



На правах рукописи

Найгерт Катарина Валерьевна

**ОСНОВЫ ТЕОРИИ И МЕТОДОЛОГИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ
МАГНИТОРЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРИВОДОВ СИСТЕМ ВИБРОЗАЩИТЫ
КОМБИНИРОВАННОГО ТИПА**

Специальность

05.02.02 – Машиноведение, системы приводов и детали машин

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Челябинск 2019

Работа выполнена на кафедре «Автомобильный транспорт» ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)»

Научный консультант: **Целищев Владимир Александрович**, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «УГАТУ», г. Уфа, кафедра прикладная гидромеханика, заведующий

Официальные оппоненты: **Ломакин Владимир Олегович**, доктор технических наук, ФГБОУ ВО «МГТУ имени Н.Э. Баумана (НИУ)», г. Москва, кафедра Э-10 «Гидромеханика, гидромашины и гидропневмоавтоматика», профессор

Шайдаков Владимир Владимирович, доктор технических наук, ООО «Инжиниринговая компания «Инкомп-Нефть», г. Уфа, заместитель директора

Сызранцев Владимир Николаевич, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», г. Тюмень, кафедра «Машины и оборудования нефтяной и газовой промышленности», заведующий

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», г. Самара

Защита диссертации состоится 29.04.2020 г., в 13-00 часов, на заседании диссертационного совета Д212.298.09, созданного на базе ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)» по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, аудитория 1001.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)»: <https://www.susu.ru/ru/dissertation/d-21229809/naygert-katarina-valerevna>

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью, просим направлять на имя ученого секретаря по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, ЮУрГУ, Ученый совет, электронная почта: berezovskaiail@susu.ru, контактный телефон +7(351)267-91-23.

Автореферат разослан «___» _____ 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д212.298.09,
доктор технических наук, доцент



А.А. Абызов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы:

Современные промышленные объекты представляют собой совокупность сложных технологических систем, включающих в себя технологические машины, производственное оборудование и трубопроводные системы, которые нуждаются в защите от механических нагрузок. Существенные различия в режимах нагружения объясняют целесообразность разделения реализуемых мероприятий на вибрационную защиту (ВЗ) и вибрационную изоляцию (ВИ). ВЗ машин, оборудования и трубопроводных систем связана, прежде всего, с осцилляциями конструкций, вызванными рабочими процессами агрегатов и высокоскоростным течением транспортируемой жидкой среды. В случае внешних механических воздействий реализуется ВИ, выполнение которой крайне актуально для технологических линий, производящих микроэлектронику, микропроцессорную технику и т.д., а также на предприятиях в зонах сейсмической активности. Очевидно, что конструкции, аппаратная и программная реализация управления зависят от назначения систем ВЗ и специфики объектов машиностроения. При защите от собственной вибрации возможно использование систем с предварительной настройкой, но для ВИ объектов необходимо обеспечение управления опорами в реальном времени, следовательно, требуется применение адаптивных систем. Существующие на сегодняшний день адаптивные системы ВЗ, используемые в машиностроении, как правило, предусматривают применение электромеханических преобразователей и регулирующей аппаратуры, имеющих подвижные механические элементы, которые обладают инерционностью подвижных масс, низкими динамическими характеристиками и недостаточной надежностью, поэтому необходим поиск путей дальнейшего развития адаптивных систем ВЗ и ВИ. Большой вклад в исследования вибрационных процессов и систем ВЗ технологических объектов, машин и оборудования внесли такие ученые, как И.И. Блехман, В.О. Кононенко, Я.Г. Пановко, И.И. Губанова, К.В. Фролов, А.В. Синев, N.S. Feng, E.J. Hahn, R.B. Randall, G. Kim, R. Singh, R.M. Branch, A.G. Haddow, S.J. Gan, J.D. Cotton и др.

Наиболее перспективными на сегодняшний день являются магнитореологические (МР) системы демпфирования, позиционирования и ВЗ, позволяющие исключить из своих конструкций подвижные механические регулирующие элементы. В МР системах в качестве кинематического звена выступает МР жидкость, являющаяся коллоидным раствором частиц магнетика, стабилизированных в жидкости носителе. В зависимости от размеров частиц магнетика и физико-химических свойств жидкости носителя рабочие среды разделяются на МР и феррожидкостные (ФЖ). Применение МР сред позволяет производить управление характеристиками приводных систем и генерировать в потоке рабочей среды различные физические эффекты посредством внешних электромагнитных полей (ЭМП). Расходные характеристики в МР системах регулируются МР дросселирующими устройствами, а источниками давления являются магнитодинамические (МД) насосы. Также перспективно совершенствование классических гидравлических приводных систем путем внедрения в их конструкции гибридных гидравлических (ГГ) аппаратов, имеющих ФЖ регулирующие элементы, что качественно улучшает контроль статических и расходных характеристик.

Существующие приводы МР систем ВЗ в силу своих конструктивных особенностей обладают нестабильностью рабочих характеристик, что негативно сказывается на их динамике и точности. Рабочие камеры, предусматривающие дросселирование среды посредством изменения гидравлического сопротивления во внешних управляющих полях и/или, обладающие регулирующими контурами, имеют ограничения в рабочих давлениях, вследствие непроизводительных утечек среды через рабочие сечения с ростом давления, что ограничивает грузоподъемность МР систем ВЗ. Также известен малый коэффициент полезного действия у регулирующих МР и МД аппаратов, используемых в приводах МР систем ВЗ, и применяющих для управления расходными характеристиками только изменения вязкости рабочих сред во внешних полях или реализующие линейное ускорение рабочих сред, обладающих магнитными свойствами. Поэтому качественное и количественное повышение технических характеристик и обеспечение стабильности их значений на всем протяжении рабочего цикла являются значимой проблемой для МР систем ВЗ. Во многом данную проблему можно обозначить, как следствие особенностей рабочих процессов МР приводов.

В развитии МР, ФЖ, МД и ГГ аппаратов и реологии МР жидкостей, применяемых в качестве рабочих сред, участвовали следующие ученые: А.Ф. Пшеничников, А.В. Беляев, Б.Л. Смородин, В.М. Полуниин, А.В. Лебедев, С.В. Дьяченко, А.М. Базиненков, Д.Ю. Борин, В.П. Михайлов, Р.Н. Хамитов, М.И. Шлиомис, Е.Е. Бибик, З.П. Шульман, В.И. Кордонский, R.E. Rosensweig, R. Moskowitz, J.D. Carlson, M. Jolly, M. Nakano, Д. Босис, G.R.R. Gonçalves, F. Pelegrini, P.C. Morais, S. Odenbach, Мьо Мин Тан. Основное влияние на развитие методов расчета МР систем ВЗ оказали ученые: Б.А. Гордеев, А.С. Плехов, M. Giuclea, T. Sireteanu, D. Stancioiu, S. Guo, S. Yang, C. Pan, W.H. Liao, S.R.K. Nielsen, W.L. Qu и др.

Создание активных и полуактивных систем ВЗ, способных обеспечить генерирование регулирующих осцилляций, управляемых в реальном времени, обладающих высокими динамическими характеристиками и адаптирующихся к внешним нагрузкам сложных конфигураций, позволит решить ряд проблем, связанных с транспортировкой многофазных сред. Протяженность технологических трубопроводов на предприятиях химической и атомной промышленности достигает десятков километров, а транспортируемые по ним среды могут представлять большую степень опасности для окружающей среды и здоровья персонала. Очевидно, что промышленные системы ВЗ должны соответствовать высоким требованиям надежности. В целом разработка новых конструктивных решений, автоматизация и систематизация методов инженерных расчетов, создание рациональных алгоритмов управления для адаптивных систем ВЗ, способны оптимизировать рабочие процессы систем ВЗ, повысить надежность и увеличить эффективность трансформации (диссипации) энергии механических нагрузок. Очевидно, что динамические характеристики систем ВЗ во многом определяются переходными процессами в их приводах. Это требует определения фундаментальных положений развития теории проектирования и методов расчета МР, МД и ФЖ аппаратов в приводах систем ВЗ и ВИ.

Объектом исследования являются процессы, протекающие в рабочих полостях МР и ФЖ устройств ВЗ и в регулирующих аппаратах управляющих контуров (приводов).

Предметом исследования являются закономерности рабочих характеристик МР и ФЖ устройств ВЗ, регулирующих аппаратов управляющих контуров (приводов), от гидродинамического сопротивления рабочей среды, формируемого регулирующими воздействиями комбинированного типа.

Цель: Развитие теоретических основ адаптивной ВЗ технологических систем, машин и оборудования, методов их проектирования, совершенствование их конструкций и алгоритмов управления путем создания оригинальных аппаратов на основе новых физических эффектов и явлений.

Для достижения указанной цели в работе ставятся задачи:

1. Определить основные пути повышения эффективности работы широкого класса МР систем ВЗ комбинированного типа и сформулировать принципы разработки перспективных МР и ФЖ аппаратов нового класса.

2. Создать математические модели, позволяющие описывать рабочие процессы МР систем ВЗ комбинированного типа. Выявить закономерности изменения гидравлического сопротивления и эффективности трансформации и диссипации механической энергии от технических параметров.

3. Разработать научно-обоснованный метод прогнозирования эффективности МР систем ВЗ, основываясь на анализе рабочего процесса, позволяющий осуществить оценку вклада отдельных составляющих комбинированного способа на показатели работы системы и отдельно МР / ФЖ аппаратов.

4. Создать методы расчета МР систем ВЗ, учитывающие особенности процесса трансформации и диссипации механической энергии комбинированного типа (посредством комбинации регулирующих воздействий) и геометрические параметры МР камер, формирующие диссипативно-жесткостные свойства, которые позволят рационализировать рабочие процессы МР систем ВЗ.

5. Разработать и реализовать алгоритмы управления МР, ФЖ и ГГ аппаратов систем ВЗ, с целью улучшения их динамики, стабильности и энергоэффективности.

6. Определить рациональные режимы тепловых процессов МР приводных систем. Предложить варианты конструктивного оформления системы термостабилизации рабочей среды, позволяющей реализовать эти режимы.

Научная новизна результатов, полученных в диссертационной работе, и **основные положения, выносимые на защиту:**

1. Сформулирован новый подход в области совершенствования процессов ВЗ / ВИ в МР и ФЖ аппаратах и рабочих процессах в их приводных системах, отличающийся применением комбинации различных гидродинамических (линейных и вихревых), акустических и реологических эффектов. Впервые разработаны методологические основы повышения эффективности и надежности приводных систем, в основе которых лежат комбинированные способы ВЗ и ВИ.

