На правах рукописи

ЯНГИРОВ Ильгиз Флюсович

ТЕОРИЯ И МЕТОДОЛОГИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ НОВОГО КЛАССА ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ВИБРАЦИОННЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ СО СПИРАЛЬНЫМ ВТОРИЧНЫМ ЭЛЕМЕНТОМ

Специальность:
05.13.05 – Элементы и устройства вычислительной техники и системы управления

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук

Уфа – 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет»

Научный консультант: доктор технических наук, профессор,
Исмагилов Флюр Рашитович
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет»
заведующий кафедрой электромеханики

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор,
Васюков Сергей Александрович
ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана»
профессор кафедры электротехника и промышленная электроника

доктор технических наук, профессор,
Нейман Владимир Юрьевич
ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет»
заведующий кафедрой теоретических основ электротехники

доктор технических наук,
Зусман Георгий Владимирович
НИИ Интроскопии МНПО «СПЕКТР»
главный научный сотрудник

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет» (г. Ульяновск)

Защита диссертации состоится «12» февраля 2018 г. в 10^{00} часов на заседании диссертационного совета Д 212.288.02 на базе ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» по адресу: 450008, г. Уфа, ул. К. Маркса, 12.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» и на сайте www.ugatu.su.

Автореферат разослан «__» _____ 2017 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук, доцент А. Ю. Дёмин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Диссертационная работа посвящена развитию теории и созданию методологии проектирования нового класса электромеханических вибрационных преобразователей (ЭМВП) со спиральным вторичным элементом как в режиме информационного, так и в режиме исполнительного элементов системы управления.

Разработка новых конструкций таких преобразователей является актуальной задачей и вызвана необходимостью создания устройств, удовлетворяющих в той или иной мере многим, зачастую противоречивым требованиям по точности и пределам измерения, частотному диапазону, чувствительности, габаритным размерам, массе, стоимости, эксплуатационным характеристикам и т.д.

Важной предпосылкой решения поставленных задач является исследование и разработка новых перспективных элементов конструкции электромеханических преобразователей, материалов, комплектующих изделий, специальных технологических процессов производства.

Быстрое развитие науки и техники обуславливает большое разнообразие и усложнение автоматических систем управления. Создаются инвариантные, самонастраивающиеся и другие комплексные информационно-измерительные и управляющие системы, к которым предъявляются повышенные требования.

Современное развитие автоматизированных систем контроля и управления различными технологическими и физическими процессами характеризуется широким использованием первичных средств сбора и обработки информации. При этом электромеханические вибрационные преобразователи (ЭМВП) со спиральным вторичным элементом – датчики параметров вибрации являются звеном многих информационно-измерительных или управляющих систем и практически определяют ее метрологические характеристики. Потери в точности и надежности конечного результата, связанные с неудачным применением датчика, неспособна восстановить самая совершенная система преобразования информации.

Номенклатура выпускаемых промышленностью вибрационных датчиков ограничена, а их эффективная эксплуатация и оценка результатов эксперимента весьма затруднительны. Отсутствие четких рекомендаций по выбору того или иного типа датчика, обоснованных методик инженерных расчетов и экспериментальных исследований, анализа предельных эксплуатационных и технологических возможностей привели к тому, что многие типы и конструкции датчиков оказались нежизнеспособными.

Большое количество публикаций, связанных с проектированием новых конструкций вибрационных датчиков различного назначения и совершенствованием уже известных, позволяет судить о неослабевающем интересе разработчиков к этому классу устройств, особенно с развитием технических роботов и гибких модулей.

Отсутствие основ теории и инженерных методик расчета статических характеристик ЭМВП в режиме как датчика, так и двигателя со спиральным

электропроводящим элементом ограничивает возможность рационального их проектирования для информационно-измерительных и управляющих систем. Поэтому задачи исследования и создания высокоэффективных ЭМВП со спиральным вторичным элементом, наиболее полно удовлетворяющих специальным требованиям со стороны систем управления, актуальны.

Повышение эффективности средств вибрационной диагностики и генерации низкочастотных колебаний (частота 10–100 Гц) на основе создания нового класса электромеханических вибрационных преобразователей со сложной геометрией вторичного элемента является важной научной проблемой, подтверждённой, в том числе, в аналитической ведомственной целевой программе Министерства образования и науки РФ «Развитие научного потенциала высшей школы» («Исследование процессов энергопреобразования в электромеханических колебательных системах с распределенной вторичной средой») и Государственным заказом Министерства образования и науки РФ «Фундаментальное научное исследование» («Исследование электромагнитных полей и электромеханических процессов в сложных гетерогенных средах перспективных электротехнических систем и технологических комплексов авиационно-космической техники»).

Вопросы разработки и создания низкочастотных вибрационных преобразователей (10–100 Гц) были рассмотрены такими авторами как Ширман А. Р., Браташ О. В., Васюков С.А., Крупенин В.Л., Нейман В.Ю., Зусман Г.В. и др. В настоящее время существует необходимость решения задач по созданию обобщённой теории и методологии проектирования и конструирования электромеханического преобразователя (ЭМП), в частности ЭМВП со спиральным вторичным элементом, направленные на улучшение средств вибродиагностики и генерации низкочастотных колебаний, на создание нового класса ЭМП со сложной геометрией вторичного элемента.

Кроме того, появляется перспектива использования результатов исследований при проектировании и конструировании других типов ЭМП, например, электромеханических реле, двигателей и тахогенераторов с полым композиционным ротором, нагревательных установок и т.д.

Объектом исследования являются электромеханические вибрационные преобразователи со спиральным вторичным элементом, как элементы систем управления информационного и исполнительного функционального назначения.

Предметом исследования являются теория и методология проектирования нового класса электромеханических вибрационных преобразователей со спиральным вторичным элементом.

Основание для выполнения работы. Диссертационная работа выполнена на кафедре «Электромеханика» Уфимского государственного авиационного технического университета в рамках:

- проекта по теме АП-ЭМ-02-09-ПГ «Исследование процессов энергопреобразования в электромеханических колебательных системах с распределенной вторичной средой» аналитической ведомственной целевой

программы «Развитие научного потенциала высшей школы (2009–2011 гг.)» Министерства образования и науки РФ;

- госбюджетных НИР: Фундаментальное научное исследование «Исследование электромагнитных полей и электромеханических процессов в сложных гетерогенных средах перспективных электротехнических систем и технологических комплексов» (2012–2013 гг., тема АП-ЭМ-12-12-ОЗ/а); Фундаментальное научное исследование «Исследование электромагнитных полей и электромеханических процессов в сложных гетерогенных средах перспективных электротехнических систем и технологических комплексов авиационно-космической техники» (2013–2014 гг., тема АП-ЭМ-12-13-03/а); Фундаментальное научное исследование «Исследование электрических и магнитных полей и газоразрядных процессов в сложных гетерогенных средах перспективных электротехнических комплексов и систем» (2014-2016 гг., тема АП-ЭМ-05-14-ОЗ).

- хоздоговорных НИР: «Обучение в области энергосбережения и энергетической эффективности, в том числе по вопросам проведения энергетических обследований подготовки и реализации энергосервисных договоров на объектах в Республике Башкортостан» (2013 г., тема АП-ЭМ-03-13-УТ).

Степень разработанности темы исследований. Ученые-исследователи вибрационных электромеханических преобразователей: Москвитин А.И., Ряшенцев Н.П., Ходжаев К.Ш., Свечарник Д.В., Соколов М.М., Овчинников И.Е., Веселовский О.Н., Пачурин Г.В., Васюков С.А., Зусман Г.В., Нейман В.Ю., Лопухин Е.М., Коняев А.Ю.,Сарапулов Ф.Н., Хитерера М.Я., Ширман А.Р, Laithwaite E.R., Boldea I., Nasar S.A., Елисеев С.В., Михеев В.П. и др.

За минувшие двадцать лет опубликовано множество статей, патентов и авторских свидетельств на изобретения, а также монографий, посвященных теории преобразователей магнитного поля и принципам работы приборов, созданных на их основе. Большой вклад в разработку этой темы внесли отечественные авторы книг и статей: О. К. Хомер, В. И. Стафеев, А. Н. Марченко, Г. А. Егиазарян, М. М. Мирзабаев, Ю. В. Афанасьев и многие другие. Одной из самых удачных признана монография коллектива авторов во главе с Д. И. Агейкиным, посвященная датчикам различного назначения. Некоторую информацию общего характера о преобразователях магнитного поля можно найти в справочнике под редакцией А. В. Нефедова.

Однако литературный обзор и патентные проработки показали полное отсутствие теории и методологии проектировании нового класса электромеханических вибрационных преобразователей со спиральным вторичным элементом как в режимах информационного, так и исполнительного элементов систем управления.

Анализ существующего положения показывает, что в области вибродиагностики и генерации низкочастотных вибрационных колебаний существует определенная научно-техническая проблема. Причем анализ

существующего положения показывает, что разработанные положения в работе имеют перспективный характер при исследовании и проектировании аналогичных электромеханических преобразователей, применяемых в народном хозяйстве.

Цель диссертационной работы − решение научной проблемы повышения эффективности средств вибрационной диагностики и генерации низкочастотных колебаний (частота 10–100 Гц) на основе создания нового класса электромеханических вибрационных преобразователей со сложной геометрией вторичного элемента.

Для достижения поставленной цели необходимо решение следующих задач:

1. Разработка нового класса ЭМВП со спиральным вторичным элементом в различных режимах. Создание новых конструкций ЭМВП с улучшенными техническими характеристиками и уменьшенными массогабаритными показателями.

2. Разработка комплекса математических моделей электромеханических вибрационных преобразователей со спиральным вторичным элементом.

3. Исследование выходных характеристик ЭМВП со спиральным вторичным элементом в режиме информационного преобразователя, используя полученные комплексы математических моделей. Разработка метода повышения качества сигнала ЭМВП-датчика.

4. Решение задач оптимизации геометрических размеров магнитной системы и спиральной пружины, исследование передаточной функции преобразователей в системе управления, используя комплексы математических моделей.

5. Создание метода определения чувствительности информационных элементов со сложной геометрией вторичного электропроводящего элемента. Оценка влияния короткозамкнутых витков на характеристики электромеханических преобразователей (механическую характеристику ЭМП, чувствительность, на диагностику обмотки индуктивных преобразователей и т.д.).

6. Исследование метрологических, надежностных характеристик и чувствительности ЭМВП со спиральным вторичным элементом.

7. Исследование выходных характеристик ЭМВП со спиральным вторичным элементом в режиме исполнительного преобразователя, используя полученные комплексы математических моделей. Разработка метода линеаризации механической характеристики ЭМВП-двигателя со спиральным вторичным элементом. Решение оптимизационной задачи по выбору электромагнитных и механических нагрузок.

8. Проведение экспериментальных исследований с целью подтверждения результатов теоретических исследований и математических моделей, полученных в работе.

9. Разработка методологии проектирования и конструирования спиральных ЭМП с различными режимами работы с программным сопровождением.

Научная новизна

1. Разработан новый класс информационных и исполнительных электромеханических преобразователей систем управления со спиральным

электропроводящим вторичным элементом, находящихся в переменном магнитном поле или в цепи переменного электрического тока. Разработаны новые научно обоснованные конструктивные схемы спиральных ЭМП с улучшенными выходными характеристиками и расширенными функциональными возможностями (двухспиральный дефектоскоп, спиральный накопитель энергии, спиральный акселерометр, спиральный вибратор и т.д.). Установлена зависимость их выходных характеристик от способа подключения вторичного элемента и коэффициента формы, технологии их изготовления.

