Y.

В этом случае динамика механического домена акселерометра определяется уравнениями

$$\begin{aligned}
m_{1i}\ddot{y}_i + \mu_{yi}\dot{y}_i + \frac{\partial \Pi_{yi}}{\partial y_i} - \frac{1}{2} \sum_{n=6,7} \frac{\partial C_{1n}}{\partial y_i} (V_n - V_1)^2 &= +m_{1i}a_y + 2m_{1i}\Omega_x \dot{z} - m_{1i}z\Omega_y\Omega_z \ddot{\epsilon} \\
m_{2i}\ddot{x}_i + \mu_{xi}\dot{x}_i + \frac{\partial \Pi_{xi}}{\partial x_i} - \frac{1}{2} \sum_{n=2,3} \frac{\partial C_{1n}}{\partial x_i} (V_n - V_1)^2 &= +m_{2i}a_x - 2m_{2i}\Omega_y \dot{z} - m_{2i}z\Omega_x\Omega_z, \\
m_3\ddot{z} + \mu_z\dot{z} + \frac{\partial \Pi_z}{\partial z} - \frac{1}{2} \sum_{n=10,14} \frac{\partial C_n}{\partial z} (V_n - V_1)^2 &= +m_3a_z - 2m_{1i}\Omega_x \dot{y}_i + 2m_{2i}\Omega_y \dot{x}_i - m_{2i}x_i\Omega_x\Omega_z - \\
&- m_{1i}y_i\Omega_y\Omega_x,
\end{aligned} \tag{5.1}$$

где номер моды $i = 1, 9$; Π_i – потенциальная энергия i -ой моды деформации сенсора гироскопа. Те силы, которые зависят от угловых скоростей объекта, являются помехами для акселерометра. Искажают характеристики акселерометра также электростатические силы электродных структур.

Для реализации системной модели механического домена в статическом КЭ анализе рассчитывается энергия деформации сенсора для первой и девятой мод колебаний, аппроксимирующие функции которых имеют вид

$$\begin{aligned}
\Pi_{y1} &= -2,0506 \cdot 10^{-21} + 4,8722 \cdot 10^{-15} \cdot y_1 + 10,5813 \cdot y_1^2. \\
\Pi_{y9} &= 4,0854 \cdot 10^{-20} - 7,7027 \cdot 10^{-14} \cdot y_9 + 176,4696 \cdot y_9^2. \\
\Pi_{x1} &= -2,0506 \cdot 10^{-21} + 4,8722 \cdot 10^{-15} \cdot x_1 + 10,5813 \cdot x_1^2. \\
\Pi_{x9} &= 4,0854 \cdot 10^{-20} - 7,7027 \cdot 10^{-14} \cdot x_9 + 176,4696 \cdot x_9^2. \\
\Pi_z &= 6,5934 \cdot 10^{-17} + 1,2023 \cdot 10^{-11} \cdot z + 113,3330 \cdot z^2.
\end{aligned} \tag{5.2}$$

Межэлектродные ёмкости связывают механическое и электрическое взаимодействие в системе через систему измерения ускорений и электростатические силы емкостных датчиков. Ток I_j через электрод j определяется количеством заряда Q_j , протекающим по нему в единицу времени, и может быть вычислен по формуле

$$I_j = \frac{\partial Q_j}{\partial t} = \sum_r \left[\sum_n \left(\frac{\partial C_{1n}}{\partial q_i} \dot{q}_i \right) (V_n - V_1) + C_{1n} \frac{\partial}{\partial t} (V_n - V_1) \right], \tag{5.3}$$

где V_n, V_1 – электрические потенциалы на обкладках электродов; $q_i = x, y, z$. Для того чтобы учесть поля рассеяния гребенчатых структур, ёмкости вычисляются по серии электростатических вычислений с помощью МКЭ и определяются выражениями

$$C_{1x}(x, z) = C_{12}(x, z) + C_{14}(x, z) = 2,7177982 \cdot 10^{-12} - 1,3113215 \cdot 10^{-8} \cdot x + 67,525541 \cdot 10^{-5} \cdot x^2 - 5,43273162 \cdot 10^{-8} \cdot |z| + 8,9347898 \cdot 10^{-5} \cdot |z|^{1,5} - 0,041836979 \cdot |z|^2 - 2,8854633|z|^{2,5} + 635,10349 \cdot |z|^3 \quad (5.4)$$

$$C_{2x}(x, z) = C_{15}(x, z) + C_{13}(x, z) = 2,7177982 \cdot 10^{-12} + 1,3113215 \cdot 10^{-8} \cdot x - 67,525541 \cdot 10^{-5} \cdot x^2 - 5,43273162 \cdot 10^{-8} \cdot |z| + 8,9347898 \cdot 10^{-5} \cdot |z|^{1,5} - 0,041836979 \cdot |z|^2 - 2,8854633|z|^{2,5} + 635,10349 \cdot |z|^3 \quad (5.5)$$

$$C_{1y}(y, z) = C_{16}(y, z) + C_{18}(y, z) = 2,7177982 \cdot 10^{-12} - 1,3113215 \cdot 10^{-8} \cdot y + 67,525541 \cdot 10^{-5} \cdot y^2 - 5,43273162 \cdot 10^{-8} \cdot |z| + 8,9347898 \cdot 10^{-5} \cdot |z|^{1,5} - 0,041836979 \cdot |z|^2 - 2,8854633|z|^{2,5} + 635,10349 \cdot |z|^3 \quad (5.6)$$

$$C_{2y}(y, z) = C_{19}(y, z) + C_{17}(y, z) = 2,7177982 \cdot 10^{-12} + 1,3113215 \cdot 10^{-8} \cdot y - 67,525541 \cdot 10^{-5} \cdot y^2 - 5,43273162 \cdot 10^{-8} \cdot |z| + 8,9347898 \cdot 10^{-5} \cdot |z|^{1,5} - 0,041836979 \cdot |z|^2 - 2,8854633|z|^{2,5} + 635,10349 \cdot |z|^3 \quad (5.7)$$