2. Научно-обоснованы преимущества применения дифференциальных блоков электромагнитного управления в конструкциях аппаратов МР систем ВЗ. Установлены закономерности повышения эффективности отклика МР рабочей

среды на регулирование дифференциальным блоком электромагнитного управления при моделировании многокритериального сигнала управления и реализации обратной связи по ряду параметров.

3. Разработаны и реализованы методы проектирования и расчета МР / ФЖ систем активной ВЗ и регулируемой ВИ, отличающиеся способностью учета особенности рабочего процесса при совместном применении ФЖ осциллятора, вязкоупругого демпфирования и регулирующих МР / МД аппаратов комбинированного типа. Выявлены закономерности влияния на рабочие процессы вязкостной диссипации, импульсного изменения электромагнитной составляющей давления и колебательных движений частиц магнетика в вихревых ЭМП, их вклада в реализацию осцилляций в ФЖ опоре и критерии рационализации их соотношения.

4. Установлены закономерности повышения эффективности работы ФЖ камеры при совместной ее эксплуатации с ФЖ регулирующими элементами немагнитного управляющего контура.

5. Разработаны и реализованы методы проектирования и расчета, адаптивных МР систем ВЗ, отличающиеся способностью учета особенностей рабочего процесса МР камер с неоднородно распределенными диссипативно-жесткостными свойствами. Предложенные методы позволили впервые выявить закономерности, определяющие допустимый градиент распределения диссипативно-жесткостных характеристик в неоднородных МР камерах.

6. Впервые с позиций стабильности рабочих процессов и повышения надежности МР системы ВЗ разработана методика расчета и настройки жидкостного охладительного контура, отличающаяся использованием значений градиента магнитной восприимчивости рабочей среды, комплексной магнитной проницаемости рабочей среды и рационализации их значений с учетом требуемых динамических характеристик МР системы ВЗ комбинированного типа.

Практическая ценность и реализация результатов работы:

1. Разработанный подход дает возможность полностью устранить из конструкций систем ВЗ и ВИ подвижные регулирующие элементы, повышая на один порядок их надежность и динамические характеристики.

2. Разработана научно обоснованная методология повышения эффективности ВЗ и ВИ путем совершенствования процессов трансформации (диссипации) механической энергии в рабочих объемах МР и ФЖ сред для систем комбинированного типа. Предложены критерии оценки МР и ФЖ систем с точки зрения теории надежности с последующей формулировкой прикладной теории надежности МР и ФЖ систем. Установлены зависимости, позволяющие на стадии проектирования провести подбор рациональных геометрических и режимных параметров МР систем ВЗ и ВИ комбинированного типа с учетом особенностей рабочего процесса регулирующих МР / МД аппаратов управляющего контура привода.

3. На основе предложенной методологии созданы и промышленно внедрены рекомендации по МР системам ВЗ и ВИ комбинированного типа, включающие в себя: разработку МР систем ВЗ и ВИ, оценку динамики и степени диссипации механической энергии, позволяющие провести сравнительный анализ эффективности компоновок МР систем ВЗ и ВИ еще на стадии проектирования.

4. Разработаны и реализованы в виде программных кодов, прошедших государственную регистрацию, алгоритмы и инженерные методики расчета МР систем ВЗ, которые позволяют решать задачу расчета рабочих параметров аппаратов и задачу выбора компоновочных схем МР систем ВЗ и ВИ для конкретного объекта и значительно повысить производительность процесса проектирования и инженерного расчета МР и ФЖ аппаратов.

5. Разработан широкий ряд МР, МД, ФЖ и ГГ аппаратов, обладающих улучшенными динамическими характеристиками и высокими показателями надежности. Предложенные МР и МД аппараты обладают модульной конструкцией, позволяющей унифицировать конструктивные элементы. Разработанные конструкции реологического дросселя-термостата и МР аппаратов, в рабочие полости которых произведена интеграция термоэлектрических элементов, позволяют повысить эффективность теплообмена в системе и реализовать эффекты термомагнитной конвекции в объемах ФЖ и МР рабочих сред. Новизну предложенных конструкций подтверждают патенты.

6. Предложенные конструктивно-схемные решения систем ВЗ комбинированного типа, использующие дифференциальные блоки электромагнитного управления в сочетании с оригинальными алгоритмами их включения и схемами подключения индукторов обеспечивают создание нестационарных ЭМП с требуемыми структурами и высокими динамическими характеристиками. Наиболее перспективные МР и МД аппараты комбинированного типа внедрены в нефтехимической, аэрокосмической и других отраслях промышленности.

Методология проведения исследований:

В работе применены методы теоретического и экспериментального исследования. Методологическими и теоретическими основами исследования являются концептуальные положения гидродинамики, электродинамики, реологии, термодинамики, физической химии и материаловедения, прикладные исследования в области проектирования, изготовления и эксплуатации элементов машин, механизмов и приводных систем. Методы экспериментального исследования включали наблюдения и измерения требуемых параметров, опытных образцов.

Достоверность полученных результатов подтверждается:

Натурными экспериментальными исследованиями опытных образцов разработанных устройств; соответствием результатов математического моделирования с применением теоретических основ гидро- и электродинамики, реологии, законов физики, апробированных численных методов и компьютерного моделирования полученным экспериментальным данным, анализируемым с использованием аппарата математической статистики и теории вероятности. Разработанные методы проектирования и расчета созданных устройств, предложенные методы управления расходными и диссипативно-жесткостными характеристиками МР сред и комбинированные методы ВЗ применены при разработке приводов различного назначения и систем ВЗ и ВИ в ООО «НПП Авионика и Мехатроника», г. Челябинск и АО «УАП Гидравлика», г. Уфа, специализирующихся на изготовлении продукции авиационного и ракетно-космического назначения; при модернизации технологического оборудования, применяемого для производства элементов электронной аппаратуры и печатных плат в ООО «Контакт» г. Челябинск.

Результаты диссертационной работы используются в учебном процессе при чтении курсов лекций для студентов технических специальностей ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» на кафедре Прикладной гидромеханики, г. Уфа и НЧОУ ВО «Технический университет УГМК» г. Верхняя Пышма на кафедре Механики и автоматизации технологических процессов и производств, ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», г. Челябинск.

Работа является составной частью проекта, выполненного в рамках научно-технических программ ЮУрГУ (НИУ), № 9.7881.2017/БЧ «Развитие теории решения нестационарных задач нелинейной динамики связанных систем упругоподатливых гидродинамических трибосопряжений».

Апробация работы: Результаты работы докладывались в период с 2013 по 2019 гг: Конференции, Челябинск 2013-2019 гг.; Самара 2013-2019 г.; Международная научно-практическая конференция «Актуальные направления научных исследований» Казахстан, Петропавловск 2017 г.; Международная научно-практическая конференция «Актуальные вопросы современных научных исследований: Технические науки» Казахстан, Шымкент 2017 г.; International scientific conference «Innovations in modern science» Czech Republic, Prague 2017 г.; Международная конференция «Энергосбережение. Наука и образование», Набережные Челны 2017 г.; International scientific conference «Modern science: current issues and development prospects» Bulgaria, Sofia 2017 г.; Международная научно-техническая конференция «Гидравлические машины, гидропневмоприводы и гидропневмоавтоматика. Современное состояние и перспективы развития», Санкт-Петербург 2018 г.; 4th International Conference on Industrial Engineering, Москва 2018 г.; 5th International Conference on Industrial Engineering, Сочи 2019 г.

Диссертация обсуждена на расширенном заседании кафедры Прикладной гидромеханики Уфимского государственного авиационного технического университета, на объединенном семинаре кафедр Южно-Уральского государственного университета, на совещаниях в ООО «НПП Авионика и Мехатроника».

Основные работы, опубликованные по теме диссертации

По теме диссертации опубликовано 60 работ, в том числе 22 в журналах, рекомендованных ВАК, 6 в журналах, включенных в международные системы цитирования, 3 главы в коллективных монографиях РАН, 9 патентов, 3 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа изложена на 344 страницах основного текста и состоит из введения, шести глав, заключения, списка использованной литературы и приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и основные задачи исследования, отражены научная новизна и практическая ценность полученных результатов.

В первой главе проведен анализ состояния проблемы адаптивности и управляемости систем ВЗ, генезиса МР систем ВЗ, способов управления характеристиками рабочих сред, обладающих магнитными свойствами и известных методов численного исследования МР приводов и аппаратов. На основе литературных

данных рассмотрены факторы, влияющие на качество диссипации механической энергии, динамические характеристики, энергоэффективность и надежность. Рассмотрены распространенные способы защиты оборудования и технологических систем от вибрационных и ударных нагрузок. Проанализированы используемые в настоящее время конструкции систем ВЗ, регулирующих аппаратов их приводов и методики их проектирования и расчета. Вскрыты недостатки существующих конструкций, способов ВЗ и ВИ, методик проектирования и расчета, определены направления их совершенствования и развития. Обоснован выбор МР систем ВЗ. Сформулированы методологические основы создания МР систем ВЗ комбинированного типа и МР регулирующих аппаратов, обладающих принципиально новыми характеристиками и реализующие оригинальные комбинации физических эффектов и явлений для управления рабочим процессом. Сформулированы теоретические основы проектирования МР и ФЖ аппаратов, способствующих повышению их быстродействия. Создана собственная концепция развития МР систем ВЗ, сформулированы аспекты теорий: роста эффективности, повышения надежности и снижения затрат на производство и эксплуатацию МР систем ВЗ, и их приводов. На основе нового подхода конструктивного исполнения МР и ФЖ систем ВЗ и их приводов предложены способы рационализации процессов ВЗ / ВИ в МР и ФЖ аппаратах и оптимизации рабочих процессов в их приводных системах. Определены дальнейшие направления исследования.

Во второй главе Созданы теоретические основы совершенствования и проектирования МР и ФЖ аппаратов, способствующих повышению быстродействия МР систем ВЗ. Решены задачи повышения эффективности систем ВЗ численными и конструктивно-схемными методами за счет создания конструкций оригинальных МР и МД устройств, а также посредством разработки методологических основ их расчета, базирующихся на предложенных численных моделях. Описанные численные модели, адаптированы к рабочим процессам предложенных оригинальных конструктивно-схемных решений.