2. Развита общая теория электромеханических вибрационных преобразователей со спиральным вторичным элементом, на основании создания комплекса математических моделей, которые позволяют исследовать информационные и исполнительные преобразователи со сложной геометрией вторичного элемента в статических и динамических режимах работы.

3. В результате исследования характеристик ЭМВП на основе разработанных математических моделей информационных и исполнительных элементов со спиральным вторичным элементом установлено, что вибрационный информационный преобразователь может работать в частотном диапазоне до 100 Гц и вибрационном ускорении до 30 g, чувствительность при этом может достигнуть значения до $5*10^{-2}$ мВ/g; выполнение прорезей со скосом в спиральной пружине улучшает качество сигнала за счет компенсации высших гармоник 3; 5; 7 порядка.

4. Впервые представлены конструкция низкочастотного механического генератора с короткозамкнутым электропроводящим спиральным элементом, помещенным в переменное магнитное поле и его математическая модель с экспериментальным подтверждением. Выявлена зависимость выходных характеристик исполнительного преобразователя от способа подключения спирального вторичного элемента: замкнутого или разомкнутого.

5. Разработана методология проектирования и конструирования спиральных ЭМП с информационными и исполнительными режимами работы. Получено оптимизационное соотношение для выбора электромагнитных нагрузок спирального преобразователя с использованием предельных прочностных нагрузок. Разработаны метод повышения качества сигнала ЭМВП-датчика и метод линеаризации механической характеристики ЭМВП-двигателя со спиральным вторичным элементом.

6. Разработан метод определения и повышения чувствительности информационных элементов со сложной геометрией вторичного элемента по изменению его добротности. Проведена оценка влияния короткозамкнутых витков на характеристики электромеханических преобразователей (механическую характеристику ЭМВП, чувствительность, на диагностику индуктивных преобразователей и т.д.).

Теоретическая и практическая значимость работы

1. Внесен существенный вклад в развитие общей теории электромеханических преобразователей, разработаны оригинальные конструкции преобразователей вибрационных ускорений и генераторов механических

колебаний (а. с. № 1642404, 1657977, 1774270, 1774269, патенты РФ № 2502110, 2020697, 2028835, 2074488, 2074487, 2077107, 2085012, 95101654, 95101157, 95103541, 951057676, 2580212), разработаны испытательные стенды по исследованию характеристик ЭМВП со спиральным вторичным элементом.

2. Внедрены в промышленность и учебно-научную деятельность ФГБОУ ВО УГАТУ результаты теоретических и экспериментальных исследований и новые образцы ЭМП со спиральным вторичным элементом.

3. Разработанная методология позволяет существенно сократить время и материальные средства на проектирование, и разработку ЭМВП на 10…15 %, уменьшает массогабаритные показатели ЭМВП на 5–12 %, уменьшает сроки подготовки документации в 3…5 раз.

Основу методологической и теоретической базы исследования составили научные труды отечественных и зарубежных авторов в области электромагнитных цепей, полей и в области вибрационной техники (Н. И. Москвитин, Л. П. Левин, М. В. Хвингия, Б. И. Крюков, И. П. Копылов, Р. Р. Саттаров, В. Х. Ясовеев, И. Х. Хайруллин, Ф. Р.Исмагилов, М. А. Ураксеев, Ф. Н. Сарапулов, S. A. Nasar, E. R. Laithwaite, И. И. Блехман, К. Ш. Ходжаев, И. Ф. Гончаревич, А. Р. Ширман, А. Б. Соловьеа, Седов М. Н., Юртаев Р. И., Браташ О. В. и др.).

Методы исследовании. Использовались методы теории механических колебаний, методы теории электрических и магнитных цепей, теории систем автоматического управления, аналитические и численные методы математической физики, методы экспериментальных исследовании, метод приведения, теория электрических колебательных процессов, теория электромеханического преобразования энергии и управления электротехническими средствами, методы математического и физического моделирования. При разработке программного обеспечения на ЭВМ использованы языки высокого уровня (*Visual Basic*) и пакеты прикладных программ *(MathCAD, MSOffice, Matlab, Solidwords, Scilab*, *Maple*).

Положения, выносимые на защиту:

1. Новый класс электромеханических преобразователей систем управления со сложной геометрией вторичного электропроводящего элемента с изменяющейся конфигурацией в переменном магнитном поле или в цепи переменного электрического тока. Разработанные новые научно обоснованные конструктивные схемы спиральных ЭМП с улучшенными выходными характеристиками и расширенными функциональными возможностями (двухспиральный дефектоскоп, спиральный накопитель энергии, спиральный акселерометр, спиральный вибратор и т.д.).

2. Общая теория информационных и исполнительных электромеханических преобразователей со спиральным вторичным элементом, заключающаяся в получении комплекса математических моделей (общая математическая модель электромеханических вибрационных преобразователей со сложной геометрией вторичного элемента, математическая модель ЭМВП-датчика, модель спирального акселерометра, математическая модель ЭМВП-двигателя с

разомкнутым вторичным элементом и с замкнутым вторичным элементом, спирального путевого счетчика, спирального магнитокумулятивного генератора).

3. Результаты исследования характеристик ЭМВП на основе разработанных математических моделей информационных элементов со спиральным вторичным элементом. Определены оптимизационные соотношения по выбору геометрических размеров магнитной системы ЭМВП. Разработанный метод повышения качества сигнала ЭМВП-датчика за счет уменьшения влияния нечетных гармоник на характеристики.

4. Созданный метод определения и повышения чувствительности информационных индуктивных элементов со сложной геометрией вторичной системы по изменению добротности. Оценка влияния короткозамкнутых витков на характеристики электромеханических преобразователей (механическую характеристику ЭМП, чувствительность, на диагностику индуктивных преобразователей и т.д.).

5. Результаты исследования точностных, надежностных характеристик и чувствительности ЭМВП со спиральным вторичным элементом.

6. Результаты исследования характеристик ЭМВП на основе разработанных математических моделей исполнительных элементов со спиральным вторичным элементом, со сложной геометрией вторичного элемента. Оптимизационные соотношения для выбора электромагнитных нагрузок спирального преобразователя с использованием предельных прочностных нагрузок. Разработанный метод линеаризации механической характеристики ЭМВП-двигателя со спиральным вторичным элементом за счет уменьшения влияния на характеристики нечетных гармоник.

8. Результаты проведенных экспериментальных исследований с целью верификации теоретических исследований и математических моделей.

9. Разработанная методология проектирования спиральных ЭМП с различными режимами работы с программным сопровождением.

10. Результаты внедрения новых образцов ЭМВП в промышленность и учебный процесс.

Достоверность и обоснованность полученных в работе результатов и выводов обеспечивается корректной математической постановкой задач, использованием фундаментальных положений механики деформации твердого тела и вытекающих из них формулировок математических моделей. Достоверность численных решений подтверждается совпадением результатов с экспериментальными данными. Во всех случаях подтверждена практическая сходимость вычислительного процесса и точность выполнения естественных граничных условий. Достоверность конечных результатов проверена успешной практической реализацией проектов по месту внедрения разработанных методик и программ.

Достоверность полученных технических показателей автоматизированной измерительной и управляющей системы с ЭМВП обусловлена и подтверждается корректным использованием достижений в областях вибрационного приборостроения и применения его в теории автоматического управления при

производстве диагностических работ, экспериментальной проверкой полученных результатов в лабораторных и промышленных условиях.

Реализация работы. Результаты научно-исследовательских работ по созданию нового класса электромеханических вибрационных преобразователей со спиральным вторичным элементом акселерометра внедрены в НГДУ-1 ОАО «Белкамнефть» в виде новых конструктивных решений и рекомендаций, инженерной методики расчета, программного решения на ПЭВМ в ООО «Башинструмент».

Применение методов математического моделирования с использованием ЭВМ позволило решать нестандартные задачи, возникающие при проектировании вибрационных преобразователей со сложной геометрией вторичного элемента и повышать эффективность принятия проектных решений.

Результаты теоретических исследований, разработанные экспериментальные установки используются в учебном процессе ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» при изучении дисциплин: «Специальные электрические машины», «САПР электромеханических устройств» студентами направления 140400 и специальности 140401; ГОУ ВПО «Российский институт текстильной и легкой промышленности», ГАОУ СПО «Нефтекамский нефтяной колледж».

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались более чем на 30 научных конференциях и симпозиумах:

I Международной конфедерации по электротехнике и электротехнологии МКЭЭ-94, (Суздаль, 1994; Региональный н/т конф. «Датчики и средства первичной обработки информации» (Курган, 1991); Всесоюзной научно-технической конференци «Микроэлектроника в машиностроении» (Ульяновск, 1992); Республиканской научно-технической конференции «Роль технической диагностики и экономической безопасности на предприятиях нефтехимии» (Уфа, УГНТУ, 1995); III Межвузовской научно-технической конференции «Компьютеризация учебного процесса по электротехнической диагностике» (Астрахань, АГТУ, 1995); Международной конференции по автоматическому электроприводу (С.-Петербург, 1995); Всероссийской научно-технической конференции «Датчики и преобразователи информации путем, измерения, контроля и управления» (Датчик-95) (Гурзуф, 1995); Международной конференции «Научно-технические проблемы космонавтики и ракетостроения». Тезисы и аннотации (Калининград, ЦНИИ Маш, 1996); VIII научно-технической конференции с участием зарубежных специалистов «Датчики и преобразователи информационных систем контроля и управления», тезисы докладов, Т.1.-2. Гурзуф (Датчик-96), 1995; Научно-технической конференции с международным участием «Проблемы электрических систем и перспективы их развития», тезисы докладов, Ч.I. (Ульяновск, 1996); Материалах III конгресса нефтегазо-промышленников России (Секция автоматизации производственных процессов), (Уфа, УГНТУ, 2001); Всероссийской научно-технической конференции, посвященной 15-летию со дня принятия Декларации о Государственном суверенитете РБ и 5-летию образования Нефтекамского филиала БашГУ

(Нефтекамск: РИО БашГУ, 2006); Международной заочной научно-практической конференции «Приоритетные направления развития современной науки» (Чебоксары, 2012); VII Международной научно-практической конференции «Техника и технологии: новые перспективы развития» (Москва, 2012), Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 80-летию УГАТУ «Современные проблемы расчета, проектирования и производства в машиностроении и энергетике» (Нефтекамск, 2012); Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 175-летию Российских железных дорог «Транспортное образование и наука: проблемы и перспективы» (Уфа, 2012); II Международной научной заочной конференции «Инновационные материалы и технологий в машиностроительном производстве» (Орск, 2013); X Международной научно-практической конференции «Техника и технологии: новые перспективы развития (Москва, 2013); XII Международной научно-практической конференции «Современное состояние естественных и технических наук». (Москва, 2013); Всероссийской НПК «Наукоемкие технологии в машиностроении» (Ишимбай, 2013); Всероссийской научной конференции, посвященной 80-летию УГАТУ. Секция «Современные проблемы расчета, проектирования и производства в машиностроении и энергетике» (Нефтекамск, ФБГОУ ВПО УГАТУ (НФ), 2012); Международная заочная конференция «Инновационные материалы и технологии в машиностроительном производстве», (Орск,2014); Всероссийской заочной НПК «Наукоемкие технологии в машиностроении» (Ишимбай, 2013–2015); II Всероссийской НПК «Современные проблемы электроэнергетики» (Махачкала, 2014); Научный потенциал–2014–№3-4 (рубрика «Материалы V Международной заочной научно-практической конференции «Приоритетные направления развития современной науки» (ЧУНИИ педагогики и психологии, 2014); II Всероссийской научно- практической конференции «Современные проблемы техники и образования в техническом вузе» (Стерлитамак, 2015); Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 110-летию А. М. Бамдаса «Электротехнические комплексы и системы» (Уфа, 2015).

