

На правах рукописи



Аман Елена Эдуардовна

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

Специальность 05.02.22 – Организация производства
(радиоэлектроника и приборостроение)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Санкт-Петербург – 2019

Работа выполнена на кафедре высшей математики и механики Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения».

Научный руководитель: **Смирнов Александр Олегович**
доктор физико-математических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Тимошенко Сергей Петрович**
доктор технических наук, профессор,
директор института нано- и микросистемной техники
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский
университет «Московский институт электронной
техники»

Деркач Михаил Михайлович
кандидат технических наук, ведущий инженер-технолог
научно-производственного комплекса микроэлектроники,
микросистемотехники и нанотехнологий АО «Научно-
производственное предприятие «Радар ммс»

Ведущая организация: Акционерное общество «Концерн «Моринформсистема-Агат», 105275, Москва, шоссе Энтузиастов, 29

Защита состоится 10 декабря 2019 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.233.04 при Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» по адресу: 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д.67, лит. А., ауд.53-01.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» по адресу: 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д.67, лит. А. Автореферат и текст диссертации размещены на сайте университета

Автореферат разослан «21» октября 2019 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.233.04
кандидат технических наук, доцент



Фролова Е.А.

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

В настоящее время усиливается потребность в более надежных и точных микроэлектромеханических системах (МЭМС) в подвижных объектах (ПО): малые космические аппараты, автотранспорт и железнодорожный подвижной состав, судостроение и автономные подводные аппараты, сельскохозяйственные аппараты, робототехника и т.д. Появление малогабаритных беспилотных аппаратов привело к необходимости создания миниатюрных, прецизионных приборов для инерциальных навигационных систем (ИНС). В производстве акселерометров для решения этой задачи используют различные конструктивные, технологические приемы, но чаще вводят схемы компенсации погрешностей и нелинейностей, вызванных аналоговыми компонентами. Такое решение, как правило, сопровождается увеличением массы и габаритов устройств.

Повышение качества и конкурентоспособности МЭМС осуществляется за счет разработки измерительных устройств, использующих новые физические принципы и современные достижения в области науки и техники.

Отечественные МЭМС-датчики в рамках импортозамещения нуждаются в широкой номенклатуре чувствительных элементов (ЧЭ), существенно различающихся по части принципов построения, применении отечественной элементной базы и частичном отказе от традиционных решений. Постановление Правительства Российской Федерации от 15 апреля 2014 г. № 328 «Об утверждении государственной программы Российской Федерации «Развитие промышленности и повышение ее конкурентоспособности»» в рамках программы «Развитие транспортного и специального машиностроения» (ред. от 29.03.2019 № 355 - 23) указывает на необходимость создания конкурентоспособной техники, соответствующей современному международному уровню требований по безопасности, экологичности и экономичности; программы «Содействие проведению научных исследований и опытных разработок в гражданских отраслях промышленности» (ред. от 29.03.2019 № 355 - 23), где в целях программы обозначено создание конкурентоспособных технологий, их внедрение в промышленное производство гражданских отраслей промышленности.

Степень разработанности проблемы

Микроакселерометры разрабатываются на многих отечественных и зарубежных предприятиях (Honeywell, Analog devices, STmicroelectronics, Bosch). Среди российских учёных, наиболее близкими по тематике являются труды Распопова В. Я., Скалона А.И., Ватутина В.А., Пятышева Е. Н., Тимошенкова С. П., Попова И.В., Филатова Ю.В., Лукьянова Д.П., Пешехонова В.Г., Небылова А.В., Корлякова А.В. и др. Тем не менее, в научной литературе недостаточно внимания уделяется акселерометрам, принцип нахождения ускорения которых основан на измерении временных параметрах для датчикам такого типа относятся и автоколебательные акселерометры.

Наиболее близкие по технической сути разработки датчиков ускорения, использующих ключевой режим работы, показавшие их преимущества, проводятся в ряде ведущих зарубежных научно-исследовательских центров, таких как SPAWAR Systems Center Pacific и лаборатории калифорнийского университета в США (R.L. Waters, P. Swanson, A. Wang) и национального университета Сеула.

Появление различных малогабаритных беспилотных аппаратов формирует потребность создания новых микромеханических датчиков, однако зачастую все они могут работать в строго определенных условиях. Возможность создания датчиков, сохраняющих малые габариты и точностные характеристики при различных условиях эксплуатации, обеспечивается внедрением методик управления результативностью, позволяющих преобразовать процесс производства, задавая параметры на этапе его планирования.

В ряде работ представлены устройства, работающие в режиме автоколебаний, однако преимуществом предлагаемого датчика является новые конструкторско-технологические решения микромеханического акселерометра, который, за счет введения полюсных наконечников, позволил замкнуть магнитное поле в толще корпуса, уменьшив «утечки», а сама конструкция позволяет не только отказаться от вакуумирования, но и значительно упростить подачу тока к токопроводящим дорожкам, упрощая процесс изготовления датчика, повышая его надежность.

В связи с изложенным представляется актуальным проведение исследований методов, алгоритмов и процедур создания автоколебательных микромеханических акселерометров, обладающих повышенной точностью в сложных эксплуатационных условиях.

Актуальность выполненного исследования подтверждается также его соответствием направлениям, включенным в Перечень критических технологий Российской Федерации: «Технологии информационных, направляющих, навигационных систем», «Технологии наноустройств и микросистемной техники», «Технологии создания высокоскоростных транспортных средств и интеллектуальных систем управления новыми видами транспорта».

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 микромеханических 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 планирования 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 автоколебательного микромеханического акселерометра (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 (АММА) на этапе планирования производства.

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались на следующих научных конференциях:

1. Научная сессия ГУАП, Санкт-Петербург (2012, 2014).
2. Измерения и испытания в судостроении и смежных отраслях. СУДОМЕТРИКА, Санкт-Петербург (2014, 2016).
3. 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).
4. Современное машиностроение: Наука и образование, Политехнический университет, СПб, 2019 г.
5. «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.

II. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы, уточнены перспективы развития рынка МЭМС, сформулированы цель и задачи работы, методы исследования, научная новизна работы, теоретическая и практическая значимость, сведения об апробации и внедрении результатов исследования.

В первой главе «Микромеханические акселерометры как элементы систем управления подвижными объектами» показано, что ММА широко используются в различных системах управления в качестве датчиков, позволяющих получить информацию о параметрах движения подвижных объектов (ПО). Обзор микромеханических инерциальных датчиков первичной информации подтвердил, что наиболее точные приборы не обладают малыми габаритами и часто ограничены конкретными областями применения, внешними воздействующими факторами, условиями эксплуатации и т.д. Установлена потребность в создании приборов на основе отечественной элементной базы, обладающих в совокупности, лучшими, чем существующие аналоги характеристиками (габариты, точность, стоимость), предпроектировочный процесс создания показан на рисунке 1.



Рисунок 1 – Межуровневая декомпозиция предпроизводственных процессов по созданию ММА

Реализация предложенной в работе концепции построения автоколебательный приборов дает возможность:

- существенно упростить структуру приборов, используя схемы, работающие на постоянном токе;
- использовать для формирования контура приборов новые для микромеханики элементы: магнитоэлектрические компенсирующие преобразователи и фотоэлектрические датчики перемещения;
- разорвать однозначную связь между полосой пропускания контура и точностью датчика положения, существующую в приборах с линейным контуром управления.
- минимизировать вид и время переходного процесса, доведя его при оптимальном законе управления до одного периода автоколебаний,
- работать в дорезонансном режиме,
- отказаться от вакуумирования внутреннего объема микромеханических датчиков.

Режим автоколебаний позволяет иначе подойти к процессу измерения ускорения, поскольку регистрируемой величиной становится время, а не амплитуда перемещения.

Повышение результативности процессов проектирования МЭМС особенно важно в настоящее время, когда бурное развитие микромеханики диктует необходимость создавать все новые приборы в условиях непрерывного роста требований к их техническим характеристикам.

Во второй главе «Разработка конструктивно-кинематической модели и выбор характеристик элементов автоколебательного микромеханического акселерометра» представлена разработанная конструктивно-кинематическая модель микромеханических акселерометров.

Конструктивно-кинематическая модель (ККМ) АММА ОДС позволяет произвести предварительный анализ организационно-технических решений, представлена на рисунке 1. Подвижная инерционная масса (ИМ), представляющая собой пластину из монокристаллического кремния с двумя прямоугольными оптическими щелями, закреплена на упругих подвесах в несущей раме. Основание и крышка прибора представляют собой магнитопровод с полюсными наконечниками, служащими для замыкания линий магнитного поля, слоем изолятора и токопроводящих дорожек. Введение в контур прибора нелинейного звена приводит к формированию в цепи обратной связи биполярного электрического сигнала, под действием которого ИМ совершает гармоническое движение с широтно-импульсной модуляцией сигнала на выходе ключа. Этот сигнал несет информацию об измеряемом ускорении. Применение такой ККМ обеспечивает ресурсосбережение за счет отказа от трудозатратных процедур вакуумирования и герметизации, сократить трудоемкость производства на 20-23%.

Массогабаритные характеристики датчика представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Массогабаритные характеристики датчика

Параметр	Значение
Длина, мм	7,5
Ширина, мм	7,5
Высота, мм	2,16
Масса, г	0,4

Для оценки результативности процесса создания предложены показатели и критерии оценки ММА (таблица 2).

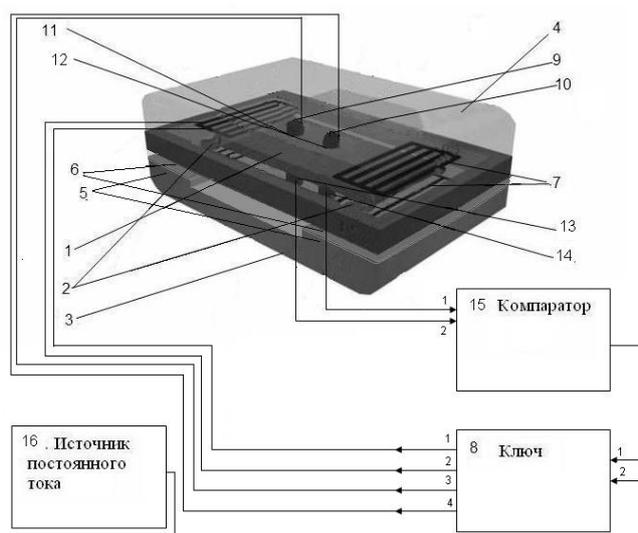


Рисунок 2 – Конструктивно-кинематическая схема АММА ОДС:

1 – постоянный магнит; 2 – упругие подвесы; 3 – основание; 4 - крышка; 5 – выступы магнитопровода; 6 – полюсные наконечники; 7 – токопроводящие дорожки (плоские катушки); 8 – ключ; 9 – первый светодиод; 10 – второй светодиод; 11 – первая оптическая щель; 12 – вторая оптическая щель; 13 – первый фотоприемник; 14 – второй фотоприемник; 15 – компаратор; 16 – источник постоянного тока

Для создания устройства для навигации и управления движением в СУ ПО сформирована структура базы элементов, определяющих показатели результативности ММА.

Обоснован выбор упругого элемента переменного сечения для подвеса инерционной массы (ИМ) (рисунок 3).