$$C_{1z}(z) = C_{110}(z) + C_{111}(z) + C_{112}(z) + C_{113}(z) = 10,5851314 \cdot 10^{-12} - 8,5097354 \cdot 10^{-7} \cdot |z| + 5,2457498 \cdot 10^{-4} \cdot |z|^{1,5} - 0,147999712 \cdot |z|^2 + 14,5528789 \cdot |z|^{2,5} \quad (5.8)$$

$$C_{2z}(z) = C_{114}(z) = 0,40493 \cdot 10^{-12} - 7,5639 \cdot 10^{-9} \cdot z + 0,000176511 \cdot z^2 - 3,94663270 \cdot z^3 \quad (5.9)$$

Уравнения 5.1 – 5.9 определяют макромоделю акселерометра, которая описывает нелинейную динамическую микромеханическую систему с электростатическими датчиками съёма информации. На каждую моду i и каждую электродную структуру j приходится по одному уравнению.

5.3.2 Макромоделю акселерометра в Simulink

Используя уравнения 5.1, 5.2, 5.3 и рассчитанные ёмкости электродных структур (уравнения 5.4 – 5.9), можно решить их в схмотехническом пакете. На рисунке 5.18. изображена общая модель микроакселерометра, моделирующая уравнения 5.1 – 5.9, которые описывают динамику механического и электрического домена.

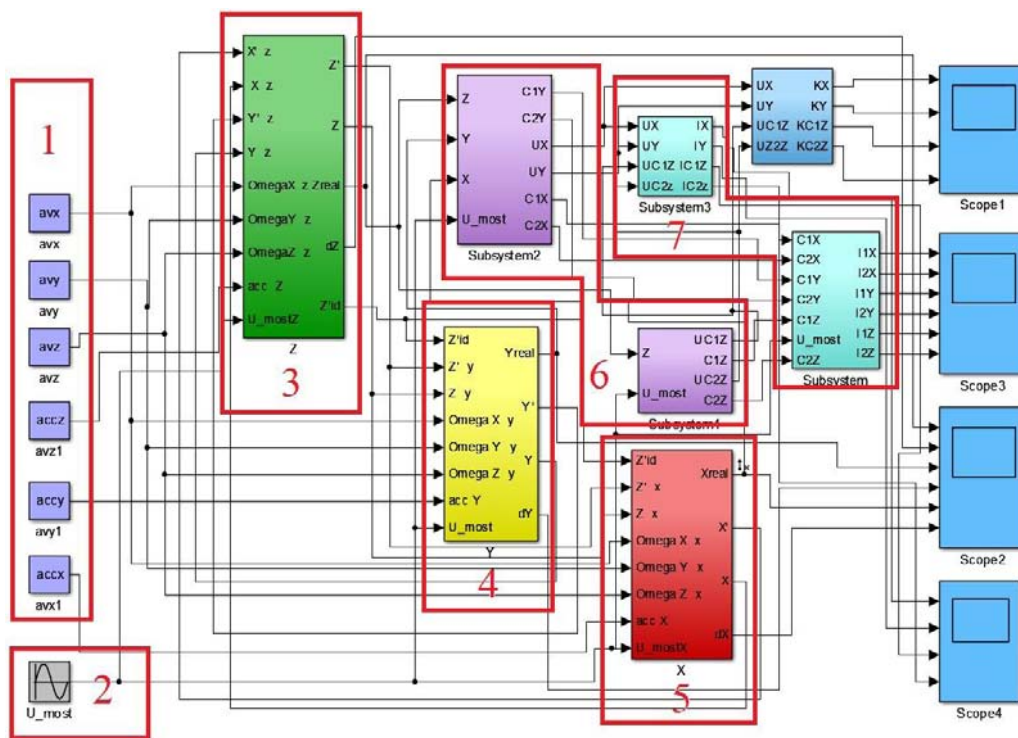


Рисунок 5.18 – Общая модель микроакселерометра

На рисунке 5.18 обозначено: 1 – источники возмущающих воздействий; 2 – источник напряжения для съема информации с измерительных мостов; 3 – канал измерения ускорения по оси Z; 4 – канал измерения ускорения по оси Y; 5 – канал измерения ускорения по оси X; 6 – подсистема измерительного моста; 7 – подсистема расчета выходных токов.

Расчёт вектора сил упругости производился на каждом временном шаге. Связь между механическим и электрическим доменами осуществляется посредством вектора электростатических сил, вызванного вектором модальных перемещений z . Вектор электростатических сил прикладывается через сумматор к механическому домену. Моделирование проводилось в несколько этапов, от моделирования отдельных частей к моделированию всей системы. Вначале проведено моделирование механического домена идеальной системы в соответствии с уравнениями 5.1, 5.2 без учета помех.

На рисунке 5.19 приведена подсистема канала измерения по оси Z. На рисунке обозначено: 1 – подсистема расчета энергии деформации в соответствии с уравнениями 5.2 для канала по оси Z. 2 – подсистема вносимых помех, обусловленных электрическими возмущениями для емкостей C_{1Z} , C_{2Z} ; 3 –

подсистема вносимых помех, обусловленных механическими возмущениями; 4 – идеальная система измерения ускорения по оси Z; 5 - подсистема перехода от модальных координат к геометрическим.