За научные исследования автор удостоен стипендии Президента Республики Башкортостан в области науки и техники за 2014–2015 гг.

Публикации. Основные научные результаты по теме диссертации опубликованы в 110 научных работах, в том числе получены 4 авторских свидетельств и 14 патентов РФ, 1 патент на полезную модель. Автор имеет 50 статей в изданиях из перечня ВАК, семь свидетельств на регистрацию программ, одну монографию.

Структура диссертационной работы.

Диссертация состоит из введения, 5 глав и заключения, изложена на 339 страницах машинописного текста, включает 138 рисунков, 8 таблиц, список литературы из 258 наименований. В приложении к диссертации приведены документы, подтверждающие использование результатов работы и их эффективность.

Основное содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи, выделена научная и практическая ценность работы, кратко дано содержание глав диссертации.

В первой главе проведен обзор известных технических решений и ранее выполненных исследований по ЭМВП, предложена классификация по принципу действия преобразователей вибрационных ускорений, проанализированы их достоинства и недостатки. Сформулированы основные требования, предъявляемые к датчикам виброускорений со стороны систем управлений. Представлена классификация спиральных вибрационных преобразователей. На рисунке 1 представлена конструкция исследованного в диссертационной работе датчика [Патент РФ № 2003982]. Датчик содержит полый корпус – магнитопровод 1, подвижный элемент 2, расположенный на оси 3, закрепленной в корпусе 1, измерительную обмотку 4 и постоянные магниты 5. Постоянные магниты 5 расположены друг относительно друга противоположными полярностями и закреплены на внутренней стенке корпуса 1; измерительная обмотка 4 выполнена в виде плоской спиральной катушки (пружины) с электрическими выводными концами 6,7, расположенной по плоскости в зазоре между магнитами 5, внутренний конец которой закреплен на неподвижной оси 8, установленной между магнитами 5, а внешний – связан с подвижным элементом 2.

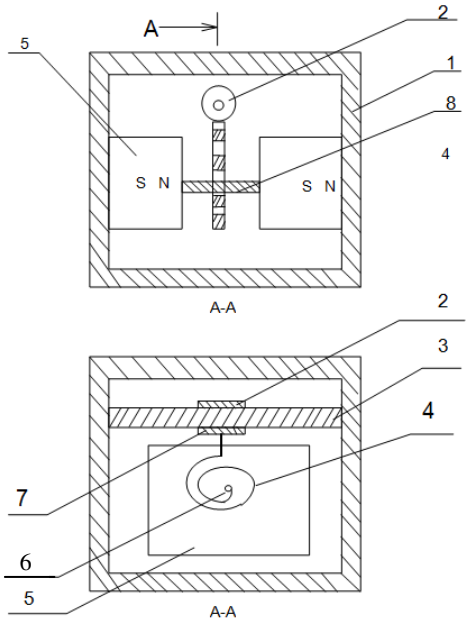

Рисунок 1 – Датчик скорости изменения ускорения:
1 – магнитопровод; 2 – подвижный элемент; 3 – ось; 4 – измерительная обмотка;
5 – постоянный магнит; 6, 7 – выводные концы спиральной катушки; 8 – неподвижная ось

Рассмотрены также особенности преобразования электрической энергии в механические колебания. ЭМВП-двигателям такого класса характерны простота, надежность, технологичность конструкции, а также минимальное потребление

энергии и регулируемость выходных характеристик, что обуславливает перспективность их применения в приборостроении, часовой промышленности, бытовой технике, энергетике, и др. На основании проведенного анализа сформулированы цель и задачи работы.

Вторая глава посвящена разработке обобщенной математической модели ЭМВП со спиральным чувствительным элементом.

Показаны различные конструктивные решения на основе спирального вторичного электропроводящего элемента и особенности их функционирования [а. с. № 1642404, 1657977, 1774270, 1774269, патенты РФ № 2502110, 2020697, 2028835, 2074488, 2074487, 2077107, 2085012, 95101654, 95101157, 95103541, 951057676]. В качестве примеров на рисунках 2; 3 показаны разработанные конструктивные решения ЭМВП.

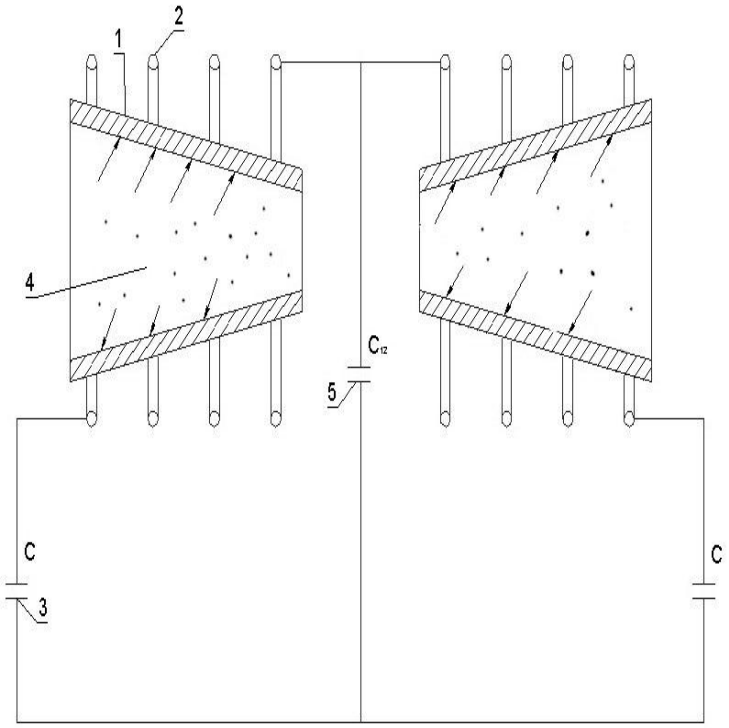

Рисунок 2 – Электромеханический магнитокумулятивный генератор (ЭМКГ):
1 – лайнер; 2 – соленоид; 3 – емкости связи; 4 – заряд взрывчатого вещества

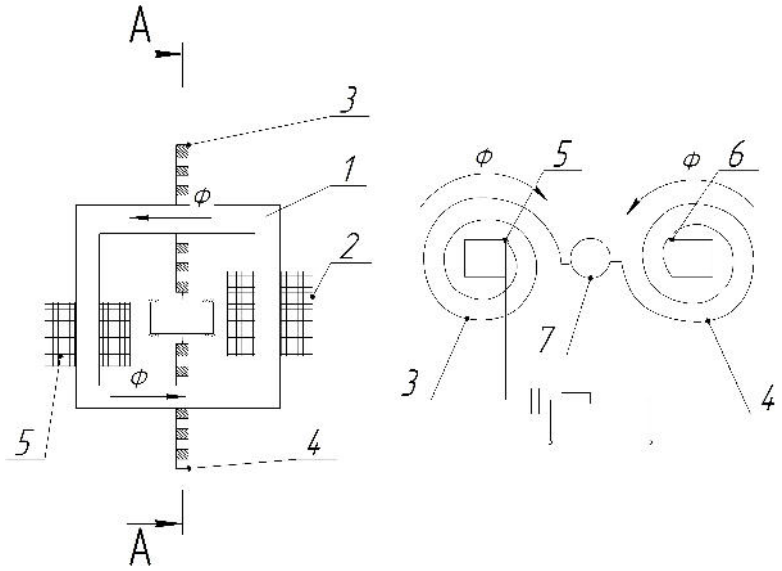

Рисунок 3 – Трансформаторный преобразователь двухспиральный:
1 – магнитопровод; 2 – обмотка переменного тока; 3, 4 – спиральные пружины;
5; 6 – плечи магнитопровода; 7– подвижная ось

Предложены новые конструкции спирального накопителя энергии, устройства для борьбы с гололедом на ВЛ, электромеханической спиральной муфты, спирального вибратора, взрывомагнитного генератора, индуктивного двух спирального путевого датчика для железнодорожного транспорта).

При разработке обобщенной математической модели ЭМВП со спиральным вторичным элементом приняты следующие допущения: магнитное поле равномерно по всему воздушному зазору, магнитная проницаемость железа магнитопровода равна бесконечности, температура окружающей среды постоянна и не меняется во времени, толщина материала спирали существенно меньше ее геометрических размеров, механический гистерезис отсутствует, модуль упругости изоляции проводника равен нулю, выходное сопротивление упругой изоляции проводника равно нулю, масса спирали меньше массы инерционного элемента, механическое трение между витками отсутствует, механическое напряжение не превосходит предела пропорциональности (допустимого).

Для расчета спиральная пружина заменена геометрической моделью (рисунок 4) в виде последовательных круговых витков, с сохранением геометрических размеров витка, шага и количества витков спирали.

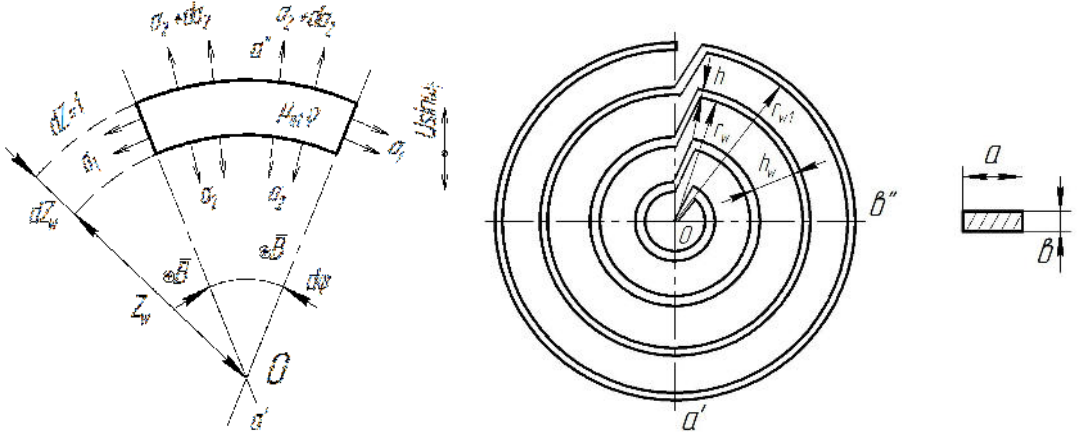

Рисунок 4 – Расчетная модель спирали

Система дифференциальных уравнений для исследования ЭМВП со сложной геометрией вторичного элемента

$$
\begin{cases}
\dfrac{\partial^2 s_w}{\partial r_w^2}+\dfrac{1}{r_w}\times\dfrac{\partial s_w}{\partial r_w}-\dfrac{1}{r_w^2}s_w=\grave{}\rho\dfrac{1-\mu^2}{E}\times\dfrac{\partial^2 s_w}{\partial t^2};\\
\dfrac{\partial^2 s_w}{\partial t_w^2}+2n\xi\times\dfrac{\partial s_w}{\partial t}+\omega_0^2 s_w=-2\pi A_{вх}\sin\omega t\times s_w(1)\\
+\left\{\dfrac{i^2}{2}\left(\left[\dfrac{dL_{ow}}{dL_{ow}}+2\sum\sum\dfrac{dM_{ow,n}}{dr_{ow}}\right]+\left[\sum K_{Lw}+2\sum\sum K_{Mw,n}\right]\right)+B_o il\right\}.\times s_w(1),\\
e_w=B_0\ell_w\dfrac{\partial s_w}{\partial t}.+\\
iR+\dfrac{di}{dr}\left(\sum L_{ow}+2\sum\sum M_{ow,n}\right)+\dfrac{di}{dt}\left(\sum K_{Lw}s_w+\sum\sum K_{Mw,n}s_w\right)+\\
+i\left(\sum K_{Lw}\dfrac{ds_w}{dt}+2\sum\sum K_{Mw,n}\dfrac{ds_w}{dt}\right)\\
s_w\Big|_{r_w=r_0}=0;\ \ s_{w=N}\Big|_{r_w=R_0}=1;
\end{cases}
\qquad (1)
$$

где s_w – радиальное перемещение w-го витка спирали; E – модуль упругости первого рода; μ – коэффициент Пуассона; $\eta\xi$ – коэффициенты трения и демпфирования; ω_o – частота собственных колебаний; ω – частота вынужденных колебаний; r_w – радиус w – го витка; l_w – длина участка витка; B_o – индукция магнитного поля; $s_w(1)$ – форма колебаний спирали; R – активное сопротивление спирали; $e(t)$ – подводимое напряжение; Low и Mow – индуктивность и взаимоиндуктивность спирали в статическом состоянии соответственно; K_{Lw}, $K_{Mw.n}$ – некоторые конструктивные постоянные.