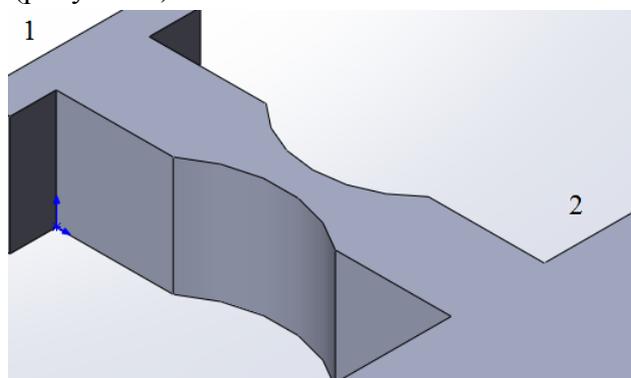


Рисунок 3 – Упругий элемент переменного сечения АММА ОДС, где 1- корпус, 2 – ИМ

По результатам анализа отечественной элементной базы уточнены элементы (Таблица 3), удовлетворяющие требуемым показателям результативности ММА.

Таблица 2 – Показатели результативности ММА и критерии их оценки

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

Таблица 3 – Элементное описание ММА

Элемент		Материал (торговая марка или форма)
Инерционная масса	Магнитный слой	Постоянный магнит, самарий-кобальт (СМ180/1000)
	Подложка	Кремний
Токопроводящие дорожки		Медь (медный порошок)
Магнитопровод		Сталь (47НК)
Изолятор		Эпоксидная смола
Упругий подвес		Кремний (переменного сечения)
Датчик положения	Излучатель	АЛ102Б (светодиод)
	Фотоприемник (фототранзистор или фотодиод)	КТФ-109А (фототранзистор) Специальные ФД

В случае, когда ширина подвеса b существенно меньше остальных геометрических параметров подвеса, движение ИМ ограничено одной степенью свободы – поступательного перемещения вдоль оси OX , радиус $r = 0,02$ м.

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.

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

Коэффициент демпфирования подвержен изменениям за счет введения короткозамкнутого витка. Например, виток из меди площадью $S = 25$ мм², с соотношением $l/S_{min} = 0,6$ позволяет получить значение суммарного коэффициента демпфирования $\mu_x = 8 \cdot 10^{-4}$ Н·м/с.

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

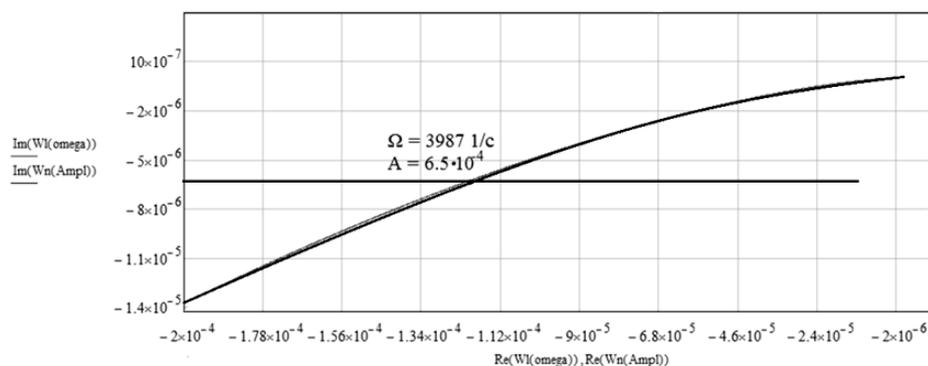


Рисунок 4 – Параметры автоколебаний при полученном коэффициенте демпфирования (амплитудно-частотная характеристика (АЧХ))

Возможность изменять параметры автоколебаний за счет введения короткозамкнутого витка и изменения его параметров позволило регулировать такие характеристики датчика, как демпфирование, частота и амплитуда колебаний ИМ.

Представленная модель процесса проектирования (рис. 5, 6) позволила уточнить комплект конструкторской и эксплуатационной документации, произвести оценку характеристик ККМ, выявить необходимость корректировки элементной базы.

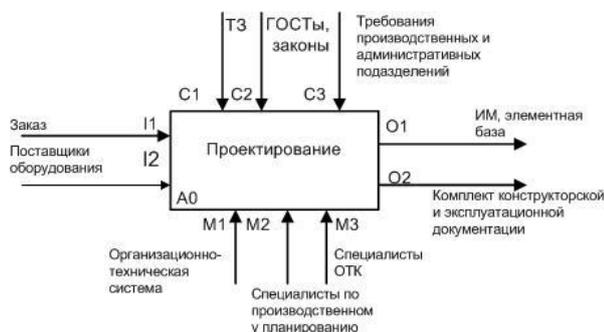


Рисунок 5 – Модель процесса проектирования

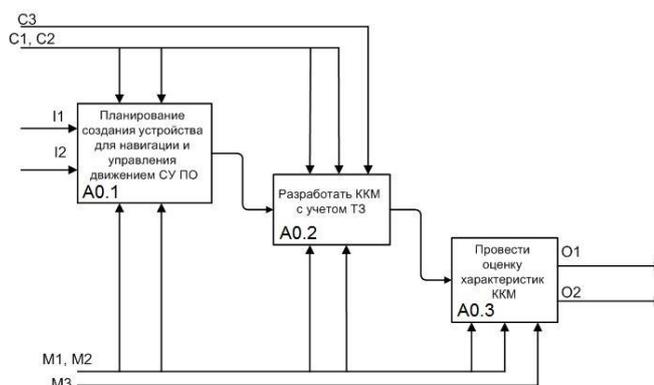


Рисунок 6 – Декомпозиция модели процесса создания ММА

В третьей главе «Повышение результативности процесса создания микромеханических акселерометров» разработана методика повышения результативности процесса создания автоколебательного микромеханического акселерометра и имитационная модель мониторинга процесса эксплуатации автоколебательных микромеханических акселерометров (рис. 8).

Предложенная и разработанная методика повышения результативности процесса создания АММА позволяет управлять результатом процесса создания АММА.