В работах Б.А. Гордеева, А.С. Плехова, M. Giuclea, T. Sireteanu, D. Stancioiu, S. Guo, S. Yang, C. Pan, W.H. Liao, S.R.K. Nielsen, W.L. Qu и др. предложены варианты способов ВЗ с применением МР трансформаторов механической энергии и методик их расчета, но рабочий процесс данных агрегатов в целом сводится к вязкостной диссипации механической энергии за счет повышения вязкости МР среды. В.М. Полунин, А.В. Лебедев и др. в своих работах формируют фундаментальные основы численного описания акустических эффектов в МР / ФЖ средах, а М.И. Шлиомис создает базовые принципы оценки изменения вязкостных характеристик МР жидкостей в магнитных полях. Основные способы подавления ударных волн наложением на них волн близких частот или волн в противофазе известны и их эффективность общепризнана. Базируясь на данных фундаментальных исследованиях в области реологии и акустики МР / ФЖ сред, сформулирован новый подход совершенствования и рационализации процессов ВЗ в МР и ФЖ аппаратах и рабочих процессов в их приводных системах. Суть метода заключается в применении комбинации акустических, гидродинамических (линейных и вихревых) и реологических эффектов, с целью повышения эффективности процесса трансформации (диссипации) механической энергии путем ра-

ционализации сочетаний параметров сигнала управления комбинированного типа. Изменение только вязкостных параметров рабочей среды недостаточно для управления характеристиками МР среды в широком диапазоне рабочих температур и давлений. Ротационные жидкостные системы более эффективны, что во многом связано с гироскопическими эффектами, наблюдаемыми в объемах жидких сред. Очевидно, что сочетание управляемости вязкостных характеристик МР жидкости и создание контролируемых в реальном времени гидродинамических (ротационных и винтовых) эффектов дает возможность повысить глубину регулирования системы и расширить интервалы рабочих параметров. Поэтому при моделировании рабочих процессов МР и МД регулирующих аппаратов комбинированного типа (способных инициировать вихревые и неньютоновские эффекты) целесообразно применение критерия – спиральности потока (фактора, характеризующего интенсивность завихренности потока), предложенного для описания гидравлических вихревых систем О.В. Митрофановой. Гидравлическая модель, учитывающая спиральность потока, разработанная О.В. Митрофановой для описания вихревых систем, модифицирована путем ее объединения с магнитодинамической моделью Максвелла и дополнена уравнениями гидродинамики и членами, позволяющими связать между собой решения гидравлической и магнитодинамической частей, а также требуемыми для параметрической и геометрической оптимизации МР/ФЖ системы ВЗ расчетными зависимостями. Как известно для установления количественных соотношений между изменяющимся электрическим полем и вызываемым им магнитным полем в диэлектриках Максвелл ввел в рассмотрение ток смещения, следуя из утверждения, что всякое переменное электрическое поле порождает переменное магнитное поле. Исходя из диэлектрических свойств МР среды и возникновения тока смещения, считаю, справедливым записать скорость изменения спиральности потока с учетом силы Лоренца, модифицировав уравнение Навье-Стокса:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + v \nabla h = \omega \left(P_v + \text{grad} \frac{v^2}{2} - \frac{1}{\rho} \text{grad} P \right) + v \text{rot} P_v - \mathcal{G} \omega \text{rot} \omega - \mathcal{G} v \text{rot} (\text{rot} \omega) + F_\omega; \quad (1)$$

$$h = v \omega; \omega = \text{rot} v; F_\omega = \text{rot} F_l.$$

P_v – вектор плотности объемных сил, ω – завихренность (частота), V – скорость, h – спиральность, t – время, P – давление, \mathcal{G} – кинематическая вязкость, ρ – плотность, F_l – сила Лоренца. Электродинамика рабочего процесса описывается системой уравнений Максвелла, адекватность применения которой для описания рабочего процесса МР и МД систем подтверждена рядом независимых друг от друга исследований:

$$\frac{\partial B}{\partial t} = \text{rot} ([v \times B] - E); \text{rot} \frac{1}{\mu} B = 4\pi j; \quad (2)$$

$$\text{div} B = 0; B = \mu H; \text{rot} \frac{1}{\mu} B = 4\pi; j = \varepsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial t}.$$

H – напряженность магнитного поля, B – магнитная индукция, E – напряженность электрического поля, j – плотность тока, μ – магнитная проницаемость,

$\varepsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t}$ – плотность тока смещения в вакууме, $\frac{\partial P}{\partial t}$ – плотность тока поляризации (плотность тока, обусловленная перемещением зарядов в диэлектрике). Очевидно, что сила Лоренца может принимать, как положительные, так и отрицательные значения, то есть, потенцируя движение магнитной среды или тормозя ее поток. Выразим электромагнитные параметры через векторный потенциал с учетом заданных направлений векторов скорости в гидродинамической части A :

$$B = \text{rot}A; E = -\frac{\partial A}{\partial t} + [v \times \text{rot}A]; \quad (3)$$

$$\text{rot} \frac{1}{\mu} B = -\text{rot} \frac{1}{\mu} \text{rot}A; B = B_m \cos(\omega_m t + \varphi_m); \omega_m = \frac{\partial \varphi_m}{\partial t}.$$

B_m – вектор амплитуды индукции магнитного поля, ω_m – частота магнитного поля, φ_m – фаза. Для описания геометрии винтового поля в координатах (r, φ, z) представим напряженность в виде:

$$H(r, \varphi, z); H_r = H_m I_n'(3\alpha r) \sin[3(\varphi - \alpha z)]; \quad (4)$$

$$H_\varphi = \frac{1}{\alpha r} H_m I_n(3\alpha r) \cos[3(\varphi - \alpha z)];$$

$$H_z = H_m I_n(3\alpha r) \cos[3(\varphi - \alpha z)]; \alpha = \frac{2\pi}{L}.$$

L – длина элементов блока управления, I_n – функция Инфельда, H_m – вектор амплитуды напряженности магнитного поля.

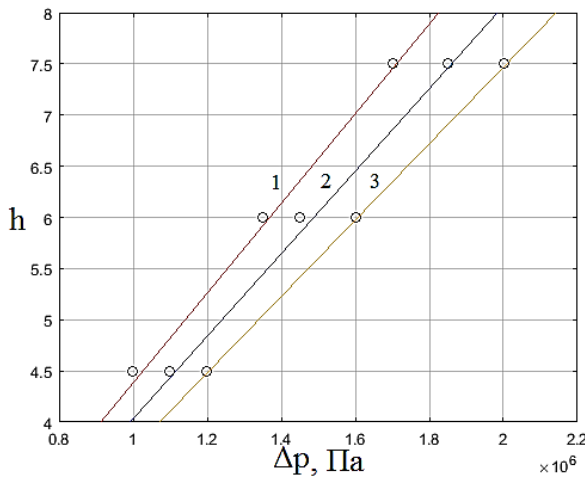


Рисунок 1 – Влияние спиральности потока на перепад давления МР жидкости, взятый как функция напряженности поля $\Delta p(H)$, при различных значениях вязкости рабочей среды: 1: $\eta=23$ сСт; 2: $\eta=25$ сСт; 3: $\eta=27$ сСт. Точки – экспериментальные данные

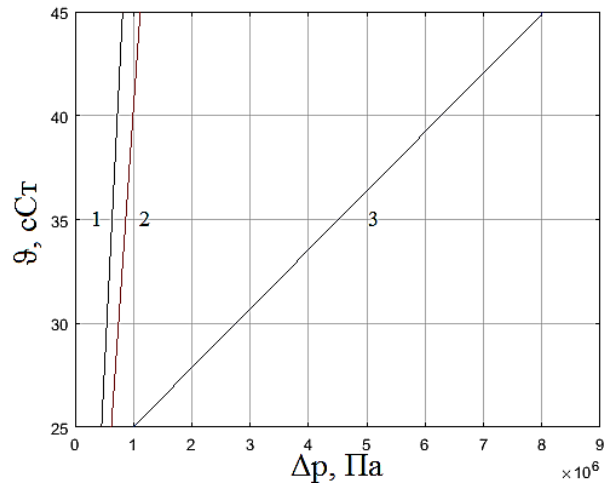
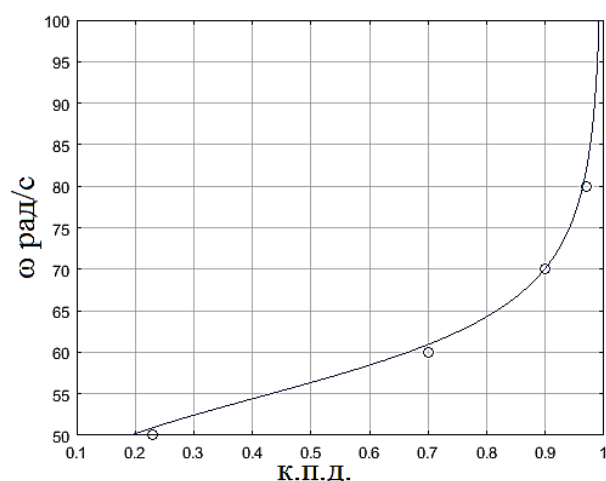


Рисунок 2 – Влияние вязкости МР жидкости на перепад давления: 1 – при управлении расходными характеристиками без магнитогидродинамического эффекта (заимствованная модель), 2 – при управлении расходными характеристиками без магнитогидродинамического эффекта (авторская модель), 3 – при варьировании значениями вязкости и генерирования магнитогидродинамического вихревого эффекта (авторская модель)

Рисунок 3 – Влияние завихренности потока в рабочей полости на к.п.д. МД насосов. Точки – экспериментальные данные



В качестве критерия, характеризующего эффективность рабочего процесса систем, примем к.п.д. Реализация ротационных / винтовых магнетогидродинамических эффектов способна повысить гидравлический к.п.д. МД насосов, что обусловлено гироскопическими эффектами частиц магнетика. Результаты моделирования и натурного эксперимента, Рисунок 1, подтверждают улучшение статических характеристик МД насосов с ростом значения спиральности потока. Для анализа данных, получаемых при численном моделировании, целесообразно произвести их сравнения с результатами существующих моделей, позволяющих осуществлять учет только влияния изменений вязкости МР среды на расходные характеристики устройств, Рисунок 2. Для верификации численной модели выбрана модель А.В. Воронкова, М.П. Галанина, А.С. Родина. Так как, в МД аппарате течение рабочей среды реализовано в винтовом канале малого диаметра и посредством внешних ЭМП, смешивание слоев не происходит и можно принять режим течения ламинарным с низким значением гидравлических потерь. Результаты расчетов показывают, что к.п.д. МД насосов комбинированного типа стремится к 0.99, Рисунок 3. Диссипативно-жесткостные свойства зависят, прежде всего, от вязкости рабочей среды. Генерирование акустических волн в объеме МР среды (чередующихся зон компрессии и декомпрессии) в сочетании с регулируемой вязкостной диссипацией механической энергии позволяют улучшить динамику гашения ударных и вибрационных нагрузок. Неоднородное распределение вязкости в МР рабочей камере регулируемо и моделируется посредством внешнего ЭМП и способно генерировать управляющие акустические волны. Численные модели базируются на фундаментальных работах А.В. Лебедева, В.М. Полунина, М.И. Шлиомиса и образуют научно-обоснованный обобщенный метод прогнозирования эффективности МР систем ВЗ комбинированного типа, позволяющий осуществить оценку вклада отдельных составляющих комбинированного способа (сочетания вязкостной диссипации и регулируемых акустических волн) на показатели работы системы и отдельно МР / ФЖ аппаратов. Численные модели, предложенные А.В. Лебедевым, В.М. Полуниным и М.И. Шлиомисом для описания магнетодинамических и магнитоакустических эффектов дополнены расчетными зависимостями. Усовершенствованные численные модели позволяют описывать рабочие процессы, созданных устройств МР/ФЖ систем ВЗ, учитывать формирующиеся в рабочей среде токи смещения и силу Лоренса, потенцирующие

