

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения»

На правах рукописи

Аман Елена Эдуардовна



**МОДЕЛИ И МЕТОДИКИ УПРАВЛЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТИВНОСТЬЮ
СОЗДАНИЯ АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНЫХ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ
АКСЕЛЕРОМЕТРОВ**

05.02.22 – Организация производства (радиоэлектроника и приборостроение)

Диссертация на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Научный руководитель
Доктор физико-математических наук,
доцент Смирнов А.О.

Санкт-Петербург – 2019

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|---|----|
| ВВЕДЕНИЕ | 4 |
| ГЛАВА 1. МИКРОМЕХАНИЧЕСКИЕ АКСЕЛЕРОМЕТРЫ КАК ЭЛЕМЕНТЫ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПОДВИЖНЫМИ ОБЪЕКТАМИ | 9 |
| 1.1 Общая функциональная структура системы управления подвижного объекта . | 9 |
| 1.2 Микромеханические акселерометры, как элементы систем управления..... | 13 |
| 1.3 Автоколебания в измерительной технике | 15 |
| 1.4 Состояние разработок ММА..... | 21 |
| 1.5 Постановка задачи исследования | 26 |
| Выводы к главе 1 | 26 |
| ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА КОНСТРУКТИВНО-КИНЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ И ВЫБОР ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕМЕНТОВ АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНОГО МИКРОМЕХАНИЧЕСКОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА | 28 |
| 2.1 Разработка конструктивно-кинематической модели автоколебательного микромеханического акселерометра..... | 28 |
| 2.2 Сравнительный анализ датчиков силы микромеханических инерциальных датчиков..... | 31 |
| 2.3 Анализ статических характеристик АММА ОДС | 34 |
| 2.4 Выбор и обоснование элементной базы | 39 |
| Выводы к главе 2 | 52 |
| ГЛАВА 3. ПОВЫШЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТИВНОСТИ ПРОЦЕССА СОЗДАНИЯ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ АКСЕЛЕРОМЕТРОВ..... | 53 |
| 3.1 Разработка имитационной модели мониторинга процесса эксплуатации | 53 |
| 3.2 Результаты имитационного моделирования | 58 |

| | |
|--|------------|
| 3.3 Разработка методики повышения результативности процесса создания АММА | 60 |
| Выводы к главе 3 | 62 |
| ГЛАВА 4. ОЦЕНКА ВРЕДНЫХ ВНЕШНИХ ФАКТОРОВ И СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНЫХ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ АКСЕЛЕРОМЕТРОВ ... | 63 |
| 4.1 Исследование влияния внешнего магнитного поля на характеристики автоколебательного микромеханического акселерометра с «обращенным» датчиком силы | 63 |
| 4.2 Разработка магнитного экрана. Выбор материалов и геометрических параметров | 69 |
| 4.3 Характеристики материалов конструкции, режим работы автоколебательного микромеханического акселерометра с «обращенным» датчиком силы | 84 |
| 4.4 Оценка влияния теплового воздействия на характеристики автоколебательного микромеханического акселерометра с «обращенным» датчиком силы | 87 |
| 4.5 Методика расчета тепловых режимов работы автоколебательного микромеханического акселерометра с «обращенным» датчиком силы | 96 |
| 4.7 Способы нормализации температурного режима автоколебательного микромеханического акселерометра с «обращенным» датчиком силы | 113 |
| Выводы к главе 4 | 125 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ | 127 |
| СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ | 129 |
| СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ..... | 130 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ. АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ..... | 141 |

ВВЕДЕНИЕ

На пути создания микромеханических датчиков и устройств возникают все новые технологии, применяются новые материалы, расширяющие возможности исследователей, инженеров и разработчиков, совершенствуя итоговый результат. В настоящее время 3d печать металлом рассматривается как наиболее перспективная в числе имеющихся на сегодняшний день. Лазерное плавление и лазерное спекание металлом - это процессы производства металлических компонентов, относящиеся к трехмерной печати порошком. Технологии имеют много общего: используют лазер и выборочно сплавляют (или расплавляют) частицы металлического порошка, склеивают их вместе, создавая тем самым, слой за слоем. Кроме того, материалы, используемые в обоих процессах, поступают в гранулированной форме. Существуют другие процессы производства присадок, которые могут быть использованы для производства плотных металлических деталей, таких как электронно-лучевое плавление, однако данный вид печати менее доступен.

Различия между лазерным плавлением и спеканием сводятся к основам процесса склеивания частиц: лазерное плавление использует металлические порошки с одной температурой плавления и полностью расплавляет частицы, а в лазерном спекании порошок состоит из материалов с переменными температурами плавления, которые плавятся на молекулярном уровне при повышенных температурах.

К разработкам микроэлектромеханических систем (МЭМС) в России причастны многие НИИ, КБ, такие как НИИПМ (НИИ прикладной механики) им. акад. В.И. Кузнецова, РПКБ (Раменское проектно-конструкторское бюро), ЦНИИ "Электроприбор", МИЭА (Московский институт электроавтоматики), АО "Гранит-16", НИИ "Полюс", НИИ "Астрофизика", Пермская научно производственная приборостроительная компания (ПНППК), ЗАО "ГИРООПТИКА" и др. [1, 2, 3].

Актуальность работы можно подтвердить высокой востребованностью МЭМС на рынке на сегодняшний день и в перспективе (рис.1) [4 - 7].

2017-2023 MEMS market forecasts: RF vs. other devices

(Source: Status of the MEMS Industry, Yole Développement, May 2018)

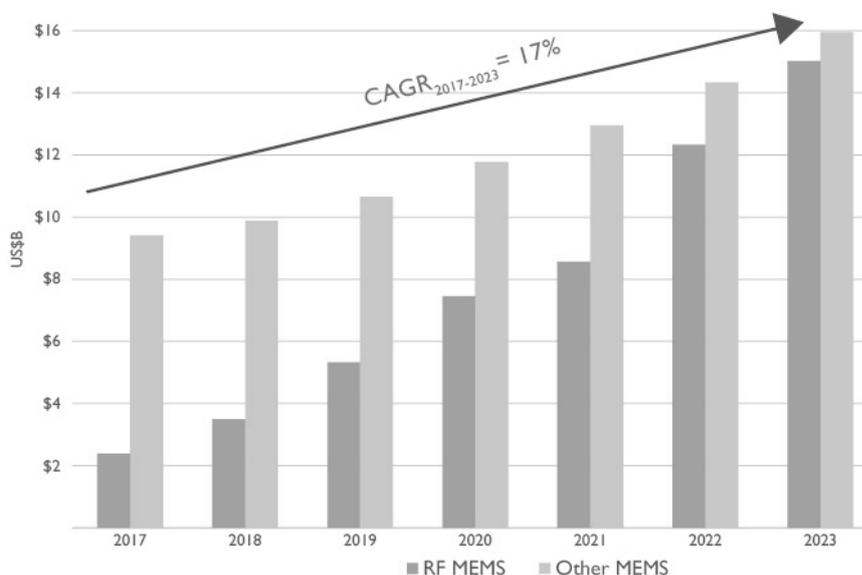


Рисунок 1 – Перспективы рынка МЭМС по данным Yole Development [7]

В области космических технологий используется МЭМС при создании перспективных новых систем для обслуживания космических аппаратов крупногабаритных модулей, платформ и систем поддержки, целевого оборудования. Использование МЭМС позволит удовлетворить основные структурные, функциональные, экономические требования к перспективным космическим технологиям [6].

Целью диссертационного исследования является повышение результативности создания автоколебательных микромеханических акселерометров за счет разработки моделей, методик и алгоритмов обеспечения эксплуатационной стабильности характеристик.

Для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи:

- разработка конструктивно-кинематической модели микромеханических акселерометров;
- разработка методики повышения результативности процесса создания автоколебательного микромеханического акселерометра;
- разработка имитационной модели мониторинга процесса эксплуатации автоколебательных микромеханических акселерометров;

– разработка методики повышения качества функционирования автоколебательных микромеханических акселерометров.

Объектом исследования является автоколебательные микромеханический акселерометр с магнитоэлектрическим датчиком силы для систем управления подвижными объектами.

Предметом исследования являются модели и методики повышения результативности создания автоколебательных микромеханических акселерометров.

Методы исследований

Для решения поставленной задачи в работе использованы методы и аппарат теоретической механики, теории колебаний, теории автоматического управления, управления производством, цифровой обработки информации, математического анализа и компьютерного моделирования.

Область исследования соответствует пп. 5, 7, 10, 11 паспорта специальности – 05.02.22 «Организация производства (радиоэлектроника и приборостроение)».

Положения, выносимые на защиту

- конструктивно-кинематическая модель микромеханических акселерометров;
- методика повышения результативности процесса создания автоколебательного микромеханического акселерометра;
- имитационная модель мониторинга процесса эксплуатации автоколебательных микромеханических акселерометров;
- методика повышения качества функционирования автоколебательных микро-механических акселерометров.

Научной новизной обладают следующие результаты исследования

- конструктивно-кинематическая модель (ККМ) микромеханических акселерометров, обеспечившая возможность реализации автоколебательных режимов, упрощение технологических решений производства датчика, введение существенно нелинейного звена и использование отечественной элементной базы;
- методика повышения результативности процесса создания автоколебательного микромеханического акселерометра, которая позволила на этапе плани-

рования производства гибко настраивать параметры прибора за счёт нелинейной обратной связи;

– имитационная модель мониторинга процесса эксплуатации автоколебательных микромеханических акселерометров, позволившая проводить расчет и анализ их характеристик на этапе проектирования;

– методика повышения качества функционирования автоколебательных микромеханических акселерометров, обеспечившая расширение диапазона условий эксплуатации, согласование его с требованиями заказчика.

Практическая значимость полученных научных результатов состоит в следующем:

– Разработанная конструктивно-кинематическая модель микромеханических акселерометров позволила отказаться от вакуумирования и герметизации внутреннего объема датчиков, что сократило трудоемкость производства на 20-23 %.

– Использование магнитоэлектрических «обращенных» датчиков силы (ДС) дало возможность расширить диапазон измерений в 1,5 раза уменьшения смещения «нуля» до $4,15 \cdot 10^{-5}$ м, добиться снижения нестабильности коэффициента преобразования до 0,05%, уменьшить величину смещения «нуля» до 30 %, сократить энерго- и трудовые затраты при производстве АММА, создать саморегулирующуюся систему за счет реализации автоколебательных режимов.

– Применение методик повышения результативности и качества функционирования датчика наряду с гибкостью настроек позволило расширить диапазон условий эксплуатации АММА.

Достоверность результатов диссертационной работы основана на корректном применении математического аппарата, методов математического и имитационного моделирования, подтверждено результатами практического внедрения.

Личный вклад автора состоит в непосредственной разработке ККМ и конструкторско-технологических решений микромеханических акселерометров, разработке имитационной модели мониторинга процесса эксплуатации автоколебательных микромеханических акселерометров, разработке методики повышения

результативности автоколебательного микромеханического акселерометра (АМ-МА) на этапе планирования производства.

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались на следующих научных конференциях:

Научная сессия ГУАП, Санкт-Петербург (2012, 2014).

Измерения и испытания в судостроении и смежных отраслях. СУДОМЕТРИКА, Санкт-Петербург (2014, 2016).

Проблемы и перспективы развития авиации, наземного транспорта и энергетики «АНТЭ-2015» Международная научно-техническая конференция, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ (КНИТУ-КАИ) (2015).

Современное машиностроение: Наука и образование, Политехнический университет, СПб, 2019 г.

«Завалишинские чтения - 2019», ГУАП, СПб, 2019.

Теоретическая значимость работы заключается в разработке теоретических основ построения ММА, работающего в режиме автоколебаний с принципиально новым датчиком силы, разработке имитационной модели для анализа характеристик автоколебательного микромеханического акселерометра с «обращенным» датчиком силы.

Реализация результатов работы

Результаты диссертационной работы использованы при выполнении работ по НИР № С-7 «Разработка новых принципов построения микромеханических датчиков для систем навигации», 2015 г., в виде основных научных положений, выводов и рекомендаций, внедрены в деятельности АО «Лазерные системы», ОМП «Энергопрогресс», АО НПП «Радар ммс» и ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения», что подтверждается актами внедрения.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 21 работа, из них 3 – без соавторов, 10 статей в ведущих рецензируемых журналах, 2 статьи в изданиях, входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования, одна статья и 8 докладов в других изданиях, патент на изобретение.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы из 108 наименований и одного приложения. Текст диссертации изложен на 140 страницах машинописного текста, содержит 93 рисунка, 24 таблицы, общий объем с учетом приложений составляет 146 страниц.

ГЛАВА 1. МИКРОМЕХАНИЧЕСКИЕ АКСЕЛЕРОМЕТРЫ КАК ЭЛЕМЕНТЫ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПОДВИЖНЫМИ ОБЪЕКТАМИ

1.1 Общая функциональная структура системы управления подвижного объекта

Функция управления СУ ПО заключается в автоматической стабилизации [8] и обеспечении автоматического или автоматизированного маневрирования [9].

Из автономных СУ наибольшее распространение получили инерциальные системы, осуществляющие управление объектом по результатам измерений ускорений его движения, вычисления отклонений от заданной траектории движения и выработки сигналов управления, ликвидирующих указанные отклонения. Преимущество инерциальных СУ заключается в том, что они являются абсолютно автономными и практически полностью помехозащищенными.

К этой же группе можно отнести СУ более сложных автономных устройств, примером которых являются промышленные роботы и манипуляторы. Эти СУ реализуют алгоритмы управления движением рабочего органа по заданной программе и по сигналам сенсоров - чувствительных элементов. В этой группе систем управления к ЧЭ кроме высокой точности добавляются требования минимизации массы и габаритов и, зачастую, низкой стоимости.

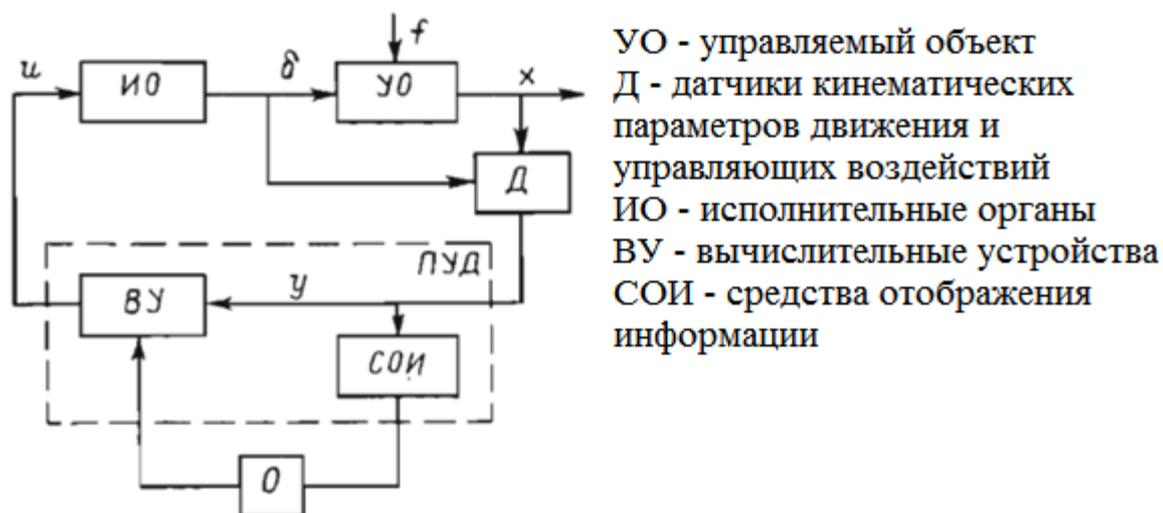


Рисунок 2 – Общая функциональная структура системы управления подвижным объектом [10]

Однако наиболее значительные результаты были достигнуты в области создания СУ подвижными объектами, что определялось в первую очередь необходимостью решения проблем укрепления обороноспособности страны. При создании современной авиации, ракетной и космической техники, надводного и подводного морского флота возникла потребность разработки систем, выполняющих различные задачи управления, например, - управление движением, управление стартом ракет, управление посадкой самолетов и космических аппаратов.

Толчком к созданию автономных СУ послужило создание межконтинентальных баллистических ракет и подводных лодок стратегического назначения, требующих устойчивого управления при больших перемещениях, в условиях скрытности движения и наличия помех.

Иногда увеличения точности систем управления и навигации удастся достичь путем привлечения дополнительной информации, т. е. коррекцией инерциальных систем от сторонних источников информации. В качестве такой информации можно использовать высоту объекта над поверхностью Земли, измеренную барометрическим высотомером или радиовысотомером, скорость объекта относительно поверхности Земли, полученную с помощью доплеровского измерителя скорости, координаты объекта по отношению к Земле, определенные радионави-

гационной системой. Для коррекции работы ИНС может быть использована астрономическая коррекция, т. е. сравнение положения осей координат стабилизированной платформы с заданными направлениями на звезды, планеты, искусственные спутники Земли и т. п.

В простейшем случае дополнительная информация используется для сравнения показаний инерциальной системы со значениями, полученными от других каналов измерения. В этом случае не затрагиваются источники погрешностей и динамические процессы в инерциальной системе. Интервал между коррекциями определяется временем, в течение которого приращения ошибок инерциальной системы не выходят за допустимые пределы.

Возможны и другие способы использования дополнительной информации, когда с её помощью изменяется сам алгоритм работы инерциальной системы, Это ведет к тому, что вместе с алгоритмом меняется и структура уравнений и ошибок, т. е., в конечном счете, меняется характер зависимости ошибок от погрешностей элементов и начальных условий. Такие способы коррекции предполагают непрерывное использование сторонней информации о течение достаточно длительного времени или даже в течение всего времени работы ИНС. При этом можно говорить не столько о коррекции инерциальной системы, сколько о её комплексировании с дополнительными неинерциальными источниками информации. В общем случае такая система теряет автономность, что в ряде случаев существенно ухудшает тактико-технические характеристики СУ. В частности, решение стратегических задач обороноспособности требует создания морских навигационных систем нового поколения. Одна из идей, над которой достаточно активно ведутся работы, заключается в коррекции ИНС по аномалиям гравитационного поля Земли. Для решения этой задачи ИНС комплексировается с гравитационным градиентометром, что позволяет ввести дополнительный канал измерения, сохраняя при этом полную автономность навигационной системы. Среди многочисленных схем устройств для измерения вертикальной и горизонтальной составляющих градиента геофизического поля Земли анализировалась возможность реализации схемы акселерометрического градиентометра, в которой чувствительными элементами яв-

ляются линейные или угловые акселерометры. При этом ввиду малости измеряемых величин наиболее существенным требованием к ЧЭ является наличие высокой пороговой чувствительности, величина которой определяется как $1 \cdot 10^{-10} g$ для линейных акселерометров или $1 \cdot 10^{-9} \text{ рад/с}^2$ для угловых акселерометров при суммарной погрешности измерения не более 0,09 %.

Таким образом, анализ требований, предъявляемых к современным системам управления и навигации подвижными объектами, показывает, что их тактико-технические характеристики в значительной степени определяются точностными характеристиками ЧЭ. Значительный разрыв между достигнутым и требуемым уровнем разработок ЧЭ позволяет утверждать, что любое решение, в той или иной степени улучшающее метрологические характеристики ЧЭ, является, безусловно, актуальным.

Несмотря на различие структурных построений, общим для всех созданных ЧЭ является реализация в них принципа динамического уравнивания, осуществляемого путем задания режима автоколебаний и превращения, тем самым, чувствительных элементов в пространственно-временные модуляторы, которые производят преобразование измеряемых физических величин в широтно- или частотно-модулированные электрические сигналы. Независимо от вида статической характеристики нелинейной части, а также от вида модуляции сигнала, последний представляет собой последовательность разнополярных импульсов напряжения, для обеспечения постоянства амплитуды которых используются стабилизированные источники напряжения или тока. Наличие на выходе прибора прямоугольных разнополярных импульсов сигнала управления позволяет далее достаточно простыми средствами сформировать цифровой код, что обеспечивается путем заполнения импульсов обратной связи высокочастотными стабилизированными счетными импульсами. В силу свойств автоколебательных систем глубина модуляции, независимо от вида (ШИМ или ЧИМ), пропорциональна измеряемой величине. При этом в случае ШИМ выходная информация определяется как разность длительности $\tau_2 - \tau_1$, а в случае ЧИМ - как изменение периода $\tau_2 + \tau_1$ автоколебаний подвижного узла ЧЭ.

При создании прецизионных ЧЭ компенсационного типа вопрос выбора типа и конструкции датчика силы является наиболее значимым, поскольку именно этот узел прибора в значительной степени определяет показатели качества (точные характеристики) ЧЭ. Специфика требований к ДС, накладываемых режимом автоколебаний, заключается в необходимости обеспечения: а) малой инерционности создаваемого силового воздействия, б) максимальной удельной энергоотдаче, в) высокой стабильности характеристик.

Вопросы разработки и создания преобразователей магнитоэлектрического типа подробно изложены в литературе [8-11], что дает возможность достаточно полно проводить расчет их параметров и характеристик. В плане конструктивной реализации этих преобразователей были проработаны различные схемы, обеспечивающие улучшение метрологических характеристик приборов.

Разнообразие задач, решаемых в области управления, как например, СУ сложных автономных устройств, как промышленные роботы и манипуляторы. [12 – 15], приводит к дифференциации систем управления по выполняемым функциям и формирует потребность в ином подходе к принципам их построения, что находит отражение в структуре, алгоритмах работы и технической реализации СУ, а также в формировании дополнительных требований к характеристикам чувствительного элемента (ЧЭ). [10]

1.2 Микромеханические акселерометры, как элементы систем управления

Использование СУ с микромеханическими датчиками широко применяется в технике различного назначения [15]. Среди основных применений СУ с микроэлектромеханическими датчиками можно выделить малые космические аппараты, автотранспортные и железнодорожные применения, судостроение и автономные подводные аппараты и сельское хозяйство, робототехнику [16, 17]. Одной из основных задач современного приборостроения – переход на цифровые технологии [18]. В настоящее время электроника находится в процессе перехода от аналогового к цифровому, данное явление в средствах массовой информации называют

«аналоговым закатом». Широкое распространение компьютерного высокоточного и производительного оборудования затрагивает различные отрасли промышленности и требует внедрения прецизионных датчиков, при этом достаточно простых в изготовлении и эксплуатации. Одно из основных требований к современным и будущим моделям авиационной техники, обеспечение высокой надежности, ремонтпригодность и эксплуатационная технологичность. Эта задача может быть решена с помощью встроенных интегрированных систем управления по техническому состоянию конструкции самолета, рабочим параметрам двигателя и различным бортовым системам. Их использование поможет повысить безопасность полетов, снизить трудозатраты и сократить время технического обслуживания самолета (вертолета), что, в свою очередь, приведет к снижению стоимости жизненного цикла самолета. Согласно разработчикам, наиболее широкое применение в диагностических системах найдут акустические, оптоволоконные и электрохимические датчики, акселерометры, тензометры, датчики усталости, датчики температуры и давления. Перераспределение нагрузок в конструкции планера самолета, может быть обнаружено с использованием тензодатчиков, а также акустических или оптических методов контроля. Данные о состоянии летательного аппарата, поступившие от датчиков, отправляются на устройства обработки информации, с преобразованием в цифровую форму [16].

Особенностью ЧЭ компенсационного типа является наличие замкнутого контура регулирования, содержащего как прямую цепь преобразования сигнала, так и цепь обратной связи. При этом структура компенсационных ЧЭ так же содержит ПУ и ДП, а компенсирующий преобразователь (или датчик силы) осуществляет силовое замыкание контура регулирования [19 - 21].

Значительное улучшение параметров датчика потребует новых конструкций и схемных решений.

Это повышает актуальность новых исследований для сборок, применяющих новые физические принципы и эффекты, чтобы обеспечить более высокую точность и нестандартные решения для выходного цифрового сигнала.

В ЧЭ компенсационного типа измеряемая величина $y_{вх}$ преобразуется первичным преобразователем (ПП) в некоторую механическую силу F_y . Приборы компенсационного типа позволяют получить существенно более высокие точностные характеристики и поэтому ЧЭ широко используются в системах управления и навигации подвижных объектов: летательных аппаратов, ракет, кораблей, космических аппаратов [22 - 26], а также в системах управления технических объектов, устройств и процессов [10].

1.3 Автоколебания в измерительной технике

Ранее уже упоминалось что развитие технологии цифровых устройств является приоритетным направлением в современном приборостроении. Решение фундаментальных и прикладных технологических задач при создании принципиально новых датчиков и систем с применением современных цифровых технологий позволяют повысить качество и простоту их изготовления наряду с увеличением точностных характеристик.

Как указано в трудах [27, 28] «разработка датчиков с применением новых физических принципов, эффектов, которые позволяют повышать точностные характеристики и реализовать нестандартные решения в области формирования выходного цифрового сигнала является одной из актуальных на сегодняшний день проблем». Такие датчики работают лучше части их современных аналогов, потому что они имеют более высокие амплитуды на более широкой частоте. При случайном возбуждении переменная потенциальная функция системы обеспечивает эффективное преобразование потенциальной и кинетической энергий. Предложенные конструкции автоколебательных датчиков позволяют повысить чувствительность при малой зависимости от уровня возбуждения. Характеристики более широкой полосы пропускания, большего отклика и более низкого порога возбуждения достигаются из-за наличия нелинейности.

В основу идеи создания таких датчиков положены фундаментальные физические явления, которые закладывают основу оценки физических явлений. [29]

Данное предположение приводит к идеи цикличности. [30] С научной точки зрения такая идея дает возможность исследователям обернуться назад, к истокам всех идей, просеянных через сито истории одни, потеряв актуальность и корни в софистике утратили свое значение, другие же – непрерывно и возобновляясь, тянулись до наших дней, развиваясь, совершенствуясь, очищаясь от «шелухи». Таковой являлась и идея цикличности, возникшая еще в трудах Платона и Аристотеля, она вновь обращает на себя внимание современных ученых.

Формула Эйнштейна связывает массу и энергию через скорость света в вакууме, эта скорость составляет 299792458 метров с секунду. Луч света, покинувший Землю через 8 минут пролетит мимо Солнца, а за 100 тысяч лет достигнет границ галактики Млечный путь. Сегодня, наблюдая свет далеких звезд, астрономы наблюдают давно погибшие миры, любуясь звездным небом, мы наблюдаем прошлое. Если мы посветим фонариком в небо, свет достигнет некоего наблюдателя, скажем, из соседней галактики – Туманности Андромеды, когда нас уже не будет в живых, через 2 миллиона лет. Скорость света велика, однако не бесконечна, а, может, и ничтожно мала, когда речь заходит о передачи информации на расстояния, разделяющие галактики и звезды. Способность достичь близких скоростей стала возможна в Большом адронном коллайдере. Однако скорость света есть больше, чем константа, она представляется как «ограничитель», как если бы, имея гоночный болид, мы жили в мире, где законы физики не дадут ему разогнаться, независимо от мощности двигателя, выше 90 км/ч. Однако, нарушение ограничения в скорости света не представляется возможным в самой ткани пространства – времени. О путешествиях во времени уже писали фантасты, в реальности данный парадокс не допустим [16].

$E = mc^2$, где m – масса тела. E – энергия, заключенная в теле, т.е. даже самая малая частица способна обладать колоссальной энергией.

С другой стороны $E = mV^2/2 + mgh$, как сумма кинетической и потенциальной энергии.

Тело, расположенное на расстоянии от поверхности $h = 0$ м, может обладать только кинетической энергией. Даже при равенстве $V = c$ получается остаток $mc^2/2$, что подразумевает неполное расходование энергии.

Энергетический подход к процессам передачи информации неизбежно приводит к аналогии с термодинамическими процессами, в которых мерой «беспорядка» является энтропия S . Так, по аналогии с термодинамикой в теории информации в качестве основной характеристики К. Шенноном была введена энтропия $H(X)$.

Предположим, наблюдается некоторая система X , в результате наблюдений за системой, получим энтропию $H(X)$. Наблюдая ту же систему повторно и фиксируя с помощью датчиков ее показатели, получаем новую энтропию – $H(X|Y)$, т.е. наблюдая событие X в сообщениях о событии Y .

Известно, что количество информации о системе будет выражаться соотношением [31]

$$I(X|Y) = H(X) - H(X|Y).$$

Таким образом, теория информации трактует получение информации как устранение некоторой неопределенности, ее части, а количество информации определяется как разность неопределенности ситуаций до и после измерения. [31] При этом информационная энтропия, также как и термодинамическая, имеет смысл меры беспорядочности. Для характеристики степени упорядоченности, т.е. запасенной в системе энергии и ее способности содержать информацию, [32] Бриллюэн предложил ввести отсчет энтропии в обратную сторону и ввел термин «негэнтропия» или «отрицательная энтропия».

Есть масса процессов, которых мы не можем наблюдать невооруженным глазом: магнитные и электрические, гравитационные и тепловые поля и т.д. Такие процессы мы научились измерять с помощью датчиков. Информация, в свою очередь, всеобъемлющее понятие – это и бумажные, магнитные, электронные носи-

тели, и свет, преломленный на сетчатке глаза, слух, обоняние и тд, не говоря уже о различиях в строении органов чувств существующих видов живых существ, т.е. их восприятие и преобразование электромагнитного излучения, звуковых колебаний в нервные импульсы так же различны. Одну и ту же информацию мы воспринимаем по-разному.

Информация о системе выражается через соотношение идеального и реального процессов, через рассеивание энергии – энтропию, хаотичность. Любой процесс обусловлен энергетически. Энергия – единая мера движения и взаимодействия материй, мера перехода материи от одной формы к другой. В замкнутой системе, как известно, энергия сохраняется. В реальном мире закон сохранения энергии не применим, в реальном земном мире энергия расходуется.

Пусть система X наделена энергией mc^2 , обладает кинетической энергией T , тогда разность этих энергий даст некоторую энтропию $H(X)$. Вернувшись на пару абзацев назад, мы получим, что этот «остаток» будет выражаться через то же самое количество информации $I(X)$.

В шестидесятые годы прошлого столетия профессор Н.А. Козырев сделал предположение о причинности и направлении времени. Степень активности времени он назвал «плотностью». [16, 33]

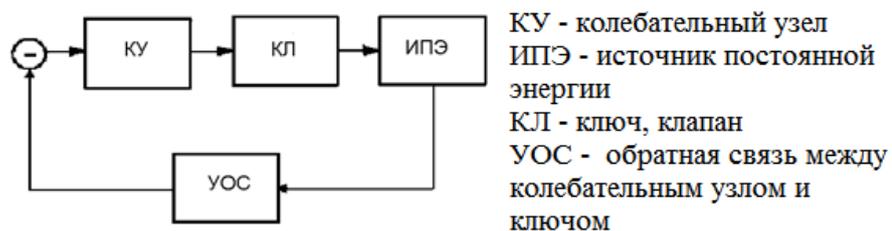


Рисунок 3 – Обобщенная структурная схема автоколебательной системы

Количество переносимой информации будет зависеть от вида модуляции, утверждение это наглядно подтверждается графиками, приведенными на рисунке 4 [28, 34, 35].

Работа автоколебательного датчика поясняется рисунком 7, где представлены его статическая характеристика элемента ключа, диаграмма движения подвижного узла прибора и диаграмма сигнала управления. [36]

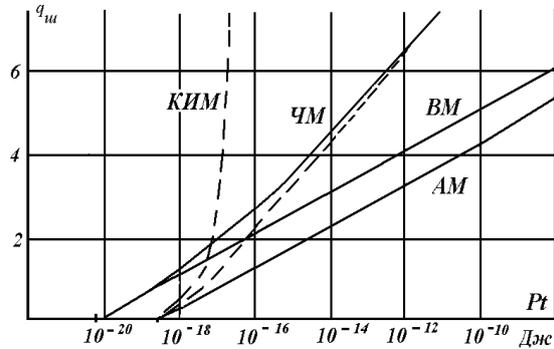


Рисунок 4 – Различные виды модуляции и количество переносимой информации

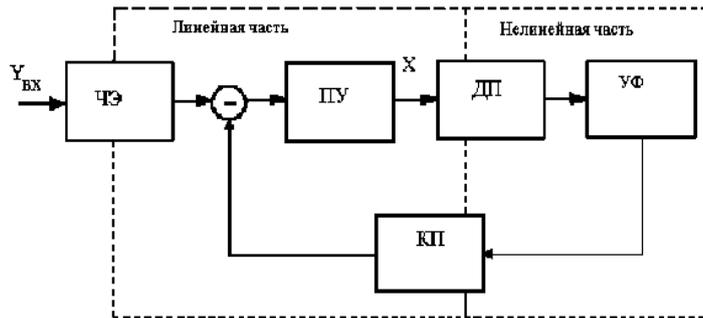


Рисунок 5 – Структурная схема автоколебательного датчика

Нетрудно сделать вывод, что изменение режима работы прибора приведет, в конечном счете, к принципиальным изменениям самого процесса измерения.

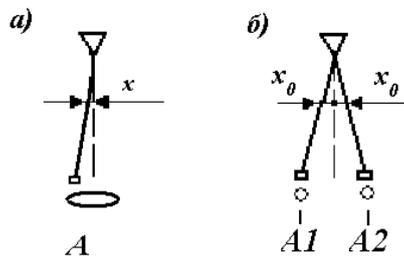


Рисунок 6 – Регистрация входного воздействия [28] а) аналоговый контур, б) автоколебательный прибор

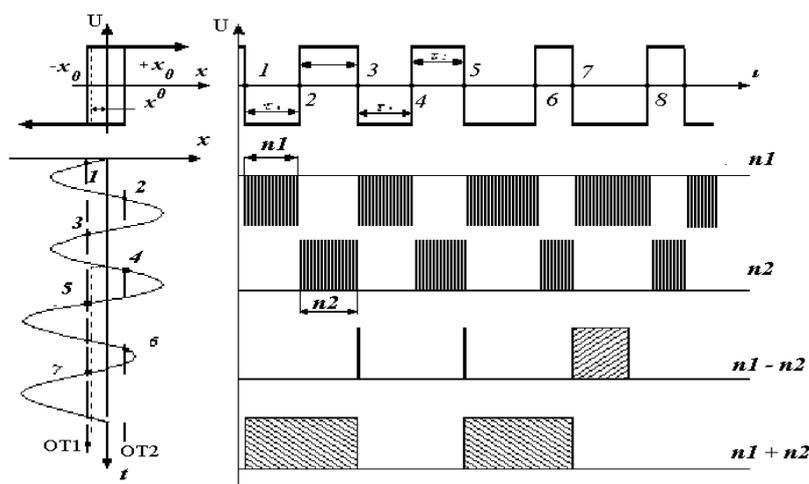


Рисунок 7 – Диаграммы движения ПУ и выходных сигналов [16, 36]

В современном обществе наблюдается тенденция роста сложности и ускорения развития. Изобретения, случившиеся за последние 15-20 лет, внесли существенные изменения в развитие науки и экономики развитых стран. Смартфоны, появившиеся на рынке в 2007 году, сейчас являются практически частью нас. Следующая значимая тенденция – автоматизация, затронувшая в первую очередь сферу промышленности. Процесс, начавшийся в Англии с середины 17 века, сейчас достигает своего апогея. Проникновение роботизированных установок в различные области промышленности привели к тому, что сейчас в рамках ускоренного развития появляется все больше дешевых роботов, более совершенных алгоритмов обработки информации, возобновился интерес к искусственному интеллекту, который оказался способен решать все более непростые задачи. Такой процесс позволяет вытеснить человека из сфер рутинного труда. Цифровизацию можно назвать «двигателем» автоматизации, поскольку именно растущий рынок цифровых устройств делает возможным автоматизировать многие процессы. Цифровизация – один из наиболее значимых трендов современности, связан со средой информационной и коммуникационной. Распространение новых цифровых медиа и цифровизации современной жизни. Количество цифровой информации растет с головокружительной скоростью. И, последнее, но немаловажное – экологизация. Данный тренд обусловлен столкновением человека с плодами собственного действия на природу, с ограничением ресурсов и т.д. Таким образом, но-

вейшие разработки должны отвечать требованиям современности в отношении данных трендов.

1.4 Состояние разработок ММА

С характеристиками современных отечественных малогабаритных акселерометров можно ознакомиться в таблице 1 [37, 38].

Акселерометр А-12 разработан в РПКБ, акселерометры АК-5 и АТ-1104 ОАО АНПП "Темп-Авиа" [18].

Таблица 1 – Характеристики акселерометров [32]

| Наименование характеристики | АК-5 | АТ-1104 | АК-6 | А-12 | АК-10/4 | ВТ-48М |
|---|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------|
| 1 Диапазон измерения, ед. g | $\pm(3...100)$ | $\pm(1...10)$ | ± 10 | ± 25 | ± 2 | $\pm(0,2...2,0)$ |
| 2 Дрейф смещения нуля, ед. g, не более | $1 \cdot 10^{-5}$ | $2 \cdot 10^{-5}$ | $3 \cdot 10^{-5}$ | $1 \cdot 10^{-5}$ | $5 \cdot 10^{-5}$ | 0,001 |
| 3 Нестабильность коэффициента преобразования, %, не более | 0,15 | 0,05 | 0,05 | 0,02 | - | 0,01 |
| 4 Рабочий диапазон частот, Гц | 10...80 | 350 | - | - | 45...80 | - |
| 5 Габариты, мм | 26x11x22 | 028,5x25,5 | 38x38x25 | 24x24x18 | 38x38x25 | 5x50x50 |
| 6 Масса, г | 55 | 45 | 50 | 38 | 115 | - |

Микромеханические гироскопы [3] и акселерометры [3, 36] компаний ЗАО «ГИРООПТИКА» и Analog Devices выполнены по технологии МЭМС [3, 38].

ЗАО «ГИРООПТИКА» производит ММА на основе ЧЭ маятникового и осевого типов [3].

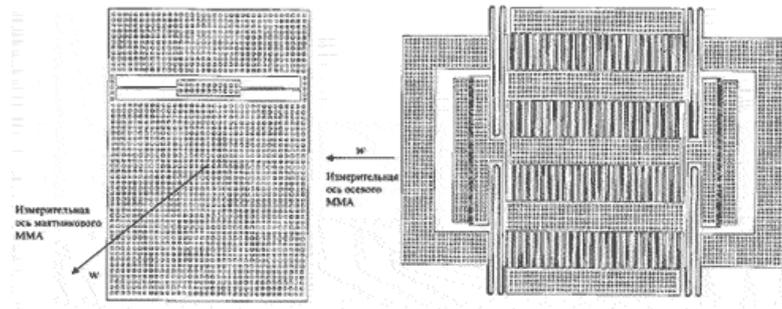


Рисунок 8 – Чувствительные элементы маятникового и осевого типов [43]

Акселерометр маятникового типа показан на рисунке 9 в виде конструктивной схемы [3, 38, 39].

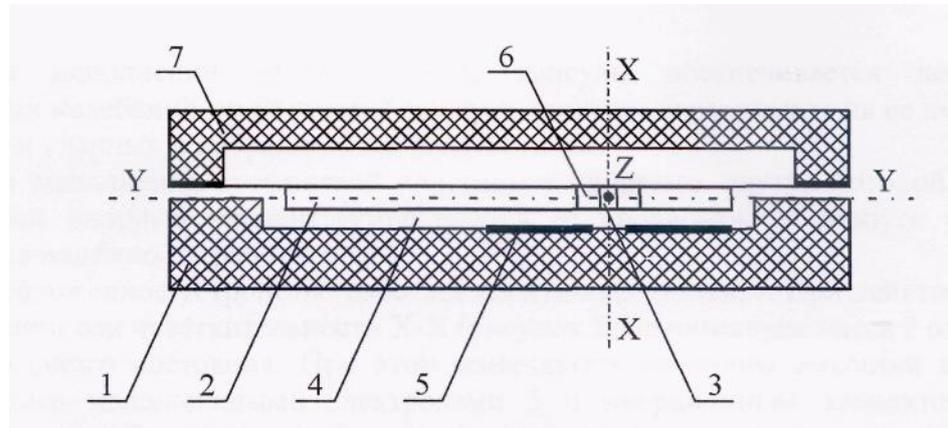


Рисунок 9 – Конструктивная схема микромеханического акселерометра маятникового типа [38]

Датчик силы имеет гребенчатую структуру.

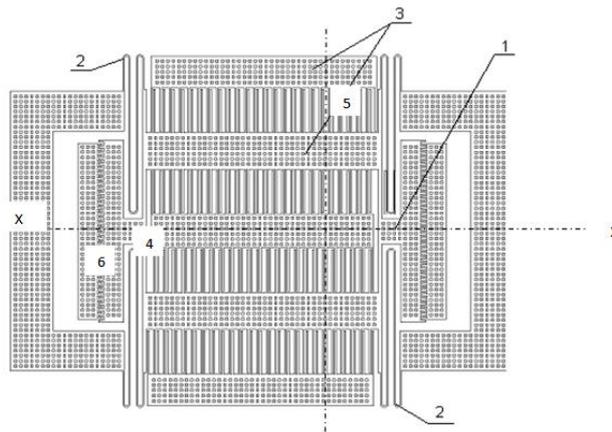


Рисунок 10 – Конструктивная схема чувствительного элемента осевого типа [38]

Среди продуктов компании Analog Devices первым серийным МЭМС продуктом компания был интегральный акселерометр ADLX50, предназначенный

для систем активации подушек безопасности автомобилей; его массовое производство началось еще в далеком 1991 году.

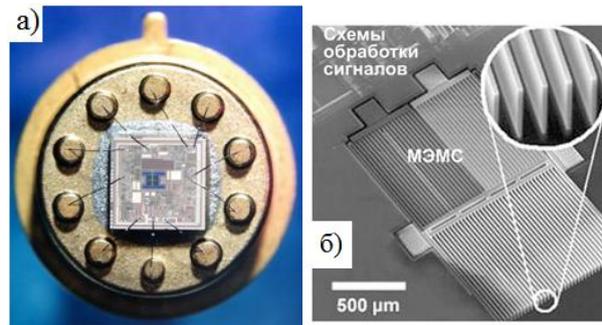


Рисунок 11 – а) ADXL50 без крышки [39]

б) - емкостной поверхностный датчик ускорения

В ADXL50 используются емкостные поверхностные датчики ускорения. На рисунке 11 а показана микросхема ADXL50 без крышки. [39]

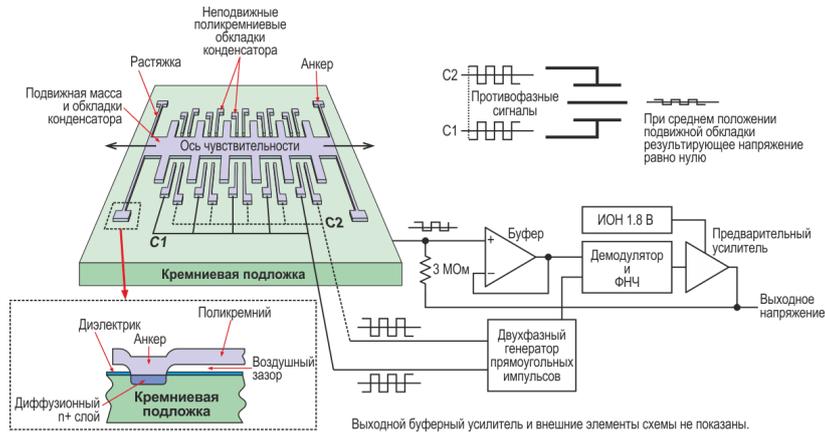


Рисунок 12 – Принцип действия емкостного датчика ускорения [39]

ADIS16210 (2011-2015 гг.) – прецизионная цифровая подсистема акселерометров для измерения угловых отклонений и ускорений [39].

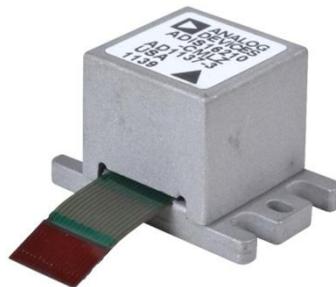


Рисунок 13 – Подсистема акселерометров ADIS16210 [39]



Рисунок 14 – Структура подсистемы акселерометров ADIS16210 [39]

Инерциальные измерительные модули (IMU – Inertial Measurement Unit). Одним из первых IMU компании, выпущенным в 2008 году, был ADIS16300 [40].



Рисунок 15 – Измерительный модуль ADIS16300 [40]

Из линейки акселерометров, к которым относится АММА ОДС, существуют уже известные:

«Акселерометр», с маятниковой инерционной массой на упругом подвесе, датчиком положения и компенсационным преобразователем, имеет две магнитные системы, каждая из которых состоит из магнитопровода и основного постоянного магнита с полюсным наконечником. [41 - 43]

«Акселерометр» [44], конструктивно-кинематическая схема которого показана на рисунке 16. Устройство предназначено для измерения угловых ускорений, так же как и устройство, описываемое в данной работе базируется на автоколебательном принципе.

"Акселерометр" [41], конструктивно-кинематическая схема двухмассового акселерометра показана на рисунке 17.

Недостатками данных разработок является необходимость подводить ток к токопроводящим пластинкам через токоподводы, которые необходимо в силу конструкции наносить на подвесы. Данная процедура является крайне трудозатратной. Разработка конструктивно-кинематической модели датчика должна от-

вечать требованиям по снижению трудозатрат на производство и изготовление датчика, сохранив при этом основные показатели качества микромеханических акселерометров: чувствительность, точность и т.д.