Исходя из полученной системы дифференциальных уравнений ЭМВП, в работе был исследован спиральный датчик. Получена обобщенная математическая модель датчика в виде системы дифференциальных уравнений второго порядка в частных производных и соответствующих решений

$$\left.\begin{aligned}
&\frac{\partial^2 s_w}{\partial r_w^2}+\frac{1}{r_w}\frac{\partial s_w}{\partial r_w}-\frac{1}{r_w^2}s_w=\rho\frac{1-\mu^2}{E}\frac{\partial^2 s_w}{\partial t^2};\\
&\frac{\partial^2 s_w}{\partial r_w^2}+2n\xi\frac{\partial s_w}{\partial t}+\omega_0^2 s_w=-2\pi A_{вх}\sin\omega t\,s_w(1);\\
&s_w\big|_{r_w=r_0}=0\\
&s_w\big|_{r_w=R_0}=1\\
&e_w=-B_0\ell_w\frac{\partial s_w}{\partial t};
\end{aligned}\right\} \qquad (2)$$

В результате решения системы получается общее выражение для статической характеристики датчика в зависимости от входного воздействия

$$e(t)=\frac{B_0}{\omega_0^2}\frac{\omega\cdot A_{вх}}{\sqrt{1-\left(\frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right)^2+4\frac{n^2\varsigma^2}{\omega_0^2}\times\left(\frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right)}}\frac{\sum r_w[J_1(\omega_0\sqrt{\rho k}\,r_w)+AN_1(\omega_0\sqrt{\rho k}\,r_w)]\eta}{J_1(\omega_0\sqrt{\rho k}\,R_0)+AN_1(\omega_0\sqrt{\rho k})R_0}\cos(\omega t-\alpha). \qquad (3)$$

Выражение для статической характеристики датчика с учетом формы приведения спиральной пружины

$$e_m=\frac{B_0}{\omega_0}R_1A_{вх}\frac{q}{\sqrt{(1-q^2)^2+4D^2q^2}}s_w(\gamma)\ , \qquad (4)$$

где $q=\omega/\omega_o$ – относительная частота, $D=\eta\xi/\omega_0$ – относительная степень успокоения.

В относительных единицах:

$$e_m^*=\frac{q}{\sqrt{\left(1-q^2\right)^2+4D^2q^2}}\times s_\omega(\gamma). \qquad (5)$$

В работе были исследованы частные случае статической характеристики датчика в зависимости от аргумента функции Бесселя.

Определена относительная чувствительность такого датчика как производная от входной величины контролируемого виброускорения. Показано, что чувствительность имеет аналогичную зависимость от относительной частоты входного воздействия, степени успокоения упругой системы и степени нелинейности. Исследована нелинейность статической характеристики вибродатчика методом наименьших квадратов и получено выражение для определения нелинейности в виде

$$e\% = \frac{50}{q_m}\sqrt{A - \frac{B^2}{C}}R(\gamma_w;\ell_0), \tag{6}$$

где $R(\gamma_w;\ell_0)$ – функция, равная произведению базовой ЭДС на коэффициент формы приведения.

В работе полечены общие выражения для определения параметров *A,B,C*. Так в частных случаях, когда $D = 0$

$$A_1 = -\frac{1}{2}q + \frac{1}{2}\frac{q}{1-q^2} - \frac{1}{2}q^3 \quad ; \tag{7}$$

$$B_1 = \frac{1}{4}q^4 + \frac{1}{6}q^6 \ ; \tag{8}$$

$$C_1 = \frac{1}{3}q^3; \tag{9}$$

а когда $D = \sqrt{2}/2$

$$A_2 = \frac{1}{4\sqrt{2}}\ln\left|\frac{q^2 - \sqrt{2}q + 1}{q^2 + \sqrt{2}q + 1}\right| + \frac{1}{2\sqrt{2}}arctg\frac{\sqrt{2}q}{1-q^2} \ ; \tag{10}$$

$$C_2 = \frac{1}{3}q^3 \ ;$$

$$B_2 = \frac{q\sqrt{1+q^4}}{1+q^2} + \frac{1}{2}F(\arccos\frac{1-q^2}{1+q^2}\frac{\sqrt{2}}{2}) - E(\arccos\frac{1-q^2}{1+q^2}\frac{\sqrt{2}}{2}), \tag{11}$$

где *F, E* – интегралы Лежандра первого и второго рода.

Были получены графические зависимости степени нелинейности датчика от частоты возмущения. В результате анализа этих кривых установлено, что степень нелинейности датчика монотонно возрастает с ростом частоты возмущения и степени успокоения.

Исходя из закона сохранения энергии и приведенной модели для спиральной пружины, выведены соотношения для определения приведенной массы, жесткости и собственной частоты колебаний

$$\omega_0^2 = \frac{C_1}{M_1} = \frac{h\text{в}}{2\pi^2 R_1}\frac{E}{1-\mu^2}\frac{\sum_1^N\left[l_0\dfrac{J_0(\ell_0\gamma_w) + AN_0(\ell_0\gamma_w)}{J_1(\ell_0 R_0/R_1) + AN_1(\ell_0 R_0/R_1)} - \dfrac{1-\mu^2}{\gamma_w}f_w(\ell_0\gamma_w)\right]}{4\pi^2 M\sum_1^N f_w^2(\ell_0\gamma_w) + \sum_1^N m_w f_w^2(\ell_0\gamma_w)}. \tag{12}$$

Получена передаточная функция. Движение подвижной части (спиральной пружины) описывается уравнением колебания второго порядка, тогда применяя преобразование Лапласа, это уравнение перепишется в виде

$$M_1 p^2 s(p) + 2\eta\xi ps(p) + C_1 = 2\pi M_1 A_{bx}(p)s_w(1), \tag{13}$$

откуда передаточная функция вибродатчика

$$W(p) = \frac{s(p)}{A_{вх}(p)} = \frac{2\pi s_w(1)}{p^2 + 2D\omega_0 p + \omega_0^2}, \tag{14}$$

т.е. передаточная функция ЭМВП – датчика со спиральным вторичным элементом можно представить как последовательно соединенные усилительное звено с передаточной функцией $W_1(p) = 2\pi s_w(1)$ и устойчивое колебательное звено с

передаточной функцией $W_2(p) = 1/(p^2 + pD\omega_0 p + \omega_0^2)$, которое характеризуется собственной частотой и степенью успокоения. В общем виде

$$W(p) = W_1(p) \cdot W_2(p) . \quad (15)$$

Полагая в выражение (15) $\rho = j\omega$ можно найти частотную характеристику ЭМВП в комплексной форме

$$W(j\omega) = \frac{2\pi s_w(1)}{1-(\omega/\omega_0)^2 + j2D(\omega/\omega_0)} . \quad (16)$$

Модуль комплексной частотной характеристики представляет собой амплитудно-частотную характеристику (АЧХ)

$$\eta = \frac{2\pi s_w(1)}{\sqrt{(1-q^2)^2 + 4Dq^2}} .$$

Аналитически исследовано распределение магнитного поля в воздушном зазоре электромеханического преобразователя. Разработана САПР для оптимизационного проектирования ЭМВП-датчика. Полученные аналитические зависимости позволяют оптимально проектировать магнитную систему электромеханических преобразователей с заложением необходимых технико-конструктивных и экономических показателей.

Решена оптимизационная задача для определения геометрических размеров магнитной системы ЭМВП из закона сохранения и превращения энергии (для ширины магнита и полюса).

Работа, произведенная при перемещениях каждого витка спирали равна

$$A_\tau = \sum_{w=1}^{N} F_{\tau w} s_w = \frac{\varepsilon h}{R_1} \frac{E}{1-\mu^2} \sum_{w=1}^{N_1} \left[l_0 \frac{J_0(\ell_0\gamma_w) + AN_1(\ell_0\gamma_w)}{J_1(\ell_0 R_0/R_1) + AN_1(\ell_0 R_0/R_1)} - \frac{1-\mu^2}{\gamma_w} f_w(\ell_0\gamma_w) \right] f_w(\ell_0\gamma_w) . \quad (17)$$

Полная энергия магнитного поля ЭМВП

$$W_m = \frac{\pi}{8} \frac{B_\delta^2}{\mu_0} b\delta d_H \left[3 + \beta^*\right] , \quad (18)$$

где в предельных случаях $d_н = 2R_1$; $d_0 = 2R_0$.

Приравнивая (17) и (18) из закона сохранения и превращения энергии $A_\tau = W_m$

ширина магнита и полюса

$$b = \sqrt{\frac{4\mu_0 \beta^{*2} B_1 A_\tau}{\pi B_\delta^3 \delta k_\delta \left[3 + \beta^*\right]}} . \quad (19)$$

Внешний диаметр индуктора спирального ЭМВП

$$d_H = \sqrt{\frac{16\mu_0 k_\delta A_\tau}{\pi B_\delta B_1 \delta \beta^{*2} \left[3 + \beta^*\right]}} , \quad (20)$$

где b – ширина магнита; d_H – наружный диаметр полюса ЭМВП; B_1 – магнитная индукция в теле магнитопровода; k_δ – коэффициент рассеяния; B_δ – индукция в воздушном зазоре; β^* – относительный диаметр.

Исследован спиральный датчик параметров вращательно-колебательных движений. Исходя из математической модели ЭМВП-датчика получено выражение для контролируемого углового ускорения исследуемого объекта

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{2}\pi\sum_1^N s_w(1)}{R_0 M_{пр}} \times \frac{U_{вых}^{\ 2}}{R_{вых}^{\ 2}} \times \frac{q^2}{\sqrt{(1-4q^2)+16Д^2q^2}} \left[\left(\sum_1^N \frac{dL_{0w}}{dr_{0w}} + 2\sum_1^N\sum_1^N \frac{dM_{0w}}{dr_{0w}}\right) + \left(\sum_1^N K_{uw} + 2\sum_1^N\sum_1^N K_{uwn}\right)\right]. \quad (21)$$

Исследован многофункциональный трансформаторный преобразователь со спиральным замкнутым вторичным элементом. Разработана компьютеризированная система вибродиагностики узлов ЭМВП. Произведена сравнительная оценка чувствительности спирального вибродатчика по изменению добротности,

Проанализированы полученные выражения влияния короткозамкнутого витка (КЗВ) на метрологические характеристики в примере конструкции трансформаторного преобразователя спиральным короткозамкнутым элементом (ТПСКЭ) и представляется метод повышения чувствительности. Для качественного анализа считается, что $\xi_H = \xi_{f2} = \xi_f$; $W_k \langle\langle W$, что вполне справедливо. Рассмотрены следующие относительные соотношения

$$\beta_L = \frac{L_{p1}}{L_{p2}} = 1 + 2K\frac{\xi_f^2}{1+\xi_f^2}; \quad (22)$$

$$\beta_{\xi f} = \frac{\xi_{fp1}}{\xi_{fp2}} = 1 + 4K\frac{\xi_f^2}{1+\xi_f^2}. \quad (23)$$

Представляют интерес следующие частные случаи.