Уравнение собственного движения $Q(p) + R(p)\Phi(x, px) = 0$, преобразуется в

$$(T_2 p + 1)(T_1^2 p^2 + 2\xi T_1 p + 1) x = k_{\text{ДС}} \Phi(x, px) \quad (1),$$

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

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

В основу предварительного анализа системы положен частотный способ определения параметров периодического решения, основанный на исследовании амплитудно-фазовой частотной характеристики разомкнутой системы $W(j\omega) = W_n(j\omega)W_n(A)$. Метод гармонической линеаризации позволил заменить нелинейную часть выражением $W_n(A) = q(A, \omega) + jq'(A)$, где q и q' – коэффициенты, зависящие от типа нелинейности. Согласно (1), $W(j\omega) = R(j\omega)/Q(j\omega)[q(A, \omega) + jq'(A)]$. Предложенная методика позволяет менять коэффициенты линейной и нелинейной частей, добиваясь устойчивости автоколебаний.

Полученное решение закладывается в основу имитационного моделирования, позволяя уточнить параметры автоколебаний и оценить датчик в различных условиях эксплуатации.

Имитационная модель учитывает влияние магнитных (рис. 7) и тепловых полей, параметры ДС (таблица 4), позволяя осуществлять мониторинг АММА при воздействии эксплуатационных факторов.

Результаты имитационного моделирования и аналитического расчета показали, что значение индукции в зазоре будет равно 0,02 Тл.

При проведении расчетов использованы значения параметров модели прибора, сведенные в таблицу 5.

Имитационная модель построена на основании уравнения (1), имеет следующий вид (рис. 7) и позволяет осуществлять мониторинг процесса эксплуатации на этапе проектирования датчика

Таблица 4 – Параметры датчика силы

Параметр	Величина параметра
Длина пластины магнита, l , м	$5 \cdot 10^{-5}$
Площадь поверхности магнита, S , м ²	$25 \cdot 10^{-6}$
Величина зазора между полюсным наконечником и ИМ, Δ , м (не более)	$20 \cdot 10^{-6}$

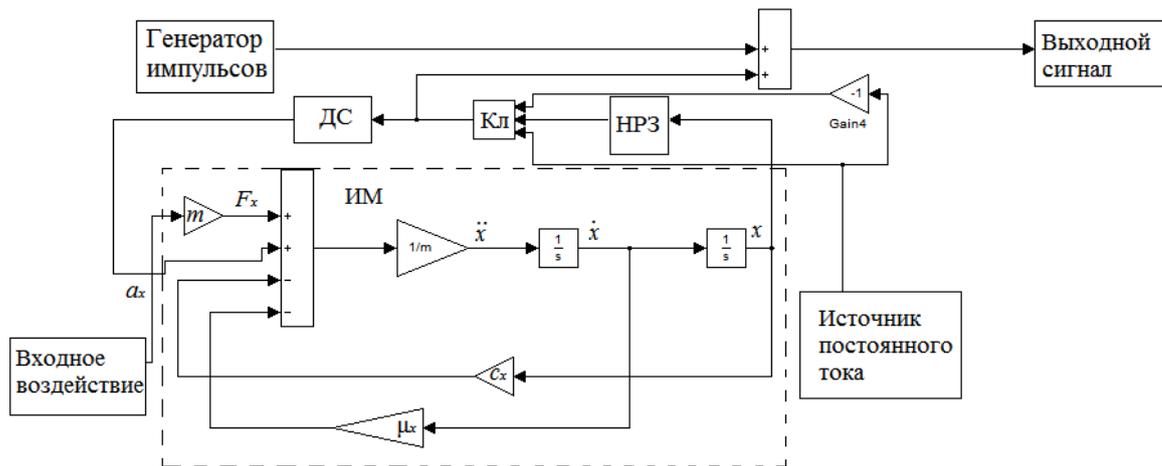


Рисунок 7 – Имитационная модель АММА ОДС

Создание «обращенных» типов ДС дает возможность существенно расширить диапазон измерений и минимизировать погрешности датчиков, а также реализовать автоколебательные режимы.

Результаты анализа силовых характеристик различных типов ДС (таблица 6) подтвердили преимущества предложенного «обращенного» датчика силы.

Параметры автоколебаний исследованы с применением амплитудно-частотного метода и представлены на рисунке 10.

Точка пересечения данных графиков определяет искомое решение: циклическая частота $\Omega = 2198 \text{ 1/с} = 350 \text{ Гц}$ и амплитуда $A = 3,2 \cdot 10^{-4} \text{ м}$.

Совокупность графоаналитического метода определения параметров автоколебаний и построения имитационной модели позволила уточнить значения коэффициентов (демпфирования $\mu_x = 8 \cdot 10^{-4} \text{ Н}\cdot\text{с/м}$ и жесткости $c_x = 5 \text{ Н/м}$), обеспечивающих автоколебания заданной частоты $\Omega = 2198 \text{ 1/с}$ и амплитуды $A = 3,2 \cdot 10^{-4} \text{ м}$.

Полученные результаты моделирования (рис. 11, 12) подтвердили целесообразность выполненной коррекции параметров элементной базы.

В ходе диссертационного исследования проведено моделирование ИМ в пакете ANSYS, подтверждена возможность реализации датчика с учетом перемещения инерционной массы (рисунок 13).

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.