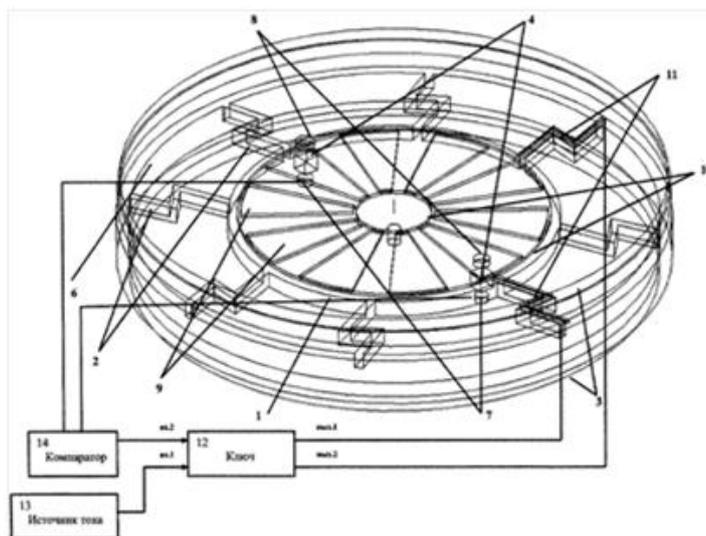


Рисунок 16 – Конструктивно-кинематическая схема углового микромеханического акселерометра

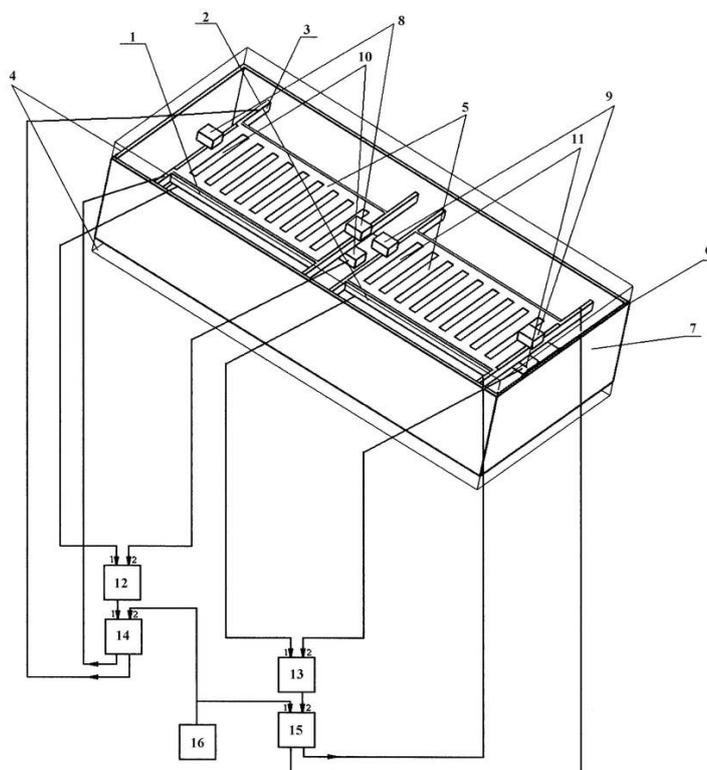


Рисунок 17 – Конструктивно-кинематическая схема двухмассового акселерометра.

1.5 Постановка задачи исследования

Целью данной диссертации является разработка моделей и методик управления результативностью создания автоколебательных микромеханических акселерометров для СУ ПО. Для достижения поставленной цели необходимо осуществить решение следующих задач:

- разработка конструктивно-кинематической модели микромеханических акселерометров;
- разработка методики повышения результативности процесса создания автоколебательного микромеханического акселерометра;
- разработка имитационной модели мониторинга процесса эксплуатации автоколебательных микромеханических акселерометров;
- разработка методики повышения качества функционирования автоколебательных микромеханических акселерометров.

Выводы к главе 1

Акселерометры являются важными элементами СУ ПО, имеют широкое применение в гражданской и военной технике.

Развитие технологии цифровых устройств является приоритетным направлением в современном приборостроении. Решение фундаментальных и прикладных технологических задач при создании принципиально новых датчиков и систем с применением современных цифровых технологий позволяют повысить качество и простоту их изготовления наряду с увеличением точностных характеристик. Таким образом, поставленная автором задача отвечает основным приоритетным направлениям развития науки в области создания прецизионных инерциальных датчиков. [45 - 47]

Реализация описанной концепции построения приборов позволяет решить ряд существующих сложностей, связанных с разработкой и созданием аналоговых датчиков:

- упрощение структуры датчиков, с применением схем, работающих на постоянном токе;

- вводить в контур прибора новые для микромеханики элементы: магнито-электрические компенсирующие преобразователи и фотоэлектрические датчики перемещения [28, 48];

- устранить связь между полосой пропускания и точностью датчика положения, характерную для приборов с линейным контуром управления. [47, 48];

- довести время переходного процесса до одного периода автоколебаний, тем самым достаточно минимизировав его,

- работать в дорезонансном режиме, [49]

- отказаться от вакуумирования внутреннего объема [49] микромеханических датчиков;

- использовать для создания микромеханических датчиков сравнительно новую технологию лазерной 3D печати.

Особенностью ЧЭ компенсационного типа является наличие замкнутого контура регулирования, содержащего как прямую цепь преобразования сигнала, так и цепь обратной связи. При этом структура компенсационных ЧЭ так же содержит ПУ и ДП, а компенсирующий преобразователь (или датчик силы) осуществляет силовое замыкание контура регулирования [22-24].

Значительное улучшение параметров датчика потребует новых конструкций и схемных решений.

Это повышает актуальность новых исследований для сборок, применяющих новые физические принципы и эффекты, чтобы обеспечить более высокую точность и нестандартные решения для выходного цифрового сигнала.

По результатам исследований на созданных существующих макетах приборов, кроме того, опираясь на результаты моделирования, можно сделать вывод, что введение режима автоколебаний дает возможность повысить их чувствительность на порядок, а также существенно снизить их погрешности. Такие исследования проводились на серийно выпускаемых приборах, (например, акселерометрах АЛЕ-048). При этом для создания автоколебаний формировался внешний контур обратной связи, в котором реализовывались нелинейные звенья различного типа [50, 51].

В настоящее время, когда развитие микромеханики позволяет создавать новые и совершенствовать уже известные устройства, важно помнить, что многочисленные примеры автоколебательных систем в технике и природе дают исследователям все основания предполагать, что и в области создания измерительных устройств, работающих в режиме автоколебаний, можно добиться существенных успехов, сделав очередной шаг на пути повышения метрологических характеристик.

ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА КОНСТРУКТИВНО-КИНЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ И ВЫБОР ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕМЕНТОВ АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНОГО МИКРОМЕХАНИЧЕСКОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА

2.1 Разработка конструктивно-кинематической модели автоколебательного микромеханического акселерометра

В настоящее время трудно найти устройство, в котором не нашлось бы применения магнитотвердым материалам, за счет способности преобразовывать энергию, обладания специальными эффектами и применения в качестве катализаторов. Создание АММА ОДС начинается с выбора магнитотвердого материала, который располагается на инерционной массе, видоизменяя и преобразовывая конструкции предшественников, дополняя новыми элементами, такими как полюсные наконечники. Исследуя и изучая предыдущие модели, удалось отметить ряд недостатков, которые позволяет решать новая «обращенная» схема.

Для анализа процесса производственного планирования применена методология IDEF0, процесс описан моделью A0 и позволяет определить набор действий для разработки производственного плана. Узел A0 иллюстрирует создание производственного плана, где входными данными являются обязательные требования законодательных документов, цехов, прочих подразделений (рис. 18).

На рисунке 19 показана декомпозиция узла A0, раскрывающая деятельность по созданию конструктивно-кинематической модели (ККМ) АММА.

Представленная модель процесса проектирования (рис. 18, 19) позволила уточнить комплект конструкторской и эксплуатационной документации, произвести оценку характеристик ККМ, позволила выявить необходимость корректировки элементной базы. [52]

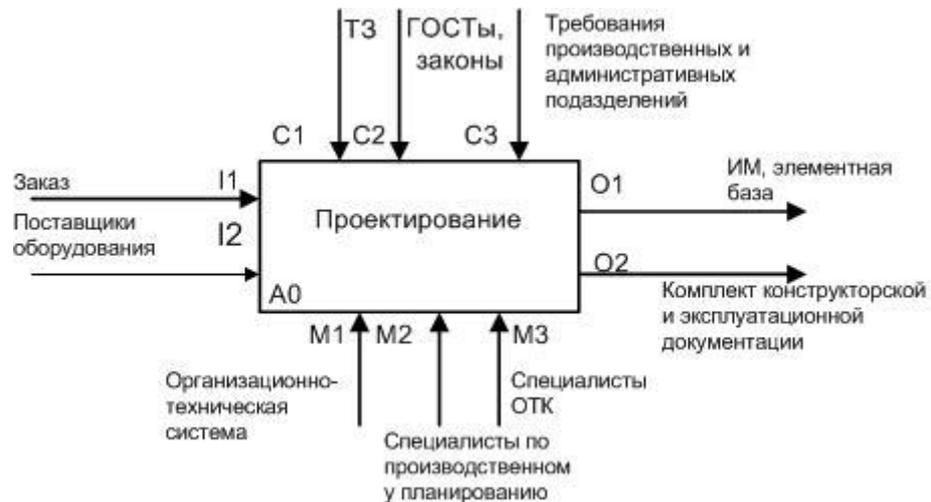


Рисунок – 18 Модель процесса проектирования

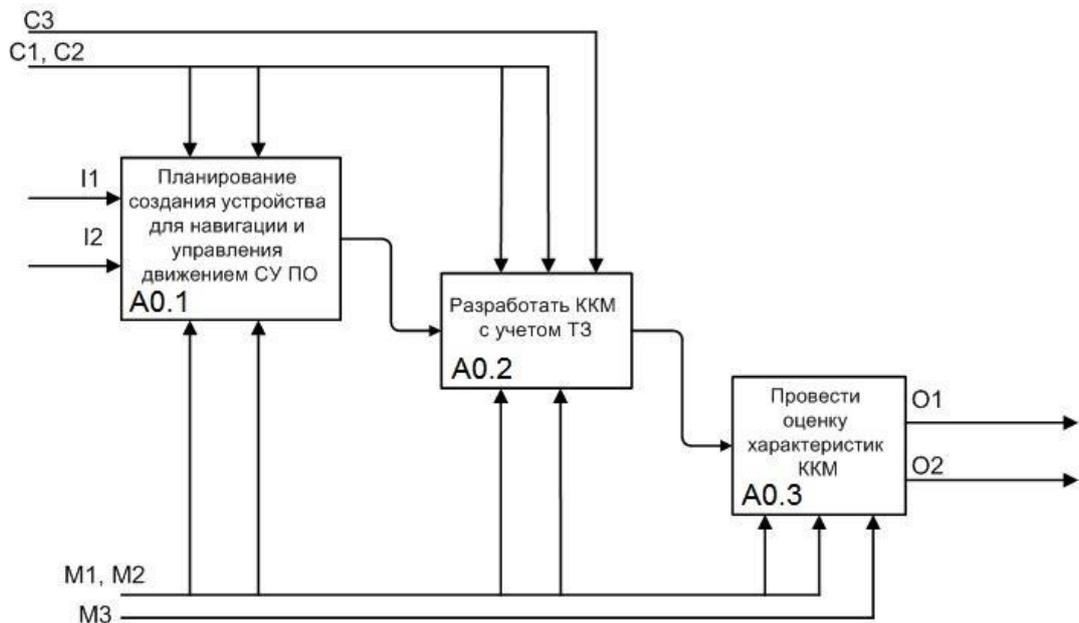


Рисунок 19 – Декомпозиция модели процесса [52]

Разработка ККМ строится вокруг датчика силы (ДС), составные элементы которого - инерционная масса (ИМ) с покрытием из магнитотвердого материала, токопроводящие дорожки, расположенные над полюсами магнита ИМ, силовые линии магнитного поля, наводимого током в дорожках должны замыкаться внут-

ри корпуса прибора, для этих целей изготовлены крышка и основание из магнитного мягкого материала с полюсными наконечниками – выступами.

На рисунке 20 представлена конструктивно-кинематическая модель автоколебательного микромеханического акселерометра с обращенным датчиком силы (АММА ОДС), работающего в режиме автоколебаний. Инерционная масса датчика представляет собой подвижную пластину из монокристаллического кремния с двумя оптическими щелями прямоугольной формы (11, 12). [3, 53] В зазоре между основанием (3) прибора и его крышкой (4) расположена несущая рама, на которой в упругом подвесе (2) закреплена ИМ [54, 55]. Поверхность ИМ покрыта магнитотвердым материалом (1), как раз на этом этапе (а так же изготовление корпуса с токопроводящими дорожками) рассматривается 3d печать металлом, так как покрытие не превышает десятков нанометров и требует высокой точности исполнения. Когда излучение одно из светодиодов (9, 10) проходит через первую оптическую щель, на выходах фототранзисторов (13, 14) возникает сигнал, который отправляется на компаратор (15), а затем – на ключ (8). Ключ позволяет активировать источник постоянного тока (16), а ток подается на токопроводящие дорожки (катушки) (7), имеющие длину l , в которых создается магнитное поле, силовые линии которого взаимодействуют с силовыми линиями магнитного поля ИМ с индукцией B . В результате возникает сила Ампера F_A . Под действием этой силы ИМ перемещается вдоль продольной оси. Магнитное поле замыкается за счет магнитопровода с выступами (5) полюсных наконечников (6). Описанный процесс повторяется и ИМ перемещается вдоль оси Ox [55]. Нелинейное звено реализовано в датчике за счет датчиков положения.

Сигнал фотоприемников идет на компаратор – изменяется момент срабатывания ключа и смещение центра автоколебаний ИМ на продольной оси. Нелинейное звено в контуре прибора формирует в цепи обратной связи (ОС) сигнал, провоцирующий гармоническое движение подвижного узла (ПУ) [56].

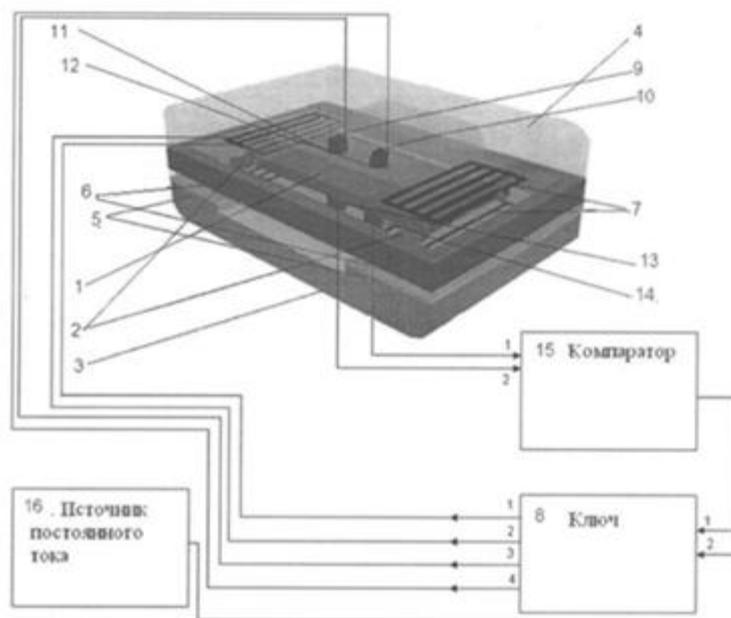


Рисунок 20 – Конструктивно-кинематическая схема АММА ОДС.

2.2 Сравнительный анализ датчиков силы микромеханических инерциальных датчиков

Технические решения, положенные в основу создания инерциальных датчиков МЭМС, определяют тип элементов и конструкцию. А именно, планарные технологии позволяют варьировать геометрические параметры инерционной массы, в то же время, делая практичные сборки с электростатическими, оптоэлектронными, оптоволоконными и другими простыми в реализации элементами. Сегодняшняя тенденция к созданию компенсирующих преобразователей и электро-механических устройств основывается на высокой точности измерений в связи с применением последних разработок.

Многочисленные разработки МЭМС-датчиков с емкостными преобразователями выявили их недостатки:

а) обширная миниатюризация привела к снижению чувствительности, увеличивая влияние различных помех,

б) емкостные датчики силы имеют низкую эффективность, что требует использования более легких датчиков. Для высокой надежности они требуют герметичности с использованием сложных технологий,

в) малые размеры подвижных элементов и их микро- и нано-смещение в ответ на измеренные физические силы, действующие на них, ставят под сомнение высокую точность измерений емкости и приращения.

Поскольку величина зазора мала, в расчете не требуется учитывать проводимость утечек, но важно учесть «действительную» длину магнита $((2/3)l)$. [22, 57]

Индукцию, создаваемую магнитоэлектрическим ОДС можно вычислить, зная параметры, указанные в таблице 2:

Таблица 2 – Параметры датчика силы

| Параметр | Величина параметра |
|---|--------------------|
| Пластина магнита (длина), l , м | $5 \cdot 10^{-3}$ |
| Пластина магнита (площадь), S , м ² | $25 \cdot 10^{-6}$ |
| Зазор (расстояние) полюсные наконечники (ПН) - ИМ, Δ , м | $20 \cdot 10^{-6}$ |

Расчет проводимости зазора (рис. 21)

$$G_{\delta} = \mu_0 \cdot \mu \cdot S / \Delta,$$

при этом

$$B/H = G_{\delta} l / S = \mu_0 \cdot \mu \cdot l / \Delta \quad (2.1)$$

Применения магнитного покрытия на основе порошкового $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$

$$B/H = 1,5708 \cdot 10^{-6} \text{ Тл}/(\text{А/м}).$$

По результатам, полученным с помощью имитационного моделирования (рис. 22, рис. 23) можно отметить, что значение индукции в зазоре будет 0,02 Тл, оказалось близко, хотя и не равно значению, полученному при аналитическом расчете.

Значение индукции в точке пересечения $B = 0,024$ Тл.

Сила Ампера в зазоре между крышкой и поверхностью ИМ определяется как

$$F_A = 0,75 \cdot B \cdot n \cdot l \cdot I_{пл}, \quad (2.2)$$

где B – значение индукции магнита (постоянный магнит, выполненный из выбранного материала), полученное в результате расчета, n – количество токопроводящих дорожек, l – их длина, $I_{пл}$ – величина тока плавления, 0,75 – коэффициент, снижающий величину тока. Результатом вычисления (2.5) будет

$$F_A = 0,37 \text{ мН}$$

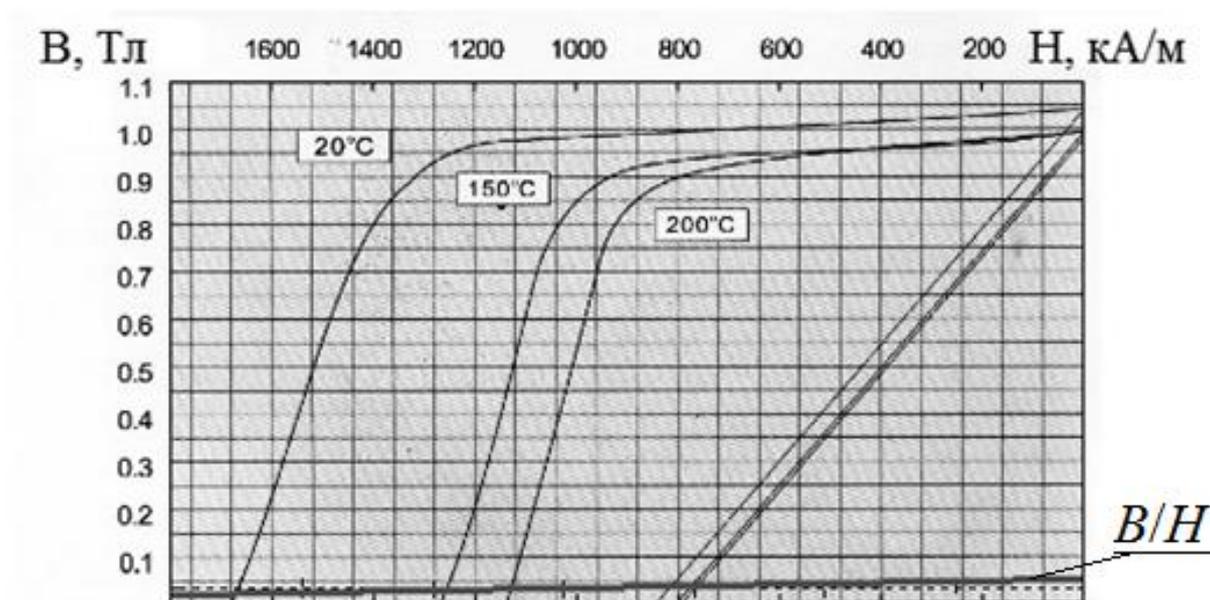


Рисунок 21 – Кривая размагничивания материала Sm₂Co₁₇[65]

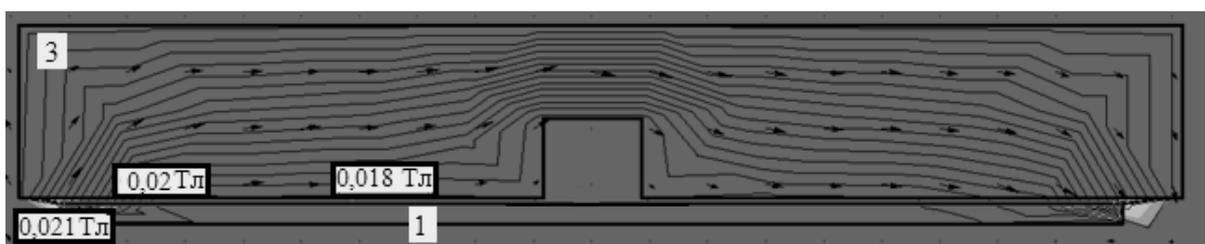


Рисунок 22 – Иллюстрация распределения магнитного поля в толще крышки и ИМ

Значение (максимальное) силы, полученное в результате вычислений составляет 0,37 мН при числе токопроводящих дорожек $n=78$.

Так же были проверены магнитные сплавы при тех же геометрических параметрах:

- на основе AlNiCo, $F_A = 0,05$ мН;
- на основе NdFeB, $F_A = 0,075$ мН.

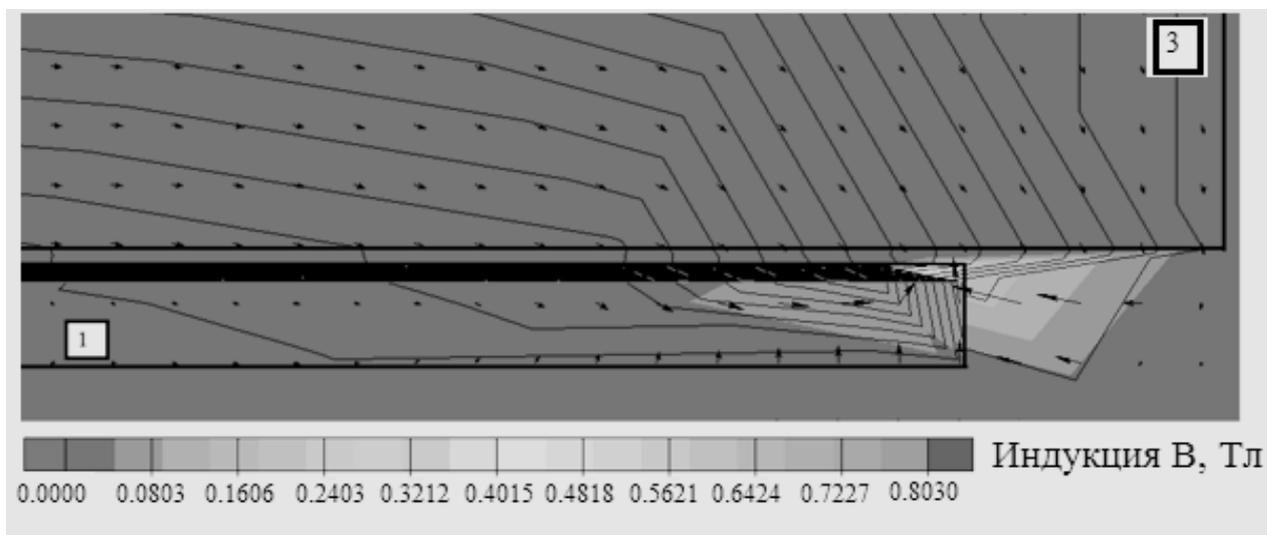


Рисунок 23 – Увеличенный участок, в котором видно распределение силовых линий магнитного поля под полюсным наконечником

В трудах [51, 54, 58] приводится пояснение, что «создание таких ОДС дает возможность расширить диапазон измерений, снизить погрешности датчиков и реализовать автоколебательные режимы». [59]

Таблица 3 - Результаты сравнения различных типов ДС [21, 59, 60]

| Вид ДС | Максимальное значение силы, мкН |
|----------------------|---------------------------------|
| Электростатический | 3,2 |
| Магнитоэлектрический | 150,0 |
| «Обращенный» | 369,0 |

2.3 Анализ статических характеристик АММА ОДС

Автоколебательный ЧЭ, лежащий в основе создания АММА ОДС является преобразователем измеряемой величины $y_{вх}(t)$ в выходной сигнал $U(t)$. В установившемся режиме работы все производные величин y и U обращается в нуль, тогда статическую характеристику ЧЭ можно выразить:

$$U = \Phi(y). \quad (2.3)$$

Уравнение (2.3) является отражением измерительных свойств ЧЭ [61, 62]. Представление нелинейной функции $\Phi(x, px)$, поскольку в установившемся режиме $y_{\text{вх}}$ постоянно или незначительно меняется за период автоколебаний, будет:

$$\Phi(x, px) = \Phi_0 + qx^* + (q'/\omega)px^*, \text{ где } x^* = A \sin \omega t.$$

После применения метода гармонической линеаризации:

$$(T_1^2 p^2 + 2\xi T_1 p + 1)(T_2 p + 1)x^* - k_{\text{ЧЭ}} k_{\text{в}} k_{\text{ДС}} \left(\Phi^0 + qx^* + \frac{q'}{\omega} px^* \right) = k_{\text{ПП}} (T_2 p + 1) y_{\text{вх}}, \quad (2.4)$$

Выполнение условия медленности позволяет далее записать:

$$(T_1^2 p^2 + 2\xi T_1 p + 1)(T_2 p + 1)x^0 - k_{\text{ЧЭ}} k_{\text{в}} k_{\text{ДС}} \Phi^0 = k_{\text{ПП}} (T_2 p + 1) y_{\text{вх}}, \quad (2.5)$$

$$(T_1^2 p^2 + 2\xi T_1 p + 1)(T_2 p + 1)x^* - k_{\text{ЧЭ}} k_{\text{в}} k_{\text{ДС}} \left(q(A) + \frac{q'(A)}{\omega} p \right) x^* = 0, \quad (2.6)$$

где (3.3) отражает реакцию системы на $y_{\text{вх}}$, а (3.4) описывает ее собственное движение, x^0 – смещение центра колебаний, x_0 – половина ширины петли гистерезиса, $k_{\text{в}} = \frac{2U_{\text{ДСм}}}{\pi A \sqrt{1 - \left(\frac{x_0}{A}\right)^2}}$ – коэффициент, зависящий от вида нелинейности, $k_{\text{ЧЭ}} = 1/c_x$

– коэффициент преобразования ЧЭ, $k_{\text{ПП}} = F_{\text{вх}}/y_{\text{вх}}$ – коэффициент преобразования ПП.

– коэффициент преобразования ЧЭ, $k_{\text{ПП}} = F_{\text{вх}}/y_{\text{вх}}$ – коэффициент преобразования ПП.

Функция смещения $\Phi_0 = \Phi(x^0 + x_0)$ – статическая характеристика, определяющая зависимость между входной и выходной величинами для данной нелинейности при постоянных и медленно меняющихся сигналах. [10, 63, 64] Данная функция может быть так же представлена в виде $\Phi_0 = kv(x^0 + x_0)$.

$$(T_1^2 p^2 + 2\xi T_1 p + 1)(T_2 p + 1)x^0 - k_{\text{ЧЭ}} k_{\text{в}} k_{\text{ДС}} (x^0 + x_0) = k_{\text{ПП}} (T_2 p + 1) y_{\text{вх}}, \quad (2.7)$$

$$x^0 - k_{\text{ЧЭ}} k_{\text{в}} k_{\text{ДС}} (x^0 + x_0) = k_{\text{ПП}} y_{\text{вх}}, \quad (2.8)$$

Из полученного соотношения следует, что смещение x^0 центра колебаний ПУ

$$x^0 = \frac{k_{\text{ПП}} y_{\text{вх}} + k_{\text{ЧЭ}} k_{\text{в}} k_{\text{ДС}} x_0}{1 - k_{\text{ЧЭ}} k_{\text{в}} k_{\text{ДС}}}. \quad (2.9)$$

$$F_{\text{вх}} = F_{\text{ДС}},$$

при этом $F_{\text{вх}} = k_{\text{ППУ}} y_{\text{вх}}$, (2.10)

$$F_{\text{ДС}} = k_{\text{ДС}} U_{\text{ср}}. \quad (2.11)$$

При прямоугольной форме импульсов управляющего сигнала [65 - 67]

$$U_{\text{ср}} = U_0 \frac{\tau_1 - \tau_2}{T_0}. \quad (2.12)$$

На основании (2.10), (2.11) и (2.12) следует, что

$$N = n_1 - n_2 \frac{k_{\text{ППУ}} T_0 k_N}{k_{\text{ДС}} U_0} y_{\text{вх}},$$

$$\text{где } \frac{k_{\text{ППУ}} T_0 k_N}{k_{\text{ДС}} U_0} = k_{\Sigma} \quad (2.13)$$

представляет собой коэффициент преобразования ЧЭ, $k_N = \Delta\tau/\Delta n$.

Точностные характеристики ЧЭ оцениваются суммарной статической погрешностью [10], коэффициентом преобразования δk_{Σ} и нестабильностью нулевого сигнала Δy_0 и определяются наличием «вредных» сил, действующих в подвесе ПУ, а так же нелинейностью и нестабильностью параметров магнитоэлектрического ДС.

$$\delta_{\text{ст}} = \sqrt{\Delta y_0^2 + \delta k_{\Sigma}^2}.$$

«Вредное» воздействие включает в себя силы подвеса $F_{\text{п}}$ – переменные по величине и силы тяжения $F_{\text{т}}$ – переменные по знаку. Влияние этих сил на ПУ прибора можно оценить за период колебаний.

Согласно [10]

$$\Delta y_{\text{вх}}^0 = \frac{(C + F_{\text{т}}) \Delta x^0}{k_{\text{ППУ}}}.$$

Нестабильность Δx^0 может возникать из-за наличия различного вида шумов.

После преобразований

$$\Delta \tau_0 = \frac{k_{\text{ППУ}} T_0}{2\pi A (C + F_{\text{т}})} \Delta y^0, \text{ тогда}$$

$$\Delta y_0 = \frac{2\pi A (C + F_{\text{т}})_0}{k_{\text{ППУ}} T} \Delta \tau^0, \text{ где } \Delta \tau_0 = \tau_1 - \tau_2, T_0 = \tau_1 + \tau_2.$$

В цифровом коде

$$\Delta y_0 = \frac{2\pi A(C+F_T)_0}{k_{\text{III}}(n_1+n_2)}(n_1-n_2)^0 - \text{данное соотношение позволяет определить неста-}$$

бильность нулевого сигнала, фиксируя соответствующую разность кода $(n_1 - n_2)$ при нулевом входном воздействии.

В работе показано, что нестабильность коэффициента преобразования ЧЭ может быть определена

$$\delta k_{\Sigma} = \frac{\delta k_{\Sigma}}{\delta k_{\text{ДС}}} \Delta k_{\text{ДС}} + \frac{\delta k_{\Sigma}}{\delta U_0} \Delta U_0 + \frac{\delta k_{\Sigma}}{\delta T_0} \Delta T_0 + \frac{\delta k_{\Sigma}}{\delta k_N} \Delta k_N.$$

Последним слагаемым можно пренебречь, так как стабильность частоты современных кварцевых генераторов достигает 10^{-8} .

Стабильность параметров магнитоэлектрических преобразователей определяется, в основном, стабильностью [68] характеристик магнитных систем во времени, а также при воздействии внешних факторов [10, 69]. Изменения магнитных свойств постоянных магнитов при этом имеют как обратимый, так и необратимый характер, причем ни магнитная, ни температурная стабилизации не исключают обратимых изменений, происходящих в процессе длительной работы преобразователей, а также при действии тепловых полей. Температурные коэффициенты индукции в области температур от 20 °С до 100 °С составляют $0,002 \text{ K}^{-1}$ для ферритов и $0,004 \text{ K}^{-1}$ для сплавов на основе редкоземельных материалов. Применение систем термостабилизации, позволяет обеспечить нестабильность коэффициента преобразования ДС на уровне $(1...3) \cdot 10^{-5}$ и, тем самым, минимизировать вклад нестабильности $\Delta K_{\text{ДС}}$ в суммарную погрешность коэффициента преобразования.

Таким образом, нестабильность коэффициента преобразования оценивается следующим соотношением

$$\delta k_{\Sigma} = \frac{\delta k_{\Sigma}}{\delta U_0} \Delta U_0 + \frac{\delta k_{\Sigma}}{\delta T_0} \Delta T_0.$$

Поскольку погрешности, входящие в это уравнение независимы и случайны, то относительная нестабильность δk_{Σ} может быть представлена следующим образом

$$\delta k_{\Sigma} = \sqrt{\delta U_0^2 + \delta T_0^2}.$$

Порог чувствительности является одной из важнейших характеристик приборов, использующих в качестве ЧЭ в СУ ПО.

В разрабатываемом АММА ОДС минимальная величина входного воздействия может быть определена как

$$y_{\min} = \frac{k_{\text{ДС}} U_0}{k_{\text{ПП}} T_0} (\tau_1 - \tau_2)_{\min}.$$

Отсюда следует, что в ЧЭ АММА ОДС порог чувствительности [70] определяется соотношением между частотой автоколебаний и частотой следования счетных импульсов.

$$y_{\min} = \frac{k_{\text{ДС}} U_0 k_N}{k_{\text{ПП}} T_0} (n_1 - n_2)_{\min}.$$

Диапазон измерения АММА ОДС определяется соотношением максимальной и минимальной величин входного воздействия [10]

$$D = \frac{y_{\max}}{y_{\min}}, \text{ где } y_{\max} = \frac{k_{\text{ДС}} U_0 \chi}{k_{\text{ПП}}},$$

где, в свою очередь $\chi = \frac{\tau_1}{T_0}$ [67] - глубина модуляции выходного сигнала акселерометра.

Таблица 4 – Статические характеристики АММА ОДС

| Характеристика | Значение |
|--|--------------------------------------|
| Смещение «нуля» | $4,12 \cdot 10^{-5}$ м |
| Коэффициент преобразования ЧЭ | $21 \cdot 10^{-5}$ с ² /м |
| Нестабильность коэффициента преобразования | 0,1% |
| Нестабильность нулевого сигнала | 0,05 м/с ² |
| Диапазон измерений | +/- 24g |
| Минимальная величина входного воздействия | 0,006 м/с ² |

Оценивая влияние изменения температуры на статические характеристики АММА ОДС, согласно формулам x^0 (3.7) и k_{Σ} (3.11) будут возрастать с увеличением температуры.

Проанализировав текущее состояние и перспективы разработки высокоточных чувствительных микроминиатюрных акселерометров с цифровым выходом [61, 62, 71, 72] очевидно, что использование в приборах компенсационного типа автоколебательных режимов позволяет создавать принципиально новые измерительные устройства. Современная разработка микромеханических датчиков направлена на улучшение основных и второстепенных параметров: чувствительность, смещение нуля, дрейф, диапазон измерений и т.д.

2.4 Выбор и обоснование элементной базы

Ранее в работе уже отмечалось, что выбор типа ДС и материалов, из которых он будет изготовлен, окажет решающее влияние на показатели результативности, в связи с чем необходимо осуществить выбор элементов, оценить их соответствие выбранным критериям.

В России редкоземельные магниты производят ООО «Валтар Магнит», ЗАО «НПП «Редмаг»/ЗАО «Прогмат», ООО «Техномаг»/ООО «Магнисеп»/ООО «Венд»/ЗАО «ЭЛМАТ-ПМ», ООО «ПОЗ-Прогресс», ОАО «НПО «Магнетон», ООО «НПО «ЭРГА», ООО «ЭРГА», ОАО «Спецмагнит», ОАО «Магнит» (Новочеркасск), ООО НПП «Магнитопласт», ООО «Фирма «Элис»/ ООО «Химсталь-комплект», ООО «Элемаш-Магнит»/ОАО «Машиностроительный завод», ОАО «Сибирский химический комбинат», ООО «Тульский завод постоянных магнитов».

Запасы кобальта в РФ составляют 250 тыс. тонн, в мире — 7,1 млн тонн, из которых половина — в Конго. Прогнозы АКРА по выпуску кобальта в РФ более оптимистичные: к 2022 году объемы могут вырасти до 8,76 тыс. тонн со средних 5–5,5 тыс. тонн в 2014–2017 годах, обеспечивая рост на 60–75%. Мировое производство должно вырасти на 56,5%, до 151,8 тыс. тонн, а потребление — на 41,5%,

до 148,6 тыс. тонн. Доля РФ на мировом рынке, сейчас составляющая 5%, к 2022 году может вырасти до 8%.

Единственный производитель кобальта в РФ сейчас «Норильский никель». Сложности добычи кобальта заключаются в нахождении всех металлов в одной руде. К 2020 году добычу планируется увеличить в 2,5 раза, до 63–66 тыс. тонн. Китай обеспечивает до 80% химического производства кобальта, в том числе на территории Конго. [73 - 77]

Географическая структура подтвержденных запасов РЗМ в мире, %

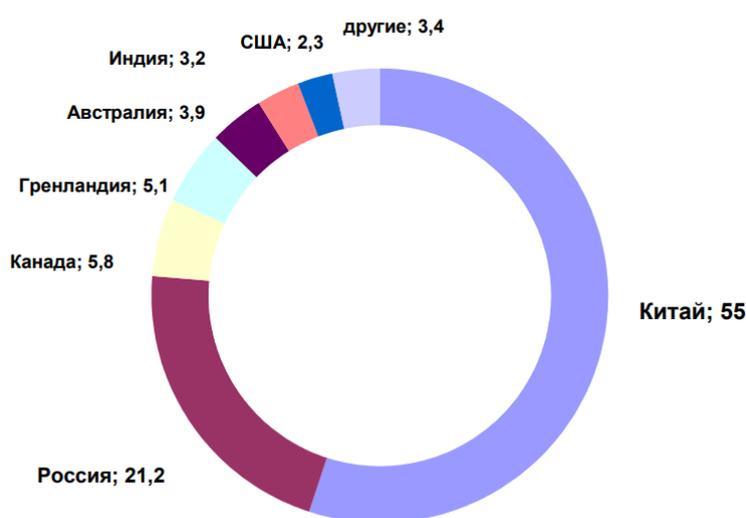


Рисунок 24 – Диаграмма мировых запасов РЗМ

Распределение РЗМ в подтвержденных минеральных ресурсах мира, %

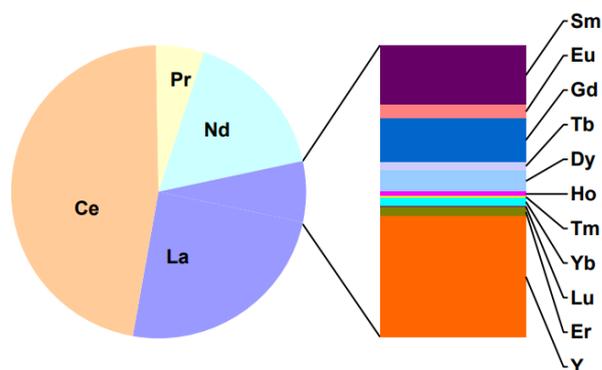


Рисунок 25 – Диаграмма процентного содержания РЗМ в мире

На сегодняшний день нашим ученым удалось создать не имеющий аналогов постоянный магнит на основе неодимового. Работать такой магнит может в диапазоне температур от минус 180°C до плюс 150°C. Это обстоятельство важно, поскольку доказывает возможность расширения диапазона рабочих температур и условий эксплуатации для устройств, содержащих магнитные элементы.

Наиболее выгодным вариантом является медь, поскольку, помимо дешевизны, она обладает достаточно низким удельным сопротивлением 0,0175 Ом·мм²/м, уступая лишь чистому серебру с удельным сопротивлением 0,0016, алюминий же имеет удельное сопротивление 0,03 Ом·мм²/м.

Для создания дорожек применяется порошковый материал, например пудра (порошок) алюминиевая АСД-1 (ФОРМУЛА: Al, CAS: 7429-90-5, ГОСТ, ТУ: ТУ 1791-007-49421776-2011 с изменением №1,2,3) или порошок меди сферической формы (99.8% фракция 0-63 мкм, ФОРМУЛА: Cu, CAS: 7440-50-8). Выбор порошков обусловлен удобством применения в рамках создания МЭМС, возможностью их использования в 3D печати металлом.

Таблица 5 – Характеристики магнитных покрытий [57, 78 - 82]

| Торговая марка | <i>Br</i> , Тл | <i>T</i> _{раб} , °С (макс) |
|----------------|----------------|--|
| NdFeB | | |
| HM265/900* | 1.15 | 80 |
| HM285/850* | 1.25 | 80 |
| HM320/800* | 1.3 | 80 |
| HM250/1200 | 1.15 | 100 |
| HM260/1100 | 1.17 | 100 |
| HM280/1100 | 1.22 | 100 |
| HM300/1100 | 1.26 | 100 |
| HM320/1100 | 1.29 | 100 |
| HM330/1100 | 1.33 | 100 |
| HM360/1100 | 1.36 | 100 |
| HM380/1100 | 1.4 | 100 |
| HM260/1300 | 1.17 | 120 |
| HM280/1300 | 1.22 | 120 |
| HM300/1300 | 1.26 | 120 |
| HM320/1300 | 1.29 | 120 |
| HM340/1300 | 1.33 | 120 |
| HM360/1300 | 1.36 | 120 |

| | | |
|----------------------------|------|--------|
| HM240/1440* | 1.1 | 150 |
| HM250/1440* | 1.15 | 150 |
| HM280/1600 | 1.22 | 150 |
| HM300/1600 | 1.26 | 150 |
| HM320/1600 | 1.29 | 150 |
| HM330/1600 | 1.33 | 150 |
| HM220/1800* | 1.04 | 160 |
| HM240/1800* | 1.08 | 160 |
| HM240/2000 | 1.14 | 180 |
| HM260/2000 | 1.17 | 180 |
| HM280/2000 | 1.22 | 180 |
| HM300/2000 | 1.26 | 180 |
| HM320/2000 | 1.29 | 180 |
| HM220/2400 | 1.08 | 200 |
| HM240/2400 | 1.14 | 200 |
| HM260/2400 | 1.17 | 200 |
| HM280/2400 | 1.22 | 200 |
| Sm-Co | | |
| CM110/1300 | 0.77 | 250 |
| CM130/1100 | 0.8 | 250 |
| CM165/1800 | 0.9 | 350 |
| CM180/1000 | 0.95 | 300 |
| CM205/1900 | 1.02 | 350 |
| AlNiCo | | |
| ЮНД8 | 0,60 | до 550 |
| ЮНТС | 0,43 | |
| ЮНДК15 | 0,75 | |
| ЮНДК18С | 0,90 | |
| ЮН13ДК24С | 1,10 | |
| ЮН13ДК24 | 1,30 | |
| ЮН14ДК24 | 1,25 | |
| ЮН15ДК24 | 1,20 | |
| ЮН14ДК24Т2 | 1,15 | |
| ЮНДК34Т5 | 1,10 | |
| ЮНДК35Т5Б | 0,75 | |
| ЮНДК35Т5 | 0,75 | |
| ЮНДК38Т7 | 0,75 | |
| ЮНДК40Т8 | 0,70 | |
| ЮНДК35Т5АА | 1,05 | |
| ЮНДК40Т8АА | 0,90 | |
| Металлокерамические сплавы | | |
| ММК1 | 0,60 | - |
| ММК2 | 0,48 | |

| | | |
|--|-----------|--|
| ММК3 | 0,52 | |
| ММК4 | 0,55 | |
| ММК5 | 0,60 | |
| ММК6, аналог Альнико 1 (Япония) | 0,65 | |
| - , аналог Альнико2 (Япония), NIALCO 1 (Франция) | 0,65-0,70 | |
| - аналог NIALCO 3 (Франция) | 0,65-0,69 | |
| - NIALCO 6 (Фран- ция) | 0,60-0,64 | |
| - NIALCO 7 (Фран- ция) | 0,66 | |

*МЭК 60404-1:2004 Магнитные материалы. Часть 1. Классификация (IEC 60404-1:2004) (Magnetic materials. Part 1: Classification) [83]

Помимо магнитотвердого материала ДС содержит плоские катушки, материалы, из которых они могут быть изготовлены, представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Параметры материалов для токопроводящих дорожек [57, 83 - 87]

| Марка материала | Удельное сопротивление, ρ , 10^{-8} Ом·м (при 20 °С) | Стоимость, рублей за кг |
|--------------------------|---|-------------------------|
| Медь М1 (М1р, М1ре, М1ф) | 1,68 | 325 |
| Алюминий (А5Е, А7Е) | 2,28 | 95-105 |
| СрМ 925 | 1,59 | 25000 - 27000 |
| СрМ 875 | | 23000 - 25000 |
| СрМ 800 | | 21000 - 23000 |
| СрМ 916 | | 25000 - 26000 |
| СрМ 750 | | 19000 - 21000 |

Различают бескислородную (М0) и раскисленную (М1) медь, изделия из которых нашли широкое применение в электротехнической, электронной и электровакуумной промышленности. В бескислородных марках O^2 содержится в пределах 0,001%, в раскисленных — 0,01%. Применительно к созданию АММА ОДС, в котором запланирован отказ от процедуры вакуумирования, должна быть применена раскисленная медь (М1).

Упругий подвес ИМ состоит из n упругих элементов ($n = 4$), одна заделка которых связана с несущей рамкой, а другая – с инерционной массой.

Для упругих подвесов ИМ применяется кремний (Кремний кристаллический, КР0, м.тн, 140000, Челябинск, ПИК [87]).

В процессе разработки упругого подвеса было рассмотрено несколько вероятных вариантов: прямолинейный подвес с прямоугольным постоянным поперечным сечением, криволинейный S-образный подвес постоянного сечения, прямоугольный подвес крестового и Т-образного сечения и подвес переменного сечения, проявивший себя наиболее приемлемо в рамках решаемой задачи.