1. Пусть $\xi_f \to 0$, т.е. $r \to \infty$ или в ТПСКЭ существует преимущественно активные потери, тогда

$$\beta_L = 1 + 2\frac{1}{1+\frac{1}{\xi_f^2}} = 1;$$

$$\beta_{\xi f} = 1 + 4\frac{1}{2+\frac{1}{\xi_f^2}} = 1.$$

2. Пусть $\xi_f \to \infty$, т.е. $r \to 0$ или в ТПСКЭ существует преимущественно реактивные потери, тогда

$$\beta_L = 1 + 2\frac{1}{1+\frac{1}{\xi_f^2}} = 1 + 2 = 3,$$

$$\beta_{\xi f} = 1 + 4\frac{1}{2 + \frac{1}{\xi_f^2}} = 1 + 2 = 3, \tag{24}$$

т.е. чувствительность и крутизна преобразовательной характеристики ТПСКЭ существенно повышается в случае наличия КЗВ, т.к. реагирует на изменение индуктивности или добротности системы (или на его дифференциацию).

Предложен метод повышения качества метрологической характеристики ЭМВП-датчика за счет выполнения продольных прорезей со скосом и уменьшения нечетных гармоник сигнала (3;5;7-ые). Исследованы индуктивный спиральный преобразователь скорости и ускорения с улучшенными метрологическими характеристиками, датчик угловых ускорений (акселерометр), электромеханический спиральный путевой счетчик железнодорожного транспорта, спиральный дефектоскоп.

В третьей главе исследованы точностные и надежностные характеристики спирального вибрационного датчика.

Получено соотношение для определения амплитудной погрешности датчика

$$\begin{cases} M = \dfrac{\omega_0^2 \ddot{x}}{\omega^2 A_{вх}} = \dfrac{s_w(1)}{\sqrt{(1-q^2)^2 + 4D^2q^2}} \\ \gamma_f = \dfrac{s_w(1)}{\sqrt{(1-q^2) + 4D^2q^2}} - 1 \end{cases}, \tag{25}$$

$$\gamma_f = M - 1,$$

а фазовая погрешность определяется из выражения:

$$\varphi = arctg\,\frac{2Dq}{q^2 - 1}, \tag{26}$$

при этом, когда $D \le 1$ и $q \le 0.3$, амплитудную погрешность можно с точностью до 1 % вычислить по формуле

$$\gamma_f = (2D^2 - 1)q^2 \cdot s_w(1). \tag{27}$$

В работе приведены кривые для исходных (25) и (26) зависимостей.

Разработана вероятностная модель оценки надежности спиральной конструкции методом «нагрузка-прочность».

Вероятность неразрушения определяется из выражения

$$P = 0.5 + \Phi(\gamma), \tag{28}$$

где $\Phi(\gamma)$ – нормализованная функция Лапласа; γ – гауссовский уровень надежности.

$$\gamma = \frac{K_3 - 1'}{\sqrt{k_3^2 \nu_R^2 + \nu_s^2}} n, \tag{29}$$

где ν_s– коэффициент вариации нагрузки; K_3 – коэффициент запаса прочности; ν_R– коэффициент вариации несущей способности.

$$\nu_R = \sqrt{\nu_{бпр}^2 + \nu_b^2 + \nu_r^2 + 4\nu_n^2}, \tag{30}$$

где $\nu_{бпр}$, ν – коэффициенты вариации прочности и размеров спирали.

По этому методу определено, что при механической надежности $P = 0{,}999$ коэффициент запаса $K_3 = 2.2$.

В работе определен коэффициент приведения расчетной модели магнитный системы, произведен учет неравномерности распределения магнитного поля индуктора на постоянных магнитах. Приведены схемная коррекция влияния дестабилизирующих факторов на работу спирального ЭМВП, также схемное уменьшение погрешностей преобразователя спирального ЭМВП субгармонических колебаний.

В четвертой главе разработана обобщенная математическая модель ЭМВП со спиральной пружиной в режиме вибрационного двигателя, и проведен анализ его характеристик. В результате составления уравнения движения участка модели спирали с учетом действующих на него электродинамических сил, получена обобщенная математическая модель вибрационного двигателя в виде системы дифференциальных уравнений второго порядка в частных производных

$$\begin{cases} \dfrac{\partial^2 s_w}{\partial r_w^2} + \dfrac{1}{r_w}\dfrac{\partial s_w}{\partial r_w} - \dfrac{1}{r_w^2} s_w = \rho \dfrac{1-\mu^2}{E} \cdot \dfrac{\partial^2 s_w}{\partial t^2}; \\ s_w\big|_{r_w = r_0} = 0; \\ s_w\big|_{r_w = r_0} = 1; \\ e(t) = iR + \dfrac{di}{dr}\left(\sum\limits_1^N L_{ow} + 2\sum\limits_1^N\sum\limits_1^N M_{ow,n}\right) + \dfrac{di}{dt}\left(\sum\limits_1^N K_{Lw} u_w \sum\limits_1^N\sum\limits_1^N K_{Mw,n} s_w\right) + \\ + i\left(\sum\limits_1^N K_{Lw}\dfrac{ds_w}{dt} + 2\sum\limits_1^N\sum\limits_1^N K_{Mw,n}\dfrac{ds_w}{dt}\right) \\ \ddot{X} + 2n\zeta\dot{x} + w_0^2 X = \left\{\dfrac{i^2}{2}\left(\left[\dfrac{dL_{ow}}{dL_{ow}} + 2\sum\limits_1^N\sum\limits_1^N \dfrac{dM_{ow,n}}{dr_{ow}}\right] + \left[\sum\limits_1^N K_{Lw} + 2\sum\limits_1^N\sum\limits_1^N K_{Mw,n}\right]\right) + B_o il\right\} \end{cases} \tag{31}$$

Путем дальнейших математических выкладок известных соотношений получены выражения для практических расчетов собственной индуктивности и взаимной индуктивности спиральной пружины, выражения для расчета индуктивности и взаимоиндуктивности спирали в любой момент времени в зависимости от радиального перемещения витков пружины в линейной форме. Решением системы уравнений получено общее выражение для расчета характеристики спирального двигателя:

$$F_{\Sigma}=\frac{\omega^2}{\omega_0^2}\sum_1^N s_w(1)\left\{\frac{4\,\mathrm{Im}^2\left[\left(\sum_1^N\frac{dl_{ow}}{dr_{ow}}+2\sum_1^N\sum_1^N\frac{dM_{ow}}{dr_{ow}}\right)+\left(\sum_1^N K_{lw}+2\sum_1^N\sum_1^N K_{мwn}\right)\right]}{\sqrt{(1-4q^2)+16Д^2q^2}}\cos(2\omega t+\varphi_3)-\right.$$

$$\left.-\frac{\mathrm{Im}\,B_0 l}{\sqrt{(1-q^2)^2+4D^2q^2}}\sin(\omega t+\varphi_3)\right. . \qquad (32)$$

Механическая характеристика ЭМВП двигателя определяется выражением:

$$F_{\Sigma}=\frac{\sqrt{2}}{2}I_m\ell B_0\frac{\omega^2}{\omega_0^2}\frac{s_w(1)}{\sqrt{(1-q^2)^2+4D^2q^2}}\ . \qquad (33)$$

В работе решена оптимизационная задача по выбору электромагнитных нагрузок спирального вибрационного двигателя с использованием прочностных нагрузок, что позволяет использовать их при оптимизационном проектировании размеров спиральной электропроводящей пружины. Для надежной работы вибродвигателя электромагнитные нагрузки выбираются с учетом следующего соотношения

$$j_m B_0<\frac{2\pi\cdot[\sigma_{KP}]M_{ПР}\omega_0^2}{\sqrt{2}abl}\frac{K}{K_{d1}}\frac{I_1\left(\omega_0\sqrt{\rho\cdot k}\cdot R_0\right)}{\sqrt{\left\{\sum\frac{1-\mu}{r_W}\left[I_1\left(\omega_0\sqrt{\rho\cdot k}\cdot r_W\right)+AN_1\left(\omega_0\sqrt{\rho\cdot k}\cdot r_W\right)\right]\right\}^2}}+$$

$$+\frac{1+\mu^2}{2}\left\{\sum\omega\sqrt{\rho\cdot k}\cdot\left[I_0\left(\omega_0\sqrt{\rho\cdot k}\cdot r_W\right)+AN_0\left(\omega_0\sqrt{\rho\cdot k}\cdot r_W\right)\right]\right\}^2-(1-\mu)\times$$

$$\times\sum\frac{1-\mu^2}{r_W}\times\left[I_1\left(\omega_0\sqrt{\rho\cdot k}\cdot r_W\right)+AN_1\left(\omega_0\sqrt{\rho\cdot k}\cdot r_W\right)\right]\cdot\sum\omega_0\sqrt{\rho\cdot k}\times$$

$$\times\left[I_0\left(\omega_0\sqrt{\rho\cdot k}\cdot r_W\right)+AN_0\left(\omega_0\sqrt{\rho\cdot k}\cdot r_W\right)\right],$$

где $[\sigma_{KP}]$ – предельно-допустимое напряжение, определяется величиной после действия пружины.

Откуда и получено выражение для определения оптимального размера пружины

$$j_m B_o K_3=2{,}136\frac{1}{1-\mu}\frac{в^2}{R_o^3}\frac{[\delta_o]}{K_{d1}}\ , \qquad (34)$$

где *Ro* – радиус опасного витка; *Кз* – коэффициент запаса прочности; j_m – плотность тока; *Bo* – индукция первичного магнитного поля; $[\delta_o]$ – предельно-допустимое напряжение; *axb* – поперечные размеры витка спирали; K_{d1} – коэффициент динамичности упругой системы.

Установлено, что механические системы отличаются высокой добротностью при $K_{d1}=60$ при расчетном значении

$$j_m B_0<0{,}556\ ,$$

т.е., если коэффициент запаса равен $K_3 = 2$, тогда $j_m B_0 = 0{,}278$ Тл А / мм^{2,} и при определенных геометрических размерах и индукции магнитного поля, равном, например, $B_o = 1$ Тл подводимый ток не должен превышать значения $I_m = 278$ мА. Установлено, что при более высоких токах требуется вести расчет с учетом температурных разрушений.

Усилия, возникающие между магнитосвязанными витками спиральной электропроводящей пружины

$$F = \frac{\sqrt{2}}{2}\mathrm{Im}^2 \sum s_w(1)\frac{4q^2}{\sqrt{(1-4q^2)^2+16D^2q^2}}\left[\left(\sum\frac{dLow}{dr_{ow}}+2\sum\sum\cdot\frac{dMow,n}{dr_{ow}}\right)+\left(\sum K_{Lw}+\rightarrow\right.\right. \quad (35)$$
$$\left.\left.\rightarrow+2\sum\sum K_{ow,n}\sqrt{K_{Lw}K_{Ln}}\sqrt{\gamma_{w,n}}\right)\right],$$

т.е. электродинамические усилия, возникающие с двойной частотой, складываются из усилий, направленных к изменению взаимного расположения витков. Далее в работе определены соотношения для развиваемых усилий [9] и для постоянной времени.