Таблица 5 – Параметры модели прибора

Обозначение параметра	Значение параметра
Масса ИМ, m , кг	$4,15 \cdot 10^{-6}$
Сила Ампера, F_a , Н	0,037
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 выступа магнитопровода, l , м	$5 \cdot 10^{-3}$
Ширина выступа магнитопровода, b_0 , м	$2,5 \cdot 10^{-3}$
Ширина токопроводящей дорожки, b , м	$22,8 \cdot 10^{-6}$
Толщина слоя токопроводящих дорожек, h , м	$10 \cdot 10^{-6}$

Таблица 6 – Результаты анализа силовых характеристик различных типов ДС

Вид ДС	Максимальное значение силы, мкН
Электростатический	3,2
Магнитоэлектрический	150,0
«Обращенный»	3690,0

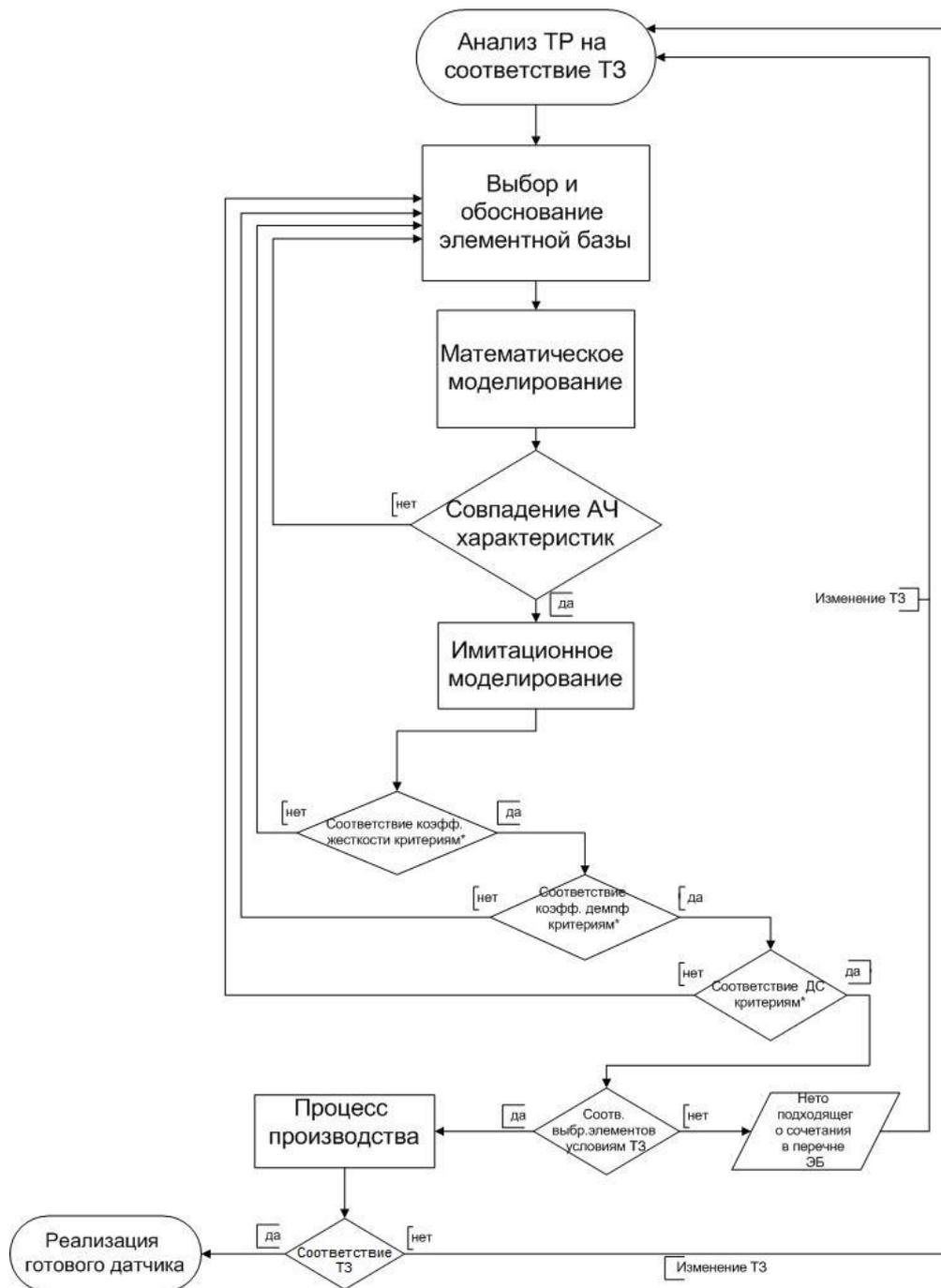


Рисунок 8 – Алгоритм методики повышения результативности

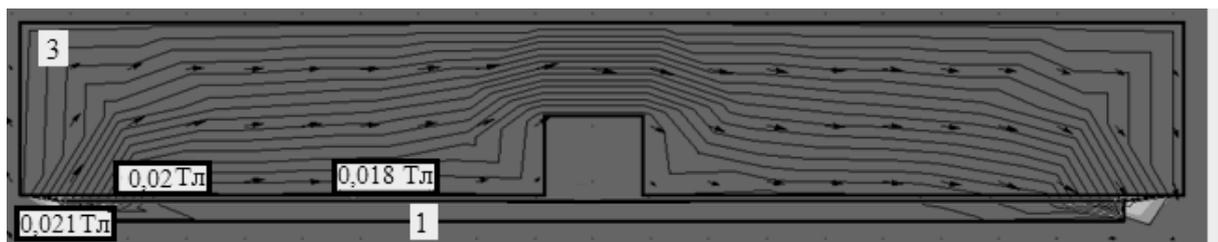


Рисунок 9 – Распределение магнитного поля в ОДС

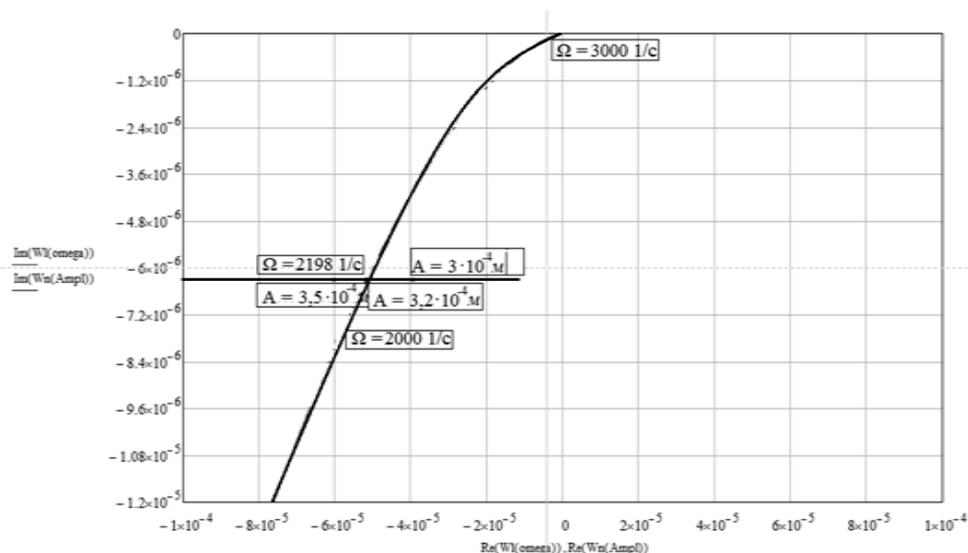


Рисунок 10 – АЧХ линейной части АХ нелинейной части системы

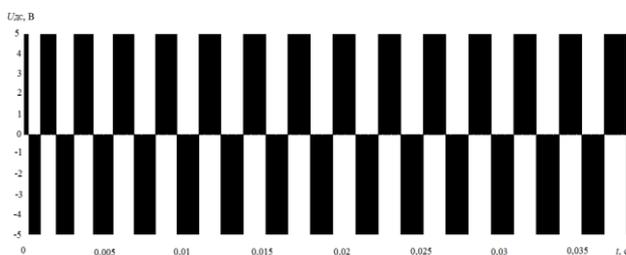


Рисунок 11 – Формирование импульсов при нулевом входном воздействии

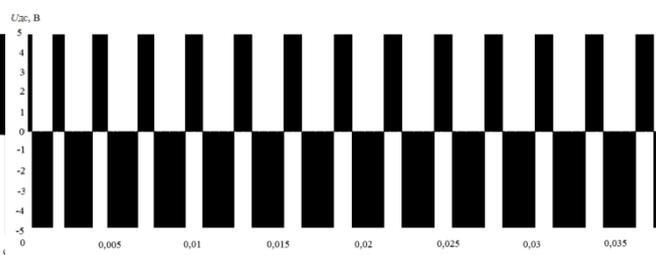
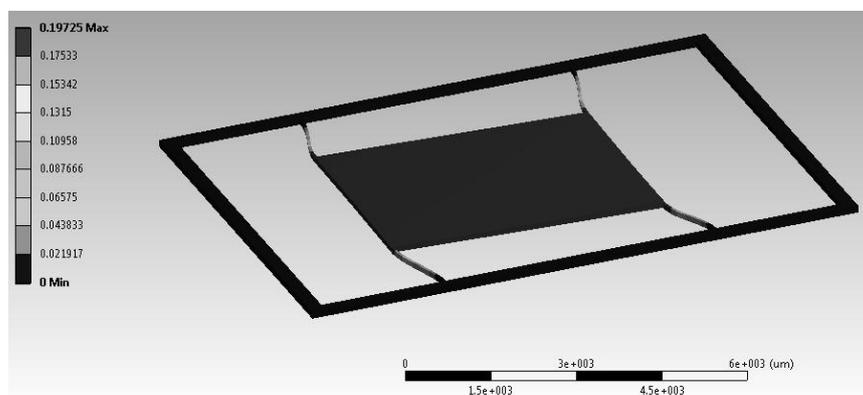
Рисунок 12 – Формирование импульсов при входном воздействии > 0 

Рисунок 13 – Результат моделирования движения ИМ

В четвертой главе «Оценка влияния вредных внешних факторов и способы повышения качества функционирования автоколебательного микромеханического акселерометра» приведена разработанная методика повышения качества функционирования автоколебательных микромеханических акселерометров (рис. 14).