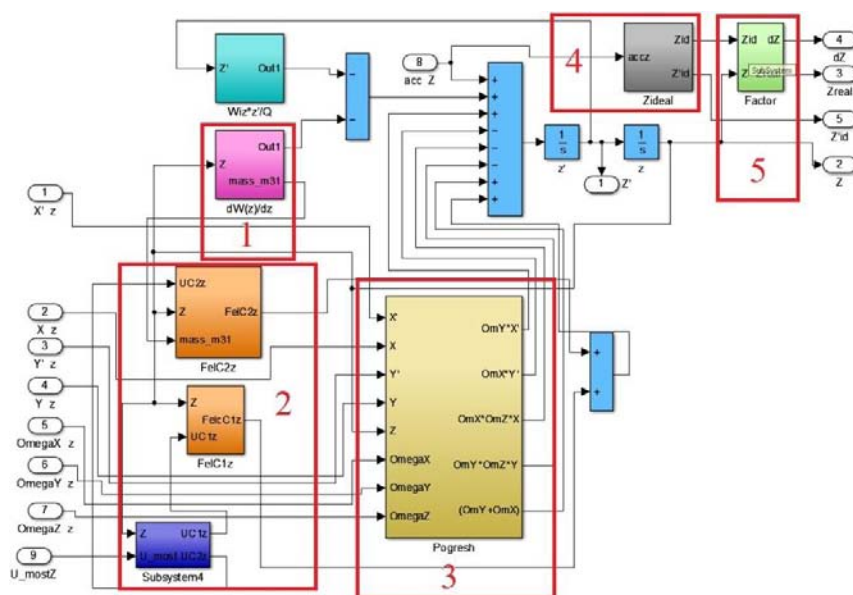


Рисунок 5.18 – Канал измерения ускорения по оси Z

На рисунке 5.19 приведена подсистема канала измерения ускорения по оси X. Для канала измерения ускорения по оси Y структура будет аналогичной.

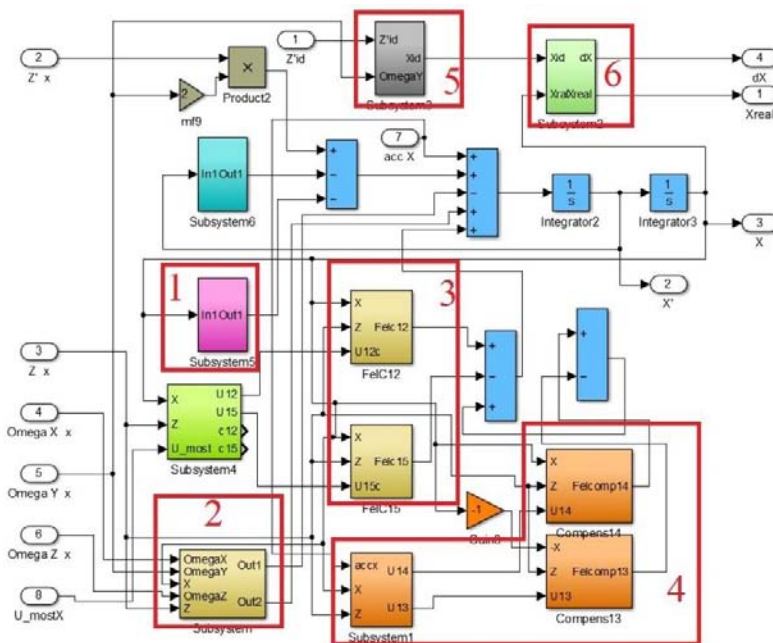
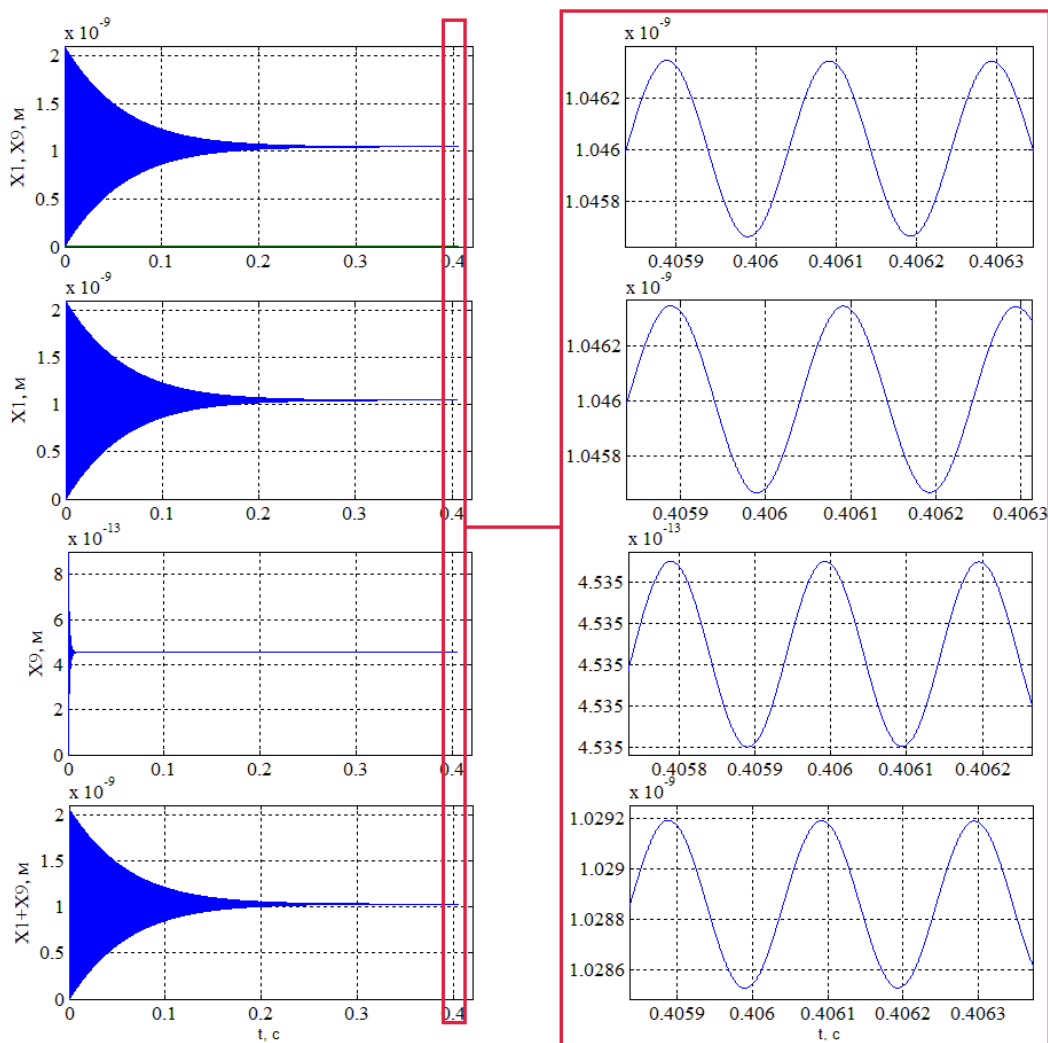