Представлены аналитические выражения для индуктивности и взаимной индуктивности электропроводящей спиральной пружины.

Проведен анализ неустановившегося режима работы спирального электромеханического преобразователя. Разработан метод линеаризации механической характеристики спирального вибропреобразователя с продольными прорезями со скосом на теле. Суть метода заключается в том, что за счет скоса прорезей происходит взаимная компенсация токов нечетных гармоник (3; 5; 7), что приводит к уменьшению влияния обратных магнитных полей, т.е. крутизна механической характеристики повышается с одновременной ее линеаризацией.

В пятой главе проведены стендовые испытания конструкции разработанного и изготовленного образца спирального вибродатчика на основе постоянных магнитов и спиральных конструкции из различных материалов и геометрических размеров.

Исследование метрологической характеристики опытного образца проводилось на экспериментальной установке, имитирующей гармонический вид внешних кинематических возмущений, с плавным регулированием частоты до 100 Гц и амплитудой 5мм. Результаты экспериментального исследования метрологической характеристики датчика, проведенного при нормальных условиях, в целом совпали с теоретическими (рисунок 5). Максимальное расхождение между экспериментальными и расчетными данными составило 12–13 %, при относительной погрешности не более 5%.

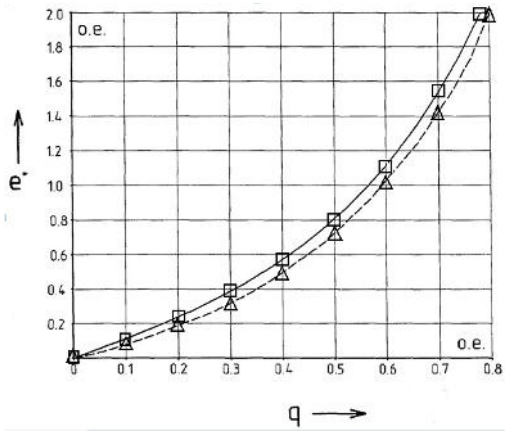

Рисунок 5 – Выходная характеристика датчика:
——— экспериментальная кривая;
------ теоретическая кривая. Базовые данные: $E_{баз} = 2\ mB$; $f_{баз} = 50$ Гц

Исследованы механические характеристики разработанного образца вибродвигателя со спиральным рабочим органом. Для измерения величин усилий, развиваемых двигателем, использованы тензометрические датчики с тензометрическим усилителем 4 АНЧ-22.

Эти усилия регистрировались осциллографом. Анализ полученных результатов показал их удовлетворительное совпадение с расчетными данными. Расхождение составляет не более 16 % (рисунок 6), при относительной погрешности не более 7 %.

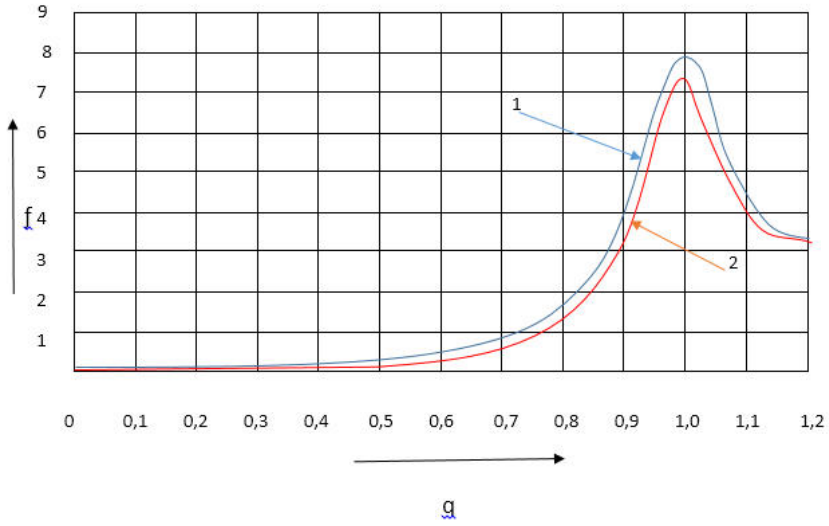

Рисунок 6 – Механическая характеристика двигателя:
1 – экспериментальная кривая; 2 – теоретическая кривая.
Базовая сила: $F1 = 14 \cdot 10^{-7}$ Н; частота: $f = 50$Гц

В диссертационной работе достигнута **цель** – решена научная проблема повышения эффективности средств вибрационной диагностики и генерации низкочастотных колебаний (частота до 100 Гц) на основе создания нового класса электромеханических вибрационных преобразователей со сложной геометрией

вторичного элемента, о чем свидетельствует экспериментальное подтверждение полученных теоретических положений и разработанной методологии проектирования. В работе проведена оценка эффективности разработанных ЭМВП по сравнению с существующими. Показано, новые разработанные конструкции имеют улучшенные характеристики, они обеспечивают в том числе:

-повышение информативности в 2–3 раза за счет выполнения спиральной формы конфигурации чувствительного элемента относительно плоской;

-повышение качества сигнала на 10–15 % за счет компенсации нечетных гармонических составляющих частоты возмущения 3; 5; 7-го порядков;

-уменьшение массо-габаритных показателей;

- сокращение сроков проектирования и конструирования на 10–15 %;

- улучшение технологичности конструкции;

- разработанные конструкции ЭМВП могут работать в частотном диапазоне до 100 Гц и вибрационных ускорениях до 30g, чувствительность при этом может достигнуть значения $5 \cdot 10^{-2}$мВ/g;

В заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы.

В приложении приведены результаты разработки методологии проектирования ЭМВП в виде разработанных методик инженерного расчета ЭМВП-датчика и двигателя, программ для расчетов, которые позволяют определять размеры пружины, параметры магнитной системы, проводить проверочные и тепловые расчеты, оценивать экономическую эффективность. В приложении представлены также акты внедрения результатов работы в промышленность и учебный процесс.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Диссертационная работа является результатом теоретических и экспериментальных исследований автора в области разработки высокоэффективных электромеханических вибрационных преобразователей со спиральным вторичным элементом систем управления и автоматики в режиме информационного и исполнительного преобразователей.

Основная научная и практическая значимость работы состоит в развитии теории и методологии проектирования нового класса ЭМП, создании совокупности математических моделей ЭМВП со спиральным вторичным элементом, разработке новых научно обоснованных технических решений.

1. Разработан новый класс ЭМВП со спиральным вторичным элементом как информационных и исполнительных элементов систем управления с улучшенными техническими характеристиками и уменьшенными массогабаритными показателями. Предложены оригинальные конструкции ЭМВП, разработанные на основе теоретических и экспериментальных исследований, защищенные патентами РФ.

2. Разработан комплекс математических моделей электромеханических вибрационных преобразователей со спиральным чувствительным элементом.

Впервые определена форма колебания спиральной электропроводящей пружины как для информационного, так и для исполнительного устройств.

Создана математическая модель многофункционального спирального индуктивного вибрационного преобразователя (МСИВП) на базе общей математической модели. Получены аналитические выражения по определению выходных характеристик в зависимости от величины возмущающего воздействия одновременно по двум степеням свободы с экспериментальным подтверждением полученных теоретических выкладок. Погрешность не превышает 10 %.

Установлено, что при включении многофункционального спирального индуктивного вибрационного преобразователя со спиральным вторичным элементом в измерительную мостовую схему за счет регулирования добротности резонансного контура через активное сопротивление возможно повышение чувствительности в 1,4 – 1,5 раза, а также расширение полосы пропускания.

3. Установлено, что вибрационный информационный преобразователь может работать в частотном диапазоне до 100 Гц и вибрационном ускорении до 30 g, чувствительность при этом может достигнуть значения до $5*10^{-2}$ мВ/g.

Установлено, что степень нелинейности статической характеристики информационного спирального преобразователя является функцией частоты, преобразуемой величины, степени успокоения, и представляет собой монотонно-возрастающую зависимость от частоты возмущения и степени успокоения. Установлено, что уменьшение степени нелинейности до 12 % достигается выполнением условия $D = 0$, $q = 0{,}54$ и $D = \sqrt{2}/2$, $q = 0{,}24$.

Определено соотношение для расчёта собственной частоты упругой системы преобразователя, более полно учитывающее влияние геометрических размеров и физических свойств материалов спирали с необходимой точностью. Установлено, что собственная частота колебаний информационного преобразователя со спиральным вторичным элементом определяется как свойствами материала спирали, так и геометрическими размерами спиральной пружины, и коэффициентом формы приведения.

Установлено, что выполнение прорезей со скосом в спиральной пружине улучшает качество сигнала за счет компенсации высших гармоник 3; 5; 7 порядков.

4. Разработан алгоритм для оптимизационного проектирования магнитной системы преобразователя. Установлено, что технико-экономический эффект от внедрения САПР ЭМВП достигается за счет следующих факторов: повышения качества проектируемых изделий; повышения производительности труда расчетчиков в 6…7 раз, ожидаемого повышения производительности при разработке и выпуске чертежей в 3…5 раз. Общее сокращение сроков проектирования и конструирования, включая изготовление и испытания образцов составляет 10-15 %.

Исследована передаточная функция ЭМВП для увязки с другими элементами систем управления. Установлено, что передаточную функцию ЭМВП-датчика со спиральным вторичным элементом можно представить как последовательно соединенные усилительное звено с передаточной функцией

$W_1(p) = 2\pi s_w(1)$ и устойчивое колебательное звено с передаточной функцией $W_2(p) = 1/(p^2 + pD\omega_0 p + \omega_0^2)$, которое характеризуется собственной частотой и степенью успокоения.

5. Установлено, что чувствительность и крутизну преобразовательной характеристики с большей точностью и надежностью у спирального информационного преобразователя предпочтительнее определять по значению добротности, чем по общепринятым соотношениям по индуктивности и по потерям; чувствительность по добротности увеличивается в 2–3 раза, чем по индуктивности и по потерям.

Разработан метод определения короткозамкнутого витка в индуктивной цепи ЭМВП со спиральным вторичным элементом. Произведена теоретическая и экспериментальная оценка влияния короткозамкнутых витков на характеристики электромеханических преобразователей (механическую характеристику ЭМП, чувствительность, на диагностику обмотки индуктивных преобразователей и т.д.).

6. Установлено, что наибольшую погрешность датчика вызывают нелинейность статической характеристики (порядка 10%), неточность изготовления спиральной конструкции (порядка 1% от каждого витка) и температурная погрешность (до 1%) на 10% с учетом изменения магнитных свойств магнитопровода.

Установлено, что амплитудная погрешность имеет наименьшие значения при относительной добротности D = 0,6÷0,7. Амплитудная погрешность вибрации определяется функцией приведения формы для спиральной пружины, а в выражении фазовой погрешности вибродатчика такая функция приведения формы отсутствует, при линейной фазовой погрешности запаздывание вынужденных колебаний подвижной части от изменения измеряемой величины при каждой частоте будет по времени одинаковым. Фазовая погрешность при D=0,65÷0,70 почти линейно зависит от частоты.

7. Разработана математическая модель и проведены исследования механических характеристик исполнительного элемента систем управления со спиральным вторичным элементом, используя комплексы математических моделей.