Методика позволила обеспечить стабильность и улучшение статических характеристик: уменьшение смещения «нуля» до 50%, снижение порога чувствительности до $0,005 \text{ м/с}^2$, расширение диапазона измерений в 1,5 раза, уменьшении смещения «нуля» до $4,15 \cdot 10^{-5} \text{ м}$, снижение нестабильности коэффициента преобразования до 0,05%.

Смещение центра колебаний подвижного узла

$$x^0 = \frac{k_{ПП} y_{вх} + k_{ЧЭ} k_b k_{ДС} x_0}{1 - k_{ЧЭ} k_b k_{ДС}},$$

где $k_{ЧЭ} = 1/c_x$ – коэффициент преобразования ЧЭ, $k_{ПП} = F_{вх}/y_{вх}$ – коэффициент преобразования первичного преобразователя, $y_{вх}$ – входное воздействие,

$k_b = \frac{2U_{ДСm}}{\pi A \sqrt{1 - \left(\frac{x_0}{A}\right)^2}}$ – коэффициент, зависящий от вида нелинейности, $k_{ДС} = F_{ДС}/U_{ср}$, где

$$U_{ср} = U_0 \frac{\tau_1 - \tau_2}{T_0}.$$

Нестабильность коэффициента преобразования $\delta k_{\Sigma} = \frac{\delta k_{\Sigma}}{\delta U_0} \Delta U_0 + \frac{\delta k_{\Sigma}}{\delta T_0} \Delta T_0$, где T_0 – период автоколебаний, U_0 – величина управляющего сигнала.

Порог чувствительности $y_{\min} = \frac{k_{ДС} U_0 k_N}{k_{ПП} T_0} (n_1 - n_2)_{\min}$. Диапазон измерения АММА

ОДС $D = \frac{y_{\max}}{y_{\min}}$, где $y_{\max} = \frac{k_{ДС} U_0 \chi}{k_{ПП}}$, а $\chi = \frac{\tau_1}{T_0}$ – глубина модуляции выходного сигнала акселерометра.