Таблица 7 – Формы и характеристики упругих подвесов [87]

| Форма подвеса | Жесткость, Н/м (при $n = 4$) |
|------------------------|-------------------------------|
| S-образный | 0,43 – 1,73 |
| Прямоугольного сечения | 1,7 |
| Переменного сечения | 5,05 |

Подвес переменного сечения приведён на рисунке 6.

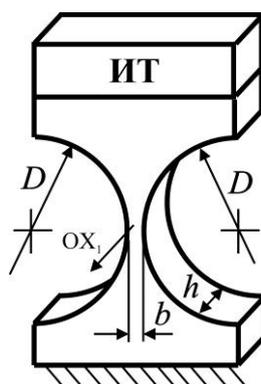


Рисунок 26 – Упругий элемент переменного сечения [71]

Упругий элемент переменного сечения, образованный двумя полуокружностями диаметра D (рис. 26), позволяет создавать конструкции подвесов со значительной исходной анизотропией упругих характеристик. При наличии симметрии внутренней структуры также имеет место симметрия свойств, выражена симметрия направления, поскольку речь идет о монокристаллическом кремнии. В этом случае в каждой точке можно отметить симметрию свойств по трем взаимно перпендикулярным плоскостям. В АММА ОДС инерционная масса должна быть ограничена в своем движении осью OX . Подвес указанной формы способен с легкостью изгибаться по центру, но не позволит совершить другого перемещения, кро-

ме того, важно расположить подвес определенным образом относительно корпуса датчика - по углам инерционной массы, перпендикулярно продольной оси. Отношение ширины такого упругого элемента b к толщине h составляет около 10-50. Такие упругие подвесы встречаются в вибрационных гироскопов [72] и РГГ [71].

Показанная на рисунке 26 форма подвеса становится основой для создания упругого подвеса АММА ОДС.

Деформации стержня постоянного сечения

$$\delta(x) = \frac{l^3 F}{6EJ} \left(3 - \frac{x}{l} \right) \left(\frac{x}{l} \right)^2,$$

где x – текущая координата, F - сила, l – длина подвеса, J – момент инерции, $J = hb^3/12$. При условии, что сечение является переменным на одном из участков подвеса, момент инерции находится с помощью интегрирования, при этом толщина подвеса b уменьшается вдвое, $E = 2,1 \cdot 10^{10}$ Па – модуль упругости кремния.

С другой стороны:

$$\delta(x) = ma_x/c_x.$$

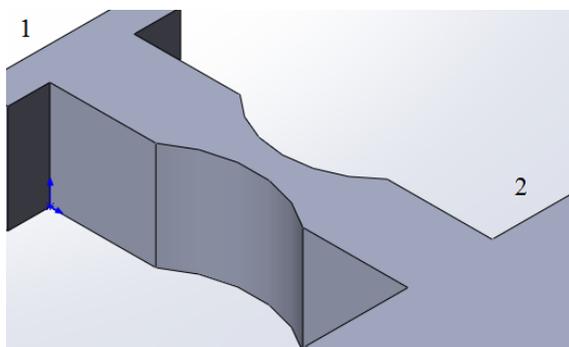


Рисунок 27 – Элемент подвеса АММА ОДС, где 1- корпус, 2 – ИМ

В случае, когда параметр b существенно меньше остальных геометрических параметров подвеса, движение ИМ ограничено одной степенью свободы – поступательного перемещения вдоль оси ОХ. Выбранная форма подвеса позволяет реализовать требуемый коэффициент жесткости при сохранении геометрических размеров датчика.

Коэффициент жесткости при параметрах подвеса $b = 18$ мкм (ширина), $h = 35$ мкм (высота), $l = 1100$ мкм (длина), количестве ($n = 4$) – $c_x = 5,05$ Н/м.

Крышка, основание, полюсные наконечники должны быть выполнены из одного материала, магнитно-мягкого прецизионного сплава.

В ЧЭ АММА ОДС демпфирующее воздействие или коэффициент демпфирования μ определяется как величиной вязкого трения, возникающего при движении ПУ, наличием вихревых токов в зазоре и величиной электромагнитного взаимодействия, обусловленного типом ДС.

Коэффициент демпфирования определяется функциональной зависимостью $\mu = \mu(f_i^2, V)$, вычислить его можно согласно соотношению

$$\mu = \mu_0(v_f^2 + 2\chi),$$

где $v_f = f/f_0$ – относительная частота периодического движения ПУ,

$\chi = \Delta V/V$ – относительное приращение скорости,

μ_0 – удельный момент демпфирования, соответствующий частоте f_0 .

ПУ совершает гармонические колебания со скоростью $V = A\omega \sin(\omega t)$, $V_{\max} = A\omega$.

Таблица 8 – Материалы, применяющиеся для изготовления основания и крышки прибора

| Торговая марка | Стоимость (руб./кг) | Торговая марка | Стоимость (руб./кг) |
|-------------------|---------------------|------------------|---------------------|
| 16Х | От 30,34 | 49К2ФА | От 560 |
| 40Н | От 15,5 | 64Н | От 637 |
| 49К2Ф | От 17 | 79НМ (пермаллой) | От 30,34 |
| 50ХНС | От 31,500 | 34НКМ | От 420 |
| 79НЗМ | От 19,77 | 45Н | От 45 |
| 27КХ | От 38,88 | 49КФ | От 31,5 |
| 40НКМ | От 28,48 | 68НМ | От 119 |
| 47НК | От 17 | 47НКХ | От 28 |
| 50Н (пермаллой) | От 31,9 | 77НМД | От 18,5 |
| 76НХД | От 17 | 81НМА | От 17 |
| 80НХС (пермаллой) | От 42 | 83НФ | От 18,5 |
| 36КНМ | От 31,5 | 83НФ-Ш | От 19,77 |

Силы вязкого трения создают демпфирующее воздействие, пропорциональное скорости движения ПУ, а коэффициент демпфирования μ является в первом приближении функцией частоты колебаний ПУ [10]

$$\mu = \mu_0 V_f$$

Расчет коэффициента демпфирования для плоских зазоров [10]:

$$\mu_0 = \mu_0^{\text{ц}} + \mu_0^{\text{п}},$$

где $\mu_0^{\text{ц}} = 2\pi\eta \frac{hr_{\text{ц}}^3}{\delta}$,

$$\mu_0^{\text{п}} = 2\pi\eta \left(\frac{r_1^4}{4\delta} + \frac{\delta r_1^2}{6} \right), [10]$$

$\mu_0^{\text{ц}}$, $\mu_0^{\text{п}}$ – коэффициенты демпфирования цилиндрических и плоских зазоров,

η – вязкость газа (жидкости),

h и $r_{\text{ц}}$ – высота и радиус цилиндра,

δ – толщина зазора,

r_1 – радиус круговой плоскости контактирования.

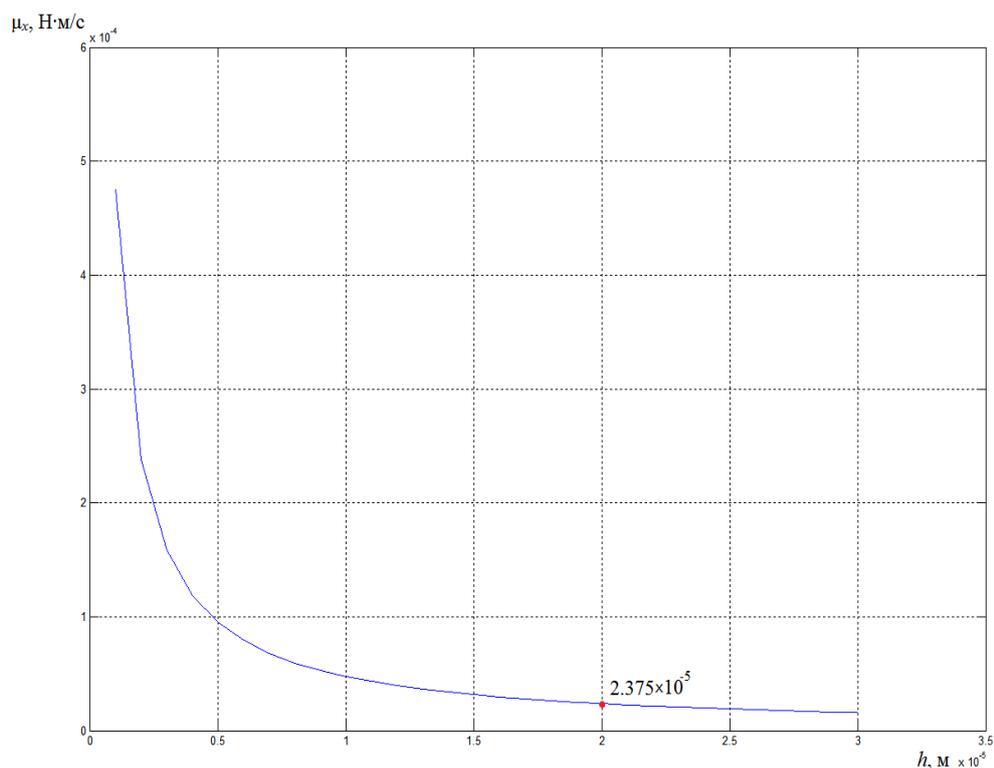


Рисунок 28 – Зависимость коэффициента демпфирования от величины зазора

Электромагнитное демпфирование обусловлено взаимодействием магнитного поля в рабочем зазоре магнитной системы ДС с магнитным полем, создаваемым токами, индуцированными в обмотке ДС или каркасе, представляющем собой короткозамкнутый виток. При этом

$$\mu_0' = \frac{(B_m S_B n)^2}{R_\Sigma},$$

$$\mu_0'' = \frac{B_m S_B}{R_{к.з.}},$$

где S_B – площадь витка, R_Σ – суммарное сопротивление обмотки и внешней цепи, $R_{к.з.}$ – сопротивление короткозамкнутого витка. [10]

Демпфирование в системе за счет наличия вихревых токов в зазоре между крышкой и поверхностью ИМ, можно найти по формуле

$$\mu_{в.т.} = \frac{k_\mu \rho y \Phi^2 p d_1}{\left(2d_1 \sin^2 \frac{\pi}{p} - d_2\right) d_2},$$

где $\Phi = LI$ – магнитный поток катушки с током, ρ – удельная проводимость покрытия ИМ, d_1 – расстояние между центрами выступов магнитопровода, d_2 – ширина катушки с током, $p = 2$ – количество пар катушек, y – толщина покрытия ИМ.

После преобразования

$$\mu_{в.т.} = \frac{k_\mu \rho y (LI)^2 2d_1}{(2d_1 - d_2) d_2}.$$

Малая величина магнитного потока, обусловленная значением индуктивности катушки L , указывает на несущественное влияние вихревых токов.

Таким образом, менять коэффициент демпфирования возможно за счет введения короткозамкнутого витка, предварительно оценив величину газового демпфирования в воздушной прослойке. Например, виток из меди площадью $S = 25$ мм², с соотношением $l/S_{mm} = 0,6$ позволяет получить значение суммарного коэффициента демпфирования $\mu_x = 8 \cdot 10^{-4}$ Н·м/с.

Возможность варьировать параметры короткозамкнутого витка позволяет задать желаемый коэффициент демпфирования:

Так, при полученном значении суммарного коэффициента демпфирования $\mu_x = 8 \cdot 10^{-4}$ Н·м/с:

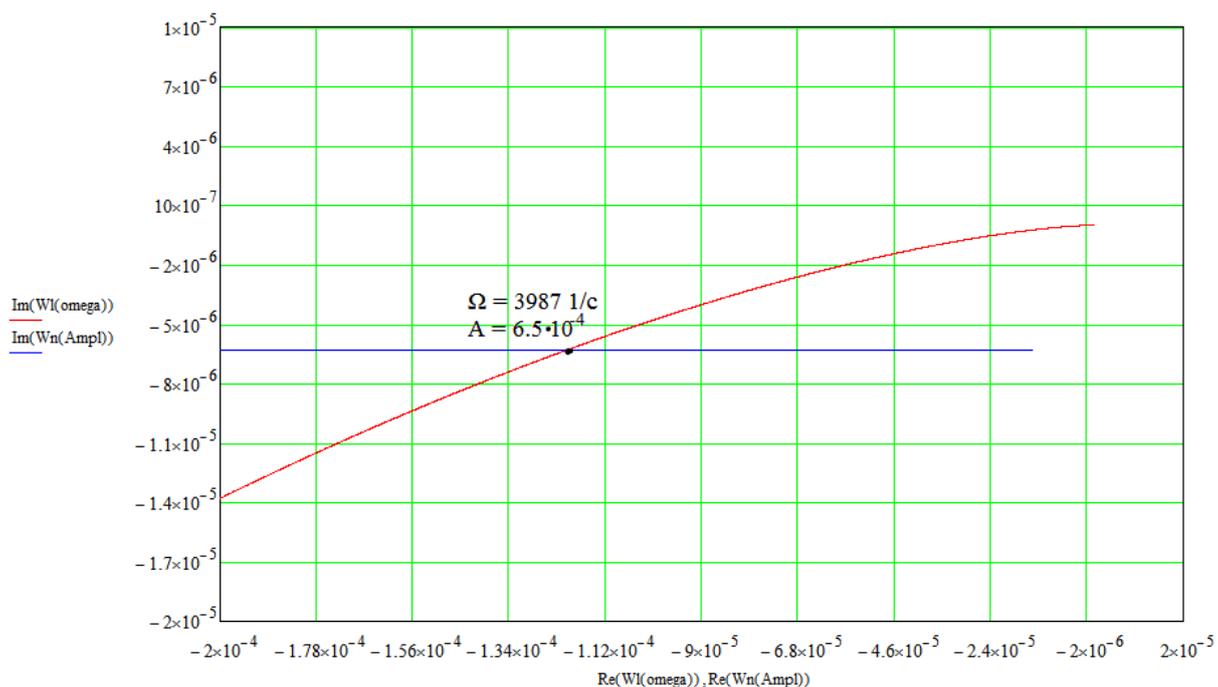


Рисунок 29 – Параметры автоколебаний при полученном коэффициенте демпфирования.

В случае отказа от демпфирования короткозамкнутым витком, параметры автоколебаний становятся следующими

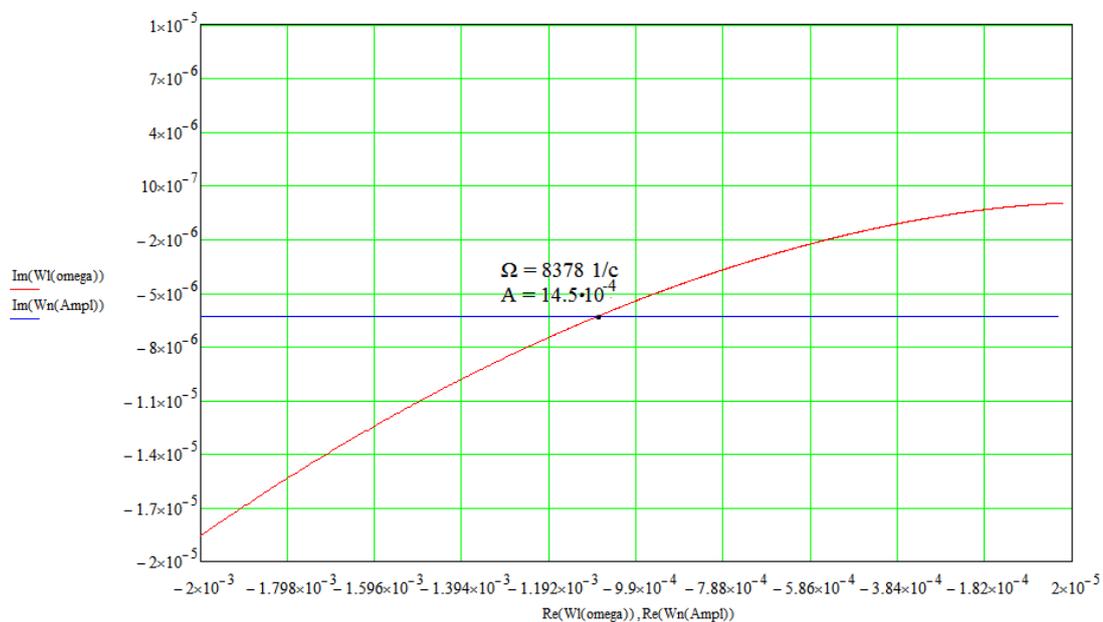


Рисунок 30 – Параметры автоколебаний без применения короткозамкнутого витка

Короткозамкнутый виток следует изготавливать из сплавов типов М1 и М2, в которых содержание меди соответственно 99,9% и 99,7%. Параметры химиче-

ского состава нормирует ГОСТ 859/2001. Процесс отбора проб с целью контроля состава осуществляются согласно ГОСТ 24 231/80.

Таблица 9 – Параметры медного провода для КЗ витка [88]

| Параметры медного провода для КЗ витка | | | |
|--|--------------------------|---|-----------------------|
| Без изоляции | | | С изоляционной эмалью |
| Диаметр, мм | Сечение, мм ² | Удельное сопротивление, ρ , 10^{-8} Ом·м (при 20 °С) | Диаметр, мм |
| 0,05 | 0,002 | 9,29 | 0,06 |
| 0,06 | 0,0028 | 6,44 | 0,07 |
| 0,07 | 0,0039 | 4,73 | 0,08 |
| 0,08 | 0,005 | 3,63 | 0,09 |
| 0,09 | 0,0064 | 2,86 | 0,1 |
| 0,1 | 0,0079 | 2,23 | 0,115 |
| 0,11 | 0,0095 | 1,85 | 0,125 |
| 0,12 | 0,0113 | 1,55 | 0,135 |
| 0,13 | 0,0133 | 1,32 | 0,145 |
| 0,14 | 0,0154 | 1,14 | 0,155 |
| 0,15 | 0,0177 | 0,99 | 0,165 |
| 0,16 | 0,0201 | 0,873 | 0,175 |
| 0,17 | 0,0227 | 0,773 | 0,185 |
| 0,18 | 0,0255 | 0,688 | 0,195 |
| 0,19 | 0,0284 | 0,618 | 0,205 |
| 0,2 | 0,0314 | 0,558 | 0,215 |
| 0,21 | 0,0346 | 0,507 | 0,23 |
| 0,22 | 0,0416 | 0,423 | 0,25 |
| 0,23 | 0,0491 | 0,357 | 0,27 |
| 0,25 | 0,0573 | 0,306 | 0,295 |
| 0,27 | 0,0661 | 0,266 | 0,315 |
| 0,29 | 0,0755 | 0,233 | 0,34 |
| 0,31 | 0,0855 | 0,205 | 0,36 |
| 0,33 | 0,0962 | 0,182 | 0,38 |
| 0,35 | 0,1134 | 0,155 | 0,41 |
| 0,38 | 0,132 | 0,133 | 0,44 |

Выбор из перечня элементной базы осуществляется за счет анализа результатов имитационного моделирования и показателей результативности.

Согласно анализу развития современных МЭМС, приведенном в первой главе, критерии сформировались в таблицу 10.

Таблица 10 – Критерии результативности АММА

| Показатель результативности | Критерий | |
|--|------------------------------|-------------------------------------|
| | Не требуются улучшения | Требуются улучшения (корректировка) |
| Смещение «нуля» | $\leq 5 \cdot 10^{-5}$ м | $> 5 \cdot 10^{-5}$ м |
| Нестабильность коэффициента преобразования | $\leq 0,1\%$ | $> 0,1\%$ |
| Нестабильность нулевого сигнала | $\leq 0,05$ м/с ² | $> 0,05$ м/с ² |
| Диапазон измерений | $\leq \pm 20g$ | $> \pm 20g$ |
| Минимальная величина входного воздействия | $\leq 0,01$ м/с ² | $> 0,01$ м/с ² |

Проведен анализ отечественной элементной базы, выявлены элементы, отвечающие критериям согласно таблице 10, результат показан в таблице 11.

Таблица 11 – Элементная база

| Элемент | | Материал (торговая марка или форма) |
|------------------------|----------------|---|
| Инерционная масса | Магнитный слой | СМ180/1000 |
| | | НМ250/1200 |
| | | НМ300/1300 |
| | | ЮН13ДК24 |
| | ММК6 | |
| | Подложка | Кремний |
| Токопроводящие дорожки | | Медь (медный порошок) |
| | | Алюминий (А5Е, А7Е) |
| | | СрМ 750 |
| Магнитопровод | | Сталь (47НК) |
| | | 79НМ |
| | | 50Н |
| Изолятор | | Эпоксидная смола |
| Упругий подвес | | Кремний (переменного сечения) |
| | | S-образный |
| | | Прямоугольного сечения |
| Датчик положения | Излучатель | АЛ102Б (светодиод) |
| | Фотоприемник | КТФ-109А (фототранзистор) Специальные ФД |

Выводы к главе 2

1. Модели процесса проектирования позволили уточнить комплект для создания конструктивно-кинематической модели, уточнить требования, необходимые для проектирования АММА, план процесса создания автоколебательного датчика.

2. Разработана конструктивно-кинематическая модель автоколебательного микромеханического акселерометра с обращенным датчиком силы, позволившая уточнить набор элементов конструкции и основные параметры датчика.

3. По результатам проведенного исследования установлено, что использование в АММА «обращенного» датчика силы существенно улучшает его силовые характеристики. При равенстве линейных размеров электростатического ДС и ДС «обращенного» магнитоэлектрического типа, силовые характеристики последнего возрастают приблизительно в тысячу раз. В работах [54, 60, 63, 64, 89] показано, что «использование магнитоэлектрических «обращенных» ДС дает возможность существенно расширить диапазон измерений и свести к минимуму погрешности датчиков и реализовать автоколебательные режимы. Предложенный тип ДС существенно упрощает технологию изготовления датчика, так как не нуждается в токоподводах». [21, 55, 64]

Проведено исследование статических характеристик АММА ОДС, которое показало, что на ДС прибора может оказывать влияние изменение (повышение) температуры, сказавшись на параметрах автоколебаний. Данный вывод однозначно указывает на необходимость детального изучения тепловых характеристик датчика.

На основании результатов расчета статических характеристик выявлены критерии результативности АММА.

4. Выбрана и обоснована элементная база, отвечающая критериям, указанным в таблице 10. Датчик силы разработан таким образом, чтобы магнитная индукция в зазоре составляла не менее 0,002 Тл. Выбран материал дорожек с током, магнитного покрытия ИМ, обеспечивающими достаточную по значению силу Ампера, магнитопровод с полюсными наконечниками для замыкания силовых

линий магнитного поля внутри корпуса прибора. Коэффициент жесткости при параметрах подвеса $b = 18$ мкм (максимальная ширина), $h = 35$ мкм (высота), $l = 1100$ мкм (длина), количестве ($n = 4$) – $c_x = 5,05$ Н/м.

Возможность изменять параметры автоколебаний за счет введения короткозамкнутого витка позволяет регулировать характеристики датчика, что может стать полезной функцией при эксплуатации устройства.

ГЛАВА 3. ПОВЫШЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТИВНОСТИ ПРОЦЕССА СОЗДАНИЯ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ АКСЕЛЕРОМЕТРОВ

3.1 Разработка имитационной модели мониторинга процесса эксплуатации

Имитационное моделирование – это способ, прежде всего, узнать поведение датчика во времени и пространстве. Соответственно, для построения модели важно знать входные данные, которые зависят от параметров системы. Такая манипуляция необходима для анализа чувствительности, но важно найти компромисс между сбором данных и экстраполяцией модели. Модель должна быть полезна в рамках исследования как АММА ОДС так и других датчиков, работающих в режиме автоколебаний. [90]

Технические решения, концептуализирующие сборку инерциальных датчиков МЭМС, определяют тип элементов и конструкцию. А именно, планарные технологии позволяют варьировать геометрические параметры инерционной массы, в то же время, делая практичные сборки с электростатическими, оптоэлектронными, оптоволоконными и другими простыми в реализации элементами. Сегодняшняя тенденция к созданию компенсирующих преобразователей и электро-механических устройств основывается на высокой точности измерений в связи с применением последних разработок.

Уравнение, описывающее собственное движение системы включает в себя обратную связи и нелинейную часть, коэффициенты которой могут быть различными ввиду разности нелинейностей.

$$Q(p) + R(p)\Phi(x, px) = 0, \quad (3.1)$$

Тогда собственное движение ПУ вдоль оси ОХ можно записать как

$$m\ddot{x} + \mu_x \dot{x} + c_x x = F(x)$$

где m – масса, μ_x – коэффициент демпфирования, c_x – коэффициент жесткости упругих подвесов.

Последнее уравнение можно представить в виде [51]

$$(T_1^2 p^2 + 2\xi T_1 p + 1)x = F(x), \quad (3.2)$$

где $T_1 = \sqrt{\frac{m}{c_x}}$, $F(x) = \frac{k_{\text{ДС}}}{T_2 p + 1} U_{\text{ДС}}(x)$, а $k_{\text{ДС}}$ – коэффициент преобразования компенсирующего преобразователя (датчика силы), T_2 – постоянная времени ДС.

Сложность в решении уравнения 3.1 заключается в наличии нелинейного звена, следовательно, необходим особый подход для предварительного исследования системы. Этот подход заключается на первом этапе в применении метода гармонической линеаризации.

В [21, 51, 63] говорится, что «метод гармонической линеаризации лучше всего подходит для исследований автоколебательных систем, поскольку физические параметры, лежащие в его основе, обусловлены периодическим сигналом на нелинейном входе».

Уравнение (2.1) можно переписать

$$[(T_2 p + 1)(T_1^2 p^2 + 2\xi T_1 p + 1) + k_{\text{ДС}}(q + q'p)]x = 0, \quad (3.3)$$

где

$$T_1 = \sqrt{\frac{m}{c_x}}, \quad \xi = \frac{\mu_x}{2\sqrt{mc_x}}, \quad k_{\text{ДС}} = \frac{F_a}{U_{\text{ДС}_m}}, \quad T_2 = \frac{L}{R}.$$

где T_1 – постоянная времени колебательного звена, ξ – коэффициент затухания, L – индуктивность, R – сопротивление обмотки КП, $T_1 \gg T_2$. Условие тако-

го неравенства для постоянных времени колебательного звена и датчика силы позволяет отметить, что сама система обладает свойствами фильтра.

$$L = 2 \cdot 10^{-7} \cdot (n \cdot l + 2b_0) \cdot \left(\ln \frac{4l}{b} - 0,75 \right). [61, 88]$$

Статическая характеристика НРЗ представлена на рисунке 31. Имитационная модель построена на основе уравнения (3.3). Целью создания имитационной модели была оценка работоспособности датчика, ведь, фактически, имитационная модель реализует уравнение (3.3) и позволяет оценить взаимосвязь входного и выходного сигналов, оценка и подбор коэффициента жесткости и демпфирования, наглядно наблюдать изменение числа счетных импульсов при изменении входного воздействия. Счетные импульсы подаются с частотой 10^6 Гц. В современном мире компьютерные технологии развиваются с бешеной скоростью и позволяют решать все более трудоемкие и сложные задачи. Встречаются случаи, когда создание опытного образца невозможно а, следовательно, невозможно и провести эксперимент с реальным образцом по причине хрупкости, высокой стоимости. Целесообразность проведения реального эксперимента под вопросом в случае, когда надо проверить работоспособность изобретения. В таких случаях на помощь приходит моделирование, метод конечных элементов, применяемый во многих программных пакетах. Так же и уравнения с нелинейностью, когда речь идет об их решении нелинейность следовало бы линеаризовать, однако, с появлением компьютерных программ решение может быть выполнено путем моделирования, т.е. без необходимости линеаризации и, следовательно, с минимумом допущений. Моделирование существенно упрощает подход к решению задачи до выполнения опытного образца, позволяет наглядно продемонстрировать те его особенности, на которых исследователям стоило бы заострить внимание.

Сравнивая метод анализа графика задачи с моделированием, выполненным в лаборатории университета, был получен соответствующий результат, доказывающий осуществимость разработанной методики для измерения основных параметров датчика первичной информации, работающего в режиме автоколебаний, с разработанной моделью.

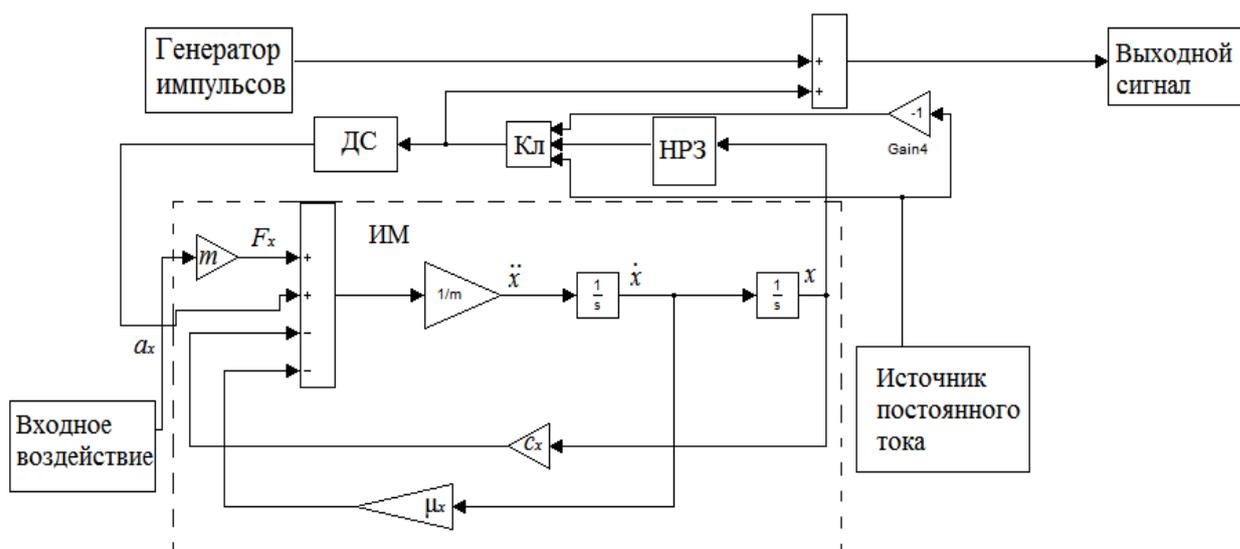


Рисунок 31 – Имитационная модель АММА ОДС[49]

Дальнейшее применение расчета и моделирования может быть использовано для решений в МЭМС. Моделирование позволяет определить параметры для дальнейших расчетов. Коэффициент демпфирования и коэффициент жесткости подвеса, и уже оцененные значения являются отправной точкой для дальнейшего исследования.

ИМ обладает одной поступательной степенью свободы, перемещаясь вдоль оси ОХ, движение ограничено упругими подвесами с жесткостью c_x . «Обращенный» магнитоэлектрический ДС, создавая силу Ампера, обеспечивает возбуждение колебаний ИМ с относительной скоростью \dot{x} . Для возбуждения колебаний схема дополнена нелинейным элементом с известными статистическими параметрами. [10] Эта нелинейность компенсирует другие (часто неизвестные) нелинейности, которые могут быть однозначными и петлевыми, как симметричными, так и асимметричными относительно начала координат.

Амплитудно-фазовая частотная характеристика разомкнутой системы [51]

$$W(i\Omega) = W_n(i\Omega)W_n(A),$$

где $W_n(i\Omega)$ – АЧХ линейной части, $W_n(A)$ – АЧХ нелинейной части системы.

Согласно (3.3)

$$W_n(i\Omega) = \frac{k_{ДС}}{(T_2 i\Omega + 1)(-m\Omega^2 + \mu_x i\Omega + c_x)}$$

$$W_H(A) = q + jq'$$

В соответствии с [59], при выбранном нелинейном звене

$$q = \frac{1}{\pi A} \int_0^{2\pi} F(A \sin \Omega) \sin \Omega d\Omega = \frac{4U_{дс}}{\pi A} \sqrt{1 - \frac{x_m^2}{A^2}},$$

$$q' = \frac{1}{\pi A} \int_0^{2\pi} F(A \sin \Omega) \cos \Omega d\Omega = -\frac{4U_{дс} x_m}{\pi A^2}.$$

где A – амплитуда автоколебаний.

При проведении расчетов были использованы следующие значения параметров:

Таблица 12 – Параметры модели прибора [54]

| Обозначение параметра | Значение параметра |
|--|----------------------|
| Масса ИМ, m , кг | $4.15 \cdot 10^{-6}$ |
| Сила Ампера, F_a , Н | 0,00037 |
| Коэффициент преобразования ДС, Н/В | $9,2 \cdot 10^{-5}$ |
| Ширина петли гистерезиса, x_m , м | $40 \cdot 10^{-6}$ |
| Величина напряжения, $U_{дс}$, В | 5 |
| Индуктивность ДС, Гн | $4,31 \cdot 10^{-7}$ |
| Сопротивление ДС, Ом | 31,2 |
| Постоянная времени магнитоэлектрического ДС, T_2 , с | 10^{-8} |
| Число токопроводящих дорожек на пластине ИМ, n | 78 |
| Длина пластины ИМ, l , м | $5 \cdot 10^{-3}$ |
| Ширина пластины ИМ, b_0 , м | $2,5 \cdot 10^{-3}$ |
| Ширина токопроводящей дорожки, b , м | $22,8 \cdot 10^{-6}$ |
| Толщина слоя токопроводящих дорожек, h , м | $10 \cdot 10^{-6}$ |

Построены АФХ линейной части и АХ нелинейной части системы

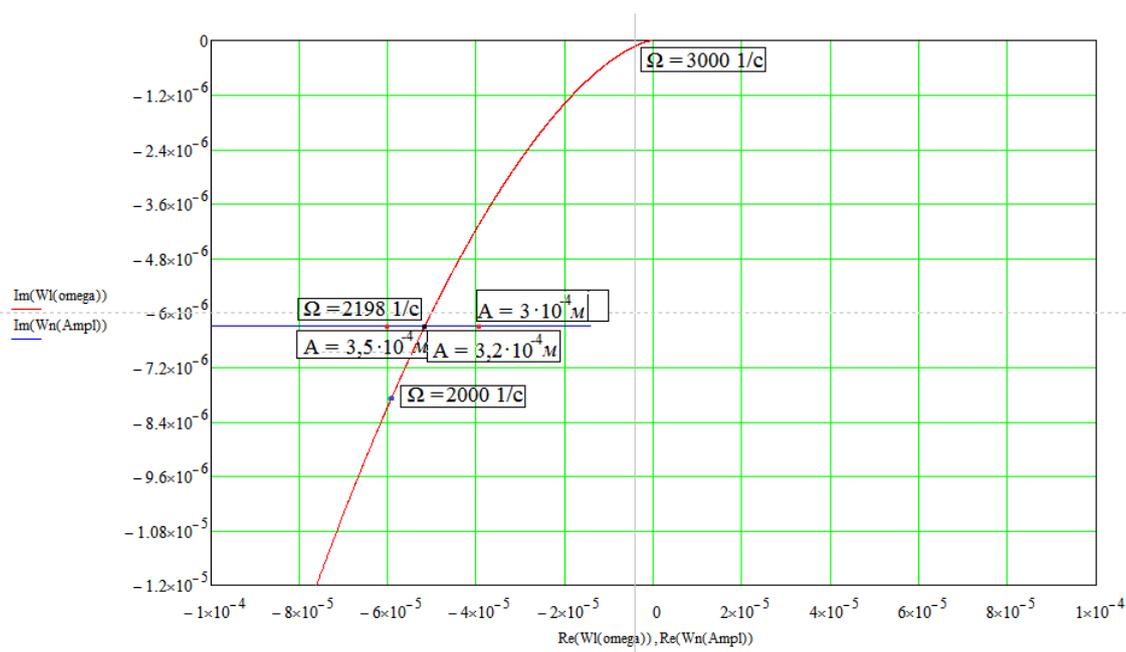


Рисунок 32 – АЧХ линейной части АХ нелинейной части системы

Искомое решение находится в точке пересечения построенных графиков [89]:

$$\Omega = 2198 \text{ 1/c} = 350 \text{ Гц и } A = 3,2 \cdot 10^{-4} \text{ м.}$$

В решении задачи по созданию методики расчета характеристик АММА ОДС, построение графиков (рисунок 32) является отправной точкой в поисках дальнейшего решения. На данном этапе это позволяет оценить значения искомого амплитуды и частоты колебаний и двигаться в сторону уточнения таких параметров как демпфирование и жесткость подвеса ИМ. К моменту определения параметров уже известны способы их изменения. Коэффициент жесткости подвеса в данном случае можно корректировать путем изменения его формы и геометрических параметров, а коэффициент демпфирования – за счет введения короткозамкнутого витка.

3.2 Результаты имитационного моделирования

Методика подбора коэффициентов дополняется за счет имитационного моделирования, в котором обретает свою закономерность. Благодаря построению имитационной модели можно осуществить подбор коэффициентов таким обра-

зом, чтобы совпали параметры автоколебаний (частота $\Omega = 350$ Гц, амплитуда $A = 3,2 \cdot 10^{-4}$ м) с теми результатами, что получились при графоаналитическом методе. Эти значения: коэффициент демпфирования $\mu_x = 9 \cdot 10^{-3}$ Н·с/м, а коэффициент жесткости подвеса $c_x = 5$ Н/м.

Сама имитационная модель представлена на рисунке 31.

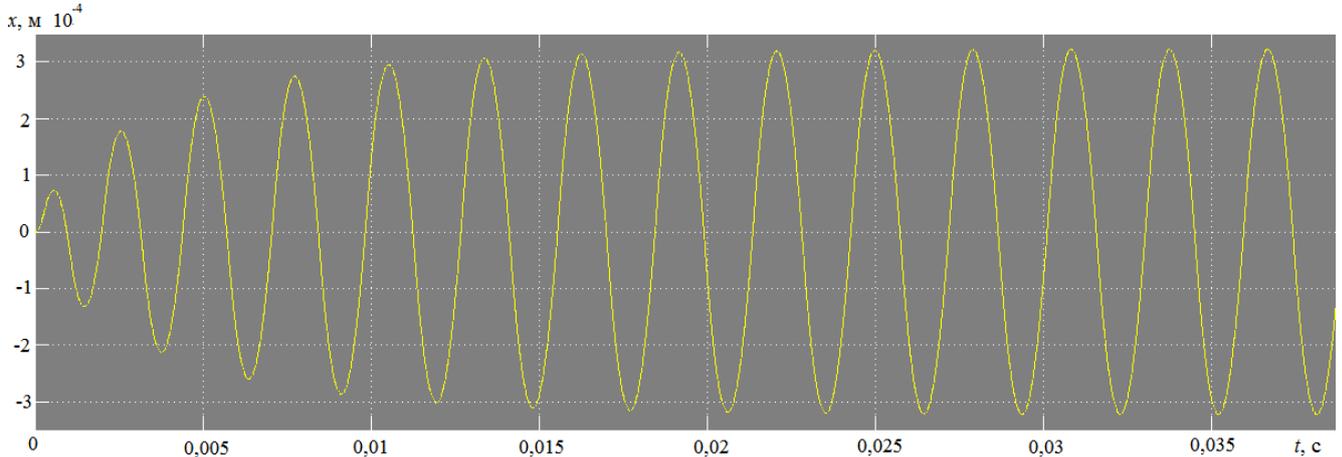


Рисунок 33 – Амплитуда колебаний ИМ при нулевом входном воздействии

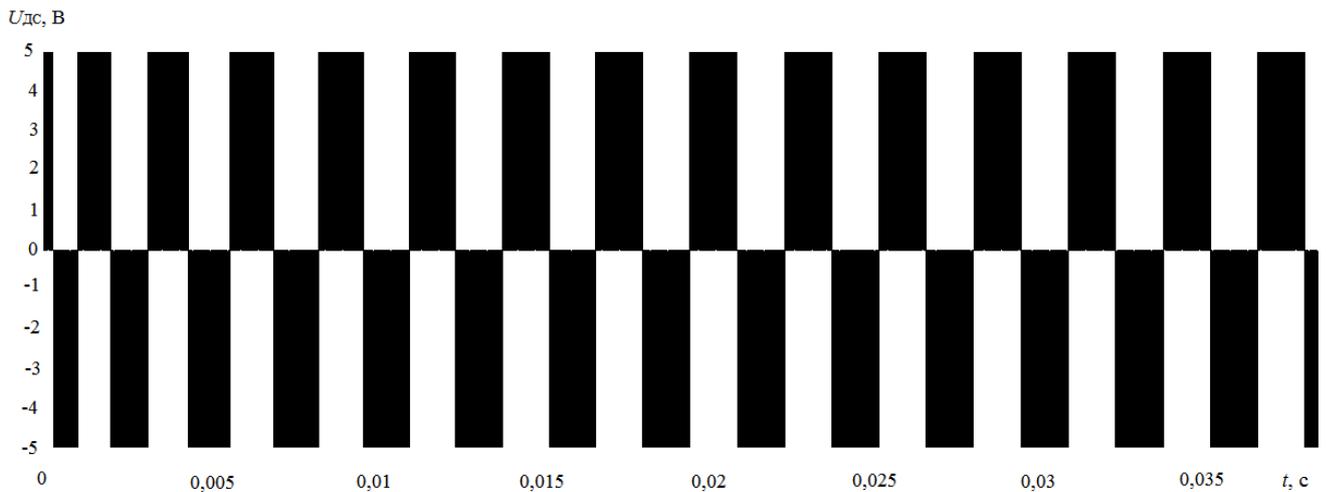


Рисунок 34 – Формирование импульсов при нулевом входном воздействии

Совпадение параметров колебаний происходит путем подбора коэффициентов линейной части. Ранее вычисленные аналитически, они совпадают с полученными путем имитационного моделирования значениями.

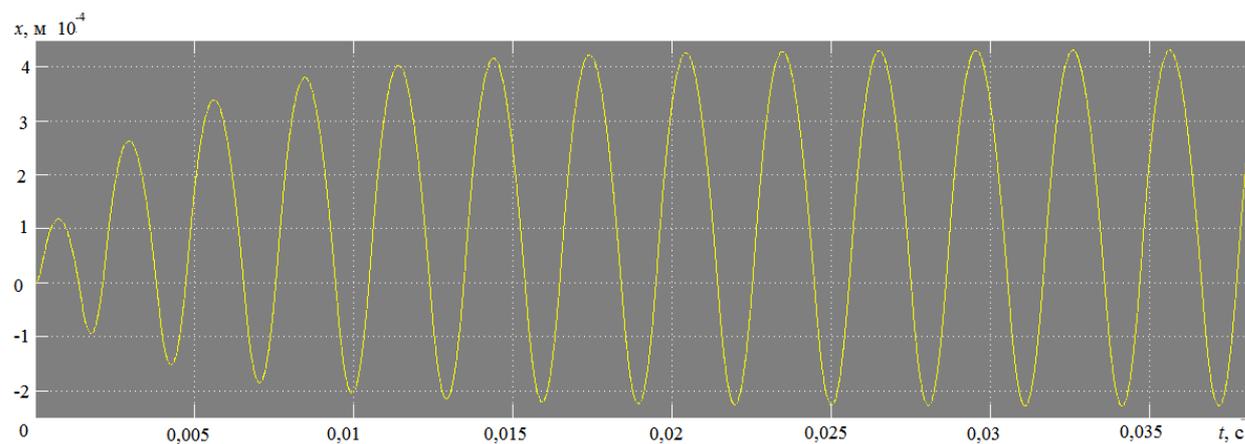


Рисунок 35 – Амплитуда колебаний ИМ при входном воздействии > 0

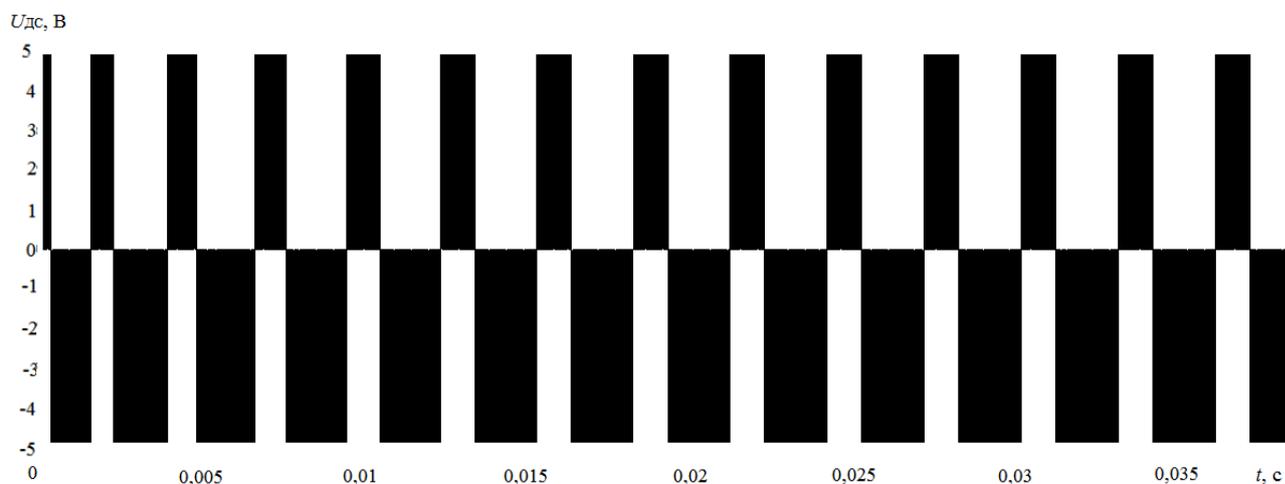


Рисунок 36 – Формирование импульсов при входном воздействии > 0

3.3 Разработка методики повышения результативности процесса создания АММА

Методика повышения результативности АММА [64] позволяет подобрать такой набор элементов и компонентов датчика, чтобы он максимально удовлетворял требованиям ТЗ. Поскольку элементы могут быть заменены, то процесс подготовки датчика к изготовлению является наиболее существенным.

Методика позволяет осуществить подбор элементов по наличию автоколебаний, силовым параметрам, жесткости подвесов и коэффициента демпфирования, тем самым, к этапу производства можно подойти, предполагая ряд заведомо удачных решений. В отличие от изготовления опытных образцов, данная методика предлагает выбор из нескольких вариантов.

Предложенная и разработанная методика повышения результативности процесса создания АММА подтверждена результатами имитационного моделирования по данной методике.