Разработана конструкция низкочастотного механического генератора с короткозамкнутым электропроводящим спиральным элементом, помещенным в магнитное поле. Построена его математическая модель, и решение ее позволило определить аналитическое выражение для исследования механической характеристики такого силового преобразователя. Исследование такого преобразователя в переходном режиме позволило определить постоянную времени для аналитического выражения передаточной функции и увязки в информационно-управляющую систему. Приведено экспериментальное подтверждение полученных теоретических положений.

Исследованы аналитические соотношения для анализа и проектирования вибрационного преобразователя с учётом и без учёта краевых эффектов при наличии продольных прорезей со скосом и без скоса в плоской широкой спиральной пружины в зависимости от магнитного числа Рейнольдса в о.е..

Разработан метод линеаризации механической характеристики ЭМВП-двигателя со спиральным вторичным элементом и установлено, что выполнение исполнительного преобразователя с прорезями со скосом на плоской спирали приводит к повышению крутизны механической характеристики и линеаризации из-за компенсации высших гармоник от вторичного магнитного поля и высших гармоник 3; 5; 7 порядков.

Исследовано оптимизационное соотношение для выбора электромагнитных нагрузок спирального преобразователя с использованием предельных прочностных нагрузок, что позволяет их учитывать на стадии эскизного проектирования.

8. Установлено, что экспериментальные характеристики совпадают с расчётными при определении выходных характеристик вибрационного датчика с погрешностью не более 12–13 %, а механических характеристик спирального вибрационного двигателя не более 16%, что подтверждает достоверность математических моделей ЭМВП как в режимах датчика, так и двигателя. Показано, что новые разработанные конструкции ЭМВП имеют улучшенные характеристики по сравнению с существующими, они обеспечивают, в том числе:

-повышение информативности в 2-3 раза за счет выполнения спиральной конфигурацией упругого чувствительного элемента относительно плоской;

-повышение качества сигнала на 10-15 % за счет компенсации нечетных гармоник 3; 5;7-го порядков:

-уменьшение массо-габартных показателей;

-возможность работы в частотном диапазоне до 100 Гц и вибрационном ускорении до 30 g, чувствительность при этом может достигнуть значения до $5 \cdot 10^{-2}$ мВ/g;

- сокращение сроков проектирования и конструирования на 10–15%;

- улучшение технологичности конструкции и т.д.

9. Разработана методология проектирования нового класса ЭМВП, включающая методики проектирования ЭМВП-датчика, ЭМВП-двигателя, спирального акселерометра, накопителя энергии и т.д., соответствующее программное обеспечение с государственной регистрацией.

Применение разработанных комплексов математических моделей, методик и программ для расчета и проектирования ЭМП на промышленных предприятиях позволило повысить качество и скорость проектирования, уменьшить на 5–12 % массо-габаритные показатели специальных информационных и исполнительных электромеханических преобразователей.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований и новых образцов ЭВМП внедрены и используются на 6 предприятиях, в научно-исследовательской работе и учебном процессе кафедры электромеханики УГАТУ.

Таким образом, в диссертационной работе решена научная проблема повышения эффективности средств вибрационной диагностики и генерации низкочастотных колебаний (частота 10–100 Гц) на основе создания нового класса

электромеханических вибрационных преобразователей со сложной геометрией вторичного элемента.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

В рецензируемых журналах из списка ВАК:

1. Хайруллин, И. Х. Вибрационный электромеханический преобразователь со спиральным вторичным элементом / Хайруллин И. Х., Исмагилов Ф. Р., Янгиров И. Ф. // Электричество. – 1995. – № 11. – С. 47–50.

2. Хайруллин, И. Х. Определение допустимых электромагнитных нагрузок для электромеханических преобразователей со спиральным вторичным элементом / Хайруллин И. Х., Исмагилов Ф. Р., Янгиров И. Ф. // Электричество.– 1997. – № 6. – С. 48–50.

3. Хайруллин, И. Х. Электромеханический преобразователь со спиральной вторичной системой / Хайруллин И. Х., Исмагилов Ф. Р., Янгиров И. Ф. // Электротехника. – 1997. – № 4. – С. 40–43.

4. Хайруллин, И. Х. Определение размеров магнитопровода и частоты собственных колебаний преобразователя линейных ускорений / Хайруллин И.Х., Исмагилов Ф. Р., Янгиров И. Ф. // С.-Петербург: «Приборостроение Изв. ВУЗов». – 1997. – № 1. – С. 59–62.

5. Исмагилов, Ф. Р. Оценка механической надежности спиральных конструкций электромеханических элементов систем управления / Исмагилов Ф. Р., Янгиров И. Ф. // Приборы и системы. – 1998. – № 4. – С. 53–54.

6. Янгиров, И.Ф. Степень нелинейности статической характеристики электромеханического вибрационного преобразователя / Янгиров И. Ф. // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2003. – № 10. – С. 41–43.

7. Янгиров, И. Ф. Определение собственной частоты колебаний спиральной пружины электромеханических преобразователей / Янгиров И. Ф.// Электротехника. – 2002. – № 4. – С. 58–61.

8. Янгиров, И. Ф. Аналитическое выражение индуктивности и взаимоиндуктивности спиральных электропроводящих пружин / Янгиров И. Ф. // Приборы и системы. – 2004. – № 1. – С. 38–41.

9. Янгиров, И. Ф. Вибрационный электродвигатель со спиральным вторичным элементом / Янгиров И. Ф. // Электротехника. – 2008. – № 5 – С. 14–18.

10. Янгиров, И. Ф. Передаточная функция спирального вибрационного преобразователя / Янгиров И. Ф. // Технология машиностроения. – 2009. – № 8. – С. 43–45.

11. Исмагилов, Ф. Р. Определение чувствительности датчика вибрационных ускорений со спиральным вторичным элементом / Исмагилов Ф. Р., Янгиров И. Ф. // Электротехника. – 2010. – № 10. – С. 39–42.

12. Янгиров, И. Ф. Система автоматизированного проектирования спирального вибрационного преобразователя / Янгиров И. Ф. // Технология машиностроения. – 2011. – № 3. – С. 53–56.

13. Янгиров, И. Ф. Спиральный преобразователь с продольными прорезями на теле / Янгиров И. Ф. // Технология машиностроения. – 2011. – № 8.– С. 36–38.

14. Исмагилов, Ф. Р. Датчик вибрационных ускорений со спиральным вторичным элементом / Исмагилов Ф. Р., Янгиров И. Ф. // Датчики и системы. – 2013. – № 3. – С. 26–30.

15. Исмагилов, Ф. Р. Метод определения КЗ в обмотках трансформатора / Исмагилов Ф. Р., Янгиров И. Ф., Максудов Д. В. // Russian journal of nondestructive testing. – 2014. – № 10.– С. 33–40.

16. Янгиров, И. Ф. Индуктивный двухспиральный путевой датчик железнодорожного транспорта / Янгиров И. Ф., Суфиярова И. И., Максудов Д. В., Ханов А. Р. // Технология машиностроения. – 2015. – № 9. – С. 34–37.

17. Yangirov, I. F. Determination of sensivity of vibration transducer with spiral secondary element / Ismagilov F. R., Yangirov I. F. Russian Electrical Engineering. Vol. 81. - 2010. – Number 10. – pp. 39–42.

18. Yangirov, I. F. Determination of the allowable values of electromagnetic loads for electromechanical transducer with the spiral secondary element / Ismagilov F. R., Khajrulin I. Kh., Yangirov I. F. // Электричество. – 1997. – Number 6. – pp. 47–50.

19. Yangirov, I. F. Electromechanical transducer with the secondaru spiral sustem / Khajrulin I. Kh., Ismagilov F. R., Yangirov I. F. // Russian Electrical Engineering. – 1997. – Number 4. – pp. 40–43.

20. Yangirov, I. F. Vibrational electromechanical converter with a spiral secondary element / Khajrulin I. Kh., Yangirov I. F., Ismagilov F. R. // Электричество.– 1995. – Number 11. – pp. 43–47.

21. Yangirov, I. F. A Method for Determination of the Presence of Short-Circuited Coils in the Windings of Transformer / F. R. Ismagilov, I. F. Yangirov, and D. V. Maksudov – 2014 / Russian journal of nondestructive testing, –Vol.50, No 10. pp. 33 – 40.

Монографии и учебные пособия

22. Исмагилов, Ф. Р. Электромеханические преобразователи энергии со спиральным вторичным элементом / Ф. Р. Исмагилов, Янгиров И. Ф. – М.: Машиностоение. – 2012. – 192 с.

Патенты

23. Хайруллин, И. Х. Датчик скорости изменения ускорений: патент № 2003982 Россия МКИ GO IP 15/11/ Хайруллин И. Х., Исмагилов Ф. Р., Янгиров И. Ф.; опубл. в 1993. Б.И. № 43 – 44.

24. Хайруллин, И. Х. Магнитоэлектрический преобразователь: пат. 2020697 Рос. Федерация: H02K33/16 / Хайруллин И. Х.; Хайруллин Т. И.; Янгиров И. Ф.; Исмагилов Ф. Р.; Никифоров Ю. Н.; заявл. 05.05.1991; опубл. 30.09.1994.

25. Хайруллин, И. Х. Устройство для возбуждения крутильных колебаний: пат. 2028835 Рос. Федерация: B06B1/04/ Хайруллин И. Х.; Янгиров И. Ф.; Исмагилов Ф. Р.; Хайруллин Т. И.; заявл. 06.07.1992; опубл. 20.02.1995.

26. Хайруллин, И. Х. Трансформаторный преобразователь: пат. 2074488 Рос. Федерация: H02K33/00, B06B1/00/ Хайруллин И. Х., Янгиров И. Ф., Исмагилов Ф. Р.; заявл. 29.09.1994.; опубл.27.02.1997.

27. Хайруллин, И. Х. Магнитоэлектрический преобразователь: пат. 2074487 Рос. Федерация: H02K33/16, B06B1/04 / Хайруллин И. Х.; Янгиров И. Ф.; заявл. 27.07.1994; опубл. 27.02.1997.

28. Хайруллин, И. Х. Трансформаторный преобразователь: пат. 2077107 Рос. Федерация: H02K33/00, B06B1/00/ Хайруллин И. Х., Янгиров И. Ф., Исмагилов Ф. Р.; заявл. 17.11.1994; опубл. 10.04.1997.

29. Хайруллин, И. Х. Магнитоэлектрический преобразователь: пат. 2085012 Рос. Федерация: H02K33/00 / Хайруллин И. Х., Янгиров И. Ф., Исмагилов Ф. Р.; заявл. 08.04.1994; опубл. 20.07.1997.

30. Электромеханический магнитокумулятивный генератор: пат. на полезную модель 157383 Рос. Федерации: МПК H02N 11/00 / Исмагилов Ф. Р., Хайруллин И. Х., Янгиров И. Ф., Максудов Д. В., Волкова Т. А. – № 2015112705/07; заявл. 07.04.2015; опубл. 27.11.2015, Бюл. № 33. – 3 с.

Свидетельства о государственной регистрации программ

31. Янгиров, И. Ф. Программа для расчета характеристик ПЛУ: св-во о гос. рег. прогр. для ЭВМ 2013660004. Рос. Федерация // Янгиров И. Ф., Максудов Д. В. – Зарегист. 22.10.13.

32. Янгиров, И. Ф. Программа для расчета характеристик ЭМВП-датчика: св-во о гос. рег. прогр. для ЭВМ 2013619977. Рос. Федерация // Янгиров И. Ф., Максудов Д. В. – Зарегист. 21.10.13.