гидродинамические процессы в жидком объеме ферромагнитной среды, рассчитывать гидравлические эффекты, обусловленные конструктивными особенностями регулирующих оригинальных МР/МД/ФЖ устройств и реологическими свойствами рабочих сред. Также введенные дополнения дают возможность определять рабочие и геометрические параметры созданных МР/МД/ФЖ устройств. Базовая часть основана на модели Кирхгофа, позволяющей задавать граничные условия, учитывающие особенности нагружения объекта ВЗ. Модель Кирхгофа совместно решается с уравнением движения исполнительного элемента МР системы ВЗ (плунжера) методом Рунге-Кутты (конкретный численный метод решения задачи Коши выбирается исходя из условий точности). Граничные условия для МР опоры, полученные из решений уравнений колебаний трубопровода:

$$z_1 = \frac{w_1}{L}; \frac{\partial w}{\partial \xi} = 0 \left(\xi = \frac{x}{L} \right); \omega_s \rightarrow \omega_p \text{ или } -\omega_s = \omega_p. \quad (5)$$

L – длина, W – прогиб трубопровода, $\omega_s; \omega_p$ – частота опоры; трубопровода. При распространении ударных волн в рабочей камере МР опоры, не разделенной на субполости, справедлива следующая система акустических уравнений:

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} = -c_f^2 \nabla \rho' + \frac{1}{2} \mu \chi \nabla H^2 + \nabla \eta \Delta v + \nabla \left(\eta_v + \frac{\eta_s}{3} \right) \nabla (\nabla v) + \text{div} F_l; \quad (6)$$

$$\frac{\partial \rho'}{\partial t} + \rho \text{div} v = 0; v_z = v_{za} \cos [2(k_w z - \omega_m t) + \varphi_{vz}]; v_{za} = \frac{\left(\frac{A_m}{\rho} \right) \cdot \frac{\omega_m}{k_w}}{\left(\left[c_f^2 - \left(\frac{\omega_m}{k_w} \right)^2 \right]^2 + 4\omega_m^2 b_m^2 \right)^{1/2}};$$

$$\text{tg} \varphi_{vz} = \frac{2b_m \omega_m}{c_f^2 - \left(\frac{\omega_m}{k_w} \right)^2}; A_m = \mu \chi H_a^2 / 4; b_m = \left[\eta_v + \left(\frac{4}{3} \right) \eta_s \right] / \rho;$$

$$\eta_s(H) = \left(\frac{\tau_{sh}}{\dot{\gamma}} + \eta \right) + \frac{1}{4} \frac{\tau_n M(H)}{1 + (\tau_n \tau_s H M(H)) / J}; H^2 = H_a^2 [sh^2 k_w x + \sin^2(k_w z - \omega_m t)];$$

$$H_a = B / \mu (1 + \chi) sh k_w l; \text{div} B = 0; \text{rot} H = \varepsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial t}; B = \mu H.$$

k_w – волновой вектор, c_f – скорость акустической волны в МР среде, l – высота объема МР среды в рабочей камере, φ_{vz} – разность фаз, v_φ – фазовая скорость волны, η_s – сдвиговая вязкость, η_v – объемная вязкость, χ – магнитная восприимчивость. Уравнение движения плунжера МР демпфера с учетом гидростатической подъемной силы и гидродинамического трения МР среды:

$$m\ddot{z} + K_1 \dot{z} + K_2 z = F_d \sin \omega t \pm F_{GT} \sin \omega t; \quad (7)$$

$$K_1 = \frac{\eta_s S_c v}{h_v F_d}; \eta_s(T, H, \tau_{sh}) = \left(\frac{\tau_{sh}}{\dot{\gamma}} + \eta \right) + \frac{1}{4} \frac{\tau_n M(H)}{1 + (\tau_n \tau_s H M(H)) / J}.$$

η – динамическая вязкость, S_c – площадь контакта, h_v – фактор изменения скорости, τ_{sh} – сдвиговые напряжения, $\dot{\gamma}$ – градиент скорости сдвига, J – суммарный момент инерции частиц, $\tau_n \tau_s$ – времена релаксации (немагнитных и магнитных частиц), m – масса, F_d – возмущающая сила, K_2 – коэффициент, F_{GT} – гидростатическая подъемная сила, T – температура. Формирование восстанавливающей силы (с учетом формирования гидростатической подъемной силы) в рабочей полости МР камеры с распределенными диссипативно-жесткостными свойствами, разделенной на субполости, запишем как:

$$F_r = \Delta f_{z1} \pm F_{n1} + \Delta f_{z2} \pm F_{n2} + \Delta f_{z3} \pm F_{n3} \quad (8)$$

Δf_z – магнитная сила, создаваемая субполостью. Допустимый рост давления в сегменте без изменения давления в соседнем сегменте:

$$\Delta p_n = \delta p_n \pm \frac{gV\rho_{n+1}}{S_c} - \delta p_{n+1} - p_{los}; \quad (9)$$

$$\Delta p_n = \delta p_n \pm \frac{gV\rho_{n+1}}{S_c} - \delta p_{n+1} - Z_c \left(1 + k_s \frac{d}{D_h} \right) (D_b / d)^4 \frac{\rho_f v^2}{2}.$$

Сила, действующая на перегородку:

$$F_n = S_c \Delta p_n \quad (10)$$

Z_c – количество каналов, V – объем, k_s – коэффициент гидравлического сопротивления, d – диаметр канала, D_h – диаметр спирали, p_n – давление в сегменте, ρ_f – плотность МР среды, p_{los} – потери давления. Перепишем силу, действующую на перегородку с учетом коэффициентов гидравлического сопротивления спиральных каналов перегородки:

$$F_n = \frac{p_b \left(-Z_c \left(1 + k_s \frac{d}{D_h} \right) (D_b / d)^4 \frac{\rho_f v^2}{2} \right) S_c}{a} (U_{n-1} + U_{n+1} - 2U_n); \quad (11)$$

$$\rho_f S_c b \frac{d^2 U_n}{dt^2} = \frac{p_b \left(-Z_c \left(1 + k_s \frac{d}{D_h} \right) (D_b / d)^4 \frac{\rho_f v^2}{2} \right) S_c}{a} (U_{n-1} + U_{n+1} - 2U_n) - 2\mu S_c M_z \left(\frac{\partial H_z}{\partial z} + \frac{\partial M_z}{\partial z} \right) U_n.$$

b – высота МР субкамеры, a – высота перегородки, ρ_b – плотность материала перегородки, n – номер сегмента, D_b – диаметр перегородки. Смещение из положения равновесия рассматриваемого сегмента:

$$U_n = U_0 \cos(\omega_m t - nq); q = k_w d. \quad (12)$$

Уравнение движения плунжера выбирается исходя из режима ВЗ и конструктивных особенностей. Решение уравнений модели Кирхгофа для объекта демпфирования позволяет задавать граничные условия в численных моделях МР/ФЖ систем ВЗ. Предложена конструкция адаптивного амортизатора, Рисунок 4 (Патент RU 175044), работающего по принципу комбинации МР, реологических

и механических эффектов виброгашения. Рабочая полость адаптивного комбинированного реологического амортизатора разделена на две камеры: МР камеру и рессорно-реологическую камеру, отделенных подвижной перегородкой. Регулируемым элементом конструкции является МР камера, разделенная подвижными перегородками на субполости, которые сообщаются между собой посредством системы спиральных каналов. Каждая МР субполость имеет индивидуальный управляющий электромагнит (ЭМ), сборка ЭМ образует дифференциальный электромагнитный блок управления, установленный на корпус. В зависимости от выбранного рабочего режима характеристики управляющего поля могут меняться для ЭМ, входящих в блок управления, или варьироваться индивидуально для каждого ЭМ, регулирующего реологические параметры рабочей среды в отдельной субполости. Это позволяет получать различные диссипативно-жесткостные свойства МР рабочей среды в каждой субполости из субполостей, образующих МР рабочую камеру, при этом формируются неоднородные распределенные диссипативно-жесткостные характеристики МР рабочей камеры. В случае малой грузоподъемности опоры, также возможна реализация неоднородных распределенных диссипативно-жесткостных характеристик без деления МР рабочей камеры на субполости.