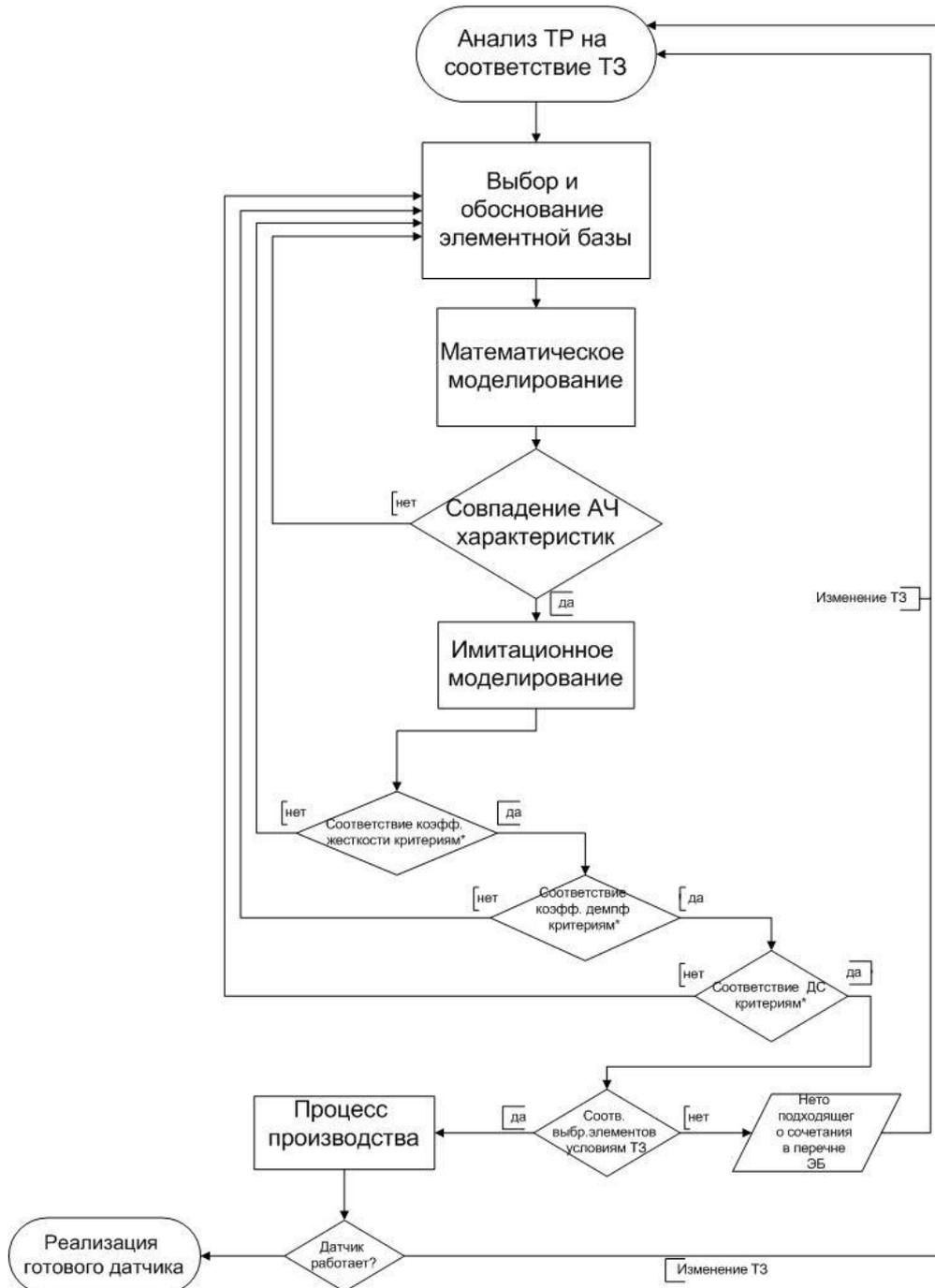


Рисунок 37 – Алгоритм методики повышения результативности

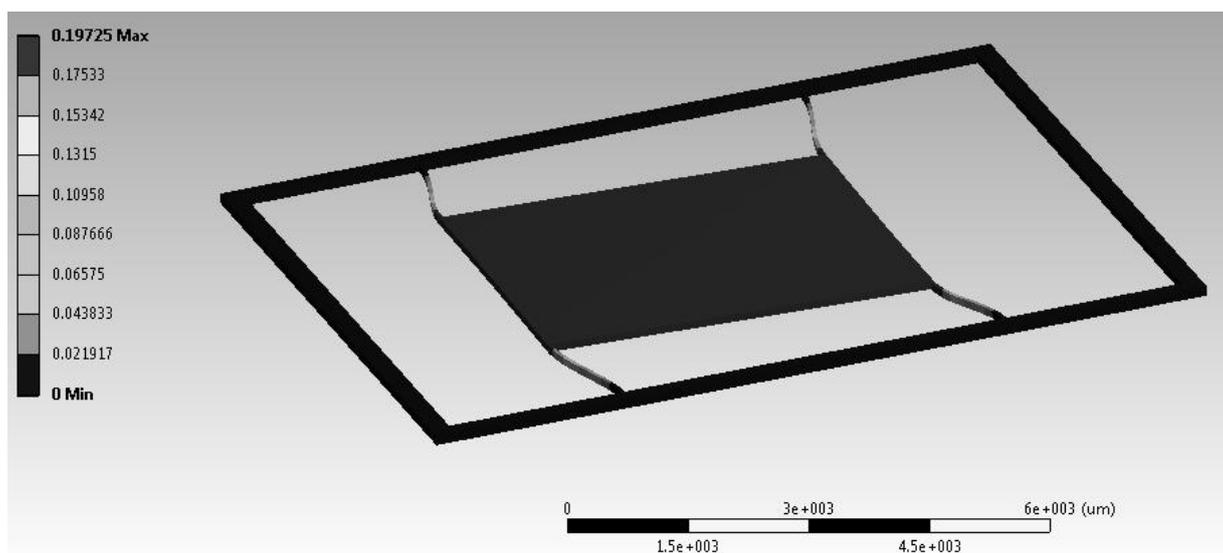


Рисунок 38 – Результат моделирования движения ИМ

По результатам проведенного анализа выявлено, что для повышения результативности процесса создания АММА необходимо обеспечить вариативность перечня элементной базы, корреляцию элементов микромеханического акселерометра

Проведенное исследование статических характеристик АММА ОДС показало, что на ДС прибора оказывают влияние внешние воздействия, ухудшающие качество функционирования АММА.

Выводы к главе 3

Сочетание графоаналитического метода определения параметров автоколебаний и построения имитационной модели позволило уточнить коэффициенты (демпфирования $\mu_x = 9 \cdot 10^{-3} \text{ Н} \cdot \text{с/м}$ и жесткости $c_x = 5 \text{ Н/м}$), обеспечивающих автоколебания с заданной частотой $\Omega = 2198 \text{ 1/с}$ и амплитудой $A = 3,2 \cdot 10^{-4} \text{ м}$. Разработана методика расчета и анализа характеристик АММА ОДС.

Сравнивая метод анализа графика задачи с моделированием, выполненным в лаборатории университета, был получен соответствующий результат, доказывающий осуществимость разработанной методики для измерения основных пара-

метров датчика первичной информации, работающего в режиме автоколебаний, с разработанной моделью.

Дальнейшее применение расчета и моделирования может быть использовано для решений в МЭМС. В настоящее время определены несколько параметров конструкции (размеры, материалы, которые будут использоваться), что позволяет рассчитать напряжение в магните проводников и индуктивность зазора. Моделирование позволяет определить параметры для дальнейших расчетов. Коэффициент демпфирования и коэффициент жесткости подвеса, и уже оцененные значения являются отправной точкой для дальнейшего исследования.

ГЛАВА 4. ОЦЕНКА ВРЕДНЫХ ВНЕШНИХ ФАКТОРОВ И СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНЫХ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ АКСЕЛЕРОМЕТРОВ

4.1 Исследование влияния внешнего магнитного поля на характеристики автоколебательного микромеханического акселерометра с «обращенным» датчиком силы

Рассматриваемый в работе АММА ОДС является датчиком, начиненным магнитными элементами (покрытие ИМ, полюсные наконечники, токопроводящие дорожки). Учет воздействия магнитного поля на эти элементы отдельно и в совокупности требуется рассмотреть, так как оно является существенной помехой при работе датчика, провоцируя возникновение неточностей результатов измерения. Целью данного исследования является изучение влияния внешнего магнитного поля на датчик силы прибора, а так же, при необходимости, подбор геометрических параметров и материалов для изготовления магнитного экрана.

При воздействии внешнего магнитного поля в отсутствии ускорения, на катушки с током, помимо индукции магнитного поля постоянного магнита B_m , будет оказывать вредное влияние $B_{вп}$ в направлении вектора внешнего магнитного поля, оказывая влияние на линейную часть системы.

Магнитные и электрические поля низких частот бывают как естественного, так и искусственного происхождения. Естественно возникающие электрические магнитные поля связаны с атмосферными явлениями, например, в ионосфере, грозы, молнии. Искусственными источниками могут быть даже бытовые приборы (телевизоры, компьютеры и т.д.). На уровне земли, непосредственно ниже линий электропередач, магнитные поля достигают 20 мкТл. При данных условиях, высокая чувствительность датчика к магнитным полям означала бы его непригодность. Следовательно, необходимо провести ряд исследований, подтверждающих или опровергающих существенность действия магнитных полей на ДС АММА ОДС, «поставив» датчик в различные условия его эксплуатации.

В качестве отправной точки исследований можно оценить влияние магнитного поля Земли на ДС, сделав следующие предположения:

1) пусть, при известном значении магнитной индукции постоянного магнита ($B = 0,024$ Тл) и силе Ампера, создаваемой КП ($F_a = 0,37$ мН), имеется проводник длиной ($l = 1$ м), тогда, создаваемая таким проводником сила тока I будет равна 1,5 А:

$$I = F_a / Bl,$$

2) На такой проводник будет действовать магнитное поле Земли, создавая силу Ампера, величина которой будет зависеть от расположения устройства в пространстве, так как магнитное поле Земли вблизи экватора обладает индукцией $3,1 \cdot 10^{-5}$ Тл, а на широте 50° эта величина изменяется до $1,6 \cdot 10^{-5}$ Тл. Напряженность и индукцию удобно связать через абсолютную магнитную проницаемость $\mu_{Cu} = 1,26 \cdot 10^{-6}$ Гн/м [91, 92].

3) Так как некоторые величины не являются постоянными, удобно для оценки построить график

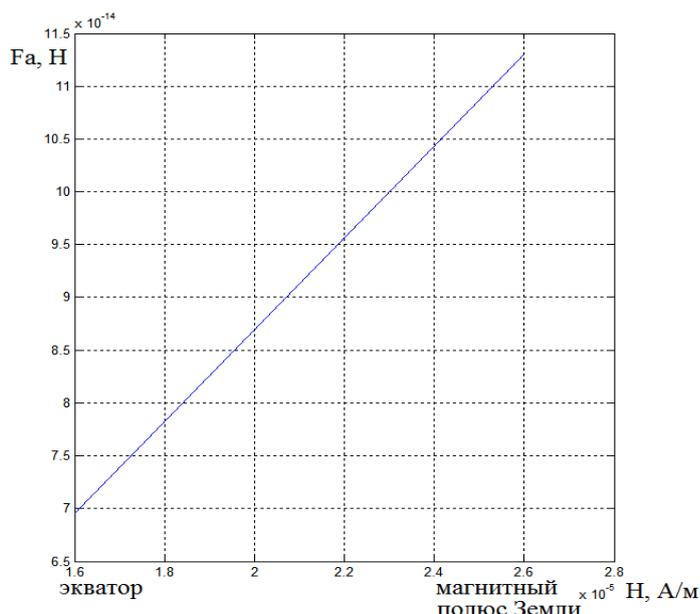


Рисунок 39 – График зависимости силы Ампера, создаваемой экспериментальным проводником с током

С увеличением высоты индукция магнитного поля Земли будет ослабевать.

Сила Ампера, полученная в результате расчета, составляет величину порядка 10^{-14} при том, что сила, создаваемая постоянным магнитом «обращенного» ДС равна $F_A = 0,37$ мН.

Кроме того, следует проследить за изменениями выходного сигнала при внесении ДС во внешнее постоянное магнитное поле с различным значением индукции.

На этапе анализа, можно позволить ряд допущений:

1. Величина внешнего магнитного поля составит $B = 1,6 \cdot 10^{-5}$ Тл – величина магнитного поля Земли.

В этом случае амплитуда колебаний и выходной сигнал будут вести себя как при нулевом входном воздействии, в связи с чем можно прийти к выводу о том, что магнитное поле Земли не способно оказать влияния на датчик силы АММА ОДС.

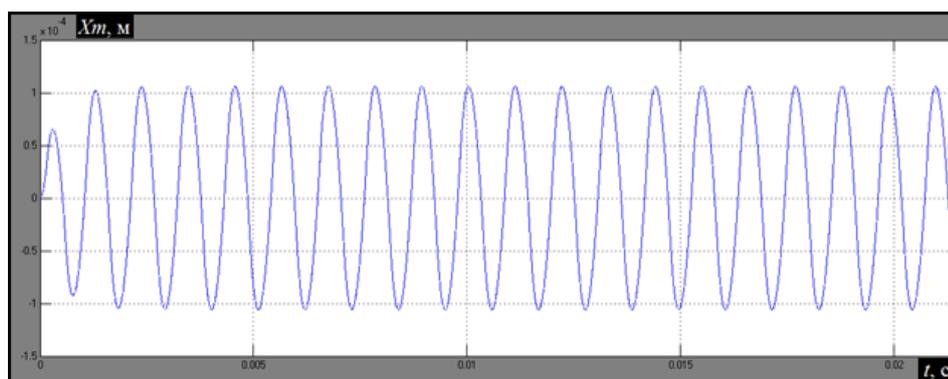


Рисунок 40 – Амплитуда колебаний ИМ при внешнем магнитного поля $B = 1,6 \cdot 10^{-5}$ Тл – магнитного поля Земли

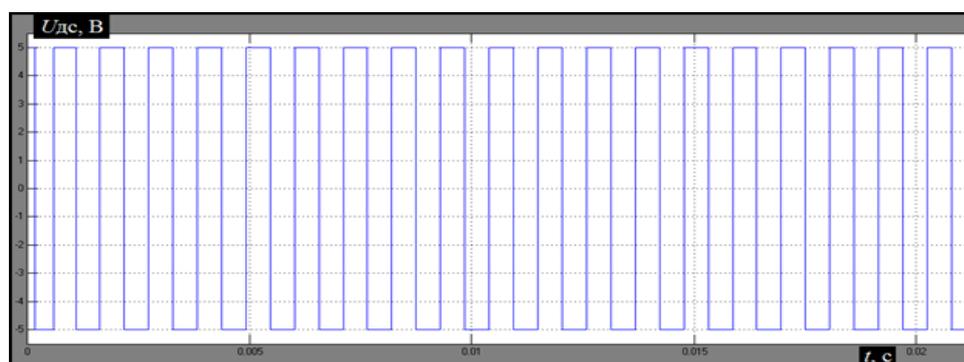


Рисунок 41 – Выходной сигнал при внешнем магнитного поля $B = 1,6 \cdot 10^{-5}$ Тл – магнитного поля Земли

2. Повышая величину внешнего магнитного поля, можно получить новую картину выходного сигнала, показанную на рисунках 35 – 38.

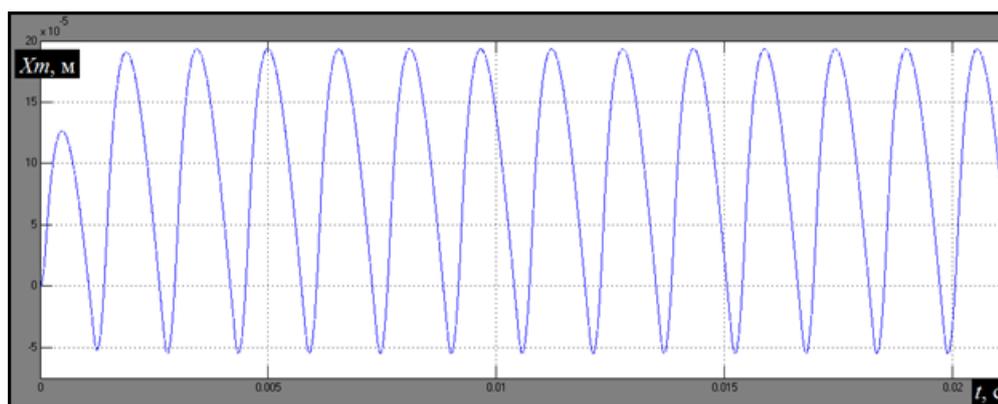


Рисунок 42 – Амплитуда колебаний ИМ при внешнем магнитного поля $B = 1,6 \cdot 10^{-4}$ Тл

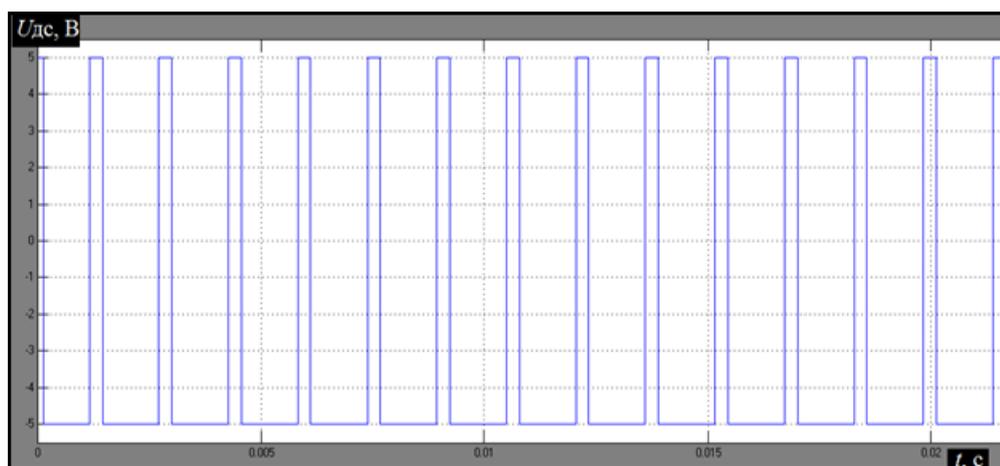


Рисунок 43 – Выходной сигнал при внешнем магнитного поля $B = 1,6 \cdot 10^{-4}$

Тл

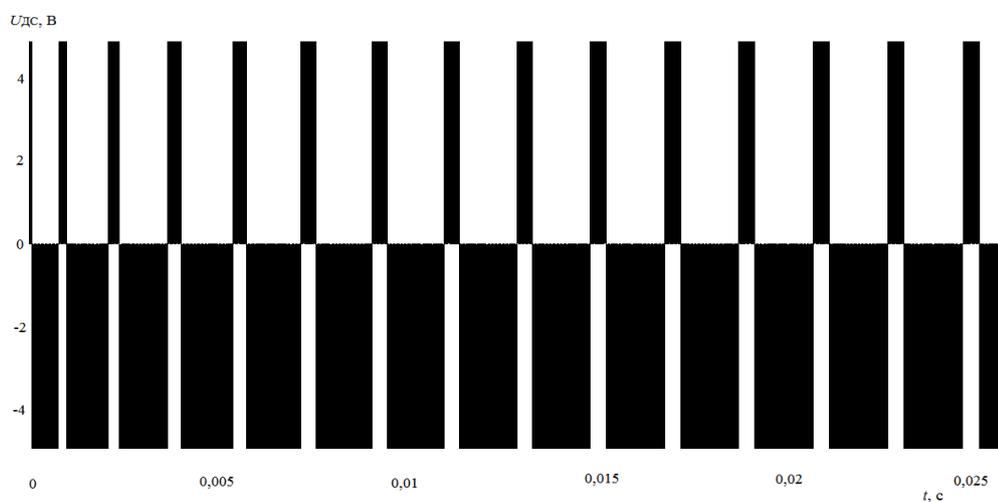


Рисунок 44 – Выходной сигнал при внешнем магнитного поля $B = 1,6 \cdot 10^{-4}$

Тл

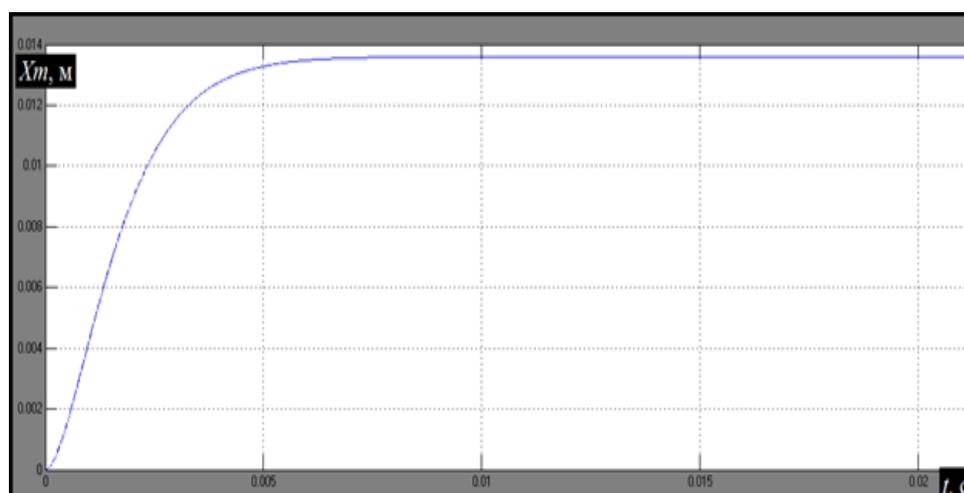


Рисунок 45 – Амплитуда колебаний ИМ при внешнем магнитного поля $B = 9,7$ мТл

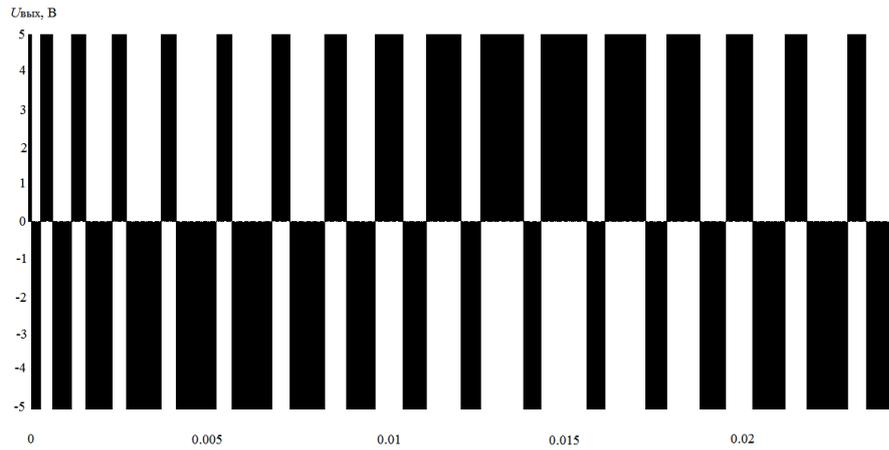


Рисунок 46 – Зависимость выходного сигнала от воздействия внешнего магнитного поля $H = 10 \text{ А/м}$, $f = 50 \text{ Гц}$

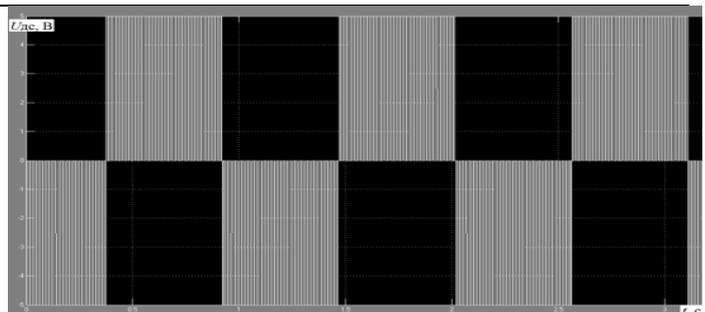


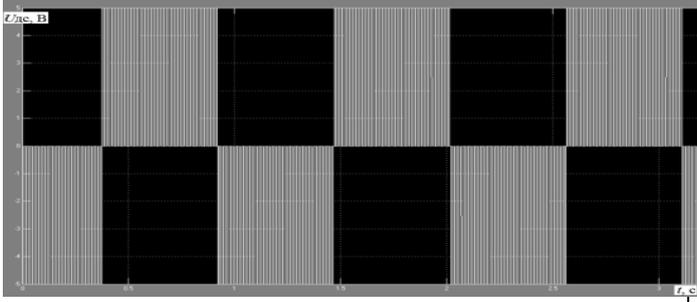
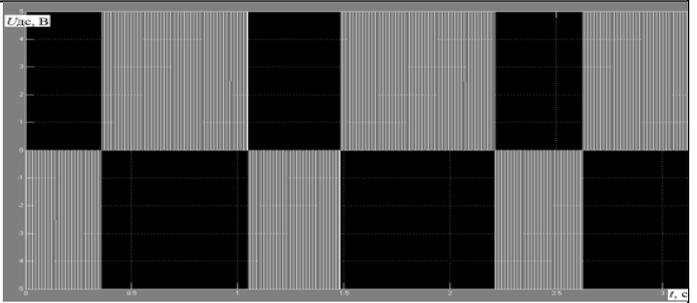
Рисунок 47 – Картина распределения магнитного поля при $H = 10 \text{ А/м}$, $f = 50 \text{ Гц}$

Согласно [93] и [94] важно оценить работоспособность датчика в вероятных условиях его эксплуатации.

Таблица 13 – Результаты моделирования ЧЭ АММА ОДС при различных степенях жесткости

1 ст. ж., изменение длины импульсов отсутствует [93] Это говорит о том, что в данных условиях работы датчик работает без погрешности со стороны магнитного поля, следовательно, экранирование не требуется.



| | |
|--|--|
| <p>2 ст. ж., изменение длины импульсов прослеживается и способно оказать некоторое влияние на работу прибора [93]. В данном случае погрешность составит порядка 1-2 счетных импульса, в случае, если есть возможность ее учесть, поведение датчика остается предсказуемым.</p> |  <p>Осциллограмма, показывающая импульсы с равномерной частотой и амплитудой. Визуально это выглядит как чередование черных и серых вертикальных полос. В левом верхнем углу есть надпись 'Улс. В', а в правом нижнем — 'f. c'.</p> |
| <p>3 ст. ж., уже существенно меняет длину импульсов, подобное воздействие может оказать существенное влияние на работу ЧЭ прибора [93]. В этом испытании видно, что учет погрешности имеет меньше смысла, чем установка магнитного экрана.</p> |  <p>Осциллограмма, показывающая импульсы с неравномерной частотой и амплитудой. Визуально это выглядит как чередование черных и серых вертикальных полос, но с заметными искажениями в длине и высоте импульсов. В левом верхнем углу есть надпись 'Улс. В', а в правом нижнем — 'f. c'.</p> |

4.2 Разработка магнитного экрана. Выбор материалов и геометрических параметров

Магнитные поля низких частот могут оказывать влияние на устройства с магнитными и электронными компонентами, вызывая нежелательные токи в дорожках, тем самым добавив шум, ошибки и, в конечном счете, нарушить работу откалиброванных датчиков.

При эксплуатации датчиков вблизи смартфонов, компьютеров и т.д. точность измерений не может пострадать, однако область применения, безусловно, лежит в области техники военного назначения, где магнитные поля могут серьезно угрожать работе устройств, ведь даже в автомобильных системах отсутствие надлежащего экранирования может иметь катастрофические последствия.

Авиационная электроника является одним из важнейших примеров описываемой проблемы. Инструментарий в самолетах упакован плотно из-за ограничения пространства. Эффективность работы устройств, работающих на борту, может быть заметно искажена соседними тахометрами, которые могут излучать

магнитное поле, кроме того воздушное судно изменяет направление или положение относительно магнитного поля земли.

Защита чувствительной электроники от низкочастотных магнитных полей требует иного подхода, чем защита тех же устройств от других источников энергии и шума. В отличие от других источников энергии, таких как радиочастотные, низкочастотные магнитные источники широко распространены. Помимо магнитного поля от самой Земли магнитные поля возникают из источников питания, трансформаторов и усилителей. Действительно, как показывают уравнения Максвелла, они могут возникать из любого потока тока. Кроме того, магнитные поля не могут быть уничтожены или иным образом погашены. Однако они могут быть перенаправлены, и в этом заключается фундаментальная роль магнитных экранирующих материалов.

С точки зрения обеспечения надежной работы исследовательских и бытовых приборов область магнитных полей промышленной частоты МППЧ, точнее, частоты 50 Гц является наиболее распространенным и постоянно действующим вредным фактором. [93, 94]

Магнитная проницаемость является характеристикой всех материалов, но некоторые сплавы обеспечивают наилучшую комбинацию магнитных характеристик. Наиболее широко для экранирования используются кристаллические магнитомягкие материалы такие как пермаллой (79НМ), супермаллой.

Таблица 14 – Сплавы пермаллоя

| Сплав | $B_s, \text{Тл}$ | $H_c, \text{А/м}$ |
|-------------------|------------------|-------------------|
| 79 НМ (Пермаллой) | 0,7 | 2 |
| Супермаллой | 0,7 | 0,5 |

Хотя более проницаемые материалы могут эффективно ослаблять магнитное поле, ни один материал не способен полностью перенаправить его, а тем более устранить его.

Экранирование магнитных полей подразумевает ослабление или уменьшение связи между указанными цепями за счет устранения общих магнитных полей. [92]

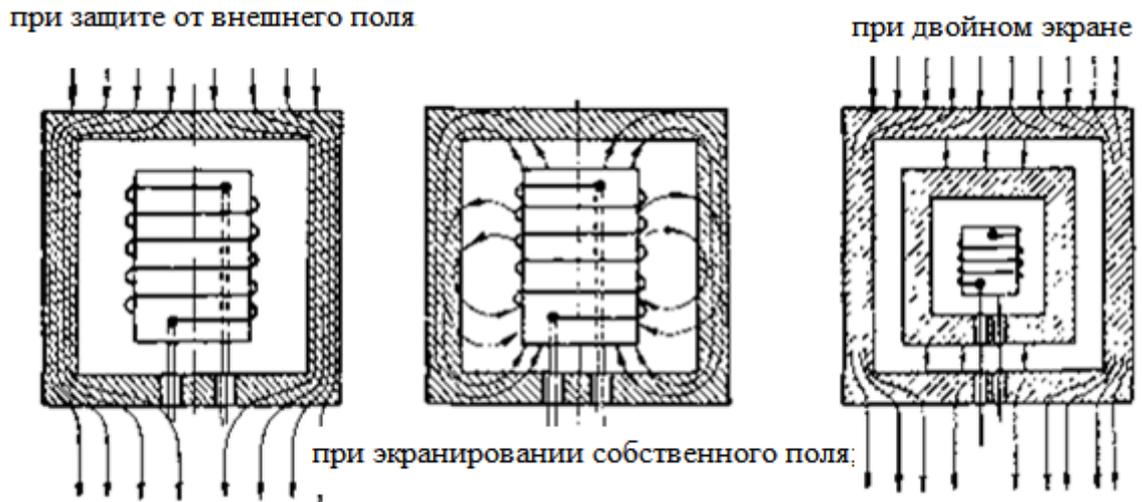


Рисунок 48 – Схематичное изображение магнитостатических экранов [92]

Коэффициент экранирования

$$K_3 = \frac{U_{п.н.}}{U_{п.э.}}$$

где $U_{п.н.}$ — э.д.с. помехи, наводимой в неэкранированной электрической цепи; $U_{п.э.}$ — э.д.с. помехи в экранированной цепи, при условии наличия внешнего магнитного поля помех той же интенсивности, что при измерении э.д.с. $U_{п.н.}$

Выбор толщины стенок магнитного экрана не может быть однозначным, так как важно учитывать материал экрана, частоту помехи, заданный коэффициент экранирования [95].

Как, например, ток будет следовать по низкоомному пути к земле, магнитные поля будут использовать самый простой и доступный путь. Для магнитных полей самый простой путь — материалы с наивысшими характеристиками магнитной проницаемости. Таким образом, высокопроницаемый материал, размещенный между внешним магнитным полем и контуром, уменьшит магнитное поле, достигающее контура, перенаправив магнитное поле от него.

Требования по выбору материалов для магнитных экранов можно свести к [88]:

1) экраны из электротехнической стали, с малой начальной магнитной проницаемостью применяют в случае, когда требуются незначительные коэффициенты экранирования ($K_э \leq 10$);

2) пермаллой (например), из которого выполняются магнитные экраны, обладает высокой начальной магнитной проницаемостью. Такие металлы применяют, когда требуется существенно больший коэффициент экранирования ($K_э > 10$) в узкой полосе частот. [88]

Конструкции экранов, в среднем, имеют три хорошо известные и технологически применимые разновидности: плоскостные, цилиндрические и сферические. Несмотря на конструкции, коэффициент экранирования [88]

$$K_э = \frac{1}{\operatorname{ch}kt} \frac{1}{1 + \frac{1}{2} \left(N + \frac{1}{N} \right) \operatorname{th}kt}, \quad (4.1)$$

где $N = Z_д/Z_э$. Разница в величине волнового сопротивления, входящего в параметр N . Сопоставляя конструкции экранов, обнаруживается что $Z_д^п : Z_д^ц : Z_д^с = 1 : 2 : 3$, следовательно, $K_э^п : K_э^ц : K_э^с = 1 : 1/2 : 1/3$, отсюда следует предположить, что наиболее перспективная форма экрана – шар. [95]

Эффективность экранирования (коэффициент) однослойного магнитного экрана может быть определена как

$$K_э = \frac{H_п}{H_{п.э}},$$

где $H_п$ — напряженность магнитного поля при отсутствии экрана; $H_{п.э}$ — напряженность магнитного поля помех при наличии экрана. [96]

В зависимости от свойств экрана [88, 96]:

$$K_э = 1 + \frac{0,66\mu t}{r_э},$$

где μ – начальная магнитная проницаемость материала экрана; t – толщина стенок экрана; $r_э$ – радиус эквивалентной сферы. [96]

$r_э$ для экрана прямоугольной формы может быть найден по формуле [88]

$$r_э = \sqrt[3]{\frac{3}{4\pi} l_1 l_2 l_3},$$

где l_1 , l_2 и l_3 — длины стенок экрана.

Коэффициент экранирования повышается с толщиной стенок экрана, однако при требуемых значениях $K_э$, если эта толщина будет значительной, то разумнее будет применить многослойный экран.

$$K_э = \frac{\Phi_{\text{п}}}{\Phi_{\text{п.э}}} = 1 + \frac{R_{\text{м.в.}}}{R_{\text{м.э}}}.$$

Магнитное сопротивление экрана кубической формы можно приблизительно определить как [88, 96]

$$R_{\text{м.э}} = \frac{l_э}{p_э t \mu_э},$$

где $l_э$ — полупериметр экрана в плоскости, параллельной помехе; $p_э$ — периметр экрана (перпендикулярно помехе); t — толщина стенки; $\mu_э$ — магнитная проницаемость материала экрана.

Магнитное сопротивление воздушного зазора [88]

$$R_{\text{м.в.}} = \frac{l_{\text{в}}}{\mu_{\text{в}} S_{\text{в}}},$$

где $l_{\text{в}}$ — длина воздушного промежутка; $S_{\text{в}}$ — площадь поперечного сечения воздушного промежутка; $\mu_{\text{в}}$ — магнитная проницаемость воздуха.

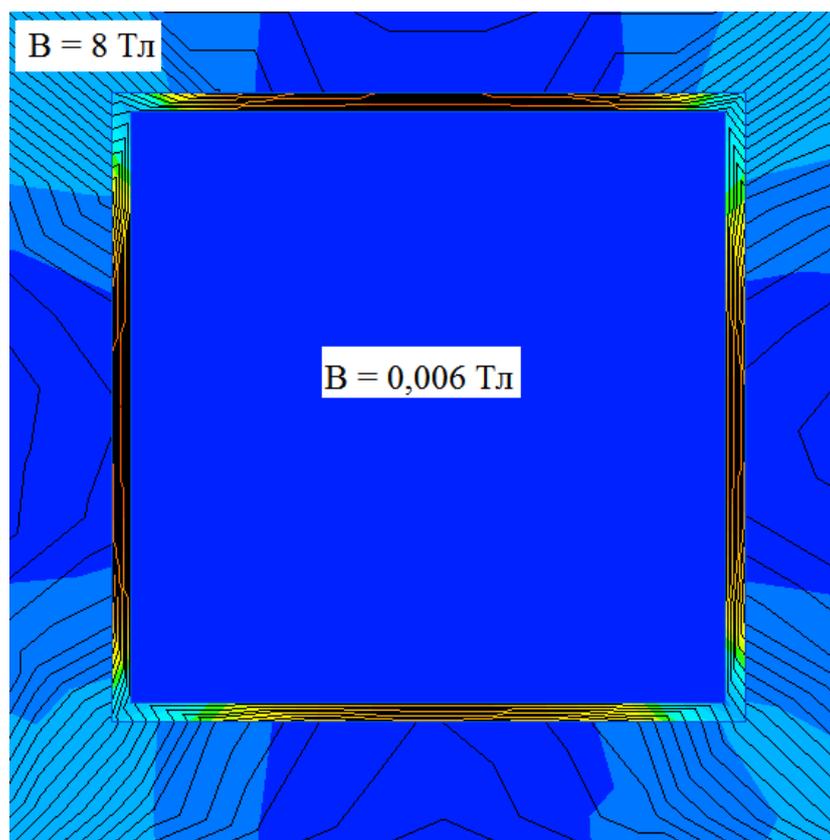


Рисунок 49 – Однослойный экран (пермаллой)

Многослойные экраны применяются в том случае, если требуется существенное экранирующее действие. Эффект достигается за счет экранирования поглощения $K_{\text{эл}}$ и экранированием отражения $K_{\text{эо}}$ на границах раздела сред. [96] Это является отправной точкой в конструировании многослойных экранов.

Конструирование многослойных магнитных экранов может повысить как эффективность экранирования, так и способствовать уменьшению их веса и габаритов. Такой подход является общим для магнитного экранирования и позволяет использовать преимущества различных материалов при одновременной минимизации влияния их ограничений. Чтобы удовлетворить эту потребность в разнообразии, производители материалов предлагают специализированные сплавы в различных формах, включая провода, стержни, пластины, листы фольги. Поскольку для создания эффективного магнитного экрана часто требуется изучить достаточное количество сочетаний материалов и форм, оценивать различные материалы и тестировать альтернативные многослойные конструкции.

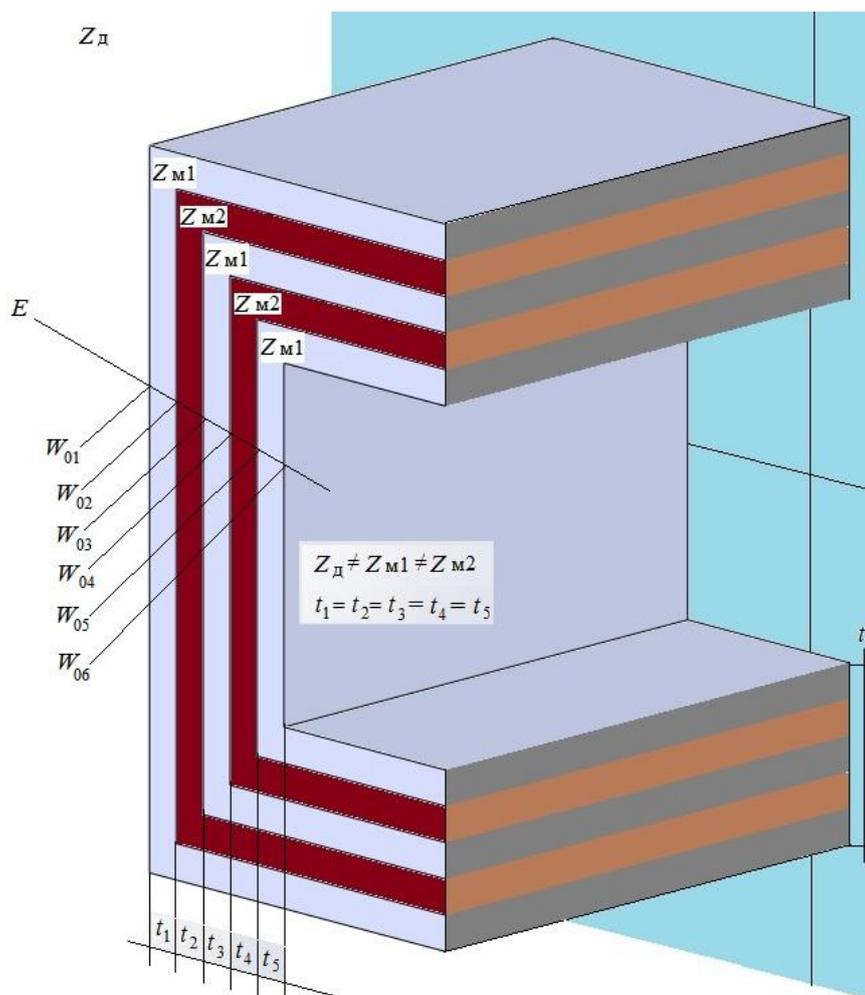


Рисунок 50 – Фрагмент упрощенной конструкции пятислойного магнитного экрана

Представлен профиль экрана, с известными параметрами и характеристиками для пермаллоя, воздуха и меди, так же магнитная индукция внешнего поля со значением $5 \cdot 10^{-5}$ и известными направлением.

Толщина экрана (пермаллой-медь-пермаллой-медь-пермаллой) = 0.5 мм одного слоя – 50 мкм

Индукция во внутреннем объеме экрана $B = 1,9 \cdot 10^{-6}$ Тл.

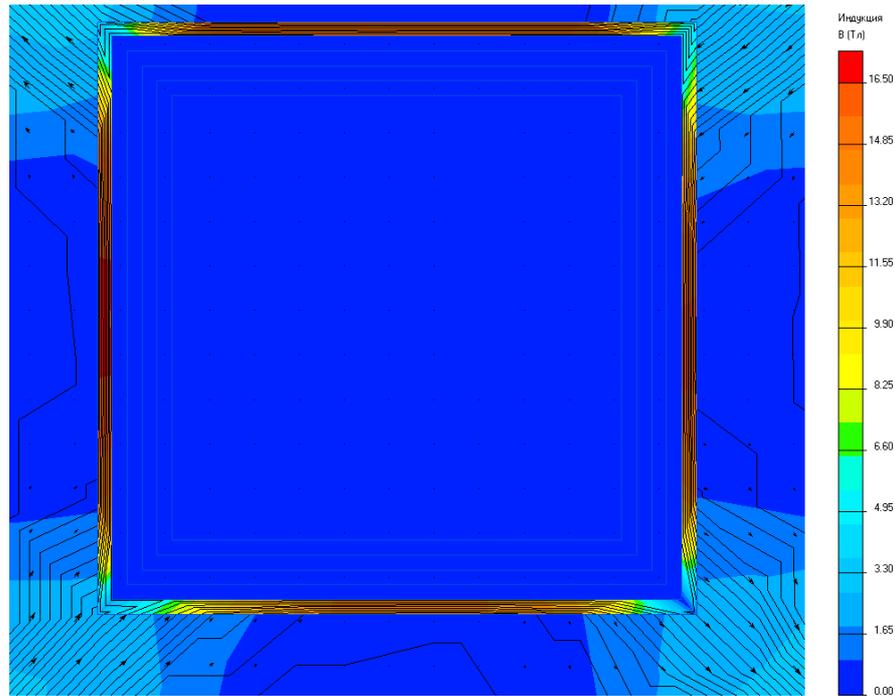


Рисунок 51 – Работа экрана во внешнем магнитном поле (п-м-п-м-п)

Существуют известные формулы для расчета затухания:

$$A_3 = \ln|ch k_M t| + \ln|1 + 0,5(Z_d/Z_M)th k_M t|,$$

где $k_M = \sqrt{i\omega\mu\sigma}$ - коэффициент вихревых токов, $Z_M = \sqrt{i\omega\mu/\sigma}$ - волновое сопротивление металла, t – толщина экрана, $Z_d = i\omega\mu r_3$ – волновое сопротивление диэлектрика (воздух) для магнитного поля, μ – относительная магнитная проницаемость, r_3 – радиус экрана (эквивалентной сферы), σ – удельная проводимость (1/Омм), ω – круговая частота магнитного поля в радианах ($\omega = 2\pi f$, где f – частота м.п. в Гц). [96]

В расчете важен учет свойств используемых материалов немагнитных (медь) и магнитных (пермаллой) экранов, для которых $Z_d/Z_M > Z_M/Z_d$ и $Z_M/Z_d > Z_d/Z_M$, соответственно. Тогда затухание

$$\text{для магнитных экранов } A_3 = \ln|1 + \mu t/2r_3|,$$

$$\text{для немагнитных экранов } A_3 = \ln|1 + k_M^2 r_3 t/2|.$$

Оценить работу магнитного и немагнитного экрана в выбранном диапазоне частот можно, поместив их в одинаковые условия и сравнив коэффициенты затухания.