Рисунок 5.19 – Канал измерения ускорения по оси X

На рисунке 5.19 обозначено: 1 – подсистема расчета энергии деформации в соответствии с уравнениями 4.16 для канала по оси X; 2 – подсистема помех, обусловленных механическими возмущениями; 3 – подсистема помех,

обусловленных электрическими возмущениями; 4 – подсистема корректирующих устройств для компенсации погрешностей; 5 – идеальная система возбуждения первичных колебаний; 6 – подсистема перевода модальных перемещений в структурные.

Состав и принцип работы системы аналогичен модели микрогироскопа, представленной в разделе 4.3. Для осей X и Y учитываются по две моды колебаний (рисунок 5.20), затем переводятся из модальных координат в геометрические с помощью подсистемы перевода (рисунок 5.21).



- 1 – модальные перемещения 1 и 9 моды, идущие по одному «проводу»;
- 2 – модальные перемещения 1 моды; 3 – модальные перемещения 9 моды;
- 3 – структурное перемещение сенсора

Рисунок 5.20 – Модальные и структурные перемещения сенсора по оси X

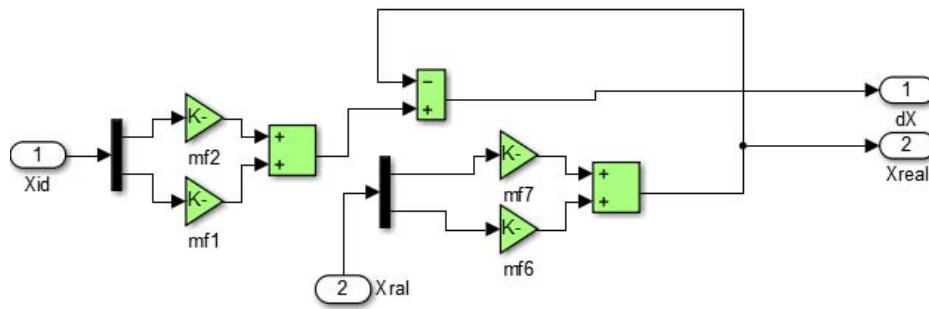


Рисунок 5.21 – Подсистема перехода от модальных координат к геометрическим

Было проведено моделирование идеальной системы, график изменения выходного напряжения в зависимости от ускорения показан на рисунке 5.22.

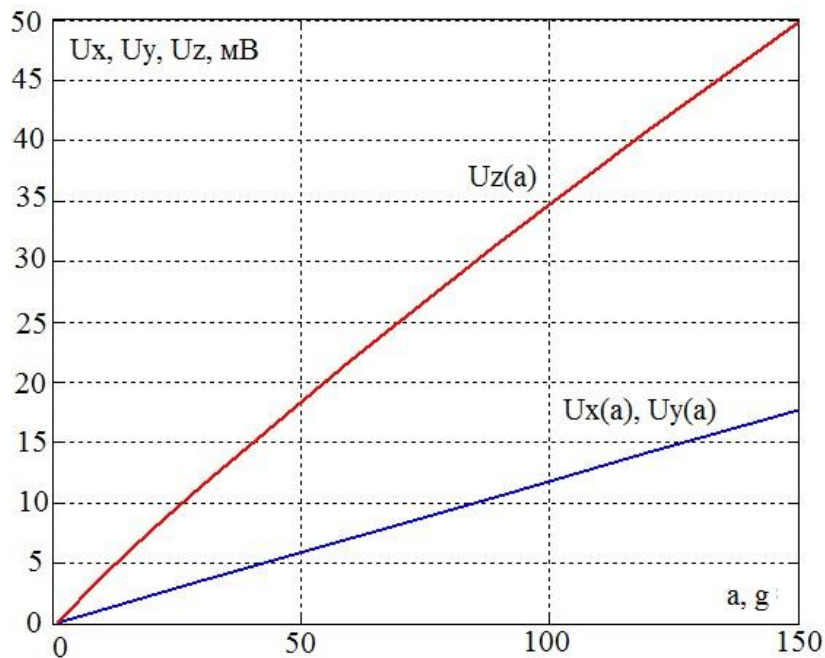


Рисунок 5.22 – Зависимость выходного напряжения от ускорения

График перемещения рамок при синусоидальном воздействии ускорения показан на рисунке 5.23