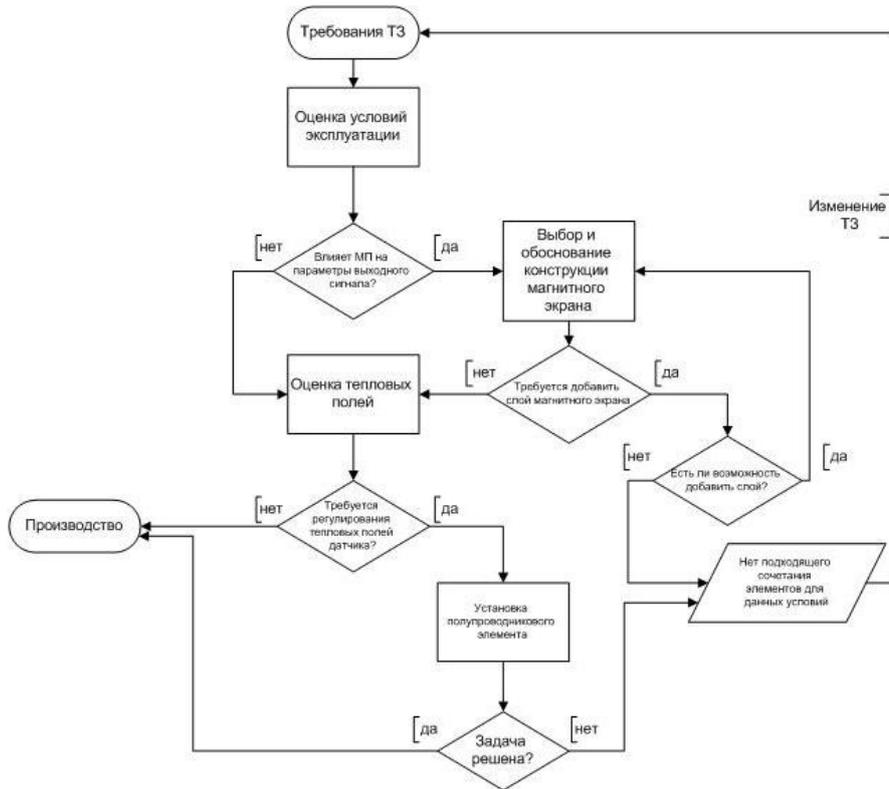
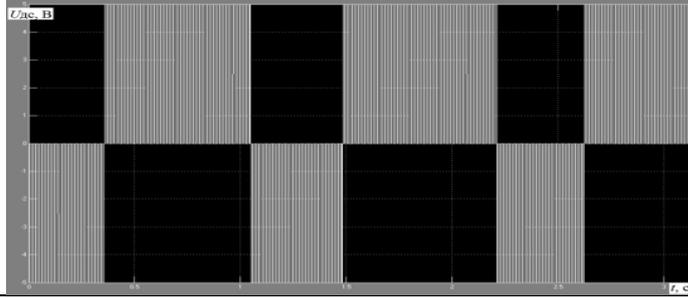


Рисунок 14 – Методика повышения качества функционирования АММА

Результаты испытаний чувствительного элемента приведены в таблице 8.

Таблица 8 – Результаты испытаний ЧЭ АММА ОДС

Степень жесткости испытаний по ГОСТ 50648-94 (МЭК 1000-4-8-93)	Результат (вид выходного сигнала)
Условия эксплуатации: коммерческие зоны, центры управления, зоны предприятий, не относящихся к тяжелой промышленности, компьютерные залы высоковольтных электрических подстанций.	

Для устранения влияния внешних магнитных полей и улучшения качества функционирования предложен магнитный экран многослойной конструкции. Слои экрана представляют собой чередование магнитных (пермаллой) и немагнитных (медь) материалов (рис. 15).

Толщина всего экрана (пермаллой-медь-пермаллой-медь-пермаллой) 0,5 мм, одного слоя – 50 мкм. Результаты испытаний магнитного экрана подтвердили эффективность выбранной (таблица 9)

Установлено, что АММА ОДС работает 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 составляет до 30 Тл, а сам датчик может работать в СУ ПО

Воздействие тепловых полей негативно сказывается на индукции постоянного магнита, сопротивлении в дорожках, способствует уменьшению электромагнитного демпфирования и величины зазора, ухудшению силовых характеристик ОДС, газовом демпфировании, приводит к изменению моментов инерции, смещению центра масс, погрешностям в измерении ускорения, существенным изменениям частоты и амплитуды колебаний (таблица 10).

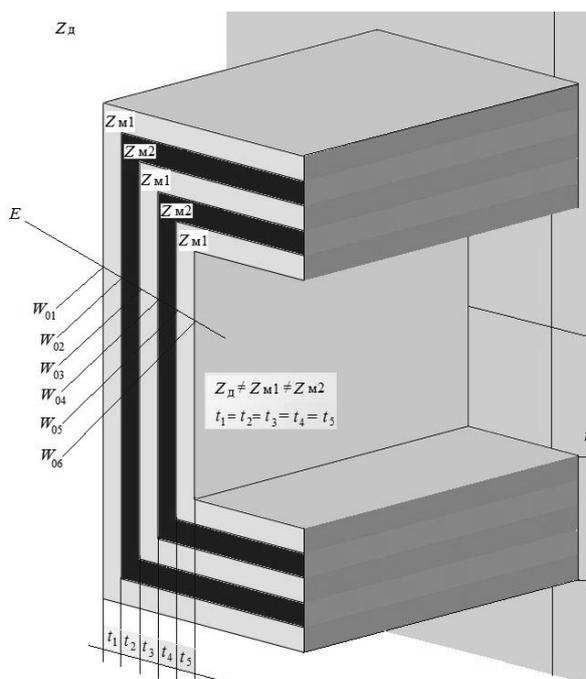


Рисунок 15 – Фрагмент упрощенной конструкции пятислойного магнитного экрана
 Потребляемая мощность 13,7 Вт, выделяемая в качестве тепловой энергии составляет 1,6 Вт.