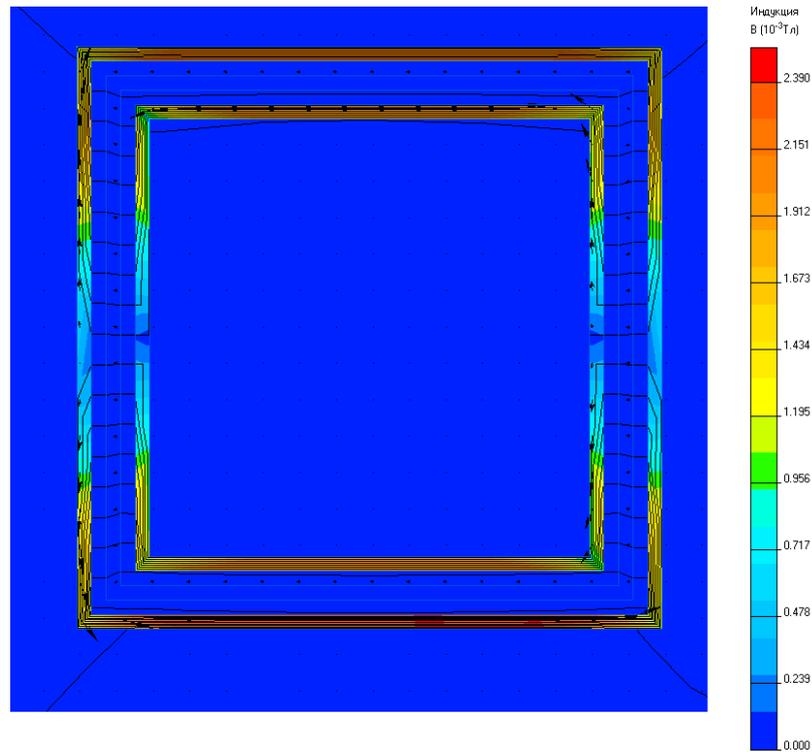


Рисунок 52 – Работа экрана во внешнем магнитном поле (м-п-м-п-м)

С повышением частоты экранирующие свойства пермаллоя заметно ослабевают по сравнению с медным экраном.

Создавая экран, особое внимание важно уделить его толщину стенок, форму и материал, в котором будет выполнен магнитный экран. Однако наименьшее значение следует придавать форме, поскольку создав многослойный экран кубической формы, можно привести куб к эквивалентной сфере. Допущение представляется возможным благодаря малым размерам экрана.

Коэффициент экранирования K_3 , характеризующийся отношением магнитного поля при наличии экрана H к магнитному полю – при отсутствии H_0 , характеризует изменение поля вне экрана, для любых форм экрана можно рассчитать по формуле

$$K_3 = \frac{1}{\operatorname{ch} kt} \frac{1}{1 + \frac{1}{2} \left(N + \frac{1}{N} \right) \operatorname{th} kt}, \quad (4.2)$$

где $N = Z_d/Z_3$, где Z_d – волновое сопротивление для сферической волны

$$Z_d = \frac{i\omega\mu r_3}{\sqrt{2}}.$$

Для экрана с большим затуханием ($kt > 3$) формула экранирования примет вид

$$K_3 = \frac{1}{\frac{1}{2} e^{kt} \left(1 + \frac{1}{2} \left(N + \frac{1}{N} \right) \right)}$$

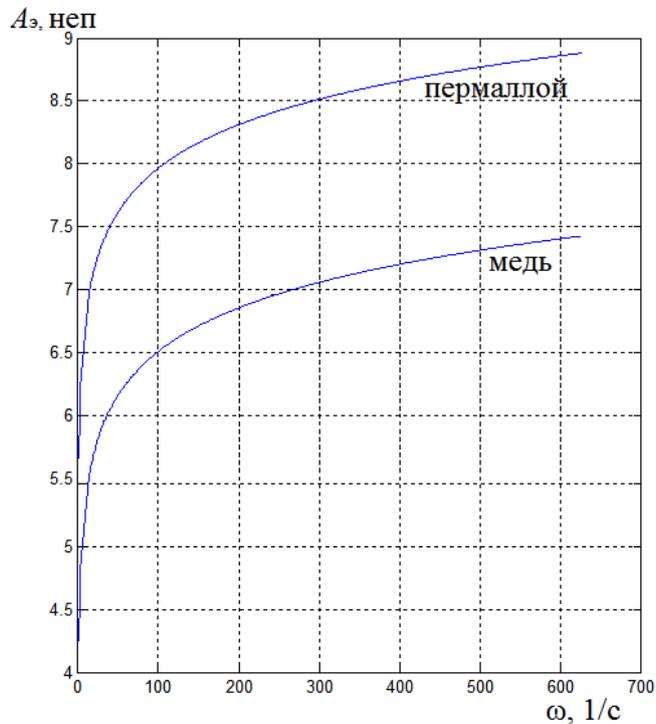


Рисунок 53 – Зависимость $A_3(\omega)$ в экране, выполненном из меди и экране из пермаллоя при заданной частоте от 0 до 100 Гц

Коэффициент реакции экрана P характеризуется отношением отраженного поля H_0 к основному полю H , характеризует изменение поля внутри экрана.

$$P = \frac{\frac{1}{2} \left(N - \frac{1}{N} \right) \text{th} kt}{1 + \frac{1}{2} \left(N + \frac{1}{N} \right) \text{th} kt}. \quad (4.3)$$

Пусть $K_{31} = K_{33} = K_{35}$, $P_1 = P_3 = P_5$ – слои пермаллоя; $K_{32} = K_{34}$, $P_2 = P_4$ – слои меди.

Определить затухание для двухслойного экрана

$$A_{1,2} = \ln \left| \frac{1 - P_1 P_2}{K_{31} K_{32}} \right| = A_{n12} + A_{o12},$$

где $A_{п12}$ – затухание поглощения двухслойного экрана, $A_{о12}$ – затухание отражения двухслойного экрана. [96]

Соответственно, затухание в толще экрана

$$A_3 = \ln \left| \frac{1}{K_3} \right| = \ln \left| e^{kt} \left(1 + \frac{1}{2} \left(N + \frac{1}{N} \right) \right) \right|.$$

Затухание в толще двухслойного экрана $A_{31,2} = \ln |1 + A'_{д1} + A'_{д2} + A'_{12}|$,

где $A'_{д1} = \frac{1}{2} \left(N_1 + \frac{1}{N_1} \right) \text{th } k_1 t_1$, - диэлектрик – 1-й слой экрана,

$A'_{д2} = \frac{1}{2} \left(N_2 + \frac{1}{N_2} \right) \text{th } k_2 t_2$, - 2-й слой экрана – диэлектрик,

$A'_{12} = \frac{1}{2} \left(N_3 + \frac{1}{N_3} \right) \text{th } k_1 t_1 \text{th } k_2 t_2$, - 1-й слой экрана – 2-й слой экрана.

В таблице 15 приведены данные для расчета

По формулам (4.2) и (4.3) можно рассчитать экранирование затухания и отражения последовательно для слоев пермаллоя и меди.

Двухслойный экран будет иметь следующие характеристики:

$$K_{31} = (K_{3п} \cdot K_{3м}) / (1 + (P_{п} \cdot P_{м})), P_1 = P_{п} + (P_{м} \cdot K_{3п}^2) / (1 - P_{п} \cdot P_{м}).$$

С добавлением третьего слоя – пермаллой:

$$K_{32} = (K_{31} \cdot K_{3п}) / (1 + (P_1 \cdot P_{п})), P_2 = P_1 + (P_{п} \cdot K_{31}^2) / (1 - P_{п} \cdot P_1).$$

Четвертый слой – медь:

$$K_{33} = (K_{32} \cdot K_{3м}) / (1 + (P_2 \cdot P_{м})), P_3 = P_2 + (P_{м} \cdot K_{32}^2) / (1 - P_{м} \cdot P_2).$$

Последний слой:

$$K_{34} = (K_{33} \cdot K_{3п}) / (1 + (P_3 \cdot P_{п})), P_4 = P_3 + (P_{п} \cdot K_{33}^2) / (1 - P_{п} \cdot P_3).$$

Для пятислойного экрана

$$A_{\Sigma} = \ln(1/K_{34}).$$

Смоделирована конструкция экрана п-м-п-м-п и помещена в магнитное поле с индукцией 10 Тл.

Таблица 15 – Параметры, применяемые при расчете

| Название параметра | Значение параметра |
|--|----------------------|
| Частота магнитного поля, f , Гц | 0..100 |
| Удельная проводимость (пермаллой), $\sigma_{п}$, См/м | $0,47 \cdot 10^{-5}$ |
| Удельная проводимость (медь), $\sigma_{м}$, См/м | $57 \cdot 10^6$ |
| Относительная магнитная проницаемость (пермаллой), $\mu_{п}$ | 8000 |
| Относительная магнитная проницаемость (медь), $\mu_{м}$ | 0,99 |
| Относительная магнитная проницаемость (воздух), $\mu_{в}$ | 1 |
| Длина стенки экрана, l , м | $7 \cdot 10^{-3}$ |
| Толщина стенки экрана, t , м | $50 \cdot 10^{-6}$ |

Можно сделать вывод, что экран конструкции п-м-п-м-п справляется со своей функцией – экранирование постоянных магнитных полей, пока их величина не превышает 30 Тл.

Для исследования в различных магнитных полях выбрана итоговая конструкция магнитного экрана в 5 слоев [97, 98]. Такой экран был помещен в магнитные поля при различных значениях их индукции и частоты. Результаты исследования приведены в таблице 16.

Согласно результатам исследований [95] пятислойная конструкция намного эффективнее (~ в 10 раз) экранов других конструкций, следовательно, выбор экрана следует остановить на пятислойном и в дальнейшем скорректировать его форму для достижения большей эффективности.

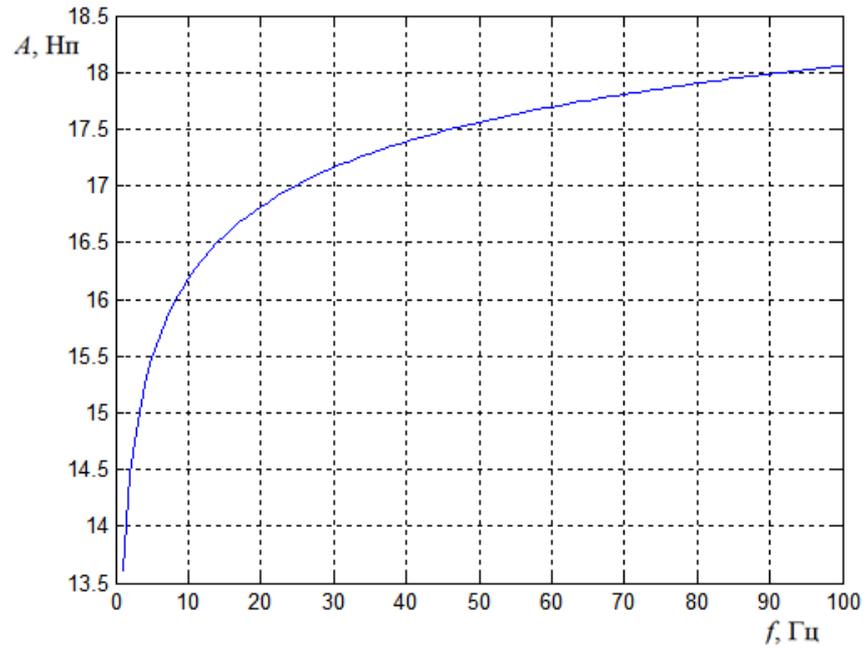


Рисунок 54 – Зависимость коэффициента затухания экрана конструкции п-м-п-м-п от частоты магнитного поля [96]

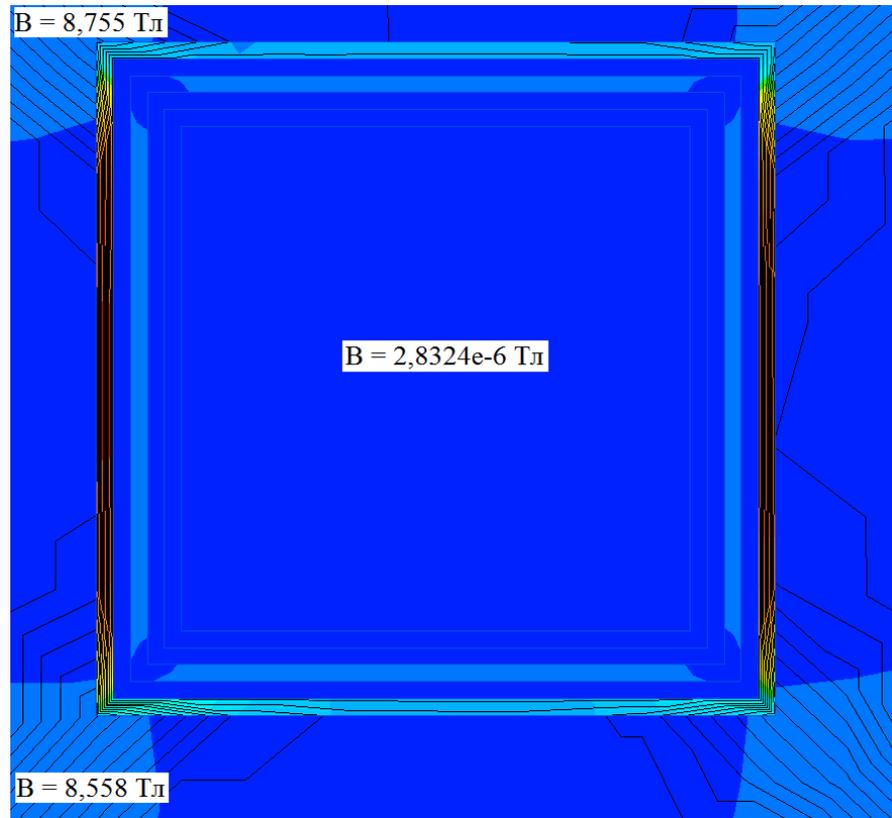


Рисунок 55 – Экран в постоянном магнитном поле, величиной 10 Тл

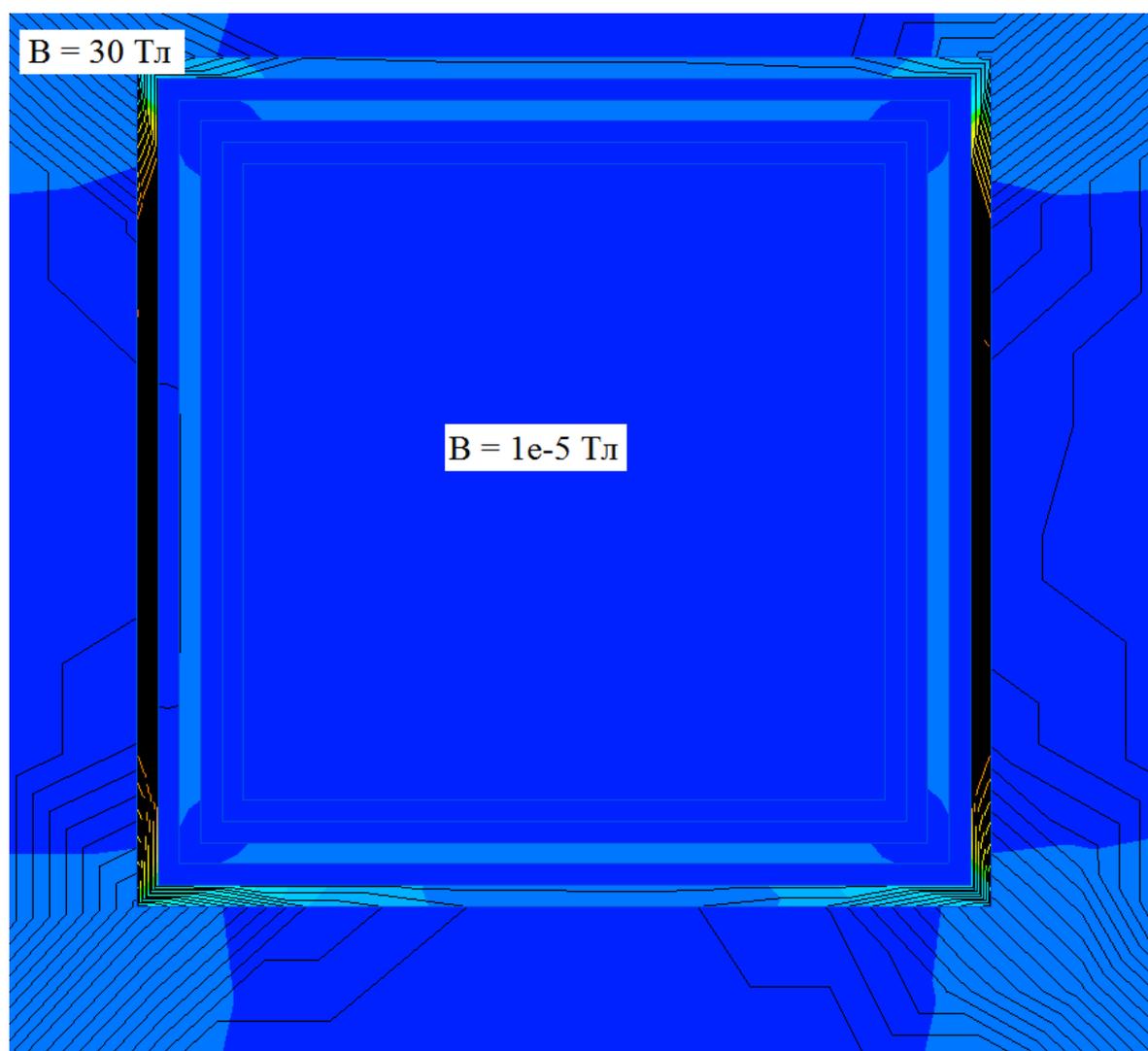


Рисунок 56 – Экран в постоянном магнитном поле, величиной 30 Тл

Таблица 16 – Результаты моделирования магнитного экрана

| Индукция (напряженность) магнитного поля снаружи экрана | Индукция (напряженность) магнитного поля внутри экрана |
|---|--|
| 10 Тл | $2,8 \cdot 10^{-6}$ Тл |
| 30 Тл | $1 \cdot 10^{-5}$ Тл |
| $1,6 \cdot 10^{-5}$ Тл | $1,7 \cdot 10^{-7}$ Тл |
| 100 А/м, 50 Гц | $3,04 \cdot 10^{-5}$ Тл |
| 30 А/м, 1 кГц | $6,1 \cdot 10^{-7}$ Тл |

Как было описано ранее, желаемая геометрическая форма экрана, для работы в магнитном поле – шар. Из технологических соображений выполнить ее такой будет непросто, потому можно применить компромиссное решение, представленное на рисунке 51.

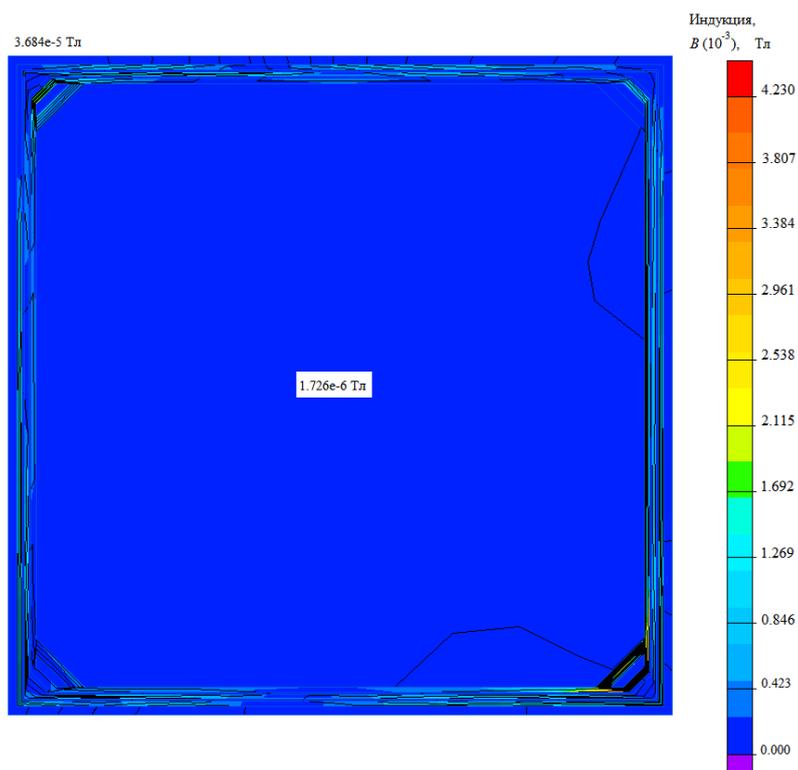


Рисунок 57 – Работа пятислоеного экрана обновленной конструкции в постоянном магнитном поле (Земли)

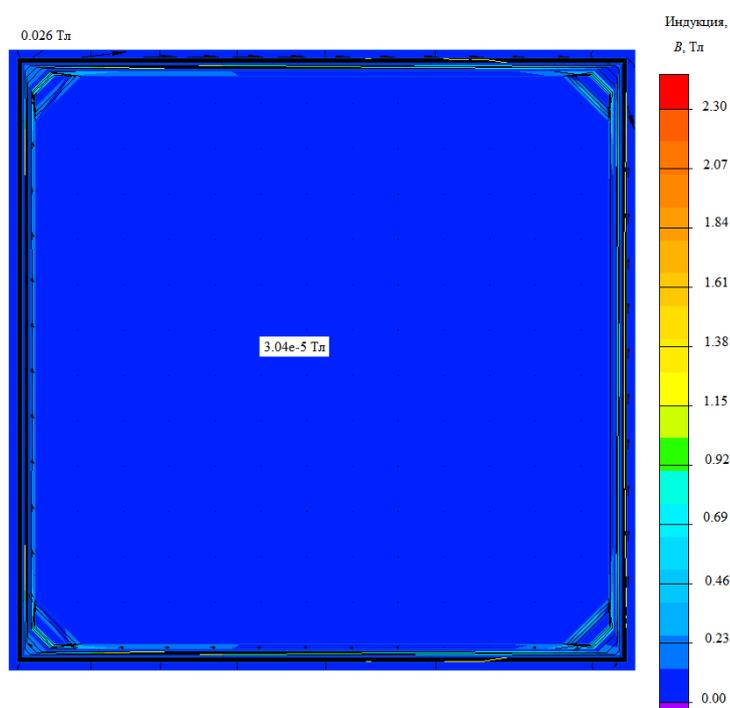


Рисунок 58 – Работа пятислоеного экрана обновленной конструкции в магнитном поле частотой 50 Гц, с параметрами, соответствующими 5 ст.ж. [93, 94]

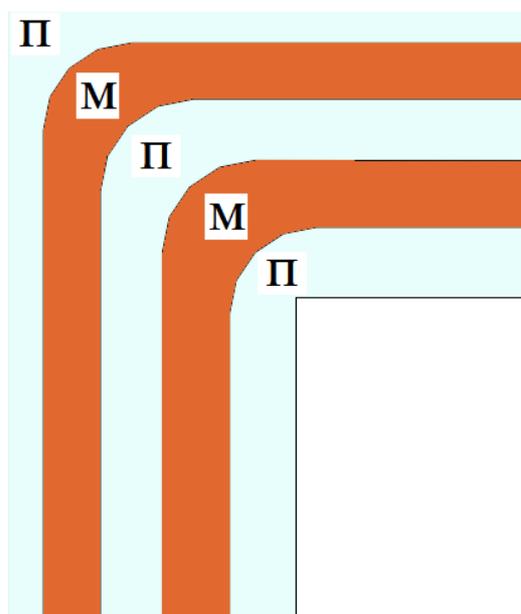


Рисунок 59 – Конструкция пятислойного экрана

Видно, что такая форма экрана обладает улучшенными экранирующими характеристиками, так как упрощает замыкание силовых линий внешнего магнитного поля в толще экрана.

4.3 Характеристики материалов конструкции, режим работы автоколебательного микромеханического акселерометра с «обращенным» датчиком силы

При проектировании датчика важно решить задачи со значительными по величине потоками тепла в области токопроводящих дорожек и ограничениями, связанными с надежностью датчика в различных условиях эксплуатации. Управление температурой является одним из важнейших аспектов в развития микроэлектронных систем в 21 веке. Таким образом, усилия, направленные на исследования тепловых режимов работы датчика должны прикладываться в контексте современных тенденций и параметров, характеризующих технологии МЭМС.

Температура - это физический параметр, который невозможно игнорировать, главным образом потому, что она оказывает влияние на большинство явлений, связанных с механическими, химическими, электронными, а также биологическими системами. Некоторые системы, в основу которых положены химические

реакции или биологические процессы, магнитные явления, работают нормально только в ограниченном диапазоне температур. Кроме того, оптимизируется производительность многих электронных и промышленных процессов, когда рабочая температура ограничена. Многие электронные устройства могут испытывать существенные сбои при воздействии высоких температур или самостоятельно генерировать достаточно тепла, за счет преобразования энергии, чтобы повысить температуру системы выше допустимого порога. Некоторые системы могут выйти из строя, если они подвергаются воздействию высоких или низких температур. Поэтому очень важно разработать средство поддержания рабочего диапазона температуры.

Не снижающийся интерес к разработке микромеханических устройств для СУ ПО гражданского и военного применения вызывает беспокойство в отношении управления температурой в различных условиях эксплуатации. Однако нет ни достаточных знаний, ни подходящих инструментов для определения тепловых свойств, необходимых для проектирования датчиков с надежностью. В данной работе применяются вычислительные симуляции, имитационная модель для оценки тепловых характеристик датчика. Затем исследована аналитическую модель для оценки критических значений температур. Эти результаты могут служить основой для рационального проектирования датчиков, применяемых в СУ ПО, где решающее значение имеют процессы теплового рассеивания и переноса. Микроэлектромеханические системы - это датчики и исполнительные механизмы, на их производительность могут сильно влиять температурные изменения, возникающие в слоях устройства и между средой и устройством. Могут возникать нежелательные деформациями и смещениями, вызванными тепловым воздействием.

Повышение температуры в замкнутом объеме АММА ОДС вызывает ухудшение изоляционных свойств отдельных материалов, возрастание сопротивления токопроводящих дорожек, что неминуемо приведет к уменьшению силы тока, текущего в них, эти зависимости демонстрируются формулами $R_T = R_{20}(1 + \alpha(T - 20)/100)$, где α – температурный коэффициент сопротивления ($\text{TKC}_{\text{медь}} = 0,4$), %/

$^{\circ}\text{C}$, T – заданная температура, R_{20} – сопротивление при 20°C , R_T – сопротивление при заданной температуре. Сила тока, I , согласно закону Ома, $I = U/R_T$, $U = \text{const}$. Так же будет наблюдаться снижение индуктивности в магнитопроводе, общее повышение интенсивности старения элементов конструкции, при длительной работе тепло имеет свойство накапливаться, согласно закону Джоуля-Ленца ($Q = I^2 R_T t$, где t – время работы прибора). Следовательно, обеспечение нормального теплового режима АММА ОДС является не единственным, но и далеко не второстепенным условием его надежной работы.

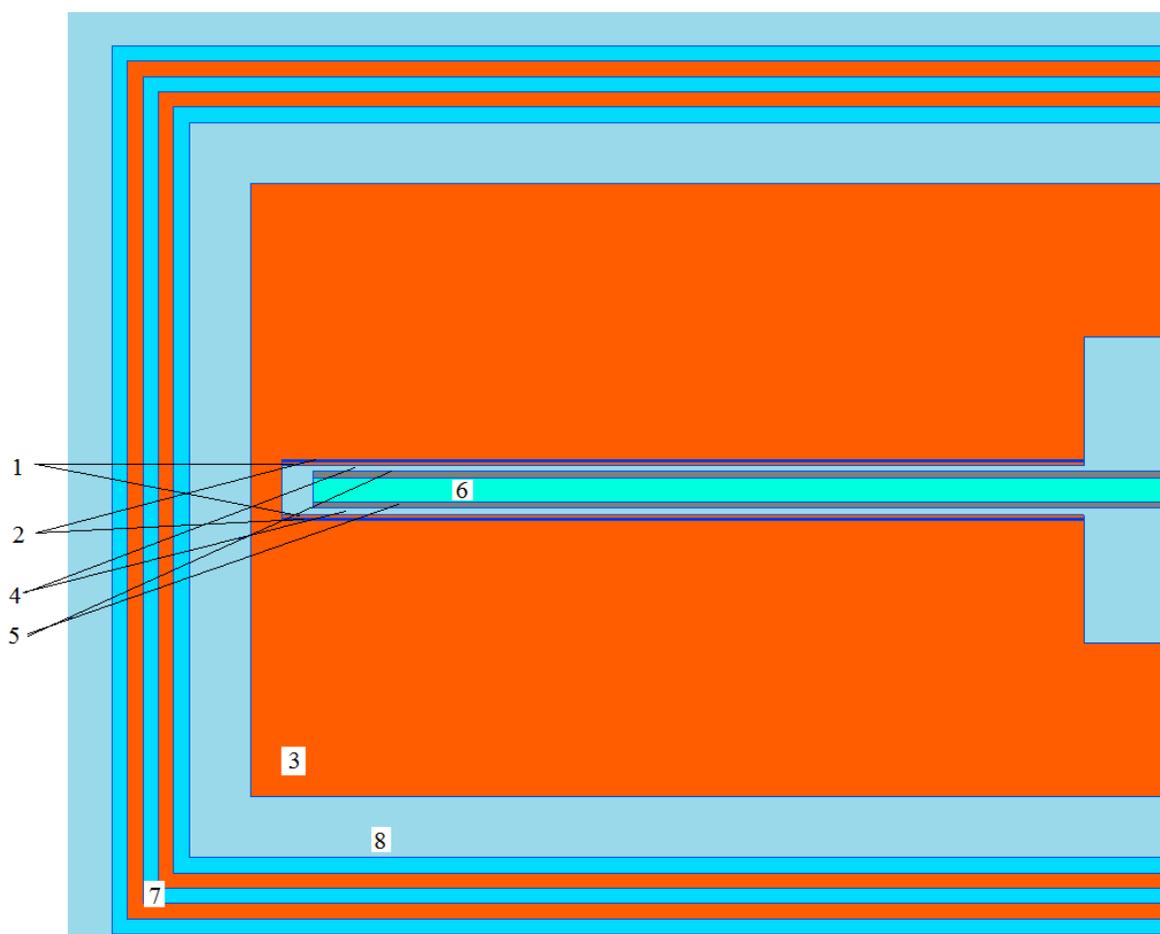


Рисунок 60 – Схематичное изображение фрагмента конструкции АММА ОДС, 1 – токопроводящие дорожки, 2 – слой изолятора, 3 – магнитопровод, 4 – воздушный зазор – 1, 5 – слой постоянного магнита, 6 – пластина ИМ, 7 – экран (пермаллой – медь – пермаллой – медь – пермаллой), 8 – воздушный зазор – 2

4.4 Оценка влияния теплового воздействия на характеристики автоколебательного микромеханического акселерометра с «обращенным» датчиком силы

При расчете характеристик АММА ОДС важно учитывать, что наличие в системе постоянного магнита, особенно, если речь идет о значительном перепаде температур, требует оценки изменения магнитных свойств с ростом температуры. Измерение температуры в данном случае является важным элементом в условиях эксплуатации датчика, которые могут значительно варьироваться. Наличие магнитных элементов, а, значит, и точки Кюри, предполагает контроль и оценку работоспособности АММА ОДС в различных температурных режимах, исследование и поиск путей решения по снижению температуры внутри корпуса датчика, оценку целесообразности его применения и т.д. Из-за нелинейного характера задачи, аналитическое решение краевых задач неизбежно сопряжено с трудностями. Благодаря быстрому развитию высокоскоростных компьютеров и современных численных методов, анализ практически любой структурной задачи теперь может быть выполнен посредством метода конечных элементов.

Для оценки характера изменения магнитных свойств с температурой используют коэффициент магнитной проницаемости [98]:

$$K_{\mu} = ((\mu_1 - \mu_2)/\mu_1)(1/(T_2 - T_1)), 1/\text{град}$$

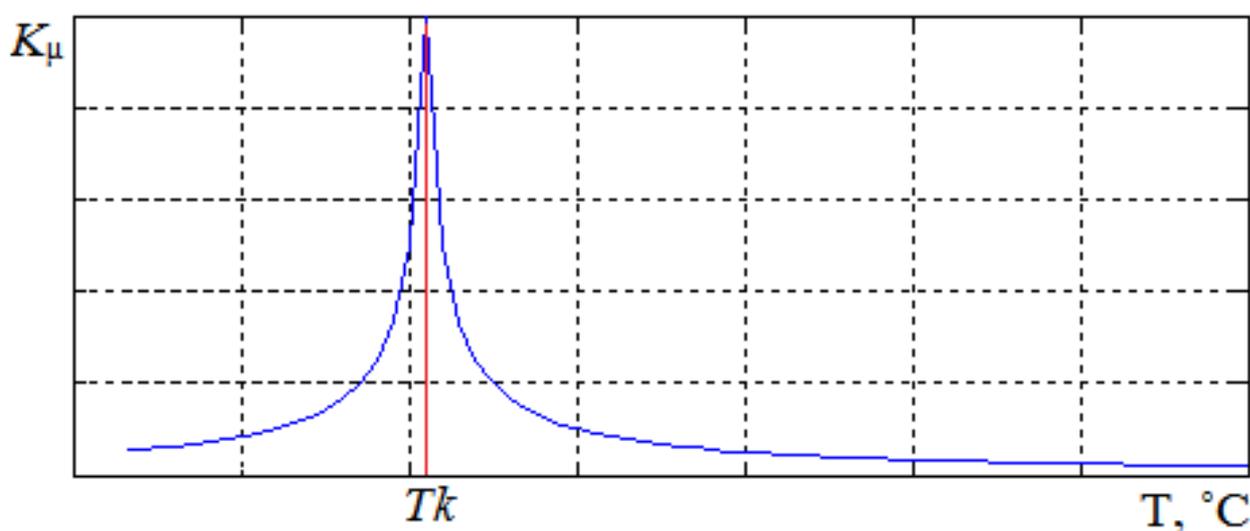


Рисунок 61 – График зависимости температурного коэффициента магнитной проницаемости от температуры

График показывает, что магнитная проницаемость с достижением точки Кюри падает, т.е. материал размагничивается.

Температурный коэффициент магнитов, выполненных из самария-кобальта, составляет $K_{\mu} = -2,0 \cdot 10^{-4} 1/\text{град}$ [98] или $K_{\mu\text{SmCo}} = -0,03 \text{ \%}/^{\circ}\text{C}$.

$$T_{\text{КСталь}} = 290 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{\text{КСамарий-Кобальт}} = 250 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

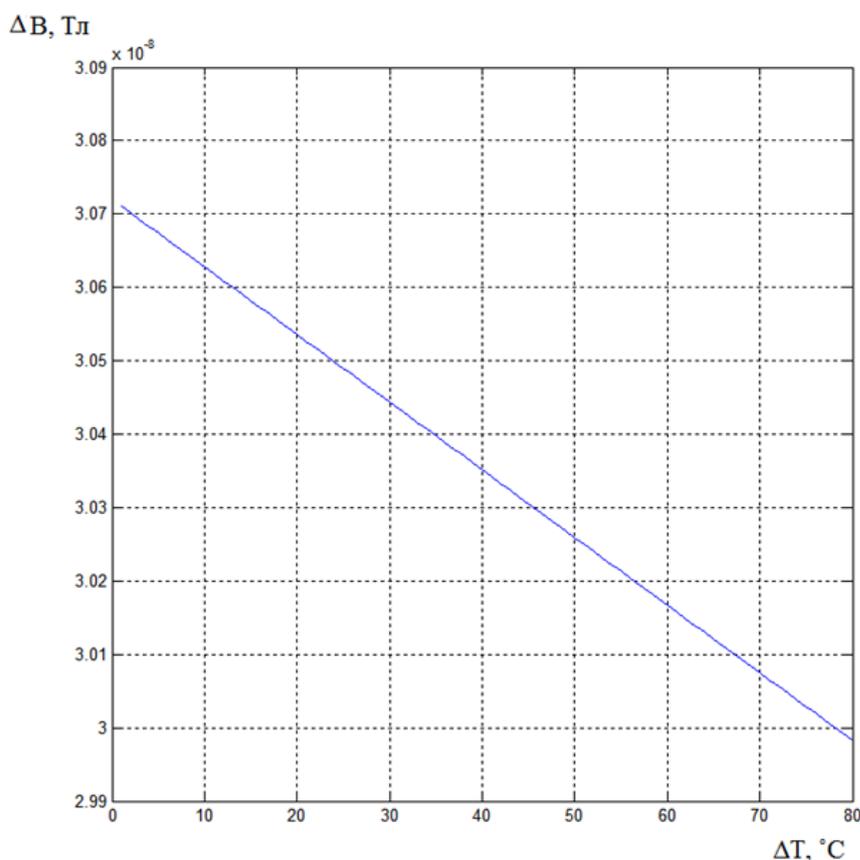


Рисунок 62 – Изменение индукции магнитного поля с ростом температуры, ΔB .

В данном случае, индукция постоянного магнита будет меняться незначительно.

В совокупности, изменение данных параметров скажется на силовых характеристиках датчика и электромагнитном демпфировании.

Так же температура окажет влияние на коэффициент газового демпфирования в связи с тепловым расширением соседних элементов конструкции

Влияние температуры на силовые характеристики ДС. В данном расчете применена совокупность изменения геометрических параметров, рост сопротивления дорожек и уменьшение магнитной индукции постоянного магнита.

На рисунке 62 видно, что выходной сигнал не отображает изменений, связанных с температурой так, как это было, например, при воздействии внешнего магнитного поля, однако сила, создаваемая ДС с ростом температуры существенно уменьшается, что может оказать влияние на параметры автоколебаний и статические характеристики акселерометра.

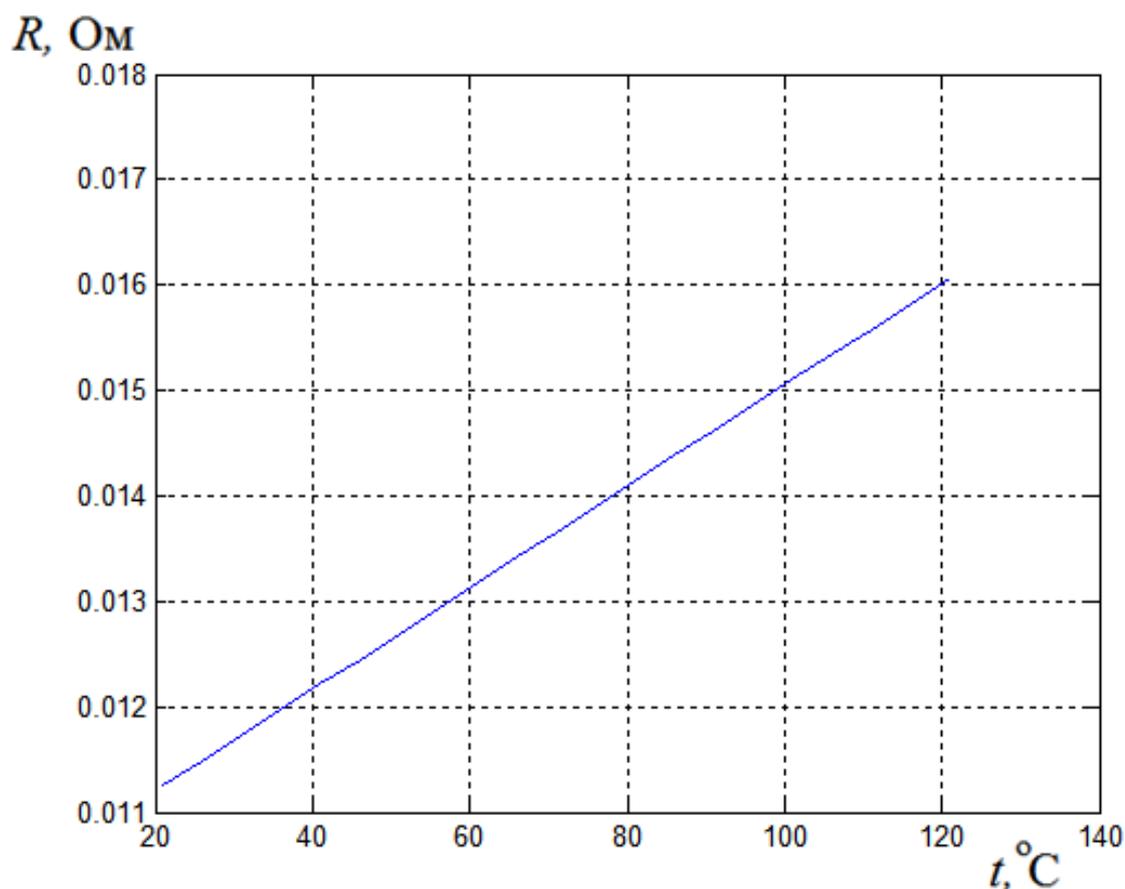


Рисунок 63 – Изменение сопротивления токопроводящих дорожек с ростом температуры

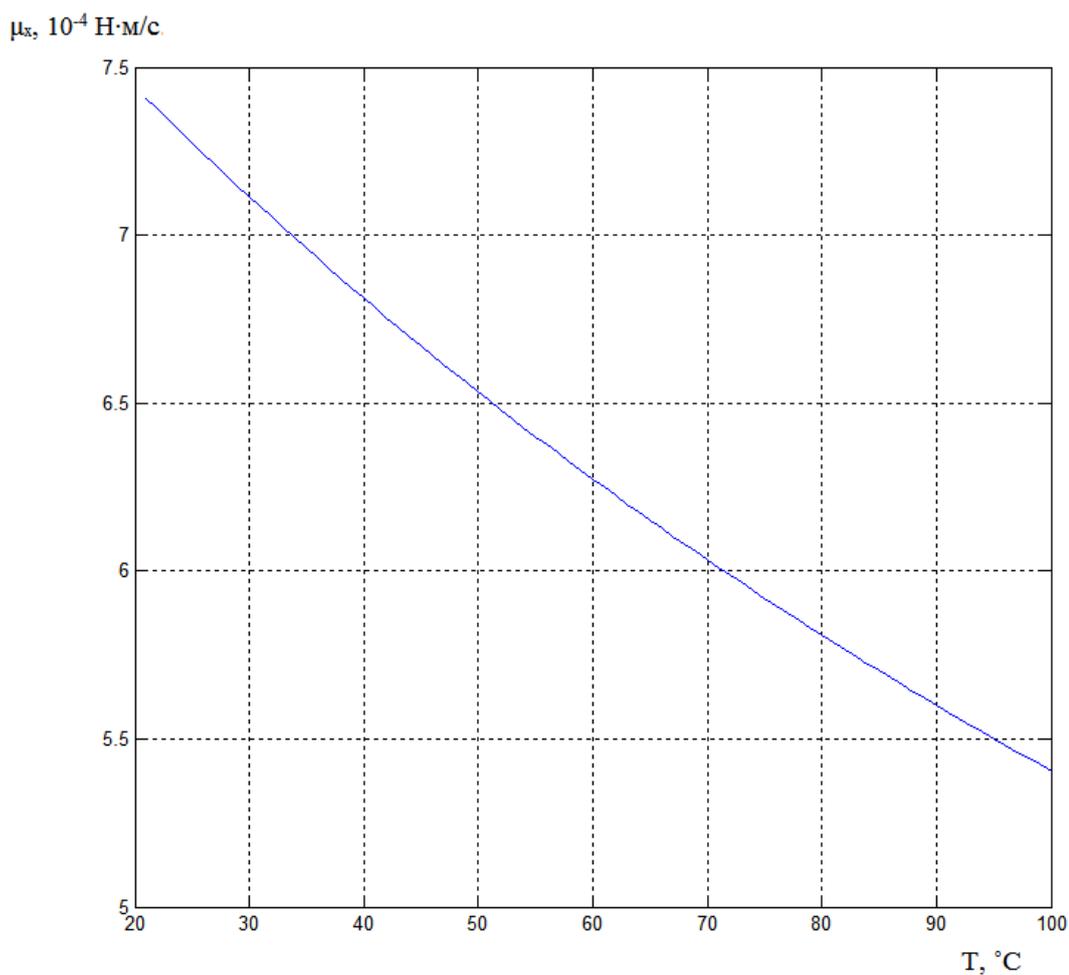


Рисунок 64 – Изменение электромагнитного демпфирования с ростом температуры.

Таблица 17 – Коэффициенты теплового расширения [99, 100]

| Материал (элемент конструкции) | Коэффициент теплового расширения, β , $^{\circ}\text{C}^{-1}$ |
|--------------------------------------|---|
| Магнит из самария-кобальта (слой ИМ) | $11 \cdot 10^{-6}$ |
| Медь (Токопроводящие дорожки) | $16,6 \cdot 10^{-6}$ |
| Сталь (Выступ магнитопровода) | $13 \cdot 10^{-6}$ |
| Кремний (ИМ) | $5,1 \cdot 10^{-6}$ |

Пусть увеличение длины происходит одинаково по всем направлениям $l_t = l_0(1+\beta t)$, [101] где l_0 – геометрический размер элемента при НУ, l_t – геометрический размер элемента при изменении температуры на °С.

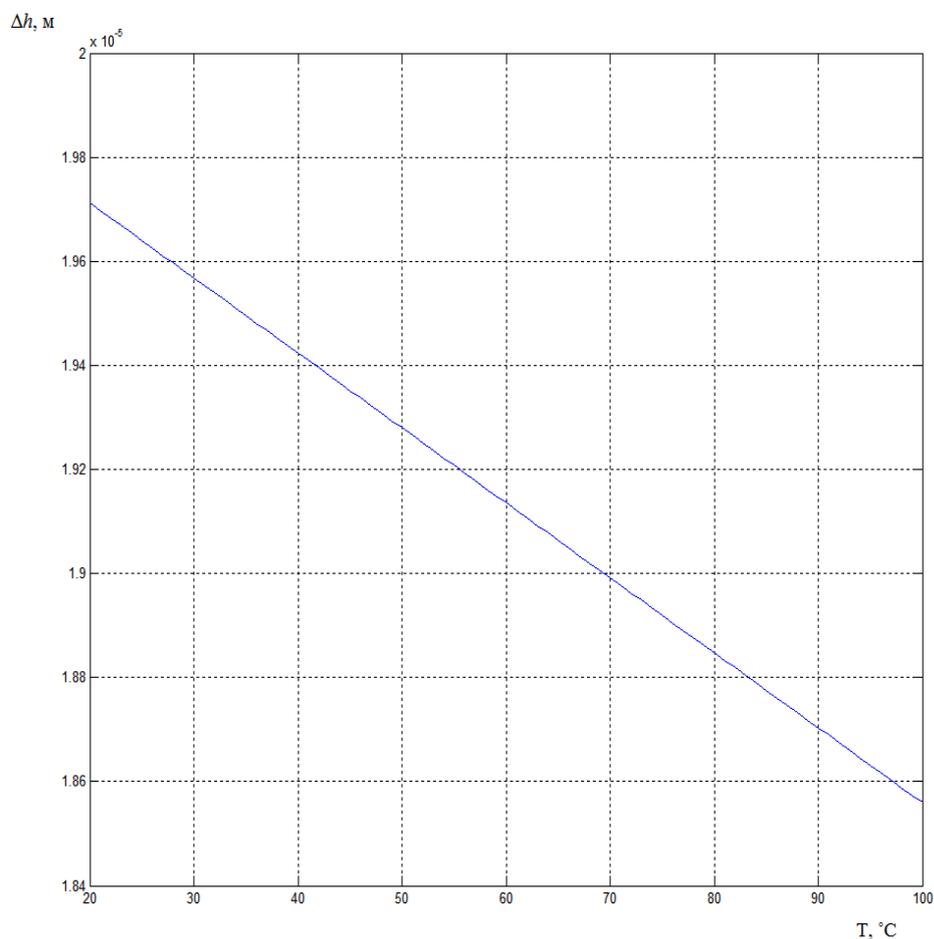


Рисунок 65 – Уменьшение зазора при увеличении температуры

Изменение температуры скажется на параметрах автоколебаний:

В работах [100 - 104] отмечено, что «при изучении температурного воздействия, следует обратить внимание на задачу термоупругости, искажению формы ИМ и подвесов и, как следствие, изменение моментов инерции, смещения центра масс, приводящих к погрешностям в измерении ускорения».