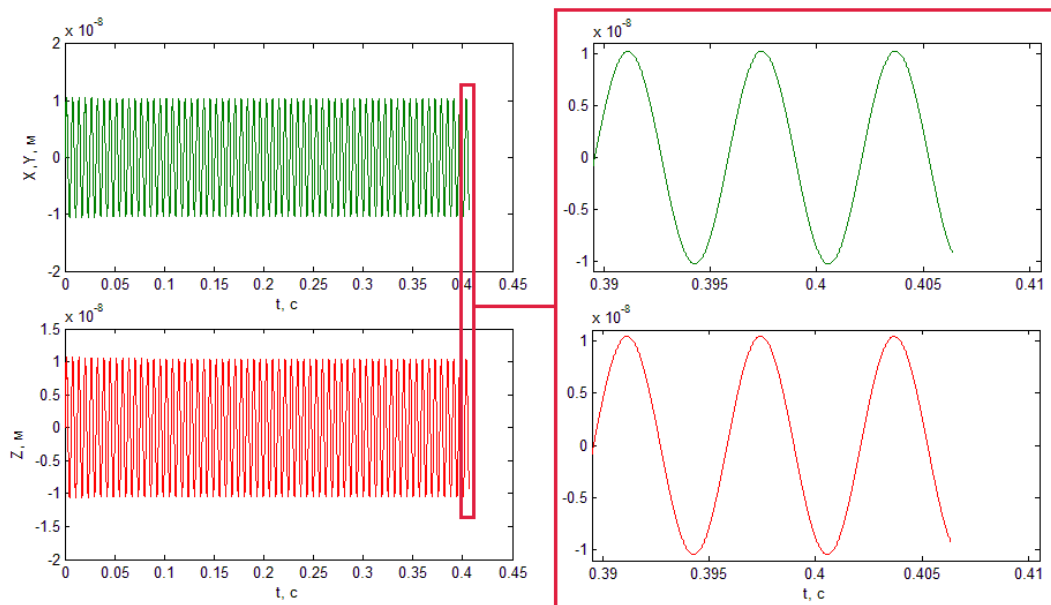


Рисунок 5.23 – Перемещение рамок при синусоидальном изменении ускорения

АЧХ микроакселерометра представлена на рисунке 5.24

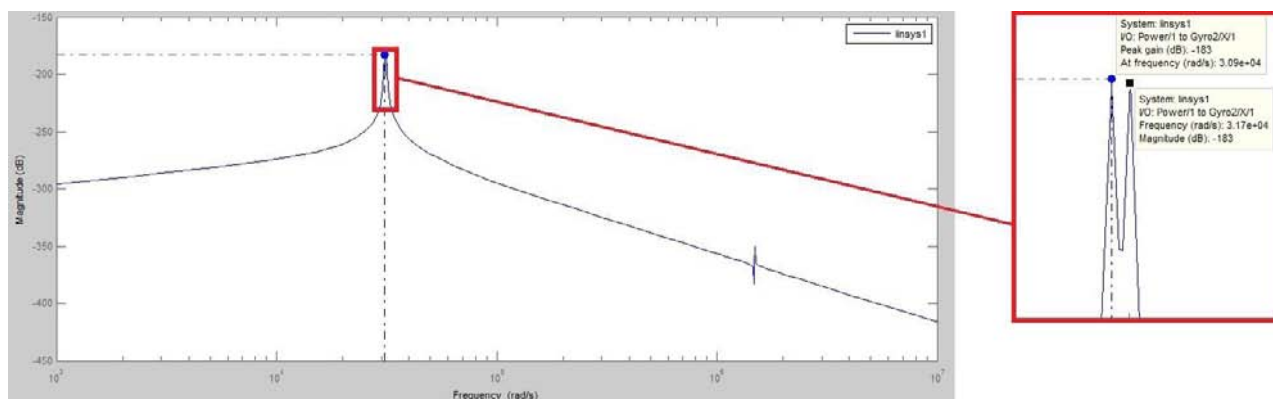


Рисунок 5.24 – АЧХ микроакселерометра

Далее проводится моделирование погрешностей перекрестных связей при наличии угловых скоростей Ω_y , Ω_x , Ω_z , определяется погрешность выходного сигнала. График изменения погрешности в зависимости от угловых скоростей представлен на рисунке 5.24.

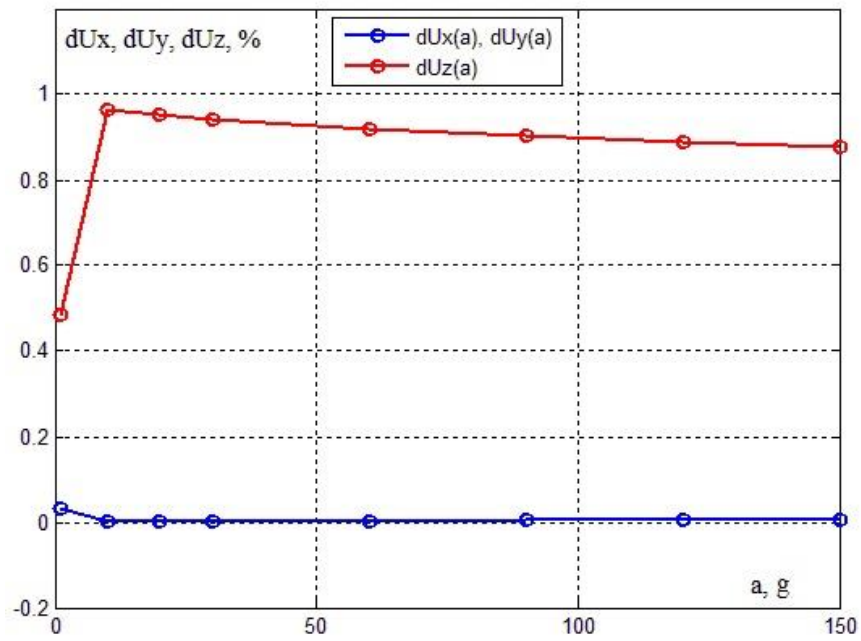


Рисунок 5.24 – Зависимость погрешности перекрестных связей по осям X и Y

6 Структурная схема инерциальной микросистемы

6.1 Чертёж кристалла

Геометрия многокомпонентной микросистемы разрабатывалась в соответствии с её принципиальной схемой, представленной на рисунке 2.1.