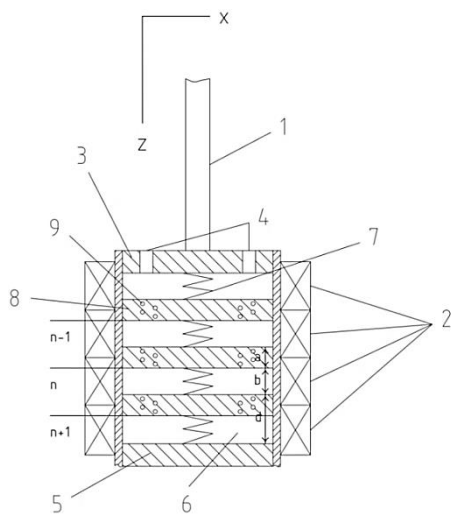


Рисунок 4 – МР камера с распределенными диссипативно-жесткостными свойствами, разделенная на субполости: 1 – шток, 2 – серия управляющих ЭМ, 3 – крышка, 4 – отверстия для включения сливной и напорной линий, 5 – подвижная межполостная перегородка, 6 – рабочая субполость, 7 – пружина, 8 – подвижная межполостная перегородка, 9 – спиральный канал

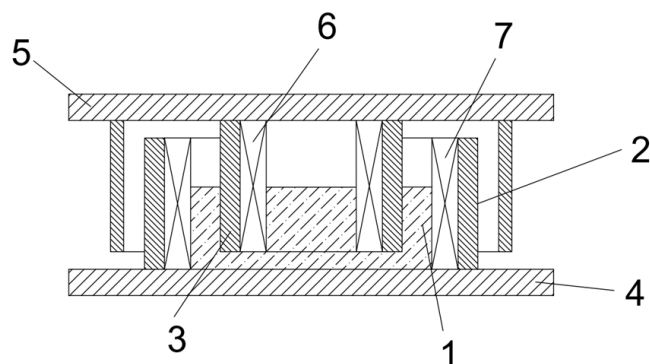


Рисунок 5 – ФЖ устройство активной ВЗ: 1 – объем ферромагнитной жидкости, 2 – цилиндрический корпус, 3 – поршень, 4 – нижняя присоединительная плита, 5 – верхняя присоединительная плита, 6 – вихревая герметизированная катушка индуктивности, 7 – герметизированная кольцевая катушка индуктивности

Генерируемые в объеме МР жидкости акустические регулирующие волны подавляют распространение ударных волн в среде. Разработана система полупассивной ВЗ, применяющая для генерирования регулирующих колебаний ФЖ осциллятор, Рисунок 5 (Патент RU 185538). Так как изменения электрического поля вызывают в окружающем пространстве вихревые ЭМП, колебательные возмущения генерируются посредством импульсного изменения электромагнитной со-

ставляющей давления, являющейся частью полного давления в объеме ферромагнитной жидкости и за счет придания частицам магнетика колебательных траекторий движения в вихревых ЭМП. Вихревые ЭМП вызывают вращение и движение магнитных частиц, что происходит путем изменения кинетической энергии частиц магнетика во внешних ЭМП, ориентации частиц и приданию частицам радиальной или осевой составляющей скорости. Это создает механические вибрации. Встречные ЭМП, индуцируемые дифференциальной катушкой, с многослойной намоткой, взаимодействуют, формируя траектории движения частиц магнетика. Тороидальная катушка индуктивности генерирует переменные вихревые управляющие ЭМП.

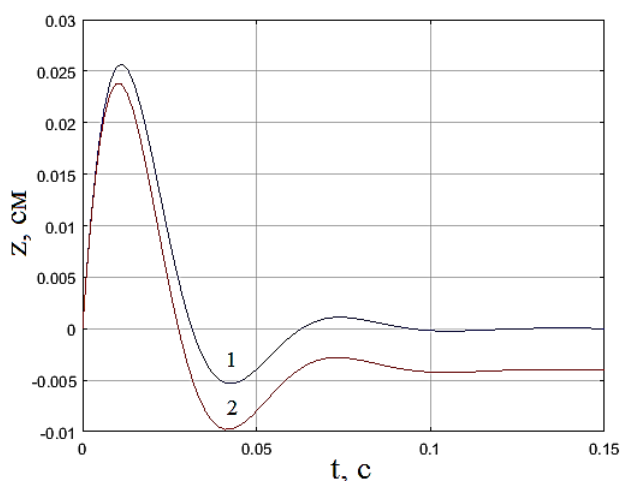


Рисунок 6 – Амплитуда перемещения (динамика) плунжера: 1 – без учета гидростатической подъемной силы, 2 – с учетом гидростатической подъемной силы

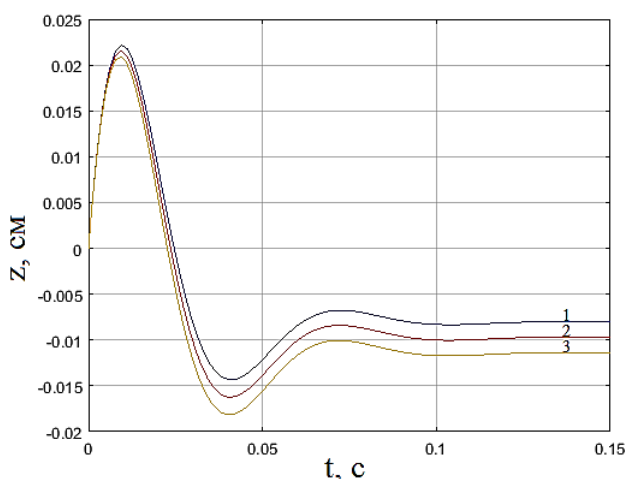


Рисунок 8 – Зависимость амплитуды перемещения плунжера от коэффициента формы каналов k_s , влияющего на значения импульсной гидростатической подъемной силы, формируемой в МР субполостях: 1: $k_s=3$; 2: $k_s=4$; 3: $k_s=5$

Подача на кольцевую катушку индуктивности постоянного тока приводит к повышению вязкости ферромагнитной жидкости и делает возможным эксплуата-

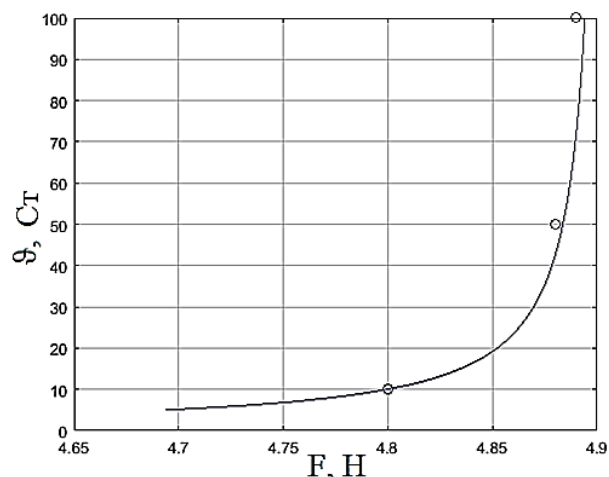


Рисунок 7 – Влияние вязкости МР среды, находящейся в системе спиральных каналов, на импульсную гидростатическую подъемную силу. Точки – экспериментальные данные

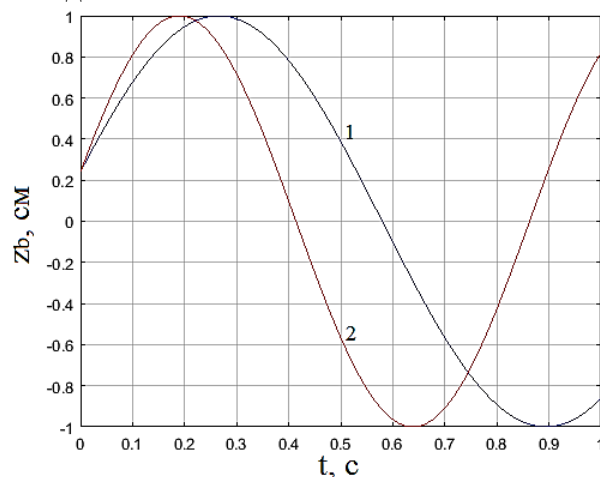


Рисунок 9 – Амплитуда перемещения (динамика смещения) 3-х перегородок, помещенных между объемами МР жидкости, относительно положения равновесия при генерировании бегущей управляющей акустической волны и вязкости рабочей среды: 1: $\eta=0.025$ Па·с; 2: $\eta=0.02$ Па·с

цию устройства виброгашения в качестве вязкоупругого демпфера. Применение комбинации ФЖ осциллятора и вязкоупругого демпфирования значительно улучшает рабочие характеристики устройства, расширяет диапазон рабочих частот, позволяет уменьшить воздействие ударных нагрузок и дает возможность реализации процесса регулируемой ВИ длинномерной конструкции. В рамках диссертационной работы создан и запатентован ряд МР и МД регулирующих аппаратов комбинированного типа. Результаты численных экспериментов, свидетельствуют о высокой эффективности МР/ФЖ системы ВЗ комбинированного типа. Создание гидростатической подъемной силы в МР камерах позволяет изменять динамику перемещения плунжера и повышать грузоподъемность систем без существенного изменения скоростных параметров перемещения, результаты численного эксперимента, Рисунки 6. Наличие спиральных каналов в перегородках накладывает ограничения на градиент давления в МР субполостях (при формировании гидростатической подъемной силы), который оптимизируется по значениям гидравлических потерь давления в системе спиральных каналов. Предложенные численные модели позволили выявить критерии рационализации количества перегородок, разделяющих рабочую камеру на субполости, и определить пути оптимизации распределения профиля вязкости по субполостям, а именно оптимизация по градиенту вязкости в субполостях и по значениям гидравлических потерь давления в системе спиральных каналов. Гидравлическое сопротивление системы каналов (коэффициент формы каналов) закладывается на стадии проектирования, вязкость МР среды регулируется в реальном времени, Рисунок 7.

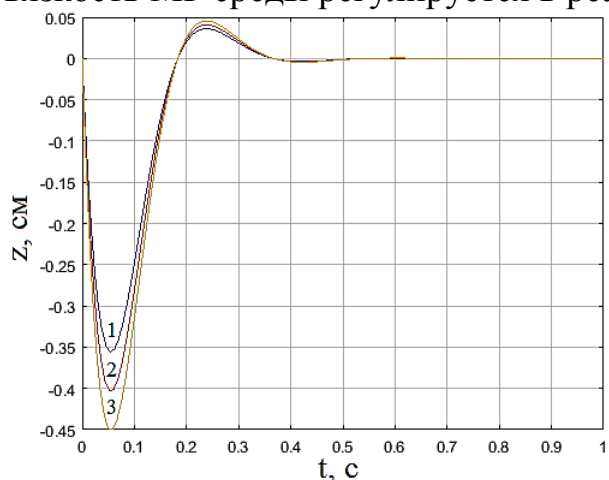


Рисунок 10 – Амплитуда перемещения плунжера при генерировании регулирующих осцилляций за счет формирования восстанавливающей силы в рабочей полости ФЖ опоры в режиме вязкостной диссипации для различных значений электромагнитной составляющей давления: 1: $p_{em}=0$ МПа; 2: $p_{em}=0,2$ МПа; 3: $p_{em}=0,4$ МПа