Плотность материалов зависит от температуры:

$\rho(x) = \rho_0(1 - \beta_T T(x))$, где β_T – температурный коэффициент изменения плотности [104, 105].

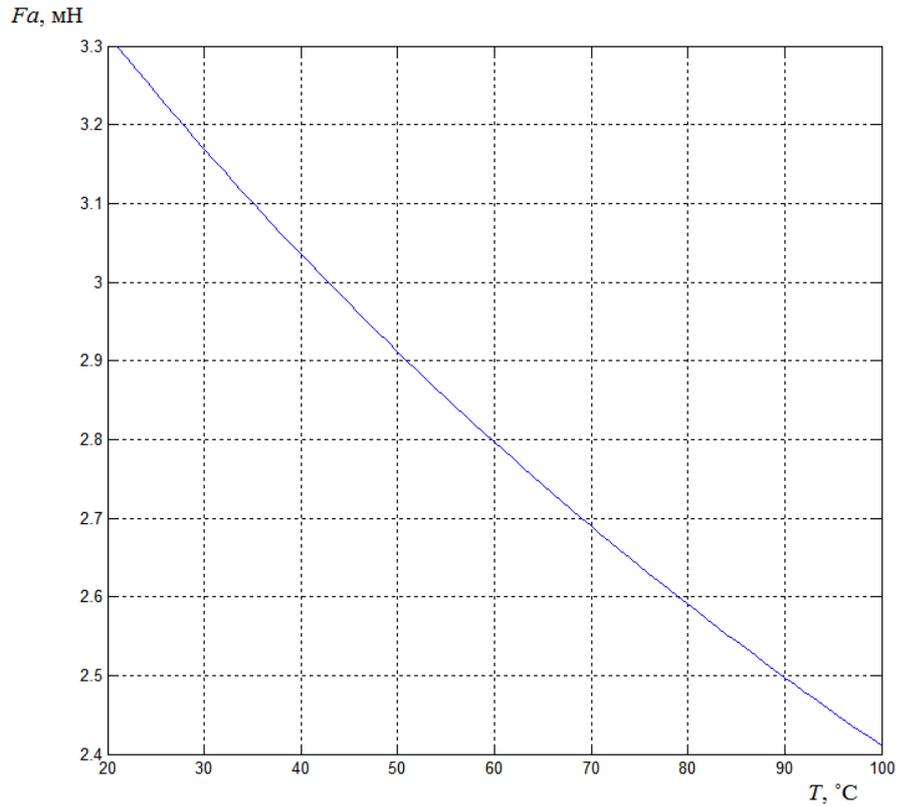


Рисунок 66 – График изменения силы, создаваемой ДС при повышении температуры

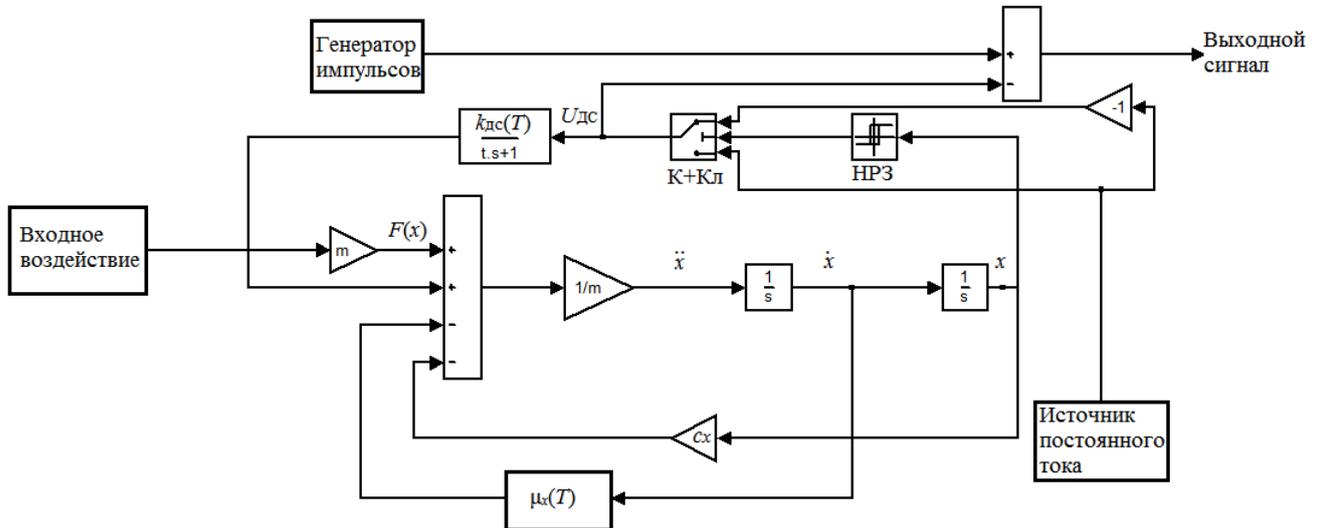


Рисунок 67 – Имитационная модель АММА ОДС, выполненная с учетом температурных зависимостей

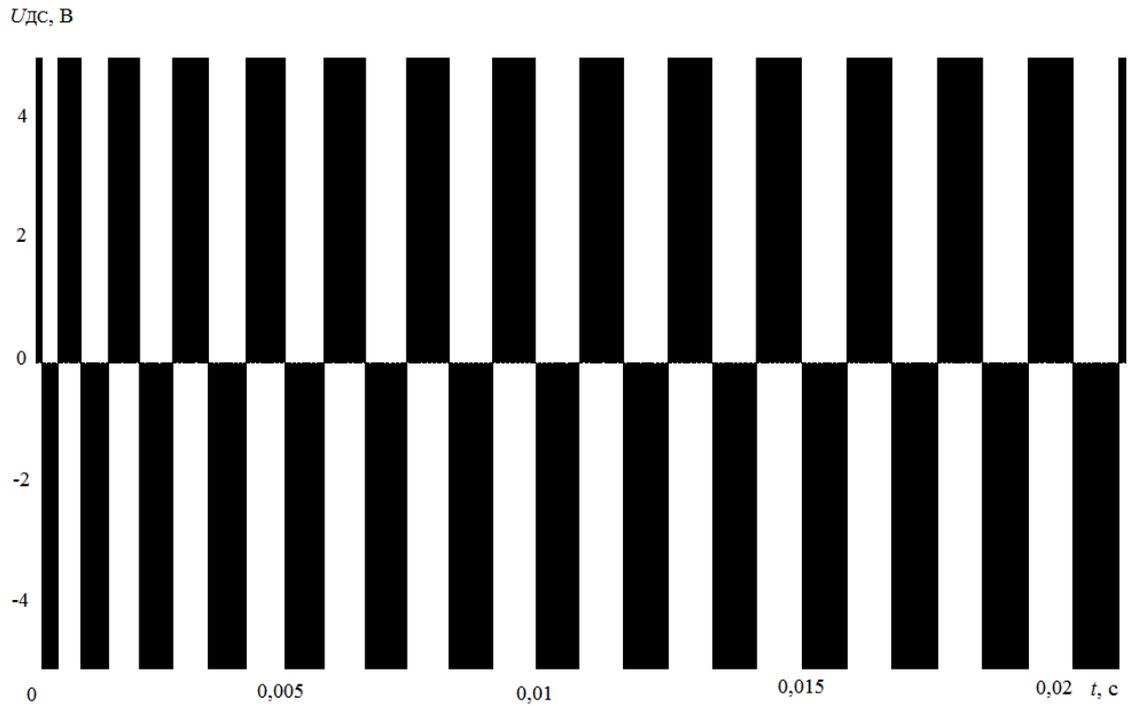


Рисунок 68 – Выходной сигнал, полученный в системе с учетом температурных воздействий

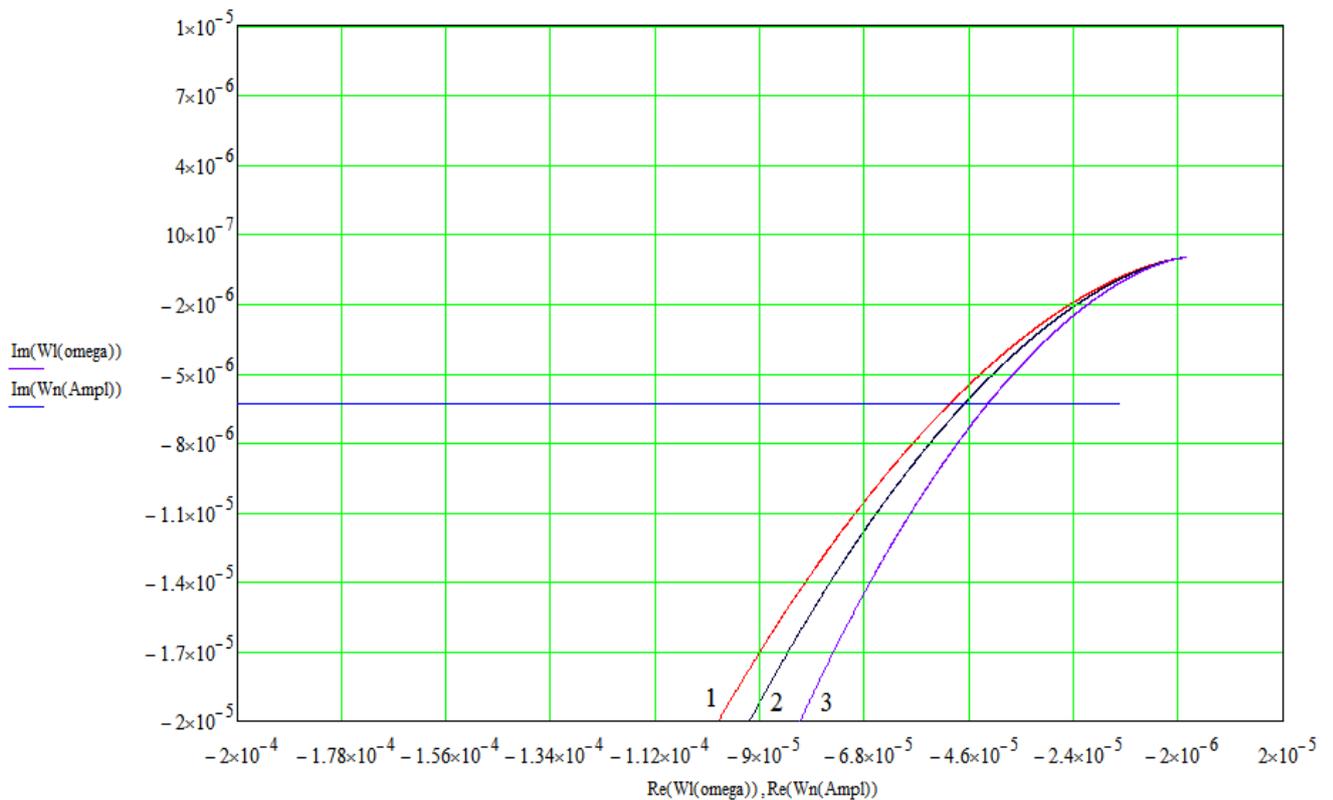


Рисунок 69 – АЧХ линейной части и АХ нелинейной части системы при 1: $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $A = 3,2 \cdot 10^{-4}\text{ м}$, $\Omega = 2198\text{ 1/с}$; 2: $t = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$, $A = 2 \cdot 10^{-4}\text{ м}$, $\Omega = 2037\text{ 1/с}$; 3: $t = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$, $A = 1,5 \cdot 10^{-4}\text{ м}$, $\Omega = 1917\text{ 1/с}$

«Выражения для моментов инерции и смещений центров масс элементов определяются согласно формулам из теоретической механики, зависят от объемов и массы тел и, следовательно, изменяются с температурой». [100, 102]

Зависимость коэффициентов жесткости от температуры может быть описана:

$$c_{ix} = c_{ix0}(1 - \alpha_E T_0), \text{ где } \alpha_E - \text{температурный коэффициент модуля упругости.}$$

Теплообмен между поверхностью S твердого тела и окружающей его средой описывается законом Ньютона-Рихмана [103]:

$$P_i = \alpha(t_i - t_c)S, \quad (4.4)$$

где P - количество тепла переносимого за единицу времени от твердого тела к среде, S - площадь поверхности теплообмена тела, α – коэффициент теплообмена между поверхностью тела и средой, t_i и t_c – температуры поверхности тела и среды. [104]

В замкнутом объеме АММА ОДС предполагается естественная конвекция, т.е. перенос тепла за счет свободного движения молекул газа вследствие разности плотностей его нагретых и холодных частей и определяется физическими свойствами, объемом и разностью температур газа.

Коэффициент теплообмена α связан с тепловой проводимостью, через которую выражается вид теплообмена $\sigma_{ij} = \alpha_{ij}S_i$.

Таблица 18 – Тепловые характеристики выбранных материалов [101]

| Материал | Теплопроводность (конвективный и кондуктивный теплообмен), λ , Вт/Км | Степень черноты тела, ε |
|--|--|-------------------------------------|
| Магнит из SmCo | 13 | 0.23 |
| Изолятор (смола эпоксидная) | 0.59 | 0.89 |
| Токопроводящие дорожки, слой экрана (медь) | 380 | 0.05 |

| | | |
|----------------------------|-------------------|-------|
| ИМ (кремний) | 162.3 (при 273 К) | 0.9 |
| Корпус (сталь) | 45 | 0.066 |
| Воздух | 0.024 | 0 |
| Слой экрана (пермаллой) | 91 | 0.3 |

С ростом температуры будут меняться свойства кремния, а именно – будет увеличиваться его теплоемкость, что приведет к изменению его упругих свойств. В связи с ростом температуры во внутреннем объеме датчика, возникнет циркуляция нагретого и холодного воздуха, что повлияет на коэффициент демпфирования.

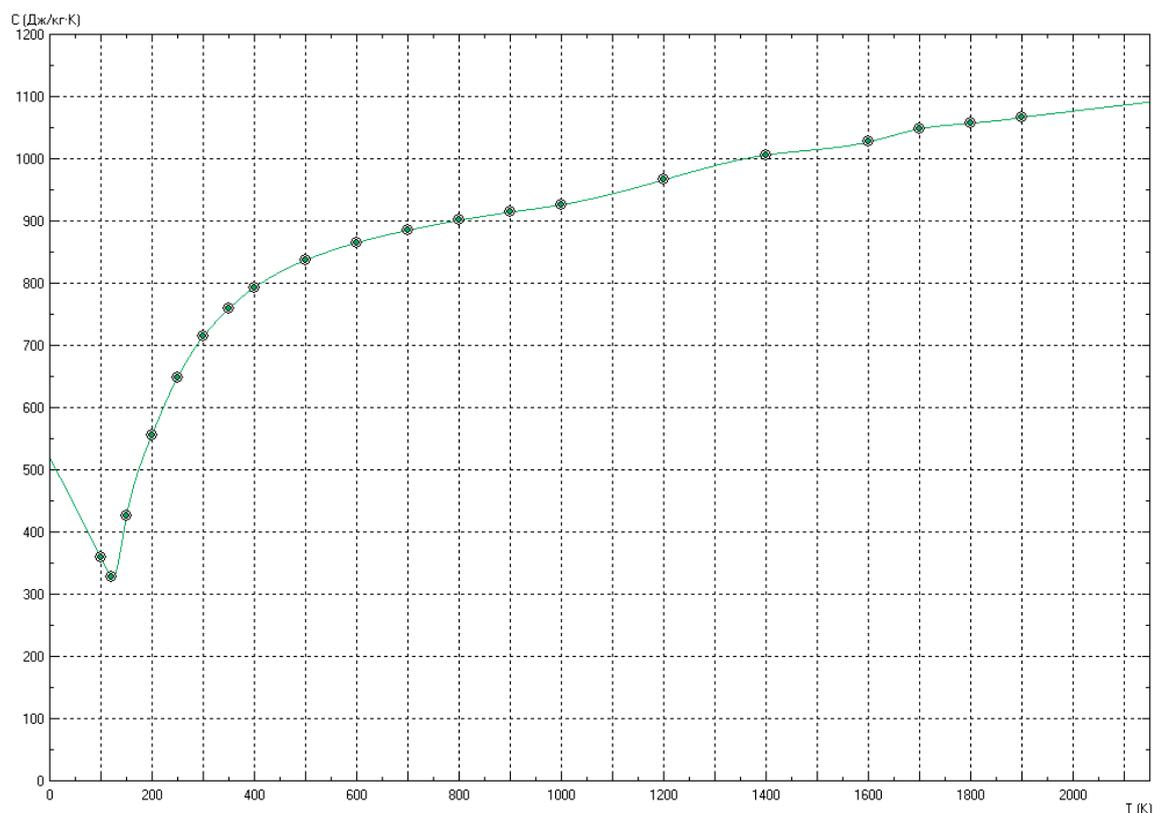


Рисунок 70 – Изменение свойств кремния в зависимости от температуры

Однако кроме свойств материалов для проведения расчета необходимо знать геометрические параметры элементов конструкции.

Таблица 19 – Физические параметры сухого воздуха при $H = 760$ мм рт.ст
[101, 103, 104]

| $t, ^\circ\text{C}$ | $\gamma,$ кг/м ³ | $c_p,$ дж/кг.град | $\lambda 10^2,$ вт/м.град | $\nu 10^6,$ м ² с | Pr |
|---------------------|--------------------------------|----------------------|------------------------------|---------------------------------|-------|
| 0 | 1.293 | 1000 | 2.44 | 13.28 | 0.707 |
| 10 | 1.247 | 1000 | 2.51 | 14.16 | 0.705 |
| 20 | 1.205 | 1000 | 2.60 | 15.06 | 0.703 |
| 40 | 1.128 | 1000 | 2.76 | 16.96 | 0.699 |
| 60 | 1.060 | 1000 | 2.90 | 18.97 | 0.696 |
| 80 | 1.000 | 1000 | 3.05 | 21.09 | 0.692 |
| 100 | 0.946 | 1000 | 3.21 | 23.13 | 0.688 |

Таблица 20 – Геометрические параметры элементов конструкции

| Порядко- вый номер (в расчете) | Элемент | Дли- на, $l,$ м·10 ⁻³ | Шири- на, $w,$ м·10 ⁻³ | Высота (толщи- на), $h,$ м·10 ⁻⁶ | Площадь поперечно- го сечения, $S, \text{м}^2 \cdot 10^{-9}$ | Площадь теп- лоотдающей поверхности, $S,$ м ² ·10 ⁻⁶ |
|--------------------------------------|-----------------------------|--|---|--|---|---|
| 1 | Токопроводя- щие дорожки | 4,8 | 2,4 | 10 | 24 | 8,54 |
| 2 | Изолятор | 4,8 | 2,4 | 10 | 24 | 14,5 |
| 3 | Магнитопровод | 5,0 | 5,0 | 1000 | 5000 | 25 |
| 4 | Воздушный за- зор -1 | 4,8 | 4,8 | 20 | 96 | 23,04 |
| 5 | Магнитный слой | 5,6 | 5,6 | 20 | 112 | 31,36 |
| 6 | ИМ | 5,6 | 5,6 | 80 | 448 | 31,36 |
| 7 (начиная с внутреннего слоя) | Слой экрана - 1 | 5,04 | 5,04 | 50 | 252 | 25,4 |
| | Слой экрана - 2 | 5,09 | 5,09 | 50 | 254,5 | 25,9 |
| | Слой экрана - 3 | 5,14 | 5,14 | 50 | 257 | 26,42 |
| | Слой экрана - 4 | 5,19 | 5,19 | 50 | 259,5 | 26,94 |
| | Слой экрана - 5 | 5,24 | 5,24 | 50 | 262 | 27,46 |
| 8 | Воздушный за- зор - 2 | 5,04 | 5,04 | 200 | 1008 | 25,4 |

4.5 Методика расчета тепловых режимов работы автоколебательного микромеханического акселерометра с «обращенным» датчиком силы

При изучении теплового режима АММА применены, в основном, программные методы, так как полностью воспроизвести аналитический расчет не представляется возможным в силу его обширности. Расчет можно несколько уп-

ростить, разделив, условно, прибор на фрагменты, в каждом из которых будет источник тепла.

Детально можно рассмотреть один такой фрагмент, конструкция которого показана на рисунке 71.

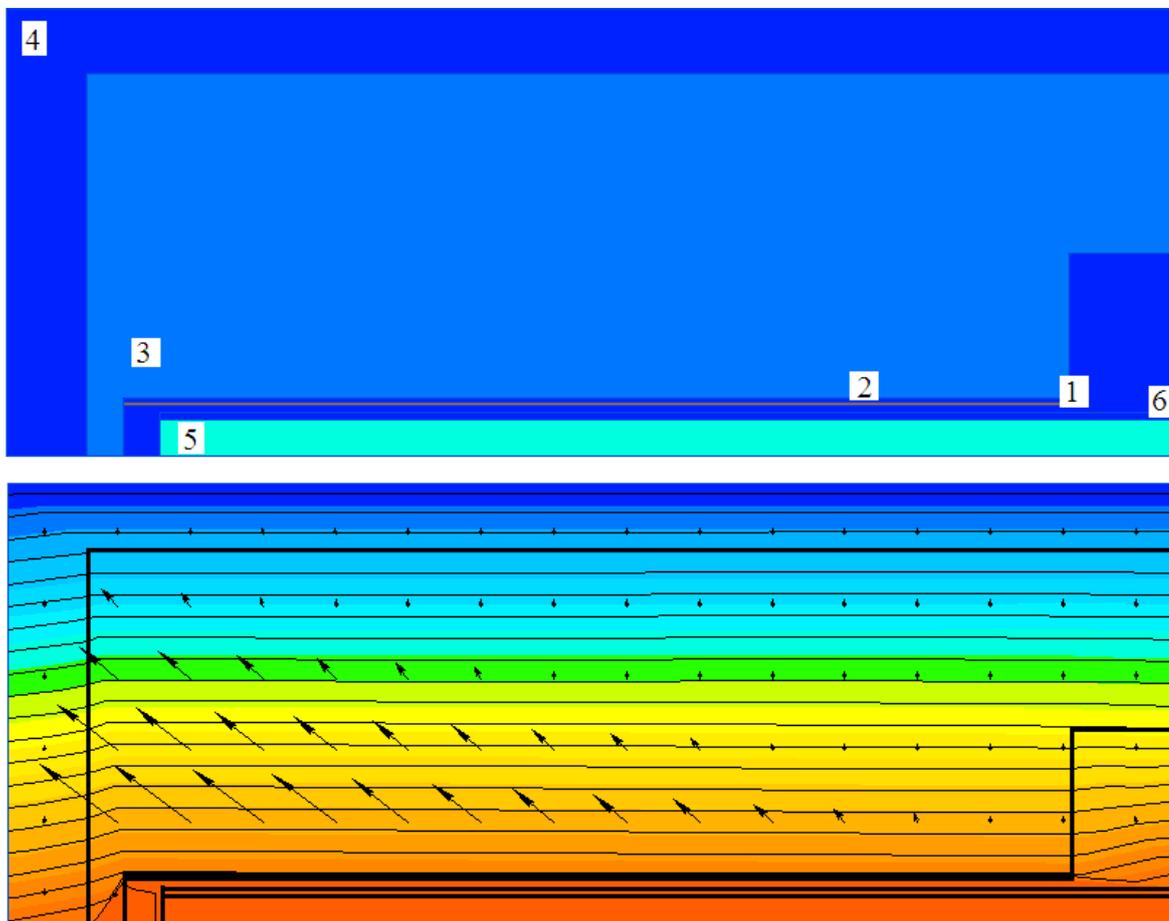


Рисунок 71 – Фрагмент конструкции АММА ОДС, так же условно обозначен перенос тепла во фрагменте конструкции

Поскольку тепловой поток пропорционален разности температур $(t_i - t_c)$, то можно записать следующее выражение [104]

$$P_i \cdot F_{ij} = (t_i - t_c), \quad (4.5)$$

где F_{ij} - коэффициент пропорциональности (тепловой коэффициент), зависящий от положения изотермической поверхности i .

С точки зрения теплового баланса рассматриваемый прибор можно представить как систему трех тел, которая имеет источник тепла (токопроводящие дорожки) мощностью P_i и контактирует с окружающей средой. Тепловая модель та-

кой системы может быть представлена в виде, показанном на рисунке 72. [103 - 106]

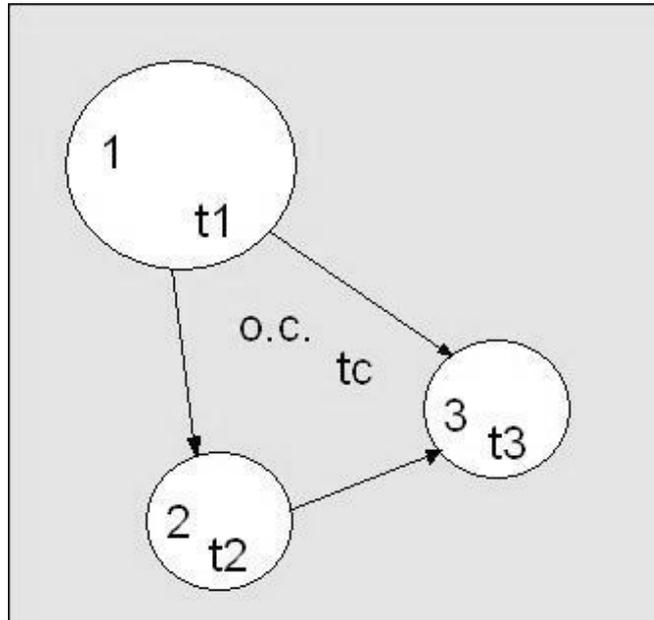


Рисунок 72 – Схема теплообмена между телами системы [104]

1 - слой токопроводящих дорожек, 2 – слой изолятора, 3 – корпус прибора, о. с. – окружающая среда, t_1, t_2, t_3, t_c - температуры тел и среды, соответственно

Между элементами прибора и средой протекают тепловые потоки. Температуры тел, участвующих в теплообмене: $t_1 > t_2 > t_3 > t_c$.

В соответствии с законом сохранения энергии для тел 1, 2, 3: [104]

$$\begin{cases} P_1 = P_{1c} + P_{12} + P_{13} \\ P_{12} = P_{2c} + P_{23} \\ P_{13} + P_{23} = P_{3c} \end{cases} \quad (4.6)$$

где P_{ij} - тепловой поток, перенос от тела i к телу j .

Тепловые потоки, передаваемые от одного тела к другому, выражаются через тепловые проводимости и выражения для расчета тепловых потоков имеют вид [89]:

$$\begin{cases} P_{12} = \sigma_{12}(t_1 - t_2); P_{1c} = \sigma_{1c}(t_1 - t_c) \\ P_{13} = \sigma_{13}(t_1 - t_3); P_{2c} = \sigma_{2c}(t_2 - t_c) \\ P_{23} = \sigma_{23}(t_2 - t_3); P_{3c} = \sigma_{3c}(t_3 - t_c) \end{cases} \quad (4.7)$$

где σ_{ij} - тепловая проводимость от тела i к телу j .

$$\left\{ \begin{array}{l}
\left(\sum_{j=2}^{n+1} \sigma_{1j} \right) \vartheta_1 - \sum_{j=2}^n \sigma_{1j} \vartheta_j = P_1 \\
-\sigma_{21} \vartheta_1 + \left(\sigma_{21} + \sum_{j=3}^{n+1} \sigma_{2j} \right) \vartheta_2 - \sum_{j=3}^n \sigma_{2j} \vartheta_j = 0 \\
-\sigma_{31} \vartheta_1 - \sigma_{32} \vartheta_2 + \left(\sigma_{31} + \sigma_{32} + \sum_{j=4}^{n+1} \sigma_{3j} \right) \vartheta_3 - \sum_{j=4}^n \sigma_{3j} \vartheta_j = 0 \\
-\sigma_{41} \vartheta_1 - \sigma_{42} \vartheta_2 - \sigma_{43} \vartheta_3 + \left(\sigma_{41} + \sigma_{42} + \sigma_{43} + \sum_{j=5}^{n+1} \sigma_{4j} \right) \vartheta_4 - \sum_{j=5}^n \sigma_{4j} \vartheta_j = 0 \\
-\sum_{j=1}^4 \sigma_{5j} \vartheta_j + \left(\sum_{j=1}^4 \sigma_{5j} + \sum_{j=6}^{n+1} \sigma_{5j} \right) \vartheta_5 - \sum_{j=6}^n \sigma_{5j} \vartheta_j = 0 \\
-\sum_{j=1}^5 \sigma_{6j} \vartheta_j + \left(\sum_{j=1}^5 \sigma_{6j} + \sum_{j=7}^{n+1} \sigma_{6j} \right) \vartheta_6 - \sum_{j=7}^n \sigma_{6j} \vartheta_j = 0 \\
-\sum_{j=1}^6 \sigma_{7j} \vartheta_j + \left(\sum_{j=1}^6 \sigma_{7j} + \sum_{j=8}^{n+1} \sigma_{7j} \right) \vartheta_7 - \sum_{j=8}^n \sigma_{7j} \vartheta_j = 0 \\
-\sum_{j=1}^7 \sigma_{8j} \vartheta_j + \left(\sum_{j=1}^7 \sigma_{8j} + \sum_{j=9}^{n+1} \sigma_{8j} \right) \vartheta_8 - \sum_{j=9}^n \sigma_{8j} \vartheta_j = 0 \\
-\sum_{j=1}^8 \sigma_{9j} \vartheta_j + \left(\sum_{j=1}^8 \sigma_{9j} + \sum_{j=10}^{n+1} \sigma_{9j} \right) \vartheta_9 - \sum_{j=10}^n \sigma_{9j} \vartheta_j = 0 \\
-\sum_{j=1}^9 \sigma_{10j} \vartheta_j + \left(\sum_{j=1}^9 \sigma_{10j} + \sum_{j=11}^{n+1} \sigma_{10j} \right) \vartheta_{10} - \sum_{j=11}^n \sigma_{10j} \vartheta_j = 0 \\
-\sum_{j=1}^{10} \sigma_{11j} \vartheta_j + \left(\sum_{j=1}^{10} \sigma_{11j} + \sigma_{1112} + \sigma_{11c} \right) \vartheta_{11} - \sum_{j=12}^n \sigma_{11j} \vartheta_j = 0 \\
-\sum_{j=1}^{11} \sigma_{12j} \vartheta_j + \left(\sum_{j=1}^{11} \sigma_{12j} + \sigma_{12c} \right) \vartheta_{12} - \sigma_{12j} \vartheta_j = 0
\end{array} \right. , n = 12. \quad (4.9)$$

$$Gr = \beta g \frac{h^3}{\nu^2} (t - t_c), \quad Pr = \frac{\nu}{\chi}.$$

h - толщина зазора, $\nu = \eta/\rho$ - кинематическая вязкость, η - динамическая вязкость, ρ - плотность, $\chi = \kappa/(c_p \rho)$ - коэффициент температуропроводности, κ - теплопроводность, c_p - изобарная удельная теплоемкость, $\beta = 1/(273 + t_0)$, K^{-1} - температурный коэффициент объемного расширения теплоносителя, для меди он составляет $16.6 \cdot 10^{-6} C^{-1}$, для стали - $13 \cdot 10^{-6} C^{-1}$.

$$\varepsilon_k = A_4 h^4 \sqrt{\frac{\Delta t}{h}}, \quad \text{где } A_4 = 0,18 \frac{(\beta g Pr)^{0,25}}{\nu^{0,5}}, [1/M^{3/4} \text{град}^{5/4}].$$

$k = \varepsilon_k \lambda_p / h$, где h - толщина зазора (прослойки).

В частном случае, когда прослойка заполнена воздухом, то для температур $t_f = 0 \dots 1000$ °С, произведение $A_4 \lambda_f$ можно принять постоянным, со значением $0,453$ (Вт/м^{7/4}град^{5/4}). Это позволяет преобразовать формулу для коэффициента конвективно – кондуктивной теплопередачи [88, 104]:

$$k = 0,453 \sqrt[4]{\frac{t_1 - t_2}{h}} \left[\text{Вт} / \text{м}^2 \text{град} \right].$$

Эквивалентный коэффициент теплопроводности рассчитывается по формуле: [119, 120]

$\lambda_{\text{экв}} = P_k h / (t_1 - t_2) S_1$, где P_k – тепловой поток, рассеиваемый через газовую прослойку.

Критериальное уравнение для зазора будет выглядеть следующим образом: [119, 120]

$\varepsilon_k = f_1(\text{GrPr}, h/l, N)$, N – коэффициент, учитывающий ориентацию нагретой поверхности в пространстве, $N = 1,3$.

Согласно исследованию Ю. Г. Володина, стало возможным определение этих параметров с достаточно высокой степенью точности.

$$\begin{cases} \varepsilon_k = 0,24N(\text{GrPr})^n f_2(h/l), n = 0,25; \\ f_2(h/l) = 6,25 - 5,25(1 + h/l)^{-1,67}; \\ 2,5 \cdot 10^5 \leq (\text{GrPr}) \leq 10^8; \\ 0,2 \leq h/l \leq 0,8. \end{cases}$$

В исследуемом случае оба отношения h/l значительно меньше того, что использовано в эксперименте (дорожки - ИМ, корпус - экран).

$l_{\text{д-ИМ}} = \sqrt{l_1 l_2} = 3,6 \cdot 10^{-3}$ м, а зазор между дорожками и пластиной ИМ составляет 20 мкм, тогда $h_{\text{д-ИМ}}/l_{\text{д-ИМ}} = 5,56 \cdot 10^{-3}$.

$$l_{\text{к-э}} = \sqrt{l_1 l_2} = 6 \cdot 10^{-3} \text{ м, а зазор составляет } 200 \text{ мкм, } h_{\text{к-э}}/l_{\text{к-э}} = 33,3 \cdot 10^{-3}$$

В таком случае справедливо можно воспользоваться формулой расчета коэффициента конвекции для неограниченной прослойки (так как размер $l_{\text{д-ИМ}}$ и $l_{\text{к-э}}$ нагретой части значительно превышает величины зазоров).

$$\varepsilon_k = 0,24N(\text{GrPr})^{0,25}.$$

График зависимости коэффициента конвекции ε_k от изменения температуры в зазоре (от 0 до 100°C) дорожки - ИМ

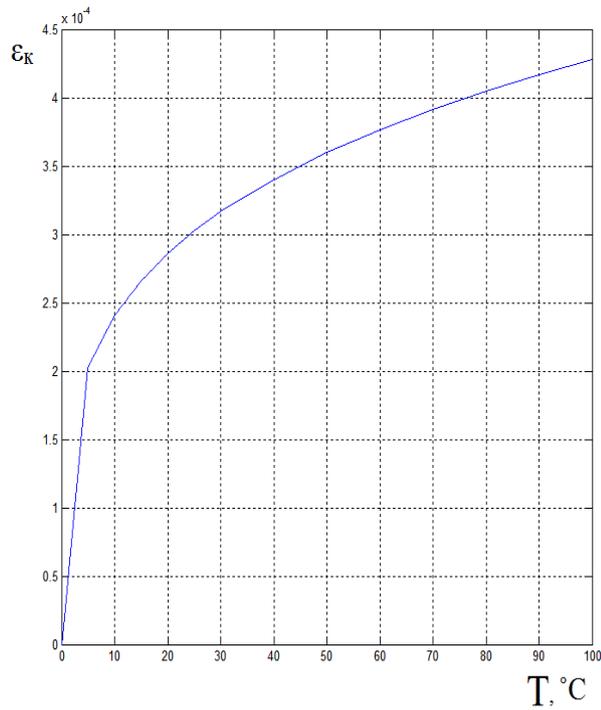


Рисунок 73 – График зависимости коэффициента конвекции ε_k от изменения температуры в зазоре

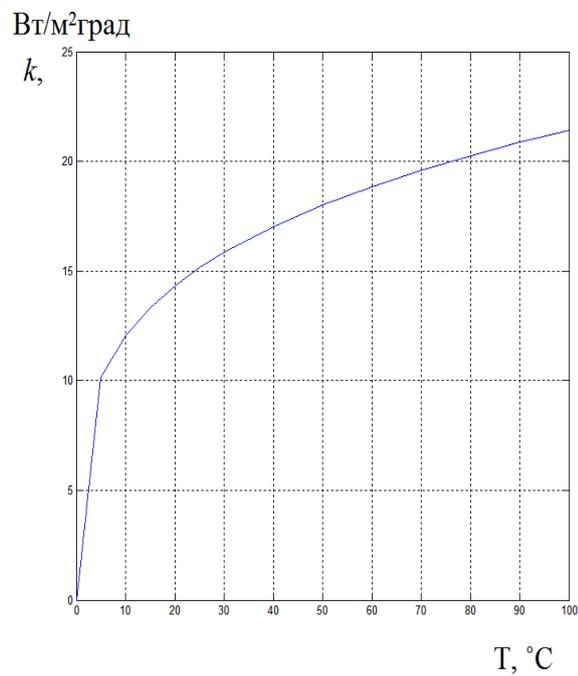


Рисунок 74 – График коэффициента конвективно – кондуктивной теплопередачи, k (дорожки-ИМ)

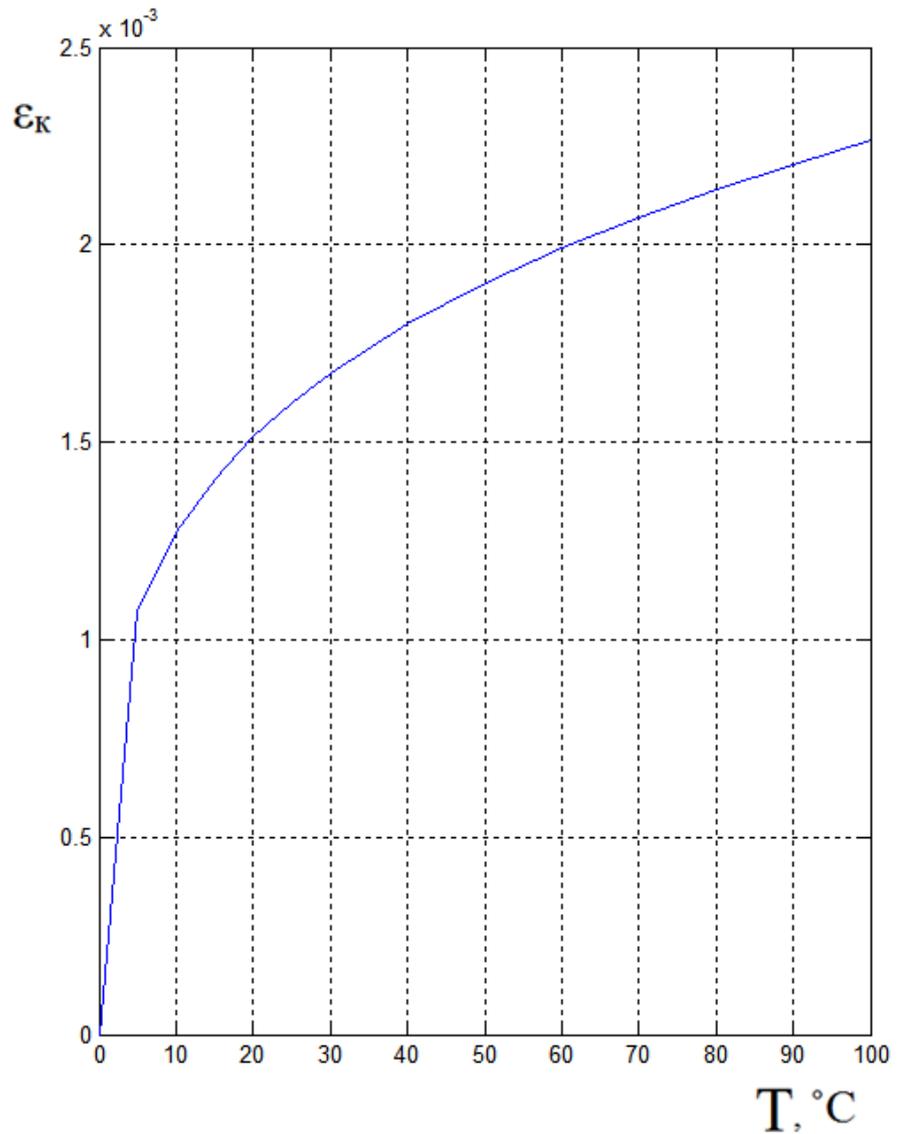


Рисунок 75 – График зависимости коэффициента конвекции ϵ_k от изменения температуры в зазоре (от 0 до 100°C) (корпус-экран)

Искомые тепловые проводимости имеют 10^{-3} порядок, в силу малости теплоотдающих поверхностей. Подобный вывод существенно упрощает расчет. Данные коэффициенты связаны с тепловыми проводимостями в зазорах.

Коэффициенты теплоотдачи при вынужденном движении газа представляются в виде зависимости между критериями Нуссельта Nu_f , Рейнольдса Re_f и Прандтля Pr_f или Pr_w :

$Nu_f = (\alpha/\lambda_f)l$; $Re_f = vl/v_f$; $Pr_f = v_f/a_f$; $Pr_w = v_w/a_w$, где индексы w и f означают температуру стенки (w) и газа (f), l – длина тела в направлении потока.

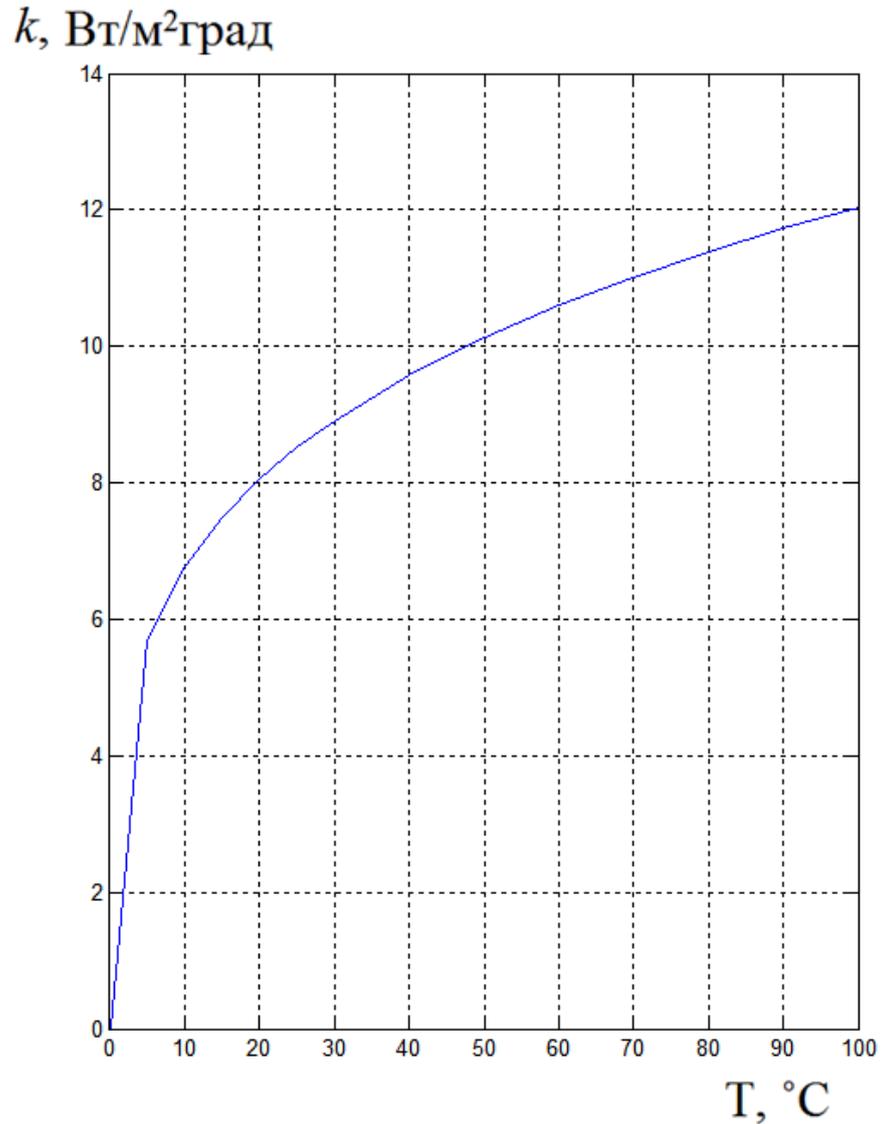


Рисунок 76 – График коэффициента конвективно – кондуктивной теплопередачи, k (корпус-экран)

При движении газа вдоль плоской стенки в неизотермических условиях:
 $Re_{кр} = 4 \cdot 10^4$.

$v = -A \sin(\omega t)$, где A – амплитуда колебаний, равная $3.2 \cdot 10^{-4}$ м, ω – их частота, равная 2198 1/с.