В соответствии с техническим заданием, габаритные размеры двухкомпонентного микрогироскопа должны быть не более 6000х6000 мкм, микроакселерометра не более 3000х3000 мкм, многокомпонентной микросистемы не более 1,5 х 1,5 см.

Кремниевый сенсор системы включает в себя сенсоры датчика температуры, гироскопа и акселерометра. В качестве датчика температуры используется микрорезонатор пятого типа, сенсор которого представлен на рисунке 6.1.

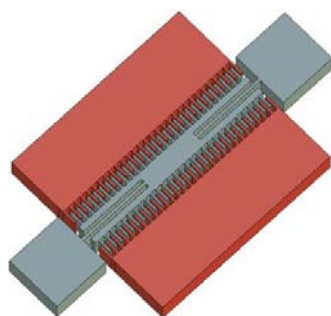


Рисунок 6.1 – Сенсор датчика температуры

Сенсоры гироскопа и акселерометра идентичны и представлены на рисунке 6.2.

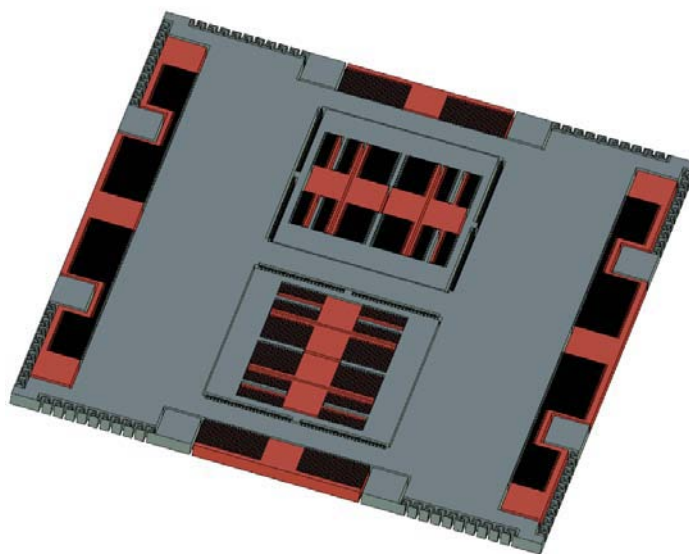


Рисунок 6.2 – Сенсор гироскопа и акселерометра

Габаритные размеры сенсора гироскопа и акселерометра составляют 3000х3000 мкм, что соответствует техническому заданию.

При построении сенсора микросистемы все эти сенсоры должны быть расположены на одной пластине и конструкция должна быть планарной (рисунок 6.3).