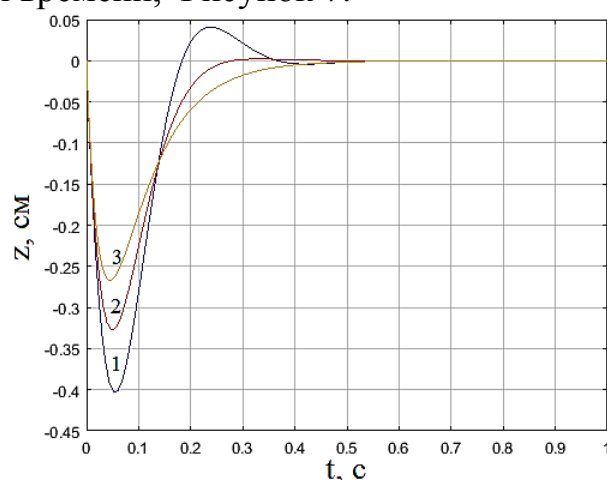


Рисунок 11 – Амплитуда перемещения плунжера при генерировании регулирующих осцилляций за счет формирования восстанавливающей силы в рабочей полости ФЖ опоры при $p_{em}=0,2$ МПа и режиме вязкостной диссипации, для различных значений напряженности вихревой катушки индуктивности ФЖ осциллятора: 1: $H=5$ А/см; 2: $H=6$ А/см; 3: $H=7$ А/см

Анализ результатов показал, что уменьшение угла между витками спирали и повышение количества витков спирали, то есть коэффициента формы каналов, выполненных в перегородках, существенно повышает гидравлическое сопротивление каналов и увеличивает значение импульсного изменения гидростатической

подъемной силы, формируемой МР субполостями, Рисунок 8. Вязкостная диссипация механической энергии возможна только при условии наличия движения (смещения) слоев в объеме рабочей среды. Поэтому оценку влияния установки перегородок, разделяющих рабочую камеру на субполости, на процесс вязкостной диссипации механической энергии и подавления ударных волн путем формирования во внешних ЭМП регулирующих акустических волн, распространяющихся в объеме МР жидкости, можно произвести из значений смещения перегородок, Рисунок 9. Использование серии перегородок позволяет достичь высоких значений трансформации (диссипации) механической энергии при малых значениях смещений, что доказывает эффективность применения последовательно расположенных МР субполостей с неоднородным вязкостным профилем для трансформации (диссипации) механической энергии. Определен вклад электромагнитной составляющей давления на формирование восстанавливающей силы в рабочей полости ФЖ камеры при генерировании регулирующих осцилляций, Рисунок 10. Показана целесообразность моделирования импульсного роста электромагнитной составляющей давления при генерировании регулирующих осцилляций. Установлены критерии рационализации соотношения вклада импульсного изменения электромагнитной составляющей давления и вклада колебательных движений частиц магнетика в вихревых ЭМП в реализацию осцилляций в ФЖ системе ВЗ. Критерии введены с учетом эффекта вязкостной диссипации механической энергии, а именно оптимизация вольт-амперных характеристик вихревой катушки индуктивности (параметров управляющего ЭМП для ФЖ осциллятора) в соответствии с вольт-амперными характеристиками кольцевой катушки индуктивности (со значениями восстанавливающей силы в рабочей полости ФЖ системы и выраженности вязкостной диссипации механической энергии). Результаты моделирования, Рисунок 11.

В третьей главе сформулированы основные теоретические положения методологии расчета диссипации механической энергии в системах ВЗ комбинированного типа. Приведены базовые расчетные зависимости, являющиеся научным обоснованием возможности реализации и рационализации трансформации энергии в МР и ФЖ системах ВЗ за счет регулирующих воздействий комбинированного типа. Созданы методы инженерного расчета, учитывающие особенности процесса диссипации механической энергии комбинированного типа и геометрические параметры МР камер, формирующие диссипативно-жесткостные свойства. Процессы виброгашения прежде всего характеризуются эффективностью процессов диссипации вибрационных и ударных нагрузок. Предложен научно-обоснованный обобщенный метод прогнозирования эффективности процесса диссипации механической энергии комбинированного типа, позволяющий осуществить оценку вклада отдельных составляющих комбинированного способа на основные показатели работы системы и отдельно МР и ФЖ аппаратов. Суть метода заключается в рационализации соотношения управляемых физических эффектов, применяемых для диссипации механической энергии, путем численного моделирования рабочего процесса. Исходя из условия вязкой диссипации механической энергии и особенностей рабочего процесса МР / ФЖ систем, основным параметром рационализации является вязкость рабочей среды и алгоритмы динамическо-

го изменения ее параметров. Очевидно, что на объем МР / ФЖ рабочей среды действуют объемные ΔA_v и поверхностные ΔA_s силы, а вязкостная диссипация механической энергии является следствием движения МР / ФЖ рабочей среды. Чрезмерное повышение вязкости рабочей среды способно привести к существенным тепловыделениям в объеме, способствующим снижению вязкости жидкости носителя и ухудшению магнитных свойств частиц магнетика, следовательно, пределы применения вязкостного способа диссипации механической энергии в МР системах лимитированы. В общем виде процессы диссипации энергии в МР среде можно описать как:

$$\Delta A_v + \Delta A_s = dt \iiint_V \frac{\eta(T, H, \tau_{sh})}{g(T, H)} v \frac{dv}{dt} dV + dt \iiint_V D dV; \quad (13)$$

$$D = \eta(T, H, \tau_{sh}) \left[2 \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v_y}{\partial y} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v_z}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_y}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial y} \right)^2 \right].$$

Где:

$$v = v_{zas} \cos[2(k_w z - \omega_m t) + \varphi_{vz}]; \eta(T, H, \tau_{sh}) = \left(\frac{\tau_{sh}}{\dot{\gamma}} + A^0 \cdot \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) \right) + \frac{1}{4} \cdot \frac{\tau_n M(H)}{1 + \left(\frac{\tau_n \tau_s H M(H)}{J} \right)}. \quad (14)$$

A^0 – коэффициент, Q – энергия активации, R – газовая постоянная.

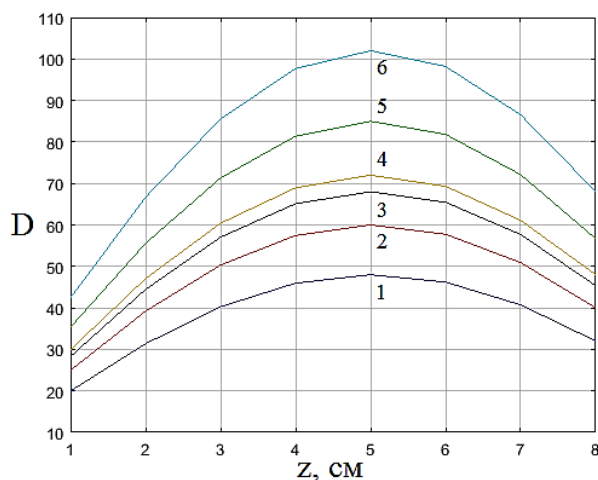


Рисунок 12 – Энергия, рассеиваемая в единицу времени на единицу объема при вязкости МР среды η и скоростных характеристиках регулирующей акустической волны v_{zas} : 1: $\eta=2$ Ст; 2: $\eta=2.5$ Ст; 3: $\eta=3$ Ст; при амплитуде скорости $v_{za}=1,2$ 4: $\eta=2$ Ст; 5: $\eta=2.5$ Ст; 6: $\eta=3$ Ст; при амплитуде скорости $v_{za}=1,7$

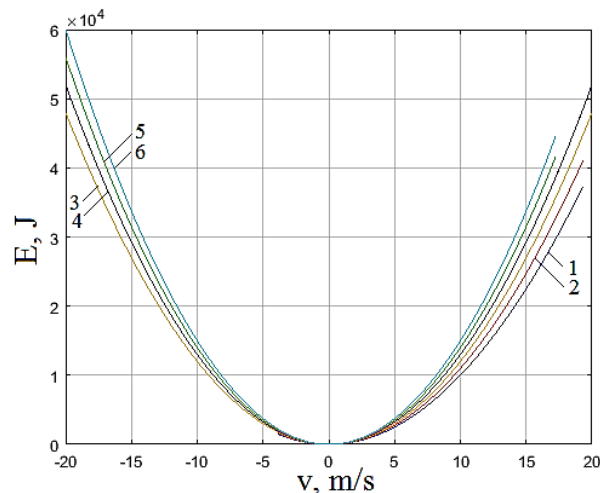


Рисунок 13 – Зависимость энергии от скорости сдвига слоев МР среды в рабочей камере при распространении бегущей регулирующей электромагнитной волны: 1 – плотность рабочей среды 1000 kg/m^3 $k_e=1/2$; 2 – плотность рабочей среды 1100 kg/m^3 и коэффициенте $k_e=1/2$; 3 – плотность рабочей среды 1200 kg/m^3 $k_e=2$; 4 – плотность рабочей среды 1300 kg/m^3 и коэффициенте $k_e=2$; 5 – плотность рабочей среды 1400 kg/m^3 $k_e=1$; 6 – плотность рабочей среды 1500 kg/m^3 и коэффициенте $k_e=1$

С учетом выявленных ограничений рационализации диссипации механической энергии путем регулирования вязкости рабочей среды, осуществлена рационализация вклада отдельных составляющих комбинированных способов управления диссипативно-жесткостными свойствами МР / ФЖ аппаратов. Результаты рационализации диссипативно-жесткостных свойств МР / ФЖ аппаратов комбинированного типа по значениям вязкости рабочей среды и скорости распространения регулирующей акустической волны, Рисунки 12–13. В качестве критерия рационализации рабочих МР сред управляющих контуров, проявляющих неньютоновские свойства целесообразно применять динамическую вязкость, заданную в виде функции $\eta(T, H, \tau_{sh})$. Полученные значения также позволяют определять оптимальную длину и объем МР камер / МР субполостей в соответствии с рабочими характеристиками опоры. Поэтому базируясь на предложенном методе прогнозирования эффективности процесса трансформации (диссипации) механической энергии комбинированного типа, и предложенных алгоритмах расчета, возможно, осуществить оценку вклада отдельных составляющих в регулирование МР и ФЖ систем. Проведены тестовые расчеты в пакете прикладных программ MATLAB. Как известно характер распространения акустических волн, прежде всего, зависит от их амплитуды и частот. Полученные результаты моделирования свидетельствуют о наличии в объеме зон декомпрессии и компрессии (ускорения и торможение сдвига слоев). Совершаемая работа регулирующей волны в объеме равна 0 в случае задания частотно-фазных характеристик в виде $\cos(2(k_w z - wt))$, Рисунок 13 кривые 3; 4. При задании частотно-фазных характеристик в виде $\cos(k_w z - wt)$ совершаемая работа регулирующей волны отрицательна, Рисунок 13 кривые 5; 6. Задание частотно-фазных характеристик в виде $\cos(1/2(k_w z - wt))$ делает совершаемую работу регулирующей волны положительной, Рисунок 13 кривые 1; 2. Очевидно, что оптимизацию процесса вязкостной диссипации механической энергии в рабочей камере МР устройств ВЗ при комбинированном типе управления рационально производить по частотно-фазовому принципу.