При ламинарном течении газа, $Re_f < 4 \cdot 10^4$, критериальное уравнение для теплоотдачи имеет вид:

$$Nu_f = 0.57 \sqrt{Re_f}, \text{ и он оказался равен } 0.022.$$

Такая запись возможна, так как в достаточно широком спектре температур воздуха (0 – 100 °C).

Число Рейнольдса, его максимум можно определить по полученному графику:

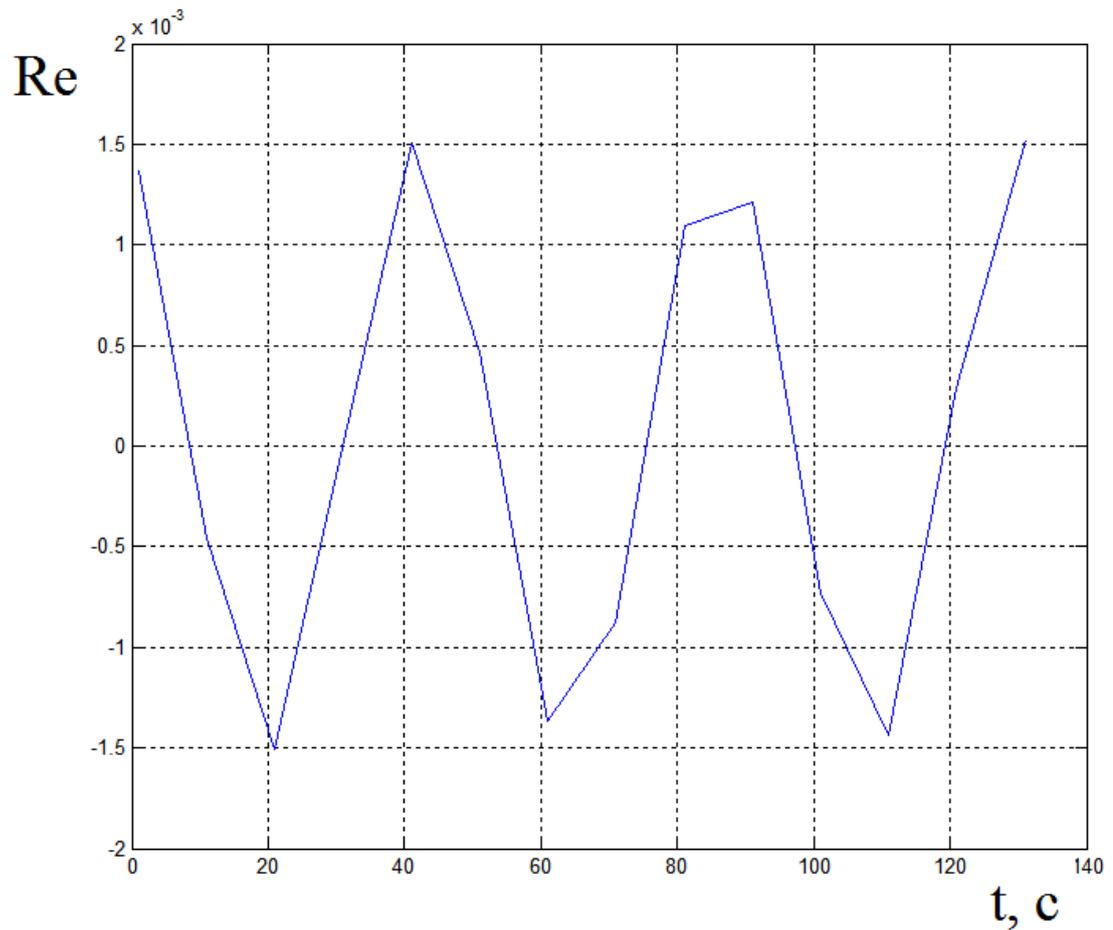


Рисунок 77 – Число Рейнольдса

Определение коэффициента теплоотдачи:

$\alpha = Nu_f(\lambda_f/l)$, где $\lambda_f = 2.44 \cdot 10^{-2}(T/273)^{0.82}$ – теплопроводность воздуха.

Коэффициент теплоотдачи оказался равным 0.15 – 0.2 Вт/м²К при средней температуре от 0 до 100°С.

В случае с АММА ОДС актуален как расчет естественной конвекции (прослойка воздуха между прибором и экраном), так и вынужденной – конвекция в замкнутом объеме АММА ОДС, так же его следует учитывать снаружи прибора (экрана).

При конвективном теплообмене в условиях естественной конвекции можно оценить закон движения около нагретой поверхности:

$(t - t_c) \leq \left(\frac{840}{L}\right)^3$, град, то движение газа подчиняется закону 1/4 степени, в противном случае – 1/3.

Легко доказать, что в случае, применимом к АММА ОДС будет выполняться закон 1/4 в всех случаях. Определяющий размер L для различных зазоров указан в таблице 20 и правая часть неравенства всегда будет во много раз больше левой.

График так же актуален и для зазора между крышкой и внутренней поверхностью экрана, а так же с внешней стороны экрана, так как определяющий размер L будет меняться незначительно.

Сконцентрировав внимание на фрагменте конструкции «токопроводящие дорожки – внутренний объем АММА ОДС», т.е. степень излучения дорожек во внутренний объем прибора, на магнитную поверхность ИМ.

Это не позволяет установить точного значения тепловой проводимости, однако может показать степень влияния излучения на изменения теплового режима работы АММА ОДС.

Результирующий тепловой поток с поверхности тела i (токопроводящие дорожки) к поверхности тела j (ИМ) может быть рассчитан по формуле:

$P_{ij} = \varepsilon_{nij} C_0 ((T_i/100)^4 - (T_j/100)^4) S_i \varphi_{ij}$, где ε_{nij} – приведенная степень черноты i и j тел, равная

$$\varepsilon_{nij} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_i} + \frac{1}{\varepsilon_j} - 1}, \quad C_0 - \text{коэффициент излучения абсолютно черного тела, равный}$$

$5.673 \text{ Вт/м}^2\text{К}^4$, T_i, T_j – абсолютные температуры поверхности тел, φ_{ij} – коэффициент облученности, $\varphi_{ij} = S_i/S_j$, S_i – площадь излучающей поверхности.

Ранее тепловой поток уже описывался, согласно закону Ньютона – Рихмана, приравнивая формулы, можно определить коэффициент теплообмена излучением α_{ij} .

$$\alpha_{ij} = \varepsilon_{nij} \varphi_{ij} f(t_i, t_j), \quad (\text{Вт/м}^2\text{К}), \text{ где}$$

$$f(t_i, t_j) = C_0 \frac{\left(\frac{t_i + 273}{100}\right)^4 - \left(\frac{t_j + 273}{100}\right)^4}{t_i - t_j}, (\text{Вт} / \text{м}^2\text{К}).$$

Если описать тепловой поток при лучистом теплообмене по закону Ньютона-Рихмана, можно вычислить порядок тепловой проводимости:

$\sigma_{nij} = \varepsilon_{nij} \varphi_{ij} S_{ij} f(t_i, t_j)$, допускается, что разность температур будет меняться от 0 до 100°C.

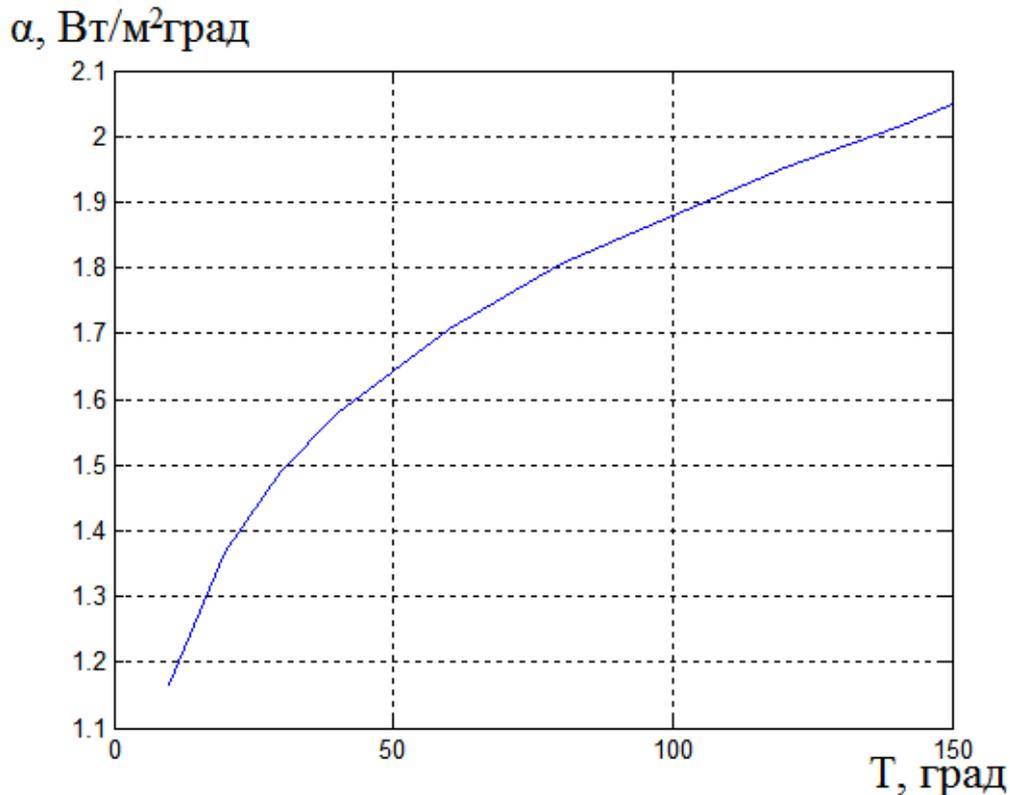


Рисунок 78 – График зависимости коэффициента теплоотдачи от изменения температуры внутри корпуса (дорожки)

Этот порядок оказался -5 и -6 степенью. Необходимость учета данного вида теплообмена будет зависеть от порядка тепловых проводимостей для конвективного и кондуктивного видов теплообмена.

АММА ОДС с точки зрения рассматриваемого вопроса представляет собой систему твердых тел с различными теплофизическими параметрами. Поле температур АММА ОДС нельзя считать стационарным, так как со временем температурное поле будет изменяться. Поверхности каждого отдельного тела в системе можно принять изотермическими.

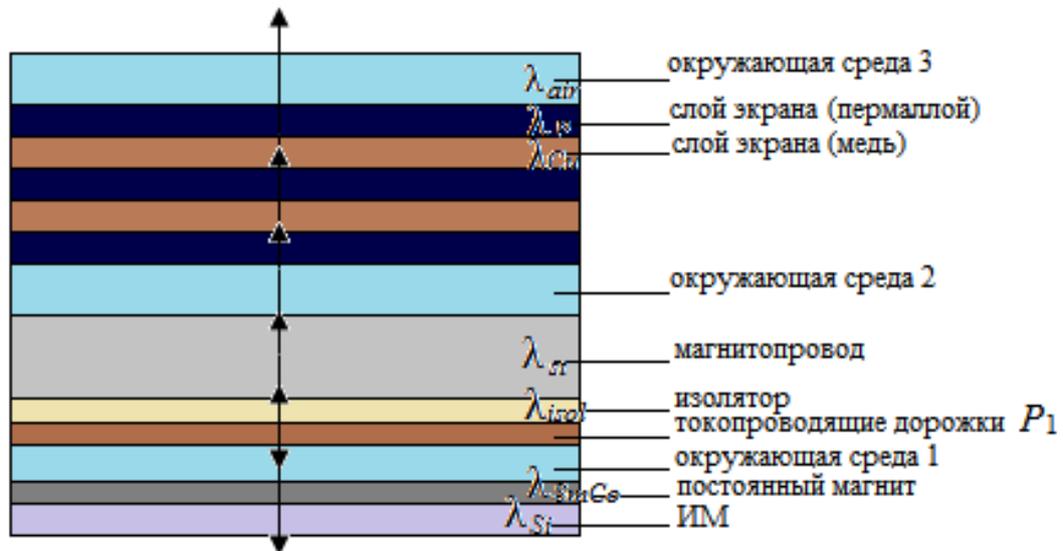


Рисунок 79 – Перенос тепла в системе тел

На рисунке схематично изображен перенос тепла в системе тел, Для окружающей среды (воздух) коэффициент теплопроводности одинаков, однако в один и тот же момент времени, температуры воздушных сред будут различны. $t_{o.c.1} > t_{o.c.2} > t_{o.c.3}$. То же справедливо и для слоев экрана.

4.6 Исследование теплового режима автоколебательного микромеханического акселерометра с «обращенным» датчиком силы

Сопротивление одной однородной прослойки [88]:

$R_{\Pi} = \delta/\lambda S_{\Pi}$, принимая это во внимание и складывая последовательно соединенные сопротивления, можно записать выражение для сопротивления R тепловому потоку между средами 1 и 2 [88, 104]:

$$R_{c1-2} = \frac{1}{\alpha_1 S_{\Pi}} + \frac{\delta_{Cu}}{\lambda_{Cu} S_{\Pi}} + \frac{\delta_{isol}}{\lambda_{isol} S_{\Pi}} + \frac{\delta_{St}}{\lambda_{St} S_{\Pi}} + \frac{1}{\alpha_2 S_{\Pi}},$$

где первое слагаемое – тепловое сопротивление между средой 1 и нагревающей поверхностью, последнее – между внешней поверхностью и средой 2, три промежуточных – тепловые сопротивления неоднородных сред.

Аналогичным образом можно рассчитать тепловое сопротивление экрана

$R_{c2-3} = \frac{1}{\alpha_2 S_{\Pi}} + \frac{2\delta_{Cu}}{\lambda_{Cu} S_{\Pi}} + \frac{3\delta_p}{\lambda_p S_{\Pi}} + \frac{1}{\alpha_3 S_{\Pi}}$, в данном уравнении первое слагаемое не равно последнему слагаемому у предыдущего уравнения, так как речь идет о разных поверхностях.

Для определения теплового сопротивления фрагмента ИМ можно записать:

$$R_{c1-ИМ} = \frac{1}{\alpha_1 S_{\Pi}} + \frac{\delta_{SmCo}}{\lambda_{SmCo} S_{\Pi}} + \frac{\delta_{Si}}{\lambda_{Si} S_{\Pi}}.$$

Зная тепловое сопротивление для каждого фрагмента системы можно определить тепловой коэффициент F , а так же тепловые проводимости и коэффициенты теплообмена.

А тепловые проводимости пары тел будут равны сумме обратных величин тепловых сопротивлений. В действительности этот расчет представляет собой много более трудоемкий процесс взаимодействия неразрывно связанных факторов, однако для получения аналитического решения, будет достаточно такого приближенного расчета.

Таблица 21 – Тепловое сопротивление элементов прибора

| Порядковый номер (в расчете) | Элемент | Тепловое сопротивление, К/Вт |
|--------------------------------|------------------------|------------------------------|
| 1 | Токопроводящие дорожки | 0,0156 |
| 2 | Изолятор | 4,5977 |
| 3 | Магнитопровод | 1,82 |
| 4 | Воздушный зазор -1 | 36,169 |
| 5 | Магнитный слой | 0,049 |
| 6 | ИМ | 0,016 |
| 7 (начиная с внутреннего слоя) | Слой экрана - 1 | 0,107 |
| | Слой экрана - 2 | 0,1297 |
| | Слой экрана - 3 | 0,107 |
| | Слой экрана - 4 | 0,1297 |
| | Слой экрана - 5 | 0,107 |
| 8 | Воздушный зазор - 2 | 0,35789 |

В аналитическом расчете нет указания на полученные температурные значения, так как температуры внутри прибора следует ограничить 60°C, температу-

ра снаружи может меняться от -50 до 80°C . Расчет в среде Elcut позволяет уточнить результаты аналитического расчета, так как данные, вводимые в программу (тепловые проводимости, выделенная токопроводящими дорожками мощность, температура окружающей среды) не отличаются от тех, что были использованы в аналитическом расчете.

Заданы граничные условия, при которых греется основание прибора ($T = 353\text{ K}$), окружающая же его среда омывается воздухом при $T = 300\text{ K}$, при полученной расчетной мощности $P_1 = 9,27\text{ Вт}$. Устройство разбивается на ряд конечных «элементарных» геометрических форм (объемов) [104] канонической формы, определяемой конструктивными особенностями датчика. Увеличение количества тепла «элементарного» объема принимается пропорциональным увеличению температуры в расчетной точке (геометрическом центре) этого объема, так же допускается, что на входе в l -й объем может происходить смешение нескольких потоков [105], одни из которых вытекают из других объемов, а те, в свою очередь, вытекают из окружающей среды, имеющей известную температуру T_c .

В результате проведенных вычислений, следует вернуться к системе 5.6. и рассчитать перегревы тел:

Таблица 22 – Перегревы

| Наименование элемента | Перегрев, ϑ , град |
|-------------------------|------------------------------|
| Токопроводящие дорожки | 54 |
| Изолятор | 54 |
| Магнитопровод | 47 |
| Магнитный слой ИМ | 52 |
| ИМ | 52 |
| Слой экрана (пермаллой) | 30 |
| Слой экрана (медь) | 30 |
| Воздушный зазор -1 | 54 |
| Воздушный зазор - 2 | 40 |
| Окружающая среда | 0 |

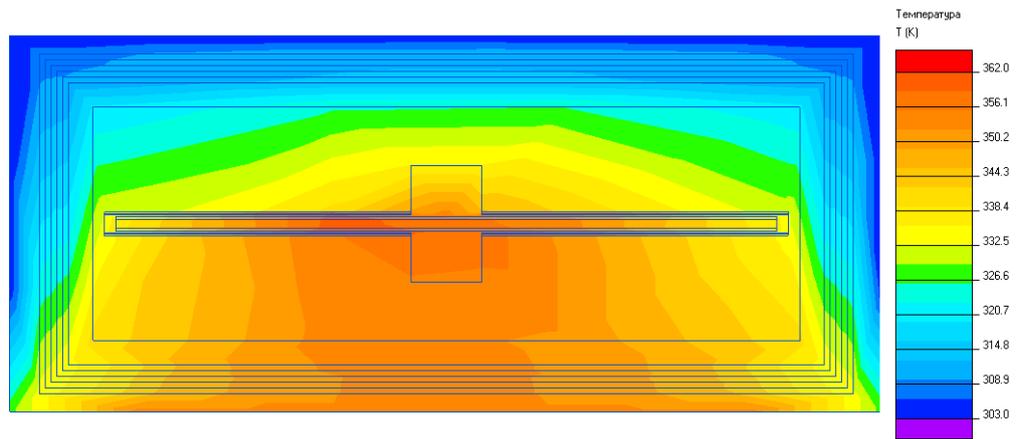


Рисунок 80 – Распределение температур в корпусе АММА ОДС

Задаются новые граничные условия, при которых вся окружающая среда прогрета до 353 К.

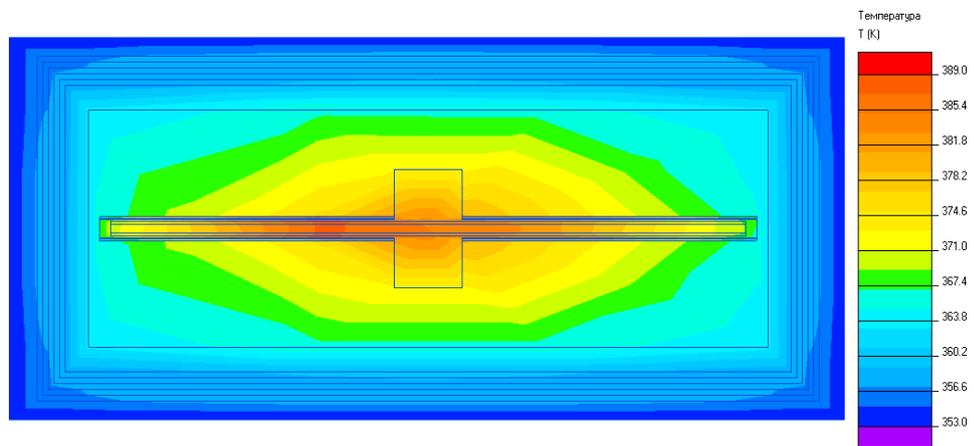


Рисунок 81 – Распределение температур в корпусе АММА ОДС при повышении температуры окружающей среды

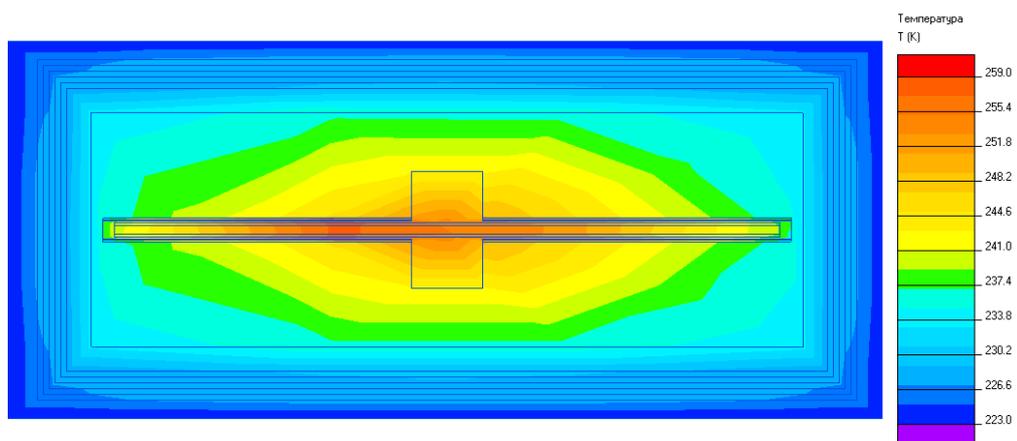


Рисунок 82 – Распределение температур в корпусе АММА ОДС при понижении температуры окружающей среды

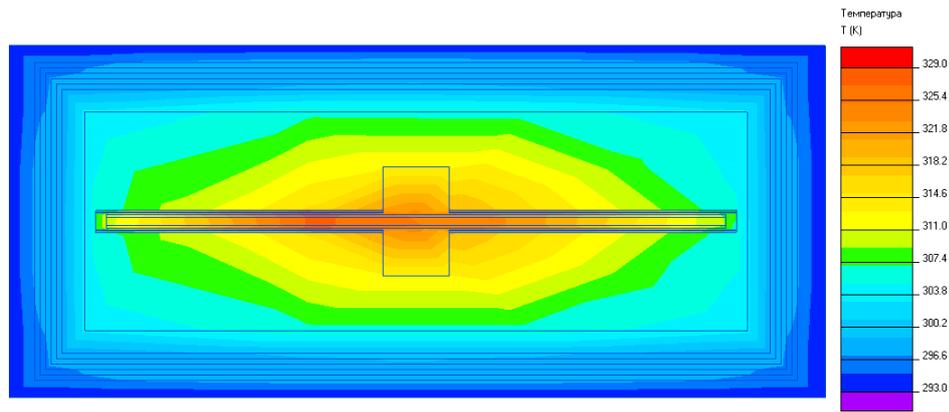


Рисунок 83 – Распределение температур в корпусе АММА ОДС при нормальных условиях температуры окружающей среды

АММА ОДС внутри своего замкнутого объема имеет 4 нагревательных элемента и, несмотря на хорошо проводящую ток медь, за счет малого внутреннего объема и максимально допустимой силы тока, нагревание будет весьма существенно.

4.7 Способы нормализации температурного режима автоколебательного микро-механического акселерометра с «обращенным» датчиком силы

Радиаторы применяются для интенсификации теплообмена. Важно определиться с его геометрическими параметрами и максимальной мощностью, которую радиатор будет способен рассеивать в окружающее пространство.

Процесс теплообмена, происходящего между радиатором и средой можно описать излучением и конвекцией.

Для удобства расчета, поверхность радиатора разбивается на n частей: S_1 – площадь поверхностей оснований радиатора, заключенных между ребрами; S_2 – площадь поверхностей радиатора, обращенных друг к другу; S_3 – площадь наружных поверхностей ребер; S_4 – площадь всех торцевых поверхностей ребер. [103 - 105]

Коэффициент теплопередачи является табличной величиной как и коэффициент теплопроводности, тогда величина пограничного слоя составляет 400 мкм.

$S_1 = (n - 1)bH$ – площадь межреберных поверхностей радиатора;

$S_2 = 2(n - 1)hH$ – площадь внутренних поверхностей ребер радиатора;

$S_3 = 2MH$ – площадь внешней поверхности радиатора;

$S_4 = n\delta(H + 2h) + 2(M - h)D$ – площадь торцевых поверхностей радиатора;

$S_5 = DH$ – площадь основания радиатора.

В общем случае коэффициенты теплоотдачи α_i и температуры t_i поверхностей i различны. Мощность P , рассеиваемая в окружающую среду поверхностью радиатора, может быть описана формулой:

$$P = \sum_{i=1}^n P_i = \sum_{i=1}^n (\alpha_{ik} (t_i - t_{ic}) S_i + \alpha_{il} (t_i - t_{ic}) S_i),$$

где P_i – мощность, рассеиваемая i -й поверхностью;

α_{ik} , α_{il} – конвективная и лучевая составляющие коэффициента теплоотдачи i -й поверхности;

t_{ic} – температура среды между ребрами;

t_c – температура среды в пространстве, удаленном от радиатора;

n – число поверхностей в конструкции.

Вместо температур отдельных поверхностей t_i следует в расчете принять среднюю по поверхности температуру t_s .

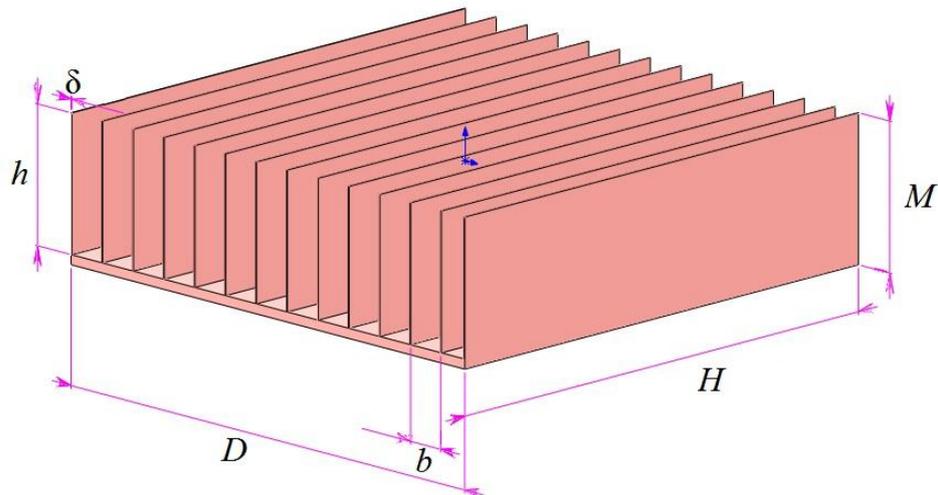


Рисунок 84 – Параметры радиатора

Известно следующая аналитическая зависимость между температурой $t_{ic}(x, y)$ в точке (x, y) пространства около полубесконечной стенки и физическими свойствами среды [77]:

$$\frac{t_{ic}(x, y) - t_c}{t_s - t_c} = \Gamma(\eta),$$

$$\eta = \frac{x}{y} (Gr_x)^{\frac{1}{4}}, Gr_x = \frac{g\beta x^3 (t_s - t_c)}{\nu_m^2}.$$

Между критериями L и Γ справедлива зависимость:

$$L(\eta) = 1 - \Gamma(\eta).$$

Тогда температуру среды между ребрами можно найти по формуле:

$$t_{ic} = t_s - (t_s - t_c)L(\eta).$$

Таким образом задача сводится к определению критериев L и η . Пусть средняя точка в пространстве имеет координаты $y = 0,5b$, $x = 0,5D$, где b – расстояние между ребрами, мм, D – протяженность ребра, мм.

Таблица 23 – Геометрические параметры радиатора

| Параметр | Величина, м |
|-------------------------------------|----------------------|
| Длина основания, H | $5,24 \cdot 10^{-3}$ |
| Ширина основания, D | $5,24 \cdot 10^{-3}$ |
| Высота внешних стенок ребра, M | $1,2 \cdot 10^{-3}$ |
| Ширина ребра, δ | $10 \cdot 10^{-6}$ |
| Расстояние между ребрами, b | $4 \cdot 10^{-4}$ |
| Высота ребра, h | $1 \cdot 10^{-3}$ |

$$\eta = A_4(t_m) b_{(\text{мм})} \frac{(t_s - t_c)^{\frac{1}{4}}}{D_{(\text{мм})}^{\frac{1}{4}}},$$

$$A_4(t_m) = 1,87 \cdot 10^{-2} \left(\frac{g\beta}{\nu_m^2} \right)^{\frac{1}{4}}, [1 / \text{мм}^{\frac{3}{4}} \text{град}^{\frac{1}{4}}],$$

где $A_4(t_m)$ – параметр, учитывающий свойства окружающей среды при температуре

$$t_m = 0,5(t_s + t_c).$$

Параметр $A_4(t_m)$ для воздуха и зависимость критерия L от η взяты из справочников.

Для вертикально ориентированных поверхностей радиатора коэффициент теплоотдачи может быть найден по формуле:

$$\alpha_k = A_2 \left(\frac{t_s - t_c}{h} \right)^{\frac{1}{4}},$$

Для горизонтальных поверхностей, обращенных нагретой стороной вниз

$$\alpha_k = 0,7A_2 \left(\frac{t_s - t_c}{L} \right)^{\frac{1}{4}}, \text{ где } L - \text{наименьшая сторона поверхности в м.}$$

В коэффициент A_2 вошли все физические параметры среды:

$$A_2 = 0,63(g\beta Pr)_m^{\frac{1}{4}} \frac{\lambda_m}{v_m^{\frac{1}{2}}}, [\text{Вт} / \text{м}^{\frac{7}{4}} \text{град}^{\frac{5}{4}}],$$

Коэффициент облученности для радиатора можно найти по формуле:

$$\varphi = b/(b + 2h), \text{ где } b - \text{расстояние между ребрами, } h - \text{длина ребра.}$$

Таким образом задача сводится к определению геометрических параметров радиатора, необходимого для рассеивания заданной мощности.

Таблица 24 – Коэффициенты теплоотдачи поверхностей

| Коэффициент теплоотдачи поверхности: | Значение, Вт/м.град |
|---|---------------------|
| Ребер (внутренняя), α_1 | 2,98 |
| Ребер (внешняя), α_2 | 1,54 |
| Торцевых поверхностей ребер, α_3 | 1,47 |
| Межреберного пространства, α_4 | 6,32 |
| Основания, α_5 | 2,24 |

Лучевой коэффициент 0,05.

Тогда суммарная мощность, рассеиваемая радиатором равна 9,55 Вт. Такой радиатор мог бы стать решением проблемы, однако такие геометрические параметры крайне трудно воспроизвести практически.

Для производства радиатора чаще всего применяются металлические материалы, функционирующие как тепловой проводник, который удаляет тепло. Однако существуют преимущества и недостатки различных металлических материалов, используемых для производства теплоотвода. Утверждается, что чем выше теплопроводность металлического материала, тем лучше он рассеивает тепло. Наиболее применимы такие материалы как медь и алюминий.

Выбор алюминия в качестве теплоотводящего материала может быть обусловлен экономической выгодой в условиях масштабного серийного производства, так же есть возможность использовать его сплавы.. Медь обладает высокой теплопроводностью по сравнению с алюминием и многими другими металлами, но в то же время нежелательно использовать сплавы меди в силу того, что теплопроводность в этом случае существенно снижается. Чистая медь – наиболее распространенный металл, применяемый при изготовлении радиаторов.

Так как известно, что эффективность работы радиатора зависит от площади теплоотдающей поверхности, то следует провести ряд сравнений для радиаторов различной конструкции.

Меняться будет лишь ширина ребра, расстояние между ребрами и их количество.

Результат оценен по суммарной площади теплоотдающей поверхности.

1. Ширина ребра 10 мкм, расстояние между ребрами 400 мкм, количество ребер 14 – будет принято за «эталон».

$$S_{\Sigma} = 2,1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$$

2. Ширина ребра 500 мкм, расстояние между ребрами 2000 мкм, количество ребер 2.

$$S_{\Sigma} = 7.033 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$$

3. Ширина ребра 600 мкм, расстояние между ребрами 2000 мкм, количество ребер 2.

$$S_{\Sigma} = 7.1778 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$$

4. Ширина ребра 1 мм, расстояние между ребрами 3 мм, количество ребер 1.

$$S_{\Sigma} = 4.9370 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$$

В результате выяснилось, что возможность подобрать радиатор с такой площадью теплоотдающей поверхности, благодаря которой может возникнуть оптимальный температурный режим и, при этом, массогабаритные характеристики устройства останутся на должном уровне, практически невозможно. Так же важно помнить про еще одно свойство радиатора: его задача не охлаждать поверхность, а способствовать установлению теплового равновесия. Вблизи вентилятора применение радиатора выглядит целесообразным, но когда рядом нет охлаждающих элементов, радиатор будет способствовать установлению теплового равновесия с окружающей средой. В этом случае важно установить существенные температурные ограничения по условиям эксплуатации прибора.

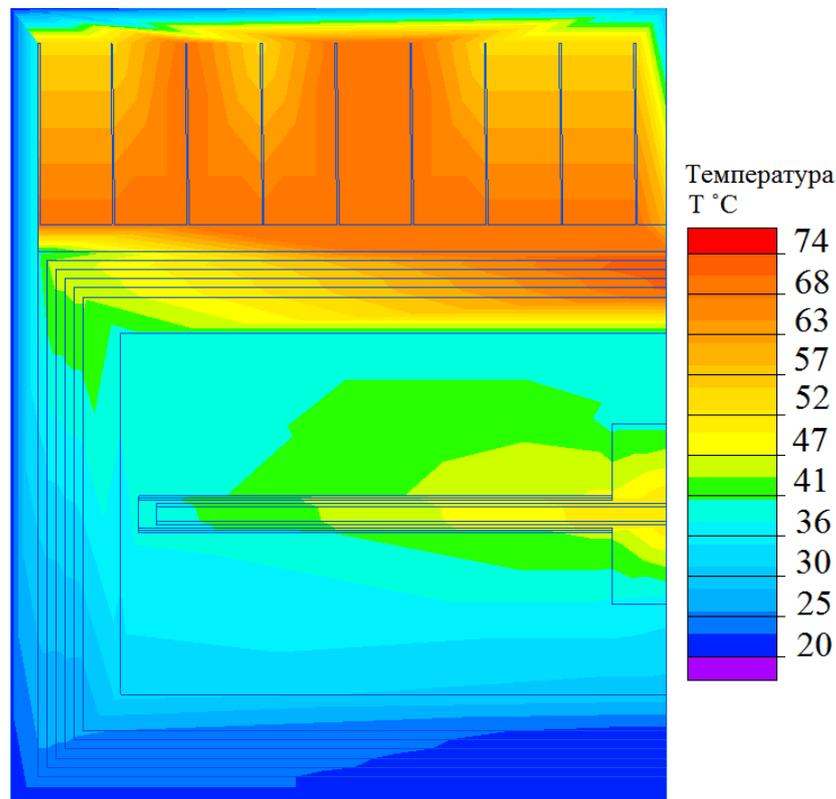


Рисунок 85 –Картина распределения температур при включении в конструкцию радиатора с заявленными параметрами. (НУ окружающей среды)

Радиатор описывается как объект, который рассеивает тепло от объектов, расположенным внутри корпуса датчика. Однако, важно помнить, что радиатор позволяет лишь установить тепловое равновесие, т.е. тепло никуда не пропадет.

Применение радиатора – является крайне удачным решением задачи отвода тепла, однако, создание элемента с заявленными параметрами является непростой задачей.

Громоздкость конструкции в совокупности с низким коэффициентом полезного действия (КПД) модуля Пельтье являются причинами отказа в применении данного метода для корректировки теплового режима.

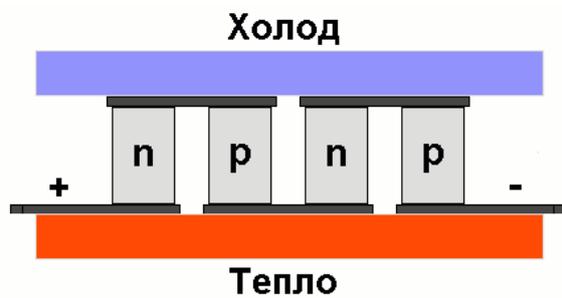


Рисунок 86 – Модуль Пельтье

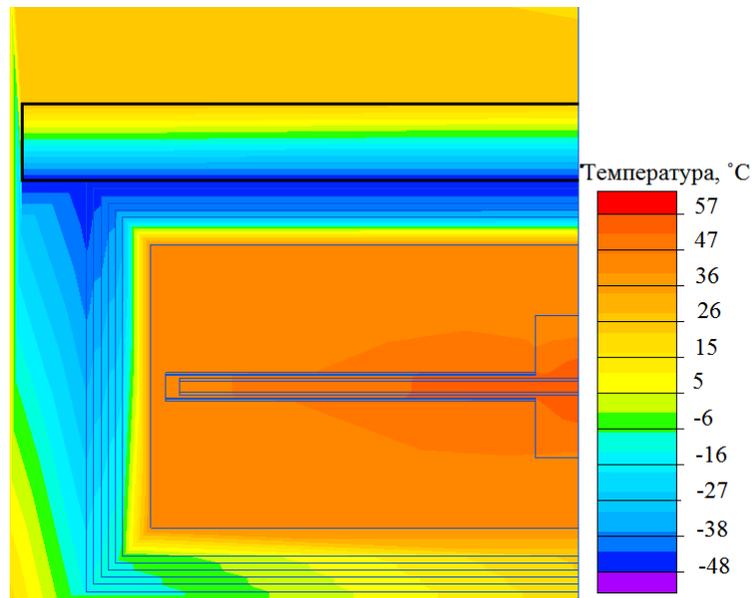


Рисунок 87 – Картина распределение температур во фрагменте АММА ОДС с применением модуля Пельтье

Элементом, за счет которого возникает повышение температуры внутри корпуса, являются плоские катушки с током. Известно, что ток, протекающий по проводнику, нагревает его. Проводники, являясь неподвижными, отдают энергию

соседним телам путем теплопередачи. Кроме того, эта энергия тем больше, чем больше сопротивление проводников. Следовательно, понизив сопротивление, можно в конечном счете добиться уменьшения выделяемой тепловой энергии.

Сопротивление каждого проводника: $R_i = \frac{\rho_{Cu} l}{S}$,

Сопротивление n параллельно соединенных проводников меньше сопротивления одного проводника в n раз.

$$R_{\Sigma} = \frac{R_i}{n}.$$

Электрическое сопротивление металла меняется с изменением температуры. $\rho_{Cu} = \rho_{20}(1 + \alpha(t - 20))$, где t – температура нагретого тела в °С, α – коэффициент температурного сопротивления, К⁻¹, численно равный изменению сопротивления проводника при изменении его температуры на 1 К.

α находится табличным способом для металлов, так, например, для меди величина коэффициента в диапазоне температур от 0 до 100°С составляет $4,3 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}$.

Если нет возможности влиять на сопротивление путем изменения параметров проводника, можно включить дополнительное сопротивление параллельно плоской катушке, определив сопротивление при перегреве проводников и величину сопротивления при желаемой температуре внутри корпуса прибора.

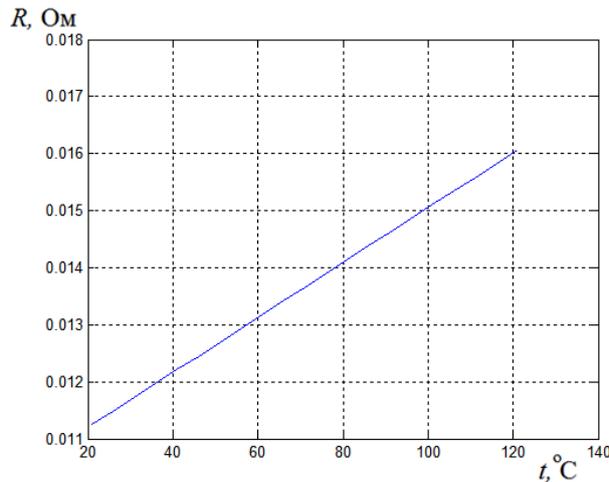


Рисунок 88 – Изменение сопротивления токопроводящих дорожек от температуры

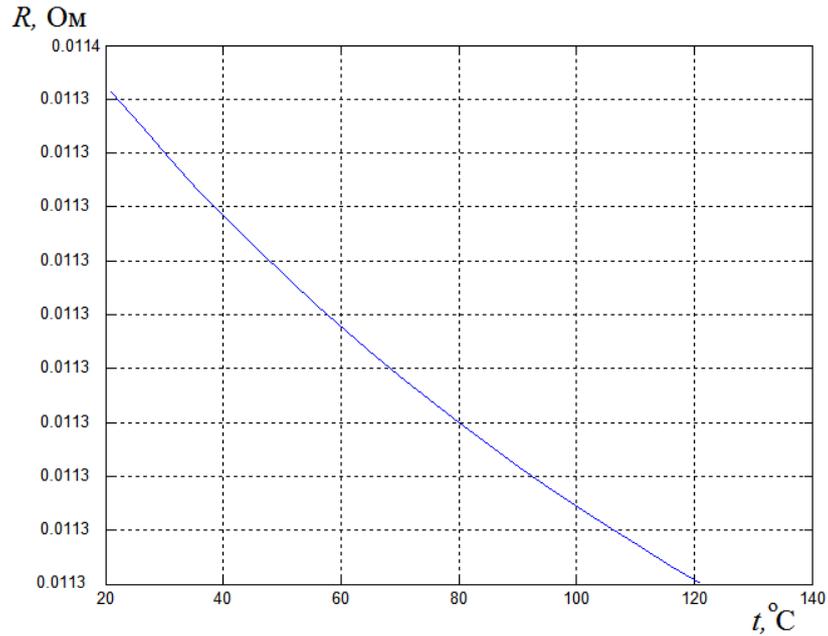


Рисунок 89 – Требуемые значения дополнительных сопротивлений для понижения температуры до 20°C

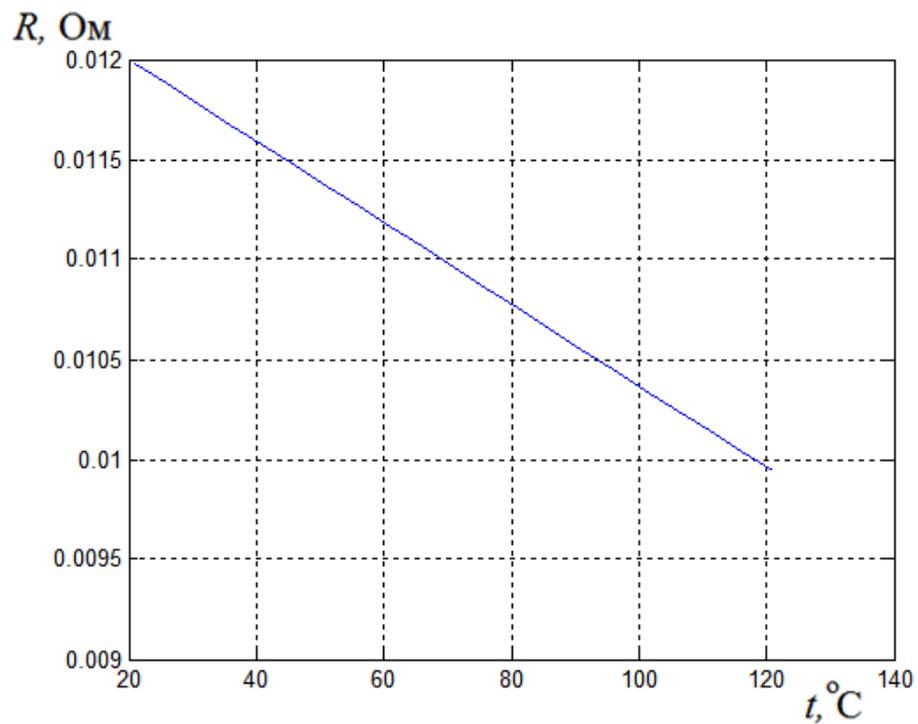


Рисунок 90 – Изменение сопротивления полупроводника (кремний) в зависимости от температуры

Возможным вариантом для стабилизации теплового режима может быть кремниевый диод, $\rho = 4,5 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, геометрическими параметрами: длиной $l = 4 \text{ мм}$, площадью поперечного сечения $S = 1,5 \text{ мм}^2$.

Заключительным шагом расчета будет возвращение к системе (5.6), так как изменится значение тепловой мощности, выделяемой дорожками, т.е.

$$P_1 = 5,32 \cdot 10^{-3} \text{ Вт.}$$

В этом случае, перегрев любого из элементов конструкции окажется равен 0.

Возвращаясь к требуемым значениям температур внутри корпуса прибора, стоит отметить, что медь, вошедшая в состав магнитного экрана, является хорошим радиатором и так же может отводить тепло (за счет большого значения теплопроводности), диод, подключенный к дорожкам, позволяет поддерживать температуру рабочих элементов АММА ОДС, препятствуя изменению температуры вблизи подвижного элемента. При этом точка Кюри для пермаллоя находится в пределах 300 – 450 °С (в зависимости от марки), магнита из самария-кобальта (отечественные марки) – 250 – 300 °С, магнитопровода – 60 – 90 °С. Применение полупроводникового диода способствует временному снижению силы тока в дорожках и, как следствие, потере силы Ампера, создаваемой ДС, однако, в требуемом диапазоне температур внешней среды (-50 – 80 °С) перепад силы не будет существенным, в то время как датчик будет иметь способность самоохладиться, таким образом, сохраняя «работоспособность» продолжительное время. Потребляемая акселерометром мощность 3,5 Вт в то время как выделяемая дорожками тепловая мощность составит 17 мВт.