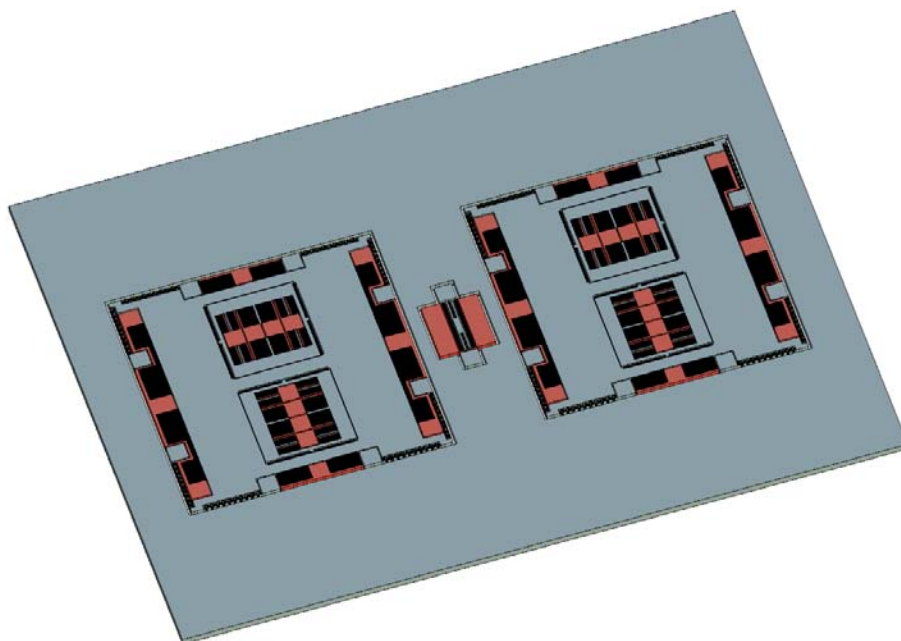


Рисунок 6.3 – Активная часть многокомпонентной микросистемы

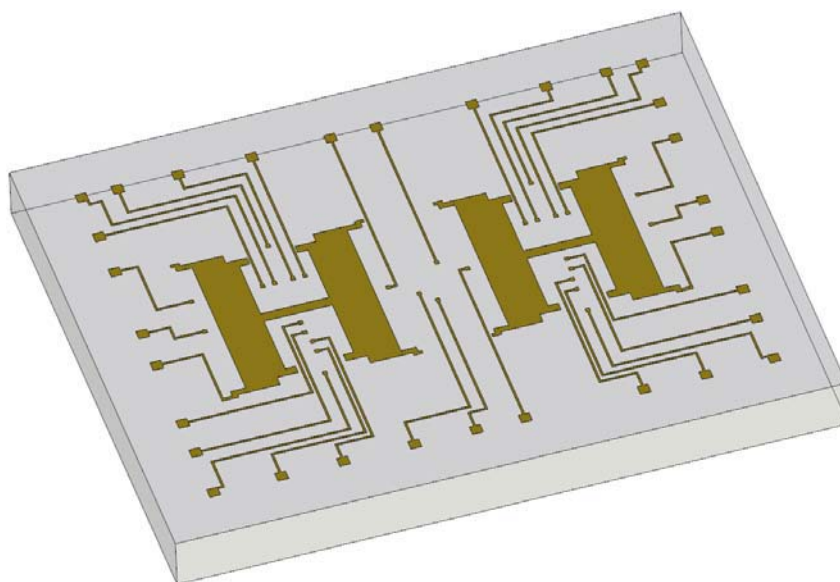
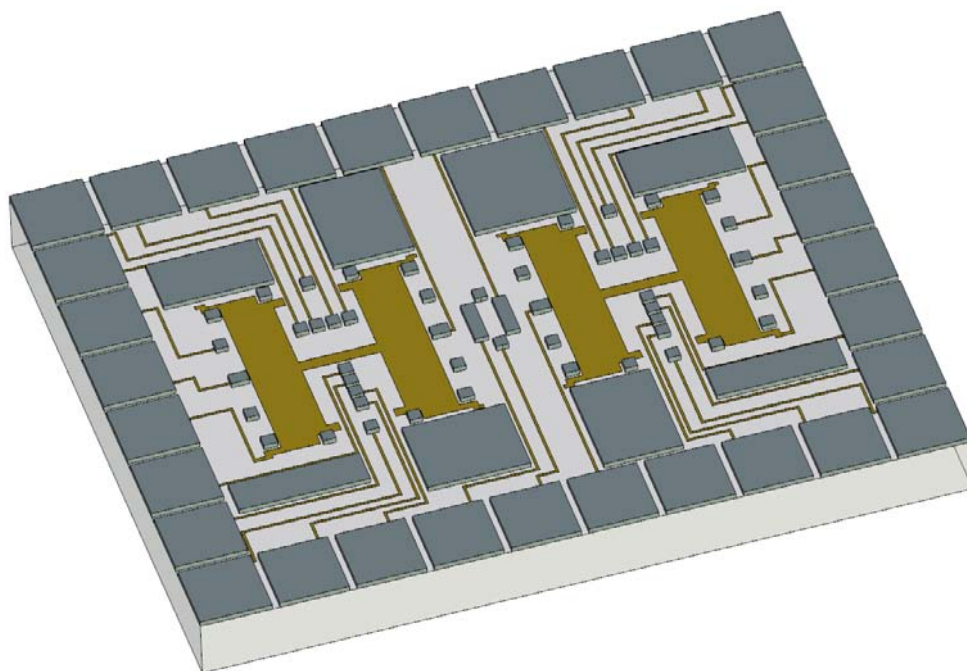
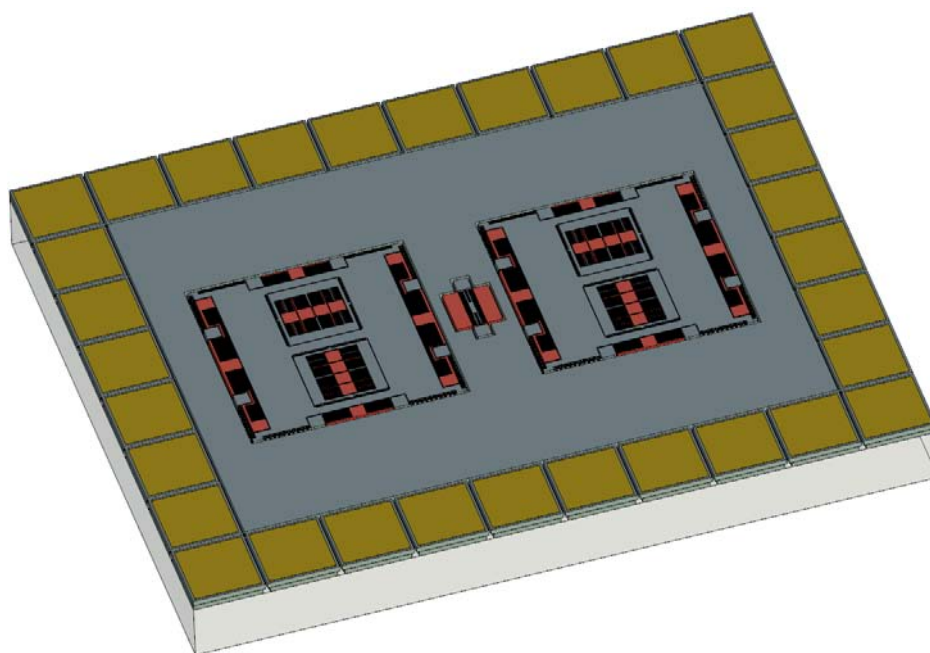


Рисунок 6.4 – Основание сенсора многокомпонентной системы с контактами



6.5 – Анкерная часть многокомпонентной системы



6.6 – Сенсор многокомпонентной микромеханической системы

Габаритные размеры многокомпонентной микросистемы 0,49 x 0,62 см.

Данная микросистема имеет пять измерительных осей, так как гироскоп измеряет две составляющие угловой скорости объекта. Для измерения третьего вектора угловой скорости на пластине устанавливается ещё один однокомпонентный гироскоп, сенсор которого представлен на рисунке 6.7.