33. Янгиров, И. Ф. Программа для расчета характеристик ЭМВП-двигателя: св-во о гос. рег. прогр. для ЭВМ 2013619978. Рос. Федерация // Янгиров И. Ф., Максудов Д. В. – Зарегист. 21.10.13.

34. Янгиров, И. Ф. Программа для расчета многофункционального спирального датчика скорости и ускорения: св-во о гос. рег. прогр. для ЭВМ 2014662342. Рос. Федерация // Янгиров И. Ф., Максудов Д. В. – Зарегист. 27.11.14.

35. Янгиров, И. Ф. Программа для расчета электромеханического вибрационного преобразователя с короткозамкнутым спиральным элементом: св-во о гос. рег. прогр. для ЭВМ 2015617007. Рос. Федерация // Янгиров И. Ф., Максудов Д. В. - Зарегист. 26.06.15.

36. Янгиров, И. Ф. Программа для расчета спирального акселерометра: св-во о гос. рег. прогр. для ЭВМ 2015662144. Рос. Федерации // Янгиров И. Ф., Максудов Д. В., Прокопьев Н.Г. – Зарегист. 17.11.15.

В других изданиях

37. Хайруллин, И. Х. Устройство для возбуждения крутильных колебаний / Хайруллин И. Х., Исмагилов Ф. Р., Янгиров И. Ф., Хайруллин Т. И. // Машиностроитель. – 1993. – № 7, 8. – С. 19.

38. Хайруллин, И. Х. Датчик виброускорений / Хайруллин И. Х., Янгиров И. Ф., Исмагилов Ф. Р. // Машиностроитель. – 1995. – № 2. – С. 12.

39. Хайруллин, И. Х. Магнитоэлектрический преобразователь / Хайруллин И. Х., Янгиров И. Ф. // Машиностроитель. – 1995. – № 3. – С. 31.

40. Хайруллин, И. Х. Трансформаторный преобразователь / Хайруллин И. Х., Янгиров И. Ф., Исмагилов Ф. Р. // Машиностроитель. – 1995. – № 10. – С. 14.

41. Хайруллин, И. Х. Устройство для регулирования характеристик магнитоэлектрического преобразователя / Хайруллин И. Х., Янгиров И. Ф., Исмагилов Ф. Р. // Машиностроитель. – 1995. – № 7 – 8. – С. 25.

42. Янгиров, И. Ф. Повышение чувствительности индуктивных преобразователей / Янгиров И. Ф. // Машиностроитель. – 1997. – № 10. – С. 24–25.

43. Янгиров, И. Ф. Шаговый двигатель для систем автоматики, электропружинный двигатель / Янгиров И. Ф. // Машиностроитель. – 1997. – №5.– С. 27–28.

44. Янгиров, И. Ф. Электрические вибродатчики с чувствительным спиральным элементом / Янгиров И. Ф. // Машиностроитель. – 2001. – № 7. – С.17–19.

45. Янгиров, И. Ф. Электромеханическая муфта / Янгиров И. Ф // Машиностроитель. – 1998. – № 2. – С. 25.

46. Янгиров, И. Ф. Датчик перемещений и ускорений с коническим спиральным вторичным элементом / Янгиров И. Ф. // Машиздат. Техника машиностроения. – 2011. – № 1. – С. 17–25.

47. Янгиров, И. Ф. Универсальный датчик вращательно - колебательных движений / Янгиров И. Ф. // Машиздат. Техника машиностроения. – 2011. – № 1. – С. 26–30.

48. Янгиров, И. Ф. Теоретическое и экспериментальное определение формы колебания чувствительного элемента сложной конфигурации / Янгиров И. Ф. // Машиностроитель. – 2010 – № 7 – С. 10–12.

49. Янгиров, И. Ф. Магнитосвязный двухспиральный механический вибрационный привод / Янгиров И. Ф. // Машиздат. Техника машиностроения. – 2011. – № 9. – С. 53–63.

50. Янгиров, И. Ф. Спиральный датчик скорости и ускорений с улучшенными метрологическими характеристиками / Янгиров И. Ф. // Машиздат. Машиностроитель. – 2011. – № 4. – С. 59 – 63.

51. Янгиров, И. Ф. Низкочастотный спиральный электромеханический преобразователь / Янгиров И. Ф. // Машиностроитель. – 2012. – № 9. – С. 45 – 48.

52. Исмагилов, Ф. Р. Спиральный датчик параметров крутильно-колебательного движения / Исмагилов Ф. Р., Хайруллин И. Х., Янгиров И. Ф. //

Электротехнические комплексы и системы: межвузовские научный сборник; УГАТУ. – г. Уфа. – 2011. – С. 213 – 218.

53. Исмагилов, Ф. Р. Индуктивный спиральный преобразователь скорости и ускорения / Исмагилов Ф. Р., Хайруллин И. Х., Янгиров И. Ф. // Электротехнические комплексы и системы: межвузовский научный сборник; УГАТУ. – 2011. – С. 225 – 232.

54. Исмагилов, Ф. Р. Многофункциональные преобразователи трансформаторные со спиральным замкнутым элементом / Исмагилов Ф. Р., Янгиров И. Ф. // Машиностроитель. – 2012. – № 1– С. 22 – 26.

55. Янгиров, И. Ф. Спиральный акселерометр / Янгиров И. Ф. // Машиностоитель. – 2012. – № 8. – С. 27 – 29.

56. Янгиров, И. Ф. Спиральный самонастраивающийся шунтирующий реактор для энергосистемы / Янгиров И. Ф., Зиялтдинова Л.Ф. // Машиностроитель. – 2014. – № 10.

57. Янгиров, И. Ф. Рекомендации по расчету конструкций ЭМВП / Янгиров И. Ф., Салимов Р. И., Карамов Д. М. // Приоритетные направления развития современной науки: материалы 4-ой Международной заочной научно-практической конференции / 10 декабря 2012 г. / Науч. ред. М. В. Волкова – г. Чебоксары. – НИИ педагогики и психологии, 2012. – С. 204 – 207.

58. Янгиров, И. Ф. Взрывомагнитный генератор спиральный для СВЧ-излучения в машиностроении (ВМГС) / Янгиров И. Ф., Зиялтдинова Л. Ф. // Третья Международная заочная конференция «Инновационные материалы технологии в машиностроительном производстве». – г. Орск. - 2014. – С. 64 – 69.

59. Янгиров, И. Ф. Спиральный двигатель с повышенными механическими характеристиками / Янгиров И. Ф., Зиялтдинова Л. Ф. // Вторая Всероссийская НПК «Современные проблемы электроэнергетики». - г. Махачкала – 24 мая 2014г. – С. 10 – 16.

60. Янгиров, И. Ф. Спиральный вибратор с улучшенными характеристиками / Янгиров И. Ф., Зиялтдинова Л. Ф., Смагин С. И. // Научный потенциал. – 2014. – № 3 – 4 (рубрика «Материалы V Международной заочной научно-практической конференции «Приоритетные направления развития современной науки»).

61. Янгиров, И. Ф. Спиральный накопитель энергии / Янгиров И. Ф., Исмагилов Ф. Р., Максудов Д. В. // Всероссийская научно-практическая конференция, посвященная 110-летию А. М. Бадамса, «Электротехнические комплексы и системы» - г. Уфа, УГАТУ. – 2015. – С. 208 – 212.

62. Янгиров, И. Ф. Беспроводная передача электроэнергии - генератор ТЕСЛА / Янгиров И. Ф., Федосов Е. М. – г. Москва. – Изобретатели - машиностроению. – 2015. – № 10. – С. 2 – 9.

63. Янгиров, И. Ф. Инженерная методика расчёта спирального акселерометра / Янгиров И. Ф., Максудов Д. В., Федосов Е. М., Зиялтдинова Л. Ф. // Машиностроитель. – 2015. – № 11. – С. 19 – 24.

64. Янгиров, И. Ф. Комплексная программа инженерного расчета ЭМВП – двигателя со спиральным короткозамкнутым элементом / Янгиров И. Ф.,

Максудов Д. В., Зиялтдинова Л. Ф. // V Всероссийская научно-техническая конференция – г. Ишимбай, УГАТУ. 2015 – 10 июня 2015. – С. 105 – 110.

65.Янгиров, И.Ф. Математическая модель спирального преобразователя с учетом основных электромеханических параметров /Янгиров И.Ф., Ахметова Е.О. // Всероссийская научно-практическая конференция «Наукоемкие технологий в машиностроений». – г. Ишимбай. –2013. –17–18 мая. – С.59–61.

66.Янгиров, И.Ф. Разработка САПР электромеханических датчиков для предприятии машиностроения /Янгиров И.Ф., Ахметова Е.О. //Всероссийская научно-практическая конференция «Наукоемкие технологий в машиностроений». – РБ. – г. Ишимбай. – 17–18 мая 2013. – С.90-92.

67. Янгиров, И.Ф. Расчет и выбор схемы для аварийного зажигания свечи у боевых самолетов на высоте 20 км. и более / Янгиров И.Ф., Максудов Д.В., Мухаметшин А.В., Зиялтдинова Л.Ф.// Российская научно-техническая конференция «Мавлютовские чтения» посвященная 90-летию со дня рождения член-корр. РАН, д.т.н., профессора Р.Р. Мавлютова – г. Уфа, УГАТУ. – 21–24 марта 2016. – С.103–106.

68. Янгиров, И.Ф. Методика расчета электропружинного привода/ Янгиров И.Ф., Сафиуллин Р.А., Максудов Д.В. // Всероссийская научно-практическая конференция посвященная 110-летию А.М.Бадамса «Электротехнические комплексы и системы» – г. Уфа, УГАТУ. – 2015. – С. 278–284.

69. Янгиров, И.Ф. Способ определения формы колебания у ракетных конструкции для прочностных расчетов / Янгиров И.Ф., Максудов Д.В., Ханов А.Р., Каримов А.И.// Российская научно-техническая конференция «Мавлютовские чтения» посвященная 90-летию со дня рождения член-корр.РАН, д.т.н., профессора Р.Р. Мавлютова-г.Уфа, УГАТУ. – 2016. – 21-24 03.2016. – С.108–110.

70. Янгиров, И.Ф. Спиральный вибрационный стенд для научных лабораторных исследований /Янгиров, И.Ф., Исмагилов Ф.Р., Максудов Д.В. Халиков А.Р. // Технология машиностроения. – 2016. – №8. – С.43–45.

71. Янгиров, И.Ф. Многосекционная пружинная электромеханическая муфта (МСЭМ) / Янгиров И.Ф., Исмагилов Ф.Р., Максудов Д.В., Зиялтдинова Л.Ф.// Технология машиностроения - 2017.- №3.- С.22-25

Диссертант И. Ф. Янгиров

ЯНГИРОВ Ильгиз Флюсович

ТЕОРИЯ И МЕТОДОЛОГИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ НОВОГО КЛАССА ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ВИБРАЦИОННЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ СО СПИРАЛЬНЫМ ВТОРИЧНЫМ ЭЛЕМЕНТОМ

Специальность:
05.13.05 – Элементы и устройства вычислительной техники и системы управления

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Подписано в печать 00.00.2017. Формат 60x84 1/16.
Бумага офсетная. Печать плоская. Гарнитура Times New Roman.
Усл. печ. л. 2,1. Уч.-изд. л. 2,0.
Тираж 100 экз. Заказ № .
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет»
Редакционно-издательский комплекс УГАТУ
450008, г. Уфа, ул. К. Маркса, 12.