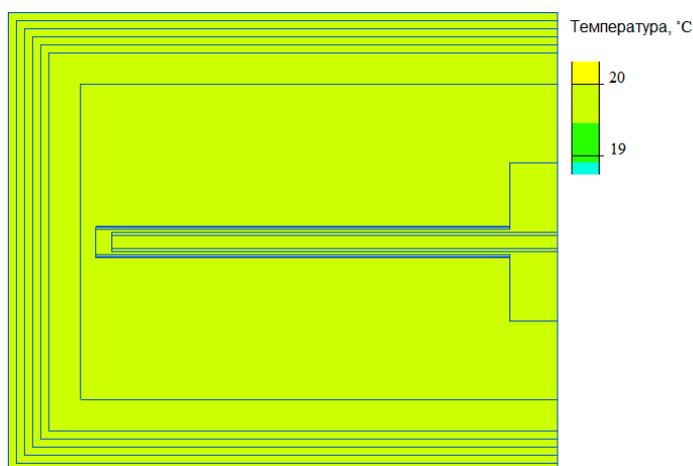


Рисунок 91 – Фрагмент конструкции после установки диода (теплоотдача дорожек прежняя)

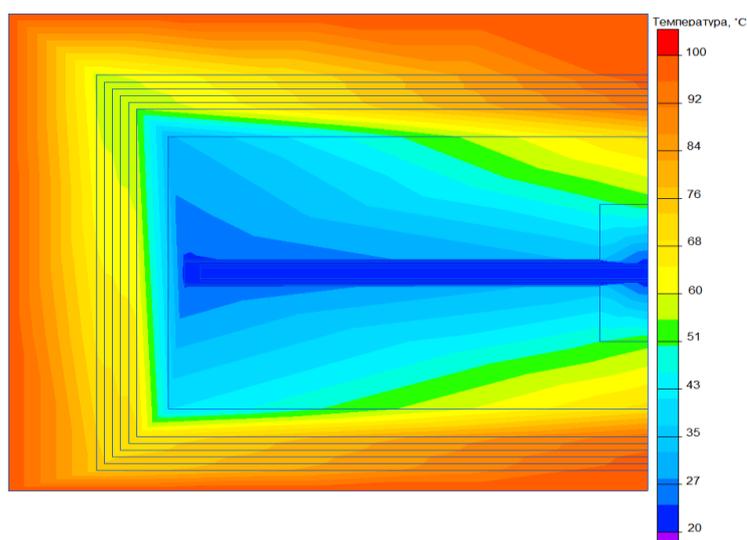


Рисунок 92 – Фрагмент конструкции при температуре окружающей среды 100°С

4.8. Методика повышения качества функционирования автоколебательных микромеханических акселерометров

Методика повышения качества функционирования АММА [64, 105-107] основана на исследовании влияния внешних вредных воздействий и выбора средств по их устранению (рис. 93). В результате был разработан АММА ОДС, максимально соответствующий условиям эксплуатации, на основе гибкой настройки параметров, в соответствии с предложенной методикой повышения качества функционирования.

В рамках разработанной методики проводится оценка условий эксплуатации, где в первую очередь оценивается влияние магнитных полей на параметры выходного сигнала датчика (п.4.1), что позволяет установить требования к магнитному экрану (п. 4.2) в случае, если он требуется. Методика подразумевает послойное нанесение экрана. Когда магнитное поле внутри экрана перестает оказывать влияние на параметры выходного сигнала, следует оценить влияние тепловых полей (п. 4.4), поскольку экран так же представляет собой элемент конструкции, участвующий в теплообмене. Выбор способа устранения перегревов обоснован в п. 4.6. Сама методика представляет собой набор непростых операций, но в рамках разработки АММА ОДС удалось создать алгоритм, позволяющий упро-

стить процесс, сделав его последовательным и реализуемым внутри уже имеющейся имитационной модели.

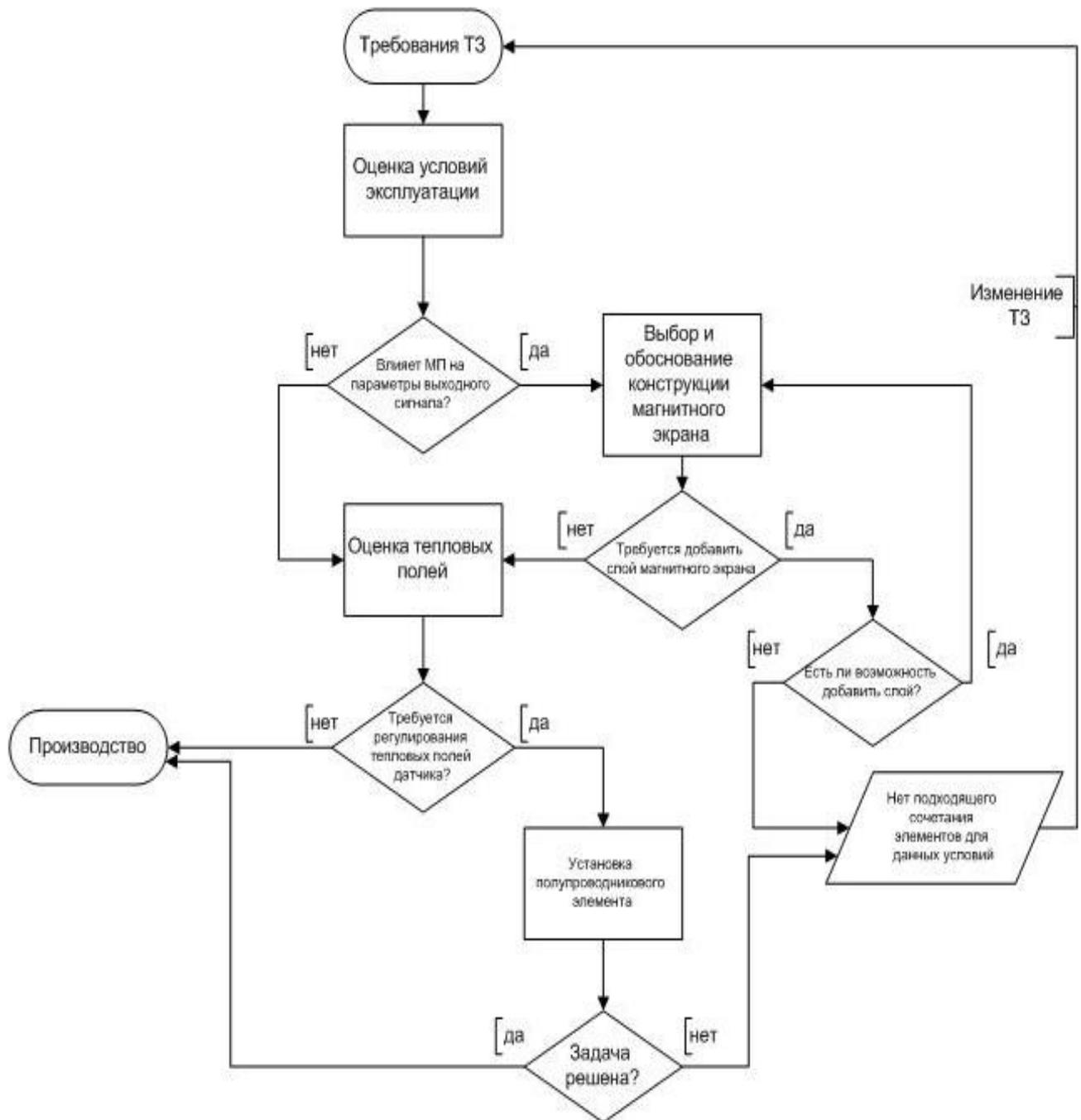


Рисунок 93 – Методика повышения качества функционирования АММА

Исследования показали, что АММА ОДС может работать в условиях воздействия внешнего постоянного магнитного поля без экрана в том случае, если это магнитное поле обладает индукцией сравнимой с индукцией магнитного поля

Земли $B = 1,6 \cdot 10^{-5} \dots 3,1 \cdot 10^{-5}$ Тл. После установки экрана допустимая величина магнитной индукции постоянного магнитного поля может составлять до 30 Тл.

Выбор многослойного квадратного экрана обусловлен достаточным количеством разделов сред, за счет которых осуществляется процессы отражения, затухания и пропускания магнитных волн, при этом толщина слоев экрана из пермаллоя должна быть не менее 50 мкм и не более 700 мкм, в то время как толщина каждого из слоев меди не должна превышать 50 мкм. Экран, состоящий из нескольких слоев будет эффективнее, так как в нем число несоответствий сред станет значительно больше. Имеет значение сочетание слоев, так как экран м-п-м-п-м будет менее эффективен, чем п-м-п-м-п. Формой квадрата экран обязан особенностью различных геометрических фигур пропускать магнитный поток, наиболее оптимальной была бы форма шара, однако это может создать трудности в креплении устройства. Решение может быть обнаружено в форме «скругления» внутренних слоев экрана, как это показано на рисунке 59. Такая форма, количество и толщина слоев экрана способствует минимизации массы и габаритов, упрощению монтажа и крепления датчика к поверхности ПО.

Выводы к главе 4

Проведено исследование возможностей применения имитационной модели АММА ОДС в рамках исследования характеристик системы, в частности, исследование ее свойств при изменении внешнего магнитного поля.

Проведен теоретический анализ функционирования АММА ОДС в различных температурных режимах и осуществлен выбор средств снижения влияния тепловых воздействий во внутреннем объеме корпуса датчика.

Исследовано влияние роста температуры на характеристики АММА ОДС. Изменения (в отдельности) не могут показать общей картины (понижение индукции постоянного магнита, рост сопротивления в дорожках, уменьшение значения электромагнитного демпфирования и величины зазора и, как следствие, уменьшение силы ОДС), однако на значимость их исследования указывает изменение ста-

тических характеристик с ростом температуры. В дальнейшем должны быть приняты меры для предотвращения роста температуры в дорожках и обеспечении нормального теплового режима.

В данной главе было проведено исследование тепловых режимов работы АММА ОДС, разработана методика расчета тепловых характеристик устройства, включающего магнитные элементы конструкции и упругие элементы. В связи с особенностью «обращенного» датчика силы, один из его элементов – токопроводящие дорожки, является источником тепла большой мощности, это, в свою очередь, объясняет возникновение перегревов элементов конструкции прибора и, как следствие – нестабильность параметров (жесткость подвесов (зависимость модуля упругости кремния от температуры), демпфирование (из-за циркуляции холодного и теплого воздуха), изменение магнитных характеристик (точки Кюри) и др.).

Повышение температуры внутри корпуса прибора не влияет на выходной сигнал и не окажет существенного воздействия на свойства элементов конструкции, однако скажется на параметрах автоколебаний.

Для стабилизации и нормализации температурного режима были рассмотрены следующие меры:

1. Радиатор. Недостатком такого элемента можно назвать невозможность создания необходимого количества ребер (штырей) на малой площади поверхности крышки АММА ОДС, так же он не дает возможности регулировать точку «теплового равновесия» в требуемых рамках.

2. Модуль Пельтье. Недостатком является малый КПД данного элемента при достаточно внушительных габаритах и большой потребляемой мощности.

3. Полупроводниковые элементы. На данный момент – наиболее подходящий вариант. И достоинств можно выделить прямое воздействие на источник тепловой энергии (подключаются параллельно дорожкам). Применение такого способа стабилизации теплового режима позволяет установить температурные рамки, в которых АММА ОДС будет функционировать в нормальном режиме, при $T = - 50 - 80^{\circ}\text{C}$ окружающей среды.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

К основным научным результатам работы относятся

– конструктивно-кинематической модели (ККМ) микромеханических акселерометров, обеспечившей возможность реализации автоколебательных режимов, упрощении технологических решений по изготовлению датчика на основе введения существенно нелинейного звена и использования отечественной элементной базы;

– методике повышения результативности процесса создания автоколебательного микромеханического акселерометра, которая позволила на этапе планирования производства гибко настраивать параметры прибора за счёт нелинейной обратной связи;

– имитационной модели мониторинга процесса эксплуатации автоколебательных микромеханических акселерометров, позволившей проводить расчет и анализ их характеристик на этапе проектирования;

– методике повышения качества функционирования автоколебательных микромеханических акселерометров, обеспечившей расширение диапазона условий эксплуатации, согласование его с требованиями заказчика

– Использование магнитоэлектрических «обращенных» датчиков силы (ДС) дало возможность расширить диапазон измерений в 1,5 раза уменьшении смещения «нуля» до $4,15 \cdot 10^{-5}$ м, добиться снижения нестабильности коэффициента преобразования до 0,05%, уменьшить величину смещения «нуля» до 30 %, упростить производственные процессы изготовления, создать саморегулирующуюся систему за счет реализации автоколебательных режимов. [107, 108]

– Применение методик повышения результативности и качества функционирования датчика наряду с гибкостью настроек позволило расширить диапазон условий эксплуатации, сформировать его под требования заказчика.

Современная автоматизация смотрит в сторону автопилотирования тяжелого транспорта, в том числе, различной специальной автотехники, предназначенной для перевозки грузов на дальние расстояния. В этой сфере следует уделять особое внимание безопасности не только в отношении понятного всем факта, что

автопилот не заснет, но и в отношении центрирования, погрузки и т.п. Проще говоря, результатом неверного нагружения кузова станет невозможность сдвинуть транспортное средство. Такой подход способен существенно снизить аварийность на дорогах, что особенно актуально в условиях зимних дорог. В рамках разработанной схемы может быть выполнен блок датчиков (расходомеры, датчики нагружения, курса и вертикали).

В настоящее время так же становится все более популярной 3d-печать металлами, что связано непосредственно с тем, что требования как прототипам, деталям и устройствам могут быть удовлетворены за счет широкого ассортимента металлических материалов разнообразных по свойствам и характеристикам. Кроме того, 3d-принтеры постоянно совершенствуются, предлагая все больше возможностей для серийного производства. 3d-печать выгодно отличается от традиционного производства меньшим энергопотреблением, возможностью минимизации массы и габаритов готового изделия.

3d-печать применяется в стоматологии, ювелирном деле, аэрокосмическом приборостроении, автомобильной промышленности. Данная технология позволяет уменьшить вес без снижения прочности (по сравнению с цельнолитными аналогами), создавать высокоточные образцы по требованиям заказчика. Причем, применяемая ранее в прототипировании, сегодня 3d-печать проникает и в серийное производство.

Программные продукты, такие как Autodesk, SolidWorks и SolidThinking применяются при создании образцов для объемной печати. Процесс 3d-печати металлами – это сплавление и спекание порошковых слоев. Лазер сплавляет в единое целое частицы порошка послойно, создавая требуемый объект. Так же применяется технология склеивания с последующим обжигом при высоких температурах, где сплавление частиц происходит под давлением. Похожий способ с применением порошка и металлической пасты, после формирования объекта его так же спекают в печи.

Однако у принтеров существует серьезный недостаток – их высокая стоимость, начинающаяся от 200 тысяч долларов, а так же расходные материалы, об-

служивание, ремонт, персонал, владеющий навыками работы со специальным ПО и вероятная постобработка, существенно увеличивают итоговую стоимость как самого принтера так и продукта, производимого предприятием. На данный момент это ставит под вопрос вероятность серийного производства, но не ограничивает исполнение опытного образца с целью его оценки и тестирования.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

МЭМС – микроэлектромеханическая система;

ДС – датчик силы;

КП – компенсирующий преобразователь;

СУ – система управления;

НРЗ – нелинейное релейное звено;

ПО – подвижной объект;

(А)ММА – (автоколебательный) микромеханический акселерометр;

(О)ДС – («обращенный») датчик силы;

УО – управляемый объект;

О – оператор;

Д – датчик;

ИО – исполнительные органы;

ВУ – вычислительное устройство;

СОИ – средства отображения информации;

ИНС – инерциальная навигационная система;

ЧЭ – чувствительный элемент;

ШИМ – широтно-импульсная модуляция;

ЧИМ – частотно-импульсная модуляция;

ПУД – пульт управления движением;

ДП – датчик положения;

ИМ – инерционная масса;

Кл – ключ;

ККМ – конструктивно-кинематическая модель;

ПП – первичные преобразователь.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kempe, V. Inertial MEMS. Principle and Practice. – Cambridge University Press. – 2011. – 497 p.
2. Krueger, S. Microsystems for Automotive Industry / S. Krueger, R. MullerFieder, S. Finkbeiner, H.-P. Trah // MST News. – March 2005. – pp. 8-10.
3. Портфель ученика: [сайт]. URL: <http://lib.rushkolnik.ru/>
4. Тузов, А. Датчики для измерения параметров движения на основе MEMS-технологии. Часть 1. Инерциальные датчики средней точности. А. Тузов. //Электроника:наука, технология, бизнес. – №1. – 2011. – С. 72-78.
5. Froyum, K. Honeywell Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) Inertial Measurement Unit (IMU) / K. Froyum [et al.] // Proceedings of Position, Location and Navigation Symposium, PLANS-2012. – pp.831-836.
6. Алексеева, В.В. Высокоточные низкочастотные акселерометры для систем управления движением изделий ракетно-космической техники: дис. к-та техн. наук : 05.11.16 / Алексеева Вера Владимировна. – Пенза, 2011. – 180 с.
7. Yole Developpement: Официальный сайт компании. 2019. URL: <http://www.yole.fr/>
8. ИСУ ИТМО: интернет-портал. СПб.: 2019. URL: <https://isu.ifmo.ru/>
9. Ицкович, Э. Современные датчики и тенденции их развития // Электронные компоненты. -2003,-с.23-26.
10. Скалон, А.И. Теория и принципы построения компенсационных автоколебательных чувствительных элементов для систем управления: дис. д-ра техн. наук : 05.13.05 / Скалон Анатолий Иванович. – СПб., 1994. – 603 с.

11. Левшина, Б. С. Вопросы расчета компенсационных приборов для измерения обобщенной механической силы/ Б. С. Левшина, М. М. Фетисов // Приборостроение, 1964. – № I. – С. 1-5.
12. Пешехонов, В.Г. Отечественный микромеханический гироскоп RR-типа. Современное состояние и перспективы / В.Г. Пешехонов, М.И. Евстифеев, Я.А. Некрасов, Н.В. Моисеев, С.В. Павлова// Информационное противодействие угрозам терроризма. – 2012. – № 19. – С. 108-114.
13. Ландау, Б.Е. Современные тенденции развития чувствительных элементов инерциальных навигационных систем / Б.Е. Ландау // Материалы I конференции молодых ученых «Навигация и управление движением». - 1999. - С.87- 97.
14. Евстифеев, М.И. Состояние разработок и перспективы развития микромеханических гироскопов / М.И. Евстифеев // Материалы II конференции молодых ученых «Навигация и управление движением». – 2000. – с. 54-71.
15. Пешехонов, В.Г. Микромеханические преобразователи. Современное состояние и применение в военной технике/ В.Г. Пешехонов, Л.П. Несенюк, Д.Г. Грязин //Мехатроника, автоматизации, управление. – 2009. – №3. –С. 28-32.
16. Аман, Е.Э. Автоколебания в измерительной технике: философские аспекты и практические результаты / А.И. Скалон, Е.Э. Аман // Датчики и системы. – 2015. – № 3 (190). – С. 3-8.
17. Урманов, Д. Развитию МЕМС в России необходим положительный импульс/ Д. Урманов //Компоненты и технологии. – 2012. – №4. – С. 65-69.
18. Голощапов, А. Применение МЕМС – технологии в навигации / А. Голощапов // Компоненты и технологии. – 2014. – №4. – С. 65-69.
19. Федутинов, Д. Боевые БЛА за рубежом: современное состояние / Д. Федутинов, А. Фомин // Взлет. – 2007. – №10. – С. 27-31.
20. Колганов, В.Н. Особенности решения проблемы взаимодействия градуировочных и измерительных средств при разработке и серийном производстве линейных акселерометров/ В.Н. Колганов, А.А. Папко, А.Н. Трофимов // Датчики и системы. 2000. – № 7. – С. 70-71.

21. Тыртычный, А. А. Разработка принципов построения и анализ характеристик автоколебательного микромеханического гироскопа: дис. к-та техн. наук : 05.13.05 / Тыртычный Алексей Анатольевич. – СПб., 2014. – 149 с.
22. Левшина, Б. С. Некоторые вопросы расчета погрешностей магнитоэлектрических обратных преобразователей/ Б. С. Левшина // Труды ЛПИ им. М.И. Калинина. – 1961. – № 3. – С. 83-90.
23. Мокров, Е. А. Датчики и преобразующая аппаратура НИИ физических измерений для авиационно-космической техники и других отраслей народного хозяйства/ Е. А. Мокров // Электронные компоненты. – 2003. – №2. – С.35-40.
24. Мокров Е. А. Технологии микромеханики в акселерометрах НИИ физических измерений/ Е. А. Мокров, А. А. Папко, В. Н. Колганов // Труды международной научно-технической конференции. "Искусственный интеллект". – 2001. – № 3. – С. 658-670.
25. Mozhaev, A.S. Theory and practice of Automated structural-logical Simulation of system. International Conference on Informatics and Control, torn 3. St. Petersburg SPNRAS, 1997. — p.1 109-1118.
26. Урманов, Д. Развитию МЭМС в России необходим положительный импульс/ Д. Урманов // Компоненты и технологии. – 2012. – № 10. – С. 10-13.
27. Пешехонов, В. Г. Микромеханические преобразователи. Современное состояние и применение в военной технике/ В. Г. Пешехонов, Л. П. Несенюк, Д. Г. Грязин // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2009. – №3. – С. 28-32.
28. Скалон, А.И. Физические основы и пути оптимизации характеристик электромеханических датчиков компенсационного типа. Ч.2.//А.И. Скалон, Датчики и системы. – 2009. – №1. – С. 7-11.
29. Мокров, Е.А. Проблемы и перспективы развития датчиков аппаратуры/ Е.А. Мокров // Микросистемная техника. – №9. – 2003.
30. Лохин, В. М. Тенденции развития беспилотных летательных аппаратов мини- и микро классов/ В. М. Лохин и др.// Нано- и микросистемная техника. – 2005. – № 2. – С. 44-48.
31. ВУнивере.ру: [сайт]. URL: <http://vunivere.ru/>

32. Файловый сервер: [сайт]. URL: <http://inethub.olvi.net.ua/>
33. Гансвинд, И.Н.. Цикл: [Электронный ресурс] // Институт исследований природы времени: [сайт]. URL: http://www.chronos.msu.ru/old/RREPORTS/gansvind_tsikl.htm [дата обращения 20.05.2018]
34. Распопов В. Я. Демпфирование поперечных колебаний вращающейся по крену ракеты с помощью микрогироскопа / В. Я. Распопов, А. П. Марков, Ю. В. Иванов, Д. М. Малютин, А. А. Горин, Р. В. Алалуев, В. В. Матвеев // Гироскопия и навигация. – 2007. – №1(56). – С. 125-128.
35. Федутинов, Д. Российские беспилотные системы / Д. Федутинов // Национальная оборона. – 2010. – №4. – С. 28-32.
36. Аман, Е.Э. Автоколебания в измерительной технике – некоторые философские аспекты / Е.Э. Аман, А.И. Скалон // Научная сессия ГУАП Сборник докладов, посвященный Всемирному Дню авиации и космонавтики. В 3-х частях. Общая редакция: Ю.А. Антохина. – 2014. – С. 285-289.
37. Тыртычный, А. А. Современные датчики систем управления и навигации// Научная сессия ГУАП: Сб. докл.: В 3 ч. Ч. 1. Технические науки / СПб.: СПбГУАП, 2007. – С. 35-38.
38. Конструкции микромеханических гироскопов и акселерометров инерциального модуля. Отчет о патентных исследованиях. СПб.: ЗАО «Гирооптика», 2005. 73 с.
39. Петропавловский Ю. Современные МЭМС-продукты компании Analog Devices. Часть 1, 2/ Ю. Петропавловский // Элементы и компоненты. – 2015. – № 6,7.
40. Радиоежегодник, 2015, выпуск 34: [сайт]. URL: <https://www.rlocman.ru/forum/kfilesmanager.php?do=downloadfile&dlfileid=513>
41. Пат. 2410703 Российская Федерация. Линейный микроакселерометр [Текст] / Григорьев А.В., Калаурный Я.Н., Скалон А.И.; патентообладатель СПбГУАП. – заявл. 30.06.2009; опубл. 27.01.2011, Бюл. № 3

42. Инерциальные приборы и МЭМС микросхемы компании Analog Devices для систем автоматики, навигации и автомобильной электроники. Часть 2: [сайт]. URL: http://www.uav-g.org/Presentations/UAVg_Eling.pdf
43. Пат. 2063047 Российская Федерация. Акселерометр [Текст] / Курнос В.И., Прокофьев В.М., Ларшин А.С., Андрюхин А.И., Колесников А.А.; патентообладатель Научно-исследовательский институт прикладной механики им.акад.В.И.Кузнецова. – заявл. 06.04.1990; опубл. 27.06.1996
44. Пат. 2399915 Российская Федерация. Угловой акселерометр [Текст] / Орлов А.С., Завиновский Л.А., Скалон А.И.; патентообладатель СПбГУАП. – заявл. 28.04.2009; опубл. 20.09.2010, Бюл. № 26
45. Джашитов В.Э. Расчет температурных и технологических погрешностей микромеханических гироскопов / В.Э. Джашитов, В.М. Панкратов, А.М. Лестев, И.В. Попова // Микросистемная техника. – 2001. – №3. – С. 2-10.
46. Иващенко, Е.И. Метод размерного стоп-травления кремния в производстве изделий микромеханики/ Е.И. Иващенко, Ю.Б. Цветков // Микросистемная техника. 2000. № 1. С. 16-20.
47. Мальцев, П.П. Перспективы разработки микросистемной техники в России [Электронный ресурс] // Нано- и микросистемная техника: [сайт]. URL: <http://www.microsystems.ru/files/publ/462.htm> [дата обращения 20.05.2018]
48. Algorithm for auto-oscillating inertial sensor parameters calculation / E.E. Aman, I.N. Lukjanenko, D.Y. Ershov, A.A. Tyrtychny, // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (MSE), 2019.
49. Аман, Е.Э. Разработка конструктивно-кинематической модели микромеханических акселерометров/ Е.Э. Аман // Вопросы радиоэлектроники. – 2019. – № 10. – С. 17 – 20.
50. Будкин, В. Л. Разработка кремниевых датчиков первичной информации для систем навигации и управления / В. Л. Будкин, В. А. Паршин, С. В. Прозоров и др. // Гироскопия и навигация. – 1998. – №3(22). – С.94-101.
51. Аман, Е.Э. Разработка конструктивной модели и анализ возможности создания микромеханического линейного акселерометра «обращенной» схемы / Е.Э.

- Аман, А.И. Скалон // Проблемы и перспективы развития авиации, наземного транспорта и энергетики «АНТЭ-2015». – 2015. – С. 332-337
52. Назаревич, С.А. Системный анализ технических характеристик формирующих инновационность продукции / С.А. Назаревич, С.Л. Поляков // Системный анализ и логистика. – 2016. – С. 81-86.
53. Программа расчета индуктивности катушек: [сайт]. URL: <http://coil32.ru/faq.html>
54. Аман, Е.Э. Разработка имитационной модели и анализ возможности создания микромеханического линейного акселерометра «обращенной» схемы/ Е.Э. Аман, А.И. Скалон // Вопросы радиоэлектроники. – 2017. – № 5. – С. 40-43.
55. Патент на изобретение №2 509 307 Российской Федерации МПК G01P15/11 от 10.03.2014 Линейный акселерометр //Аман Е. Э., Напольская Н. В., Скалон А. И. Заявитель и патентообладатель СПб ГУАП - № 2012125448/28, 19.06.2012. Оpubл. 10.03.2014. Бюл. № 7. - 4 с., - 1 ил.
56. Скалон, А.И. Физические основы и пути оптимизации электромеханических датчиков компенсационного типа. Ч. I//Датчики и системы. 2008. №11. С. 2-4.
57. Научно-технический центр «Северо-Западная лаборатория »: [сайт]. URL: <http://ferrite.ru/products/magnets/smco/smco-loose/>
58. Аман, Е.Э. Диагностирование качества систем трения механизмов приборов / Е.Э. Аман, Д.Ю. Ершов, И.Н. Лукьяненко // Вопросы радиоэлектроники. – 2019. – № 7. – С. 10-13.
59. Тыртычный, А. А. Выбор элементов конструкции микромеханических автоколебательных инерциальных датчиков/ А. А. Тыртычный // Труды МАИ: электронный журнал. – 2010. – № 38. – С.1-9. 124
60. Аман, Е.Э. Разработка имитационной модели и анализ возможности создания микромеханического линейного акселерометра «обращенной» схемы / Е.Э. Аман, А.И. Скалон // Вопросы радиоэлектроники. – 2017. – № 5. – С. 40-43.
61. Скалон, А.И. Создание микромеханических инерциальных датчиков нового поколения на основе автоколебательных электромеханических систем динамиче-

- ского уравнивания/ А.И. Скалон // Известия ГУАП. Аэрокосмическое приборостроение: науч. журнал. – 2011. – СПб.; ГУАП.
62. Тыртычный, А. Микромеханические гироскопы: состояние разработок и перспективы развития / А. Тыртычный, А. Скалон // Датчики и системы. – 2012. – № 2. – С. 59–68.
63. Аман, Е.Э. Разработка алгоритма расчета характеристик инерциальных датчиков, работающих в режиме автоколебаний / Е.Э. Аман, Д.Ю. Ершов, И.Н. Лукьяненко, А.А. Тыртычный // Сборник докладов «Завалишинские чтения - 2019». – СПб.: ГУАП, 2019. – С. 53-59.
64. Аман, Е.Э. Методика повышения качества функционирования автоколебательного микромеханического акселерометра / Е.Э. Аман // Вопросы радиоэлектроники. – 2019. – № 10. – С. 6 – 10.
65. Вороховский, Я. Прецизионные кварцевые резонаторы и генераторы для современных радиоэлектронных комплексов / Я. Вороховский // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. – 2010. – №1. – С. 34-38.
66. Waters R.L. Factors Influencing the Noise Floor and Stability of a Time Domain Switched Inertial/ Waters R.L., Fralick M., Jacobs D., Abassi S., Dao R., Carbonari D., Abramov G., Maurer G. // Position Location and Navigation IEEE Symposium - PLANS, 2012, pp. 1099-1105.
67. Вавилов В.Д. Настройка корректирующего устройства в контуре микродатчика/ В.Д. Вавилов, А.В. Улюшкин // Труды НГТУ им. Р.Е.Алексеева. – 2010. – № 2(81). – С. 345-350.
68. Aman E. E., Defining free damped oscillation in technological systems / E.E. Aman, I.N. Lukyanenko, D.Y. Ershov, A.O. Smirnov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (MSE), 537 (3), 2019. № 032035
69. Шестаков, А.В. Модели, алгоритмы и структуры систем оптимального управления синхронными электрическими машинами: дис. к-та техн. наук: 05.13.01 / Шестаков Александр Вячеславович. – Киров, 2001. – 173 с.

70. Исафилова, А.И. Погрешность измерений или неопределенность измерений? / А.И. Исафилова, Л.Н. Ломакина // 65-я научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых УГНТУ. – 2014. – 248 с.
71. Евстифеев, М. И. Теория и методы расчета упругих подвесов инерциальных чувствительных элементов приборов навигации: дис. д-ра техн. наук : 05.11.03 / Евстифеев Михаил Илларионович. – СПб., 2007. – 340 с.
72. Патент №2175773. Российская Федерация. Гравитационный вариометр// Вольфсон Г.Б., Евстифеев М.И., Пешехонов В.Г., Розенцвейн В.Г., Щербак А.Г.4 заявл. 24.04.20004 опубл. 10.11.2001. бюл. №31. – 5с.
73. Норникель: [сайт]. URL: <https://www.nornickel.ru/>
74. ОАО Соликамский магниевый завод: [сайт]. URL: <http://смз.рф>
75. Редкоземельные металлы России 2017 год: [сайт]. URL: <https://nedradv.ru/nedradv/ru/resources/?obj=ab05b068239ede80d3dd35cf406b4000>
76. Цены мирового рынка на металлы и сырье: [сайт]. URL: <http://www.infogeo.ru/metalls/worldprice/?act=rzm>
77. Metal Research/ Металлургические исследования: [сайт]. URL: http://www.metalresearch.ru/rare_earth_2019.html
78. Абрамов И.И. Проблемы и принципы физики и моделирования приборных структур микро- и наноэлектроники. Часть 1. Основные положения / И.И. Абрамов // Нано- и микросистемная техника. – № 8. – 2006. – С. 34-37
79. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Изд-во стандартов, 1999. 35 с.
80. ГОСТ 18955-73. Акселерометры низкочастотные линейные. Термины и определения. М. : Изд-во стандартов, 1973. 12 с.
81. Ермолаев, М.В. Обеспечение прецизионной калибровки бортовых и наземных навигационных и измерительных систем космического комплекса системы ГЛОНАСС/ М.В. Ермолаев, Д.И. Марарескул, Е.В. Ислентьев // Решетневские чтения. т.1. Красноярск. – 2016. – С. 265 – 267.

82. Ицкович, Э. Современные датчики и тенденции их развития/ Э. Ицкович // Электронные компоненты. – 2003. – С. 23-26.
83. Сравнение неодимовых, самариевых и AlNiCo магнитов: [сайт]. URL:https://magnit96.com/blog/article/sravnenie_neodimovyh_samarievyyh_i_alnico_magnitov/
84. Ривкин, Б.С. Аналитический обзор состояния исследований и разработок в области навигации за рубежом/ Б.С. Ривкин. – СПб: ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2017. – 58 с.
85. Бабур, Н. Направления развития инерциальных датчиков / Н. Бабур, Д. Шмидт // Гироскопия и навигация. – 2000. – №1. – С. 3-15.
86. Шевцова, Е.В. Газовое демпфирование в микромеханических приборах/ Е.В. Шевцова // Вестник МГТУ им. Баумана. №2(63). – 2006. – С. 100-111.
87. Geiger W. Decoupled Microgyros and the Design principle DAVED / W. Geiger [et al.] // Sensor and Actuators. – 2002. – №95. – pp. 239-249.
88. Nenuda.ru: [сайт]. URL: <http://nenuda.ru/>
89. Аман, Е.Э. Теоретический базис и конструктивно-кинематические схемы микромеханических инерциальных автоколебательных датчиков/ А.И. Скалон, А.А. Тыртычный, Е.Э. Аман, С.Р. Карпиков, И.Н. Лукьяненко // Датчики и системы. – 2016. – № 7 (205). – С. 3-9
90. Аман, Е.Э. Имитационная модель мониторинга процесса эксплуатации автоколебательных микромеханических акселерометров / Е.Э. Аман, А.О. Смирнов // Наука и бизнес: пути развития. – 2019. – № 7. – С. 28 – 31.
91. Антонов, А. Ю. Общая физика (электричество и магнетизм). Электронный учебник, СПбГУ, СПб, 2014 http://www.apmath.spbu.ru/ru/staff/antonov/files/em_antonov2.pdf
92. Магнитная проницаемость основных материалов, таблица. : [сайт]. URL:<https://www.dpva.ru/Guide/GuidePhysics/ElectricityAndMagnetism/MagneticPermeability/MagneticPermeabilityGeneralTable/>
93. ГОСТ Р 50648-94 Устойчивость к магнитному полю промышленной частоты. - М.: Издательство стандартов, 1994. - 19 с.

94. IEC/EN 61000-4-8 Испытания на устойчивость к магнитному полю промышленной частоты – Минск: Госстандарт, 2013. – 30 с.
95. Аман, Е.Э. Расчет магнитоэлектрического преобразователя микромеханического акселерометра «обращенной» схемы/ А.И. Скалон, Е.Э. Аман // Измерения и испытания в судостроении и смежных отраслях. СУДОМЕТРИКА-2016 Тезисы докладов. 2016. С. 65-68
96. Аман, Е.Э. Исследование влияния магнитного поля на работу автоколебательного микромеханического акселерометра с «обращенным датчиком силы» / Е.Э. Аман, А.И.Скалон // в сборнике Измерения и испытания в судостроении и смежных отраслях СУДОМЕТРИКА-2016. Материалы Шестой международной научно-технической конференции. Под общей редакцией В.А. Грановского. 2016. С. 76-82.
97. Черnodаров, А.В. Улучшение эксплуатационных характеристик интегрированных навигационных систем на основе сильносвязанных схем демпфирования ошибок чувствительных элементов/ А.В. Черnodаров, А.П. Патрикеев, С.М. Гладкий, С.Л. Булгаков, Ю.П. Миеенков, Ю.Д. Голяев, Ю.Ю. Колбас // Гороскопия и навигация. Концерн ЦНИИ «Электроприбор». – № 3(54). – 2006. – С. 91-92.
98. Электроника, микро и нано электроника: 6-я Российская научно-техническая конференция под ред. Степина В.Я: Сборник докладов. – Нижний Новгород, 2004. – 336 с.
99. Электроника: Наука, технология, бизнес. – АО РИЦ «Техносфера», 2004. – №6 (56). – 105 с.
100. Аман, Е.Э. Расчет тепловых характеристик микромеханического акселерометра «обращенной» схемы / Е.Э. Аман, А.И. Скалон // Датчики и системы. – 2016. – № 8 (171). – С. 76-82
101. Алексеева, В. В. Повышение разрешающей способности и стабильности метрологических характеристик микромеханических акселерометров/ В. В. Алексеева, А. А. Папко, М. А. Калинин, И. В. Кирянина, С. В. Шепталиня // Измерительная техника. – 2011. – №3. – С.16-19.

102. Барулина, М.А. Математическая модель микромеханического акселерометра с учетом температурных воздействий, термоупругого напряженно-деформированного состояния и динамических эффектов/ М.А. Барулина, В.Э. Джашитов, В.М. Панкратов, М.А. Калинин, А.А. Папко // Гироскопия и навигация. – 2008. – №1(60). – С.55-70.
103. Dulnev, G.N. The theory of thermal Regular Regime and its application to the determination of thermal characteristics/ G.N. Dulnev // International journal of heat and mass transfer, 1960. – № 2-3. – С. 152-160.
104. Пылаев, Ю.К. Температурные возмущения бесплатформенной инерциальной навигационной системы с волоконно-оптическими гироскопами: дис. к-та техн. наук: 05.11.03 / Пылаев Юрий Константинович. – Саратов, 2004. – 269 с.
105. Трофимов, А.А. Взаимоиндуктивные преобразователи перемещений, работоспособные в широком диапазоне температур: дис. к-та техн. наук: 05.11.01 / Трофимов Алексей Анатольевич. – Пенза, 2004. – 171 с.
106. Аман, Е.Э. Методика оценивания тепловых характеристик микромеханического акселерометра «обращенной» схемы/ Е.Э. Аман, А.И. Скалон // Датчики и системы. – 2013. – № 8 (171). – С. 27-32
107. Аман, Е.Э. Диагностирование качества систем трения механизмов приборов / Е.Э. Аман, Д.Ю. Ершов, И.Н. Лукьяненко // Вопросы радиоэлектроники. – 2019. – № 7. – С. 10-13.
108. Аман, Е.Э. Теоретический базис и конструктивно-кинематические схемы микромеханических инерциальных автоколебательных датчиков / Е.Э. Аман, С.Р. Карпиков, И.Н. Лукьяненко, А.И. Скалон, А.А. Тыртычный // Датчики и системы. – 2016. – № 7 (205). – С. 3-9.

ПРИЛОЖЕНИЕ. АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ



УТВЕРЖДАЮ
Генеральный директор
АО «Лазерные системы»

А.В Морозов

17.09.2018

АКТ

Об использовании результатов диссертационной работы
АМАН Елены Эдуардовны
«Модели и методики управления результативностью создания автоколебательных
микромеханических акселерометров»,

Комиссия в составе: научного руководителя предприятия д.т.н. профессора А.С. Борейшо (председатель комиссии) и членов: директора по качеству В.С. Лугиня, директора по производству к.т.н. И.М. Евдокимова, руководителя ПФО к.э.н. В.Ш. Теляшовой составила настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы «Модели и методики управления результативностью создания автоколебательных микромеханических акселерометров»:

- конструктивно-кинематическая модель микромеханических акселерометров;
- методика повышения результативности процесса создания автоколебательного микромеханического акселерометра, были внедрены в АО «Лазерные системы» и используются в планировании производства серийных изделий предприятия.

Внедрение указанных результатов позволило расширить диапазон измерений в 1,5 раза, уменьшить смещения «нуля» на 30%, добиться снижения нестабильности коэффициента преобразования до 0,05% за счет реализации автоколебательных режимов и введения существенно нелинейного звена, отказаться от вакуумирования и герметизации, что снижает производственные затраты на 20-23%.

Председатель комиссии

д.т.н., профессор

А.С. Борейшо

Члены комиссии

Директор по качеству

В.С. Лугиня

Директор по производству к.т.н.

И.М. Евдокимов

Руководитель ПФО к.э.н.

В.Ш. Теляшова



ОМП ЭНЕРГОПРОГРЕСС
Закрытое Акционерное Общество

198184, Санкт-Петербург, Канонерский остров, д. 22, лит. А,
пом. 4-Н
Р/с № 40702810322110000174 в филиале «С-ПЕТЕРБУРГСКА
ДИРЕКЦИЯ ОАО «УРАЛСИБ» г. САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
Корр. счет № 3010181080000000706, БИК 044030706,
ИНН 7805610668 КПП 780501001

АКТ

Об использовании результатов диссертационной работы
АМАН Елены Эдуардовны
«Модели и методики управления результативностью создания автоколебательных
микромеханических акселерометров»,

Комиссия в составе

Председатель – зам. директора Назаров Д. В.

Члены комиссии:

1. Директор по качеству Спиваченко С. А.
2. Нач. отдела КИПиА Сакович И. И.

Составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы «Модели и методики управления результативностью создания автоколебательных микромеханических акселерометров»:

- имитационная модель мониторинга процесса эксплуатации автоколебательных микромеханических акселерометров;
- методика повышения качества функционирования автоколебательных микромеханических акселерометров.

Внедрение указанных результатов позволило:

- проводить расчет и анализ характеристик микромеханических акселерометров на этапе проектирования;
- добиться расширения диапазона измерений датчика в 1,5 раза;
- создать саморегулирующуюся систему за счет реализации автоколебательных режимов.
- сформировать диапазон условий эксплуатации микромеханического акселерометра под требования заказчика.

Председатель комиссии Назаров Д. В.

08.11.2018

Члены комиссии

1. Спиваченко С. А.
2. Сакович И. И.



Акционерное общество
«Научно-производственное предприятие «Радар-ммс»»

197375, Россия, Санкт-Петербург
ул. Новосельковская, д. 37, лит. А
тел.: +7 (812) 777-50-51
факс: +7 (812) 600-04-49
e-mail: radar@radar-mms.com
www.radar-mms.com

*Иск. № 090-171-0
от 16 мая 2019 г.*

УТВЕРЖДАЮ
ВрИО Генерального директора –
генерального конструктора

С.М. Нефедов

16.05.2019 г.



АКТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

результатов диссертационной работы АМАН Елены Эдуардовны
«Модели и методики управления результативностью создания
автоколебательных микромеханических акселерометров»

Комиссия в составе

Председатель:

Бундин Г.Г. – старший научный сотрудник, докт.техн.наук, доцент.

Члены комиссии:

Коновалова В.С. – ведущий специалист Центра (091), канд.техн.наук,
доцент;

Полтарак А.А. - руководитель группы (0921);

Стовпец Ю.В. - главный специалист Центра (091).

составила настоящий акт о том, результаты диссертационной работы
Аман Е.Э. «Модели и методики управления результативностью
создания автоколебательных микромеханических акселерометров»:

- методика повышения результативности процесса создания автоколебательного микромеханического акселерометра;
 - методика повышения качества функционирования автоколебательных микро-механических акселерометров
- использованы при выполнении НИОКР «Разработка базовых конструкций чувствительных элементов и микроэлектромеханических систем для измерения давления, температуры, микроперемещений, угловой скорости и угла наклона на различные диапазоны измеряемых величин для комплексов мониторинга безопасности объектов» шифр «База-МСТ» ФЦП «Развитие электронной компонентной базы и радиоэлектроники.

Использование указанных результатов позволило:

- увеличить диапазон измерений микромеханического акселерометра в 1,5 раза;
- сократить трудоемкость процесса производства в среднем на 20%, за счет отказа от вакуумирования;
- адаптировать диапазон условий эксплуатации микромеханического акселерометра по требованиям Заказчика.

Председатель комиссии:



Г.Г. Бундин

Члены комиссии:



В.С. Коновалова



А.А. Полтарак



Ю.В. Стовец



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
 федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
 «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения»
 (ГУАП)

Санкт-Петербург

№ _____



УТВЕРЖДАЮ
 Ректор ГУАП

Ю.А. Антохина
 Ю.А. Антохина
 «24» 06 2019 г.

АКТ О ВНЕДРЕНИИ

результатов диссертационной работы

Аман Елены Эдуардовны

«Модели и методики управления результативностью создания автоколебательных микромеханических акселерометров»,

Комиссия в составе

Председатель –

Заместитель заведующего кафедры высшей математики и механики, к.т.н.,
 доцент Ю.А. Гусман;

Члены комиссии:

профессор кафедры высшей математики и механики, д.т.н., доцент
 Л.П. Вершинина;

доцент кафедры высшей математики и механики к.т.н., доцент
 О.В. Опалихина

составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Аман Е.Э. «Модели и методики управления результативностью создания автоколебательных микромеханических акселерометров», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук:

- конструктивно-кинематическая модель реализации технических решений на этапе создания микромеханических акселерометров;
- методика повышения результативности процесса создания автоколебательного микромеханического акселерометра;

– имитационная модель мониторинга процесса эксплуатации автоколебательных микромеханических акселерометров;

– методика повышения качества функционирования автоколебательных микромеханических акселерометров;

использованы в деятельности Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения».

Материалы диссертационной работы Аман Елены Эдуардовны были использованы в учебном процессе в дисциплинах «Механика», «Теоретическая механика», «Прикладная механика», «Модели прикладной механики в приборостроении и мехатронике» на кафедре №1 Высшей математики и механики для подготовки студентов по направлениям 27.03.01 «Стандартизация и метрология», 27.03.02 «Управление качеством», 20.03.01 «Техносферная безопасность», 01.04.02 «Прикладная математика и информатика».

Председатель комиссии

к.т.н., доцент

Члены комиссии

Ю.А. Гусман

д.т.н., доцент

Л.П. Вершинина

к.т.н., доцент

О.В. Опалихина