Снижение сопротивления токопроводящих дорожек способствует уменьшению выделяемой тепловой энергии, это позволит АММА ОДС функционировать в нормальном режиме, при $T = -50 - 80^{\circ}\text{C}$.

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

Разработан АММА ОДС, максимально соответствующий условиям эксплуатации, на основе гибкой настройки параметров, в соответствии с предложенной методикой повышения качества функционирования. Применение методики позволяет повысить конкурентоспособность АММА, эффективность функционирования и (показатели) качества. Обеспечить сохранность его метрологических характеристик в различных условиях эксплуатации.

Таблица 9 – Результаты испытаний магнитного экрана

Индукция (напряженность) внешнего магнитного поля	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	$6,1 \cdot 10^{-6}$ Тл

Таблица 10 – Изменение параметров автоколебаний при повышении температуры

Температура, t °С	Параметры автоколебаний, A , 10^{-4} ·м; Ω , 1/с
20	3,2; 2198
50	2; 2037
100	1,5; 1917

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе изложены и научно обоснованы новые технические и технологические решения, имеющие существенное значение для развития страны и создания перспективных средств навигации.

В ходе проведенных исследований получены новые научные результаты:

- конструктивно-кинематическая модель микромеханических акселерометров с введением существенно нелинейного звена и использованием отечественной элементной базы, обеспечившая возможность реализации автоколебательных режимов, упрощение технологических решений по изготовлению датчика;

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

- методика повышения результативности процесса создания автоколебательного микромеханического акселерометра;

- методика повышения качества функционирования автоколебательных микромеханических акселерометров.

Полученные результаты позволили обеспечить стабильность и улучшение статических характеристик: расширить диапазон измерений в 1,5 раза, уменьшить 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, отказаться от вакуумирования и герметизации внутреннего объема датчиков, что сократило трудоемкость производства на 20-23 %, создать саморегулирующуюся систему за счет реализации автоколебательных режимов.

IV. ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Публикации в ведущих рецензируемых изданиях

1. Аман, Е.Э. Разработка конструктивно-кинематической модели микромеханических акселерометров / Е.Э. Аман // Вопросы радиоэлектроники. – 2019. – № 10. – С. 17 – 20.
2. Аман, Е.Э. Методика повышения качества функционирования автоколебательного микромеханического акселерометра / Е.Э. Аман // Вопросы радиоэлектроники. – 2019. - № 10. – С. 6 – 10.
3. 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.
4. 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.
5. Аман, Е.Э. Разработка имитационной модели и анализ возможности создания микромеханического линейного акселерометра «обращенной» схемы / А.Е. Аман, А.И. Скалон // Вопросы радиоэлектроники. – 2017. – № 5. – С. 40-43.
6. Аман, Е.Э. Диагностика технического состояния смазки опор электромеханических устройств приборостроения / Е.Э. Аман, В.А. Голубков, И.Н. Лукьяненко // Современное машиностроение: Наука и образование. – 2016. – № 5. – С. 368-375.
7. 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.
8. 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
9. Аман, Е.Э. Автоколебания в измерительной технике: философские аспекты и практические результаты / Е.Э. Аман, А.И. Скалон // Датчики и системы. – 2015. – № 3 (190). – С. 3-8
10. 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

Статьи в рецензируемых журналах, входящих в системы цитирования Web of Science и Scopus

11. 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.
12. Aman E.E., The simplest oscillating solutions of nonlocal nonlinear models /A.O. Smirnov, E.E. Aman // Journal of Physics: Conference Series (JPCS) 2019 1150 №011021.

Статьи и материалы конференций

13. 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», ГУАП, СПб, 2019, С 53-59.
14. Аман, Е.Э. Исследование влияния магнитного поля на работу автоколебательного микромеханического акселерометра с «обращенным датчиком силы»/ Е.Э. Аман, А.И. Скалон // Моделирование и ситуационное управление качеством сложных систем, ГУАП, 2017. С. 68-75.
15. Аман, Е.Э. Исследование влияния магнитного поля на работу автоколебательного микромеханического акселерометра с «обращенным датчиком силы» / Е.Э. Аман, А.И. Скалон // Измерения и испытания в судостроении и смежных отраслях СУДОМЕТРИКА-2016. Сборник докладов. 2016. С. 76-82.
16. Аман, Е.Э. Расчет магнитоэлектрического преобразователя микромеханического акселерометра «обращенной» схемы / Е.Э. Аман, А.И. Скалон // Измерения и испытания в судостроении и смежных отраслях. СУДОМЕТРИКА-2016 Сборник докладов. 2016. С. 65-68.
17. 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». Международная научно-техническая конференция: Материалы конференции. 2015. С. 332-337.
18. Аман, Е.Э. Автоколебания в измерительной технике – философские аспекты/ Е.Э. Аман, А.И. Скалон // Измерения и испытания в судостроении и смежных отраслях. СУДОМЕТРИКА-2014. Сборник докладов. 2014. С. 65-68.
19. Аман, Е.Э. Автоколебания в измерительной технике – некоторые философские аспекты / Е.Э. Аман, А.И. Скалон // Научная сессия ГУАП. Сборник докладов. В 3-х частях. 2014. С. 285-289.
20. Аман, Е.Э. Расчет параметров силового преобразователя в приборах «обращенной» схемы / Е.Э. Аман // Научная сессия ГУАП. Сборник докладов. В 3-х частях. Ч.1. 2012. С. 141-143.

Свидетельство о государственной регистрации

21. Аман, Е.Э. «Линейный акселерометр» Патент на изобретение №2 509 307 Российской Федерации МПК G01P15/11 от 10.03.2014 // Е.Э. Аман, Н.В. Напольская, А.И. Скалон. Заявитель и патентообладатель СПб ГУАП - № 2012125448/28, 19.06.2012. Опубл. 10.03.2014. Бюл. № 7. - 4 с., - 1 ил.