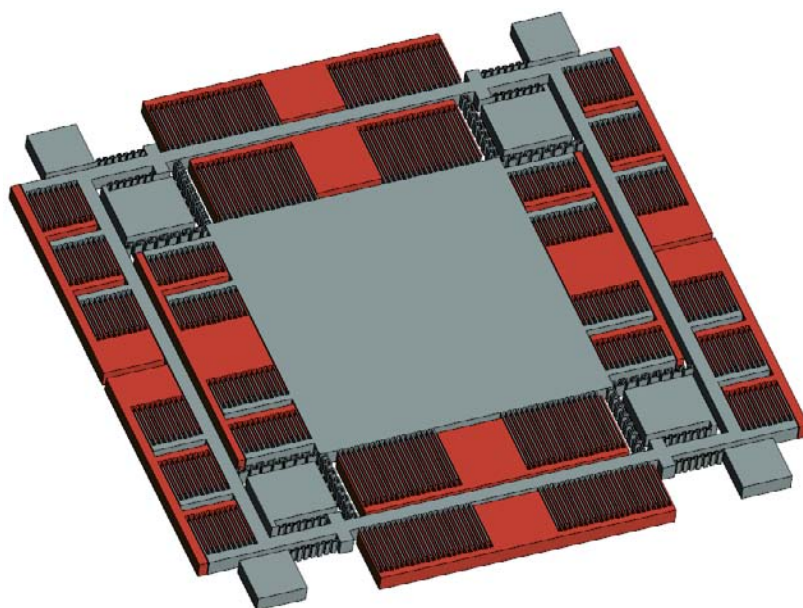


Рисунок 6.7 – Сенсор однокомпонентного гироскопа

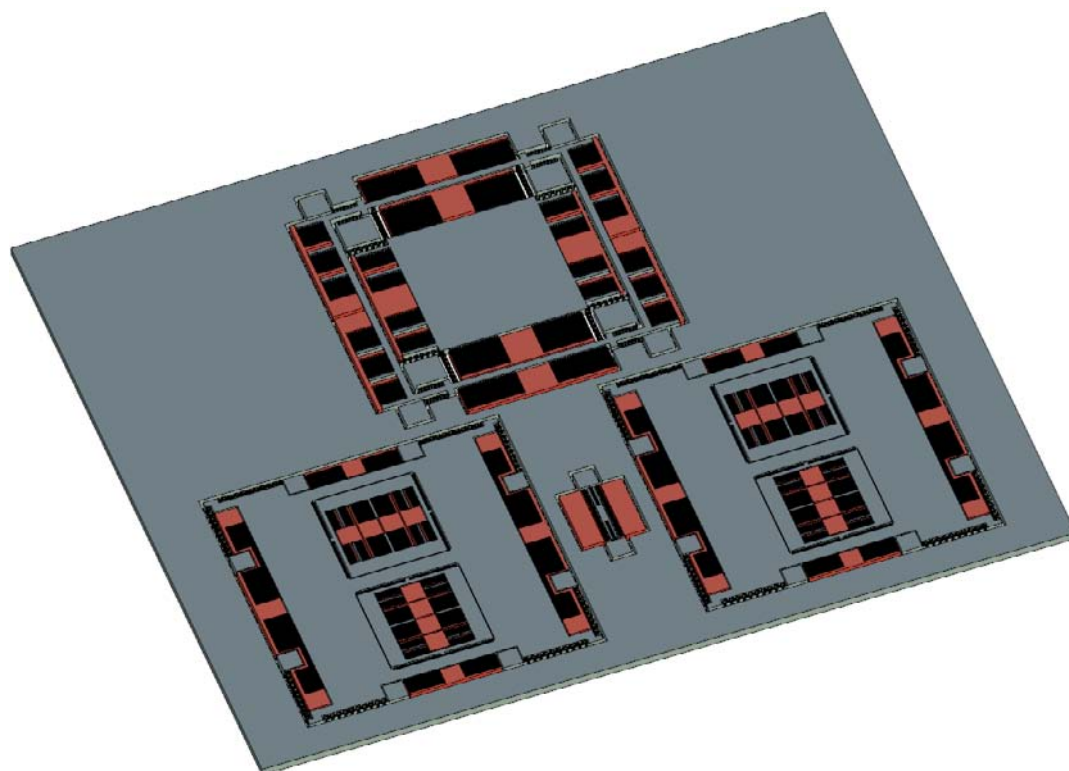


Рисунок 6.8 – Сенсор шестикомпонентной микросистемы

Габаритные размеры сенсора шестикомпонентной микросистемы составляют 0,618 x 0,62 см.

6.2 Анализ перспектив разработки микросистем с субмикронным зазором

Эффект Казимира — эффект, заключающийся во взаимном притяжении проводящих незаряженных тел под действием квантовых флуктуаций в вакууме [54, 55]. При достижении элементами микросистем субмикронных и нанометровых размеров, ощутимое влияние на их работу начнут оказывать силовые взаимодействия, слабо проявляющиеся на расстояниях порядка единиц микрон. К этим силам могут быть отнесены силы Ван-дер-Ваальса и Казимира, которые являются основными учитываемыми взаимодействиями в атомно-силовой микроскопии. Они также должны быть приняты во внимание при расчете устройств с элементами, разнесенными друг от друга на субмикронные расстояния, если же расстояния между элементами уменьшатся до единиц или десятков нанометров, эти силы будут полностью определять работу прибора.

Эффект Казимира выражается в том, что на единицу площади двух проводящих плоскопараллельных пластин действует сила притяжения

$$\frac{F}{S} = \frac{hc\pi k}{240d^4},$$

где c — скорость света в вакууме, h — постоянная Планка, d — расстояние между пластинами, $k \leq 1$ — коэффициент, зависящий от диэлектрической проницаемости пластин и среды между ними (для сверхпроводящих пластин в вакууме $\gamma = 1$).

Сила Казимира чрезвычайно мала. Расстояние, на котором она начинает быть сколько-нибудь заметной, составляет доли микрометра. Однако, будучи обратно пропорциональной 4-й степени расстояния, она очень быстро растёт с уменьшением последнего. На расстояниях порядка 10 нм давление, создаваемое эффектом Казимира, оказывается сравнимым с атмосферным.

Учитывая тенденцию уменьшения линейных размеров в микро- и наноэлектромеханических системах, необходимо учитывать проявление в них сил Казимира, так как они становятся соизмеримы с остальными действующими силами и очень серьезно будут влиять на работу устройства [56, 57]. Силы