В четвертой главе созданы методы инженерного расчета МР и ФЖ систем ВЗ комбинированного типа с учетом особенностей предложенного подхода рационализации процессов ВЗ и рационализации рабочих процессов в их приводных системах и элементов их конструкций. Учитывая простоту конструкции МР и ФЖ аппаратов, основным направлением исследования является разработка методов численного описания их рабочих процессов и ряда конструктивных особенностей, оказывающих существенное влияние на рабочие процессы. Колебательные процессы трубопроводных систем в общем виде описываются моделью Кирхгофа и уравнениями движения плунжерных элементов опор. Обобщенные методы проектирования и расчета систем ВЗ, имеющих МР камеры с распределенными диссипативно-жесткостными свойствами, позволяющие рационализировать процессы гашения ударных и вибрационных нагрузок в МР системах, Рисунок 14. Разработанные методики инженерного расчета в отличие от работ В.М. Полунина предназначены для МР систем ВЗ комбинированного типа и способны учитывать вклад различных реологических и акустических эффектов в процессы диссипации механической энергии. Методики основываются на совместном решении гидродинамических и магнитодинамических численных моделей их рабочих процессов.

Обобщенные методы проектирования и расчета систем ВЗ с ФЖ рабочими камерами, способные рационализировать процессы диссипации механической энергии, Рисунок 15. В целом наложение колебаний (близких к собственной частоте конструкции), генерируемых ФЖ осциллятором способно существенно сузить полосу амплитуды колебаний, а значения основных колебаний попадающих в эту полосу амплитуды колебаний привести к значениям близким нулю, что позволяет сохранить целостность конструкции и минимизировать ущерб от вибрационного воздействия. Выражения, требуемые для расчета регулирующих осцилляций:

$$Z_{tot} = 2Z_m \cos\left(\frac{\omega_p - \omega_{MRS}}{2}t\right) \sin\left(\frac{\omega_p + \omega_{MRS}}{2}t\right); \quad (15)$$

$$Z_{mot} = \sqrt{Z_{mP}^2 + Z_{mMRS}^2 + 2Z_{mP}Z_{mMRS} \cos(\varphi_{0P} - \varphi_{0MRS})};$$

$$\varphi_{0tot} = \arctg \frac{Z_{mP} \sin(\varphi_{0P}) + Z_{mMRS} \sin(\varphi_{0MRS})}{Z_{mP} \cos(\varphi_{0P}) + Z_{mMRS} \cos(\varphi_{0MRS})}.$$

$$\ddot{z} + 2\theta\dot{z} + \omega_p^2 z = F_r \sin 2\omega_m t; \omega_p^2 = k_\gamma \gamma_m^2 [H_z + (N_x - N_z)M_z] [H_z + (N_y - N_z)M_z].$$

(16)

$N_x; N_y; N_z$ – компоненты тензора размагничивающегося фактора, γ_m – гиромангнитное отношение, k_γ – поправочный коэффициент, учитывающий объемную долю частиц магнетика в рабочей среде, устанавливается экспериментально, Z_{mP} – амплитуда колебаний длинномерной конструкции, Z_{mMRS} – амплитуда колебаний МР опоры, φ_{0P} – начальная фаза колебаний длинномерной конструкции, φ_{0MRS} – начальная фаза колебаний МР опоры, Z_m – амплитуда обоих колебаний, ω_p – частота колебаний длинномерной конструкции, ω_{MRS} – частота колебаний МР опоры.

При вязкоупругом демпфировании удастся реализовать быстрое затухание вибрационного импульса и привести значение отклонения трубопровода к нулю. Установлена эффективность процесса регулируемой вязкостной диссипации механической энергии на процесс подавления вибрационной нагрузки путем генерирования, управляющих осцилляций в режиме противофазы. Установлен выраженный эффект диссипации механической энергии при генерировании в режиме противофазы управляющих осцилляций близких частот к частотам возмущающих колебаний. Ускорение и смещение плунжера примем равным ускорению и смещению объекта ВЗ. Оптимизировать процессы трансформации (диссипации) механической энергии, возможно, прежде всего, исходя из особенностей их динамического нагружения: **1.** Выбор рационального режима основывается на значениях максимальных смещений объектов ВЗ и частоты нагружения. **2.** В случае больших значений смещения объектов ВЗ и высокой интенсивности нагружения рациональны режимы неоднородного распределения диссипативно-жесткостных свойств и регулируемой вязкостной диссипации механической энергии или мгновенного подавления распространения возмущающих колебаний (режим противофаз) и/или выраженной регулируемой вязкостной диссипации механической энергии.

гии. 3. При вибрационной или ударной нагрузке, источником которой является внешнее воздействие, которое не связано с процессом течения транспортируемых

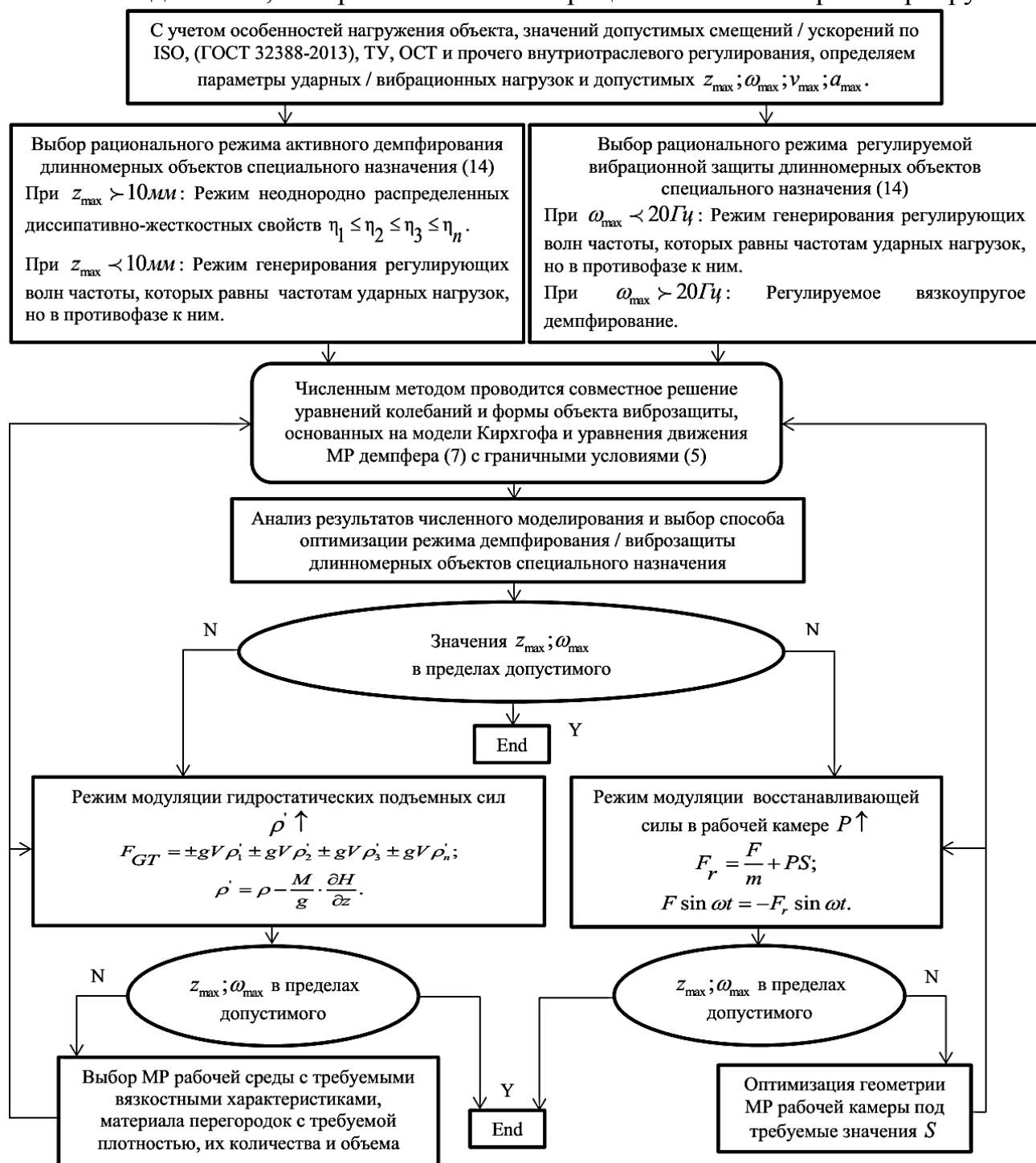


Рисунок 14 – Обобщенные методы проектирования и расчета, адаптивных МР систем ВЗ комбинированного типа

сред или работой элементов объекта, рациональна реализация виброизоляции и осуществление только регулируемой вязкостной диссипации механической энергии внешнего нагружения. 4. С целью повышения эффективности процесса ВЗ (уменьшения времени переходных процессов) целесообразно дополнительное вязкостное регулирование основного управляющего воздействия (регулирующих акустических волн). 5. Для повышения мгновенной грузоподъемности или генерирования управляющего силового противодействия внешнему нагружению ра-

9. Повышение грузоподъемности МР опоры и вклада регулирующего воздействия гидростатических подъемных сил возможно за счет увеличения числа перегородок в рабочей камере (количества субполостей). Вязкоупругое демпфирование дает возможность эффективно подавлять вибрационные и ударные нагрузки, обеспечивая статическую стабильность длинномерных конструкций.

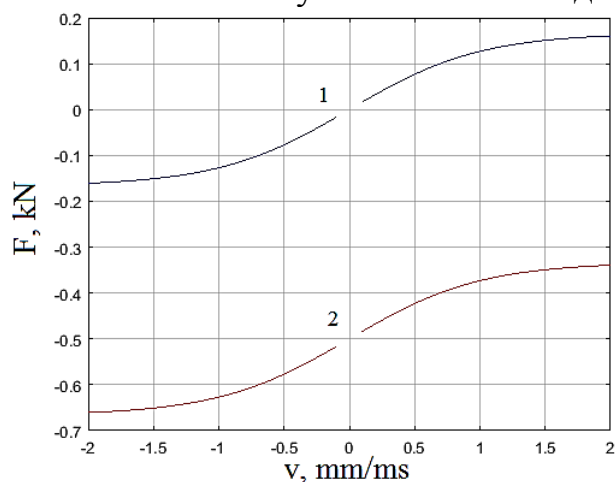


Рисунок – 16 Зависимость скорости перемещения плунжера от нагружения (нагрузочные характеристики): 1 – нагрузочная характеристика без воздействия восстанавливающей силы, 2 – нагрузочная характеристика при воздействии восстанавливающей силы

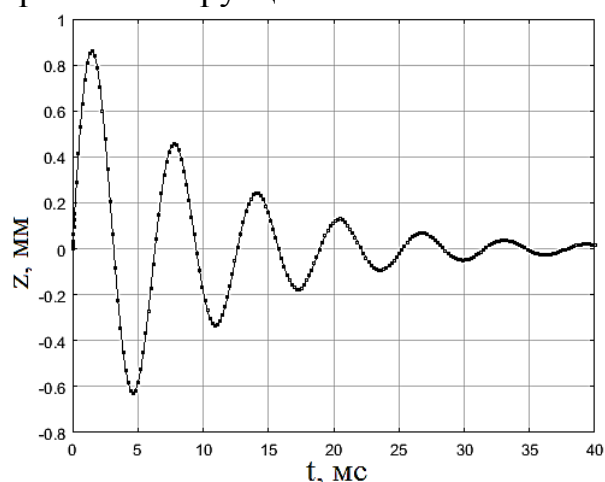


Рисунок 17 – Динамика перемещения плунжера, сопоставление расчетных и экспериментальных данных, полученных в тестовом режиме

Предложенный метод расчета позволяет выявить интервал значений вязкости ФЖ среды, допустимых для генерирования осцилляций в режиме близких частот. С целью рационализации динамических характеристик процессов в системах ВЗ определены нагрузочные характеристики МР рабочих камер комбинированного типа (зависимость перемещения исполнительного элемента – плунжера от приложенной силы), Рисунок 16. Проведен анализ влияния различных сочетаний регулирующих воздействий на динамику МР систем ВЗ. Принимая во внимание, вязкопластичные свойства МР жидкости во внешних ЭМП, перемещение поршня начнется только после достижения необходимого начального сдвигового усилия. Также учитывая несжимаемость жидкой среды при малых давлениях, формирование восстанавливающей силы в рабочей камере препятствует перемещению поршня до момента достижения приложенной нагрузкой требуемых значений. На основе полученных результатов разработаны рекомендации по совершенствованию конструктивно-схемных решений систем и способов ВЗ / ВИ, позволяющие рационализировать процессы виброгашения. Сопоставление расчетных и экспериментальных данных показало высокую точность разработанной математической модели, Рисунок 17.

В пятой главе разработаны алгоритмы генерирования управляющих динамических ЭМП, основанные на предложенном в диссертационной работе подходе к управлению расходными характеристиками МР жидкости за счет создания акустических, гидродинамических и неньютоновских эффектов во внешних динамических ЭМП. Это позволяет осуществлять управление расходом МР жидко-

сти путем регулирования гидродинамического сопротивления потока посредством внешних ЭМП. При этом, наложение на поток МР жидкости внешних динамических ЭМП, то есть бегущих, вращающихся или винтовых ЭМП, изменяет не только вязкостные свойства МР жидкости, но и способно генерировать в ней акустические (волновые эффекты), гидродинамические эффекты (вихревые эффекты) и неньютоновские эффекты (псевдопластичные и вязкопластичные эффекты), посредством сообщения потоку осевой и радиальной составляющих скорости, формирования траектории движения частиц магнетика, создания чередующихся зон компрессии и декомпрессии, а также способно вызывать в объеме сдвиговые напряжения.

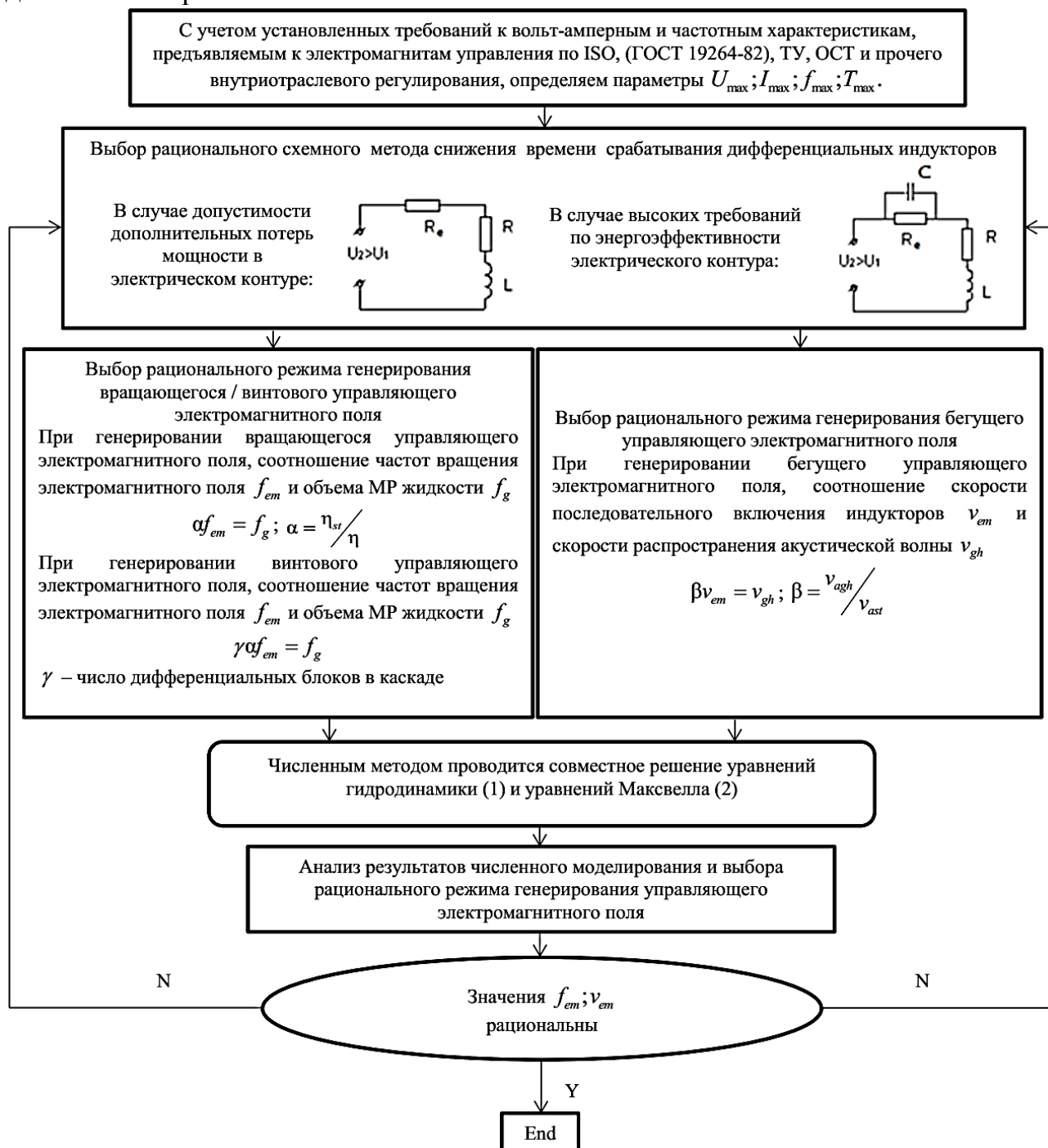


Рисунок 18 – Обобщенные методы проектирования и расчета дифференциальных электромагнитных блоков управления МР / ФЖ / МД аппаратов

Установка кольцевых дифференциальных ЭМ каскадами позволяет создавать динамические управляющие ЭМП со сложными пространственными структурами. В данной исследовательской работе предложены запатентованные конструкции МР и МД аппаратов, использующих дифференциальные электромагнитные блоки управления, позволяющие создавать регулирующие ЭМП с оригинальной структурой, разработаны обобщенные методы проектирования и расчета дифференциальных электромагнитных блоков управления МР / ФЖ / МД аппаратов, Рисунок 18. Динамика МР систем зависит от динамики электромагнитных блоков управления. Приемлемым временем срабатывания ЭМ считается 0,05–0,15 с. Время релаксационных процессов в МР / ФЖ средах на несколько порядков меньше и является единственным фактором, накладывающим ограничения на сокращение времени переходных процессов в МР системах. Целесообразна разработка комплекса мер, направленных на повышение скорости отработки сигнала управления индукторами дифференциальных электромагнитных блоков управления.

Для этого возможно применение различных схем электрических контуров питания индукторов. Результаты численного моделирования иллюстрируют хороший отклик динамики системы на схемные методы в требуемом интервале до 200 мс, Рисунок 19. За счет применения в электрической цепи каждого индуктора электромагнитного блока управления схемного метода достигается снижение времени срабатывания, что сокращает время отработки сигнала в целом. Это реализуемо: при включении в цепь индуктора добавочного сопротивления, что позволяет пропорционально увеличить мощность, но при этом происходит потеря мощности в добавочном сопротивлении или при совмещении последовательного включения с обмоткой индуктора добавочного резистора, шунтированного конденсатором, и поднятии напряжения питания в цепи. Повышение скорости отработки сигнала растет, путем повышения скорости роста тока в обмотке ЭМ за счет тока зарядки конденсатора, так как незаряженная емкость создает дополнительный путь для тока. Снятие остаточного намагничивания дифференциальных индукторов возможно путем создания колебательного электрического контура и включения в электрическую цепь каждого дифференциального индуктора светодиода после добавочного резистора, шунтированного конденсатором. Принцип работы данного схемного метода основан на том, что для генерирования ЭМП необходимо наличие электрического поля (течение электронов в обмотке ЭМ), включенный в цепь светодиод после отключения питания потребляет остаточные токи и разрезает конденсатор, дополнительно способствуя повышению эффективности схемного метода, направленного на уменьшение времени отработки сигнала индуктором. Включение светодиода в цепь также приводит к повышению скорости роста тока в обмотке ЭМ. Алгоритмы управления МР и МД устройств и систем, прежде всего, зависят от аппаратной реализации процессов регулирования и обратной связи, поэтому предложены их варианты. В разработанном способе аппаратной реализации обратной связи в МР и ФЖ устройствах представлен комплекс проведения электрических измерений для оценки неэлектрических входных параметров. На основе полученных неэлектрических входных параметров возможна корректировка вольт-амперных, амплитудно-частотных и фазово-

частотных характеристик управляющего электрического сигнала. Динамические измерения параметров проводятся с установленными временными интервалами, зависящими, прежде всего от конструктивных и функциональных особенностей датчиков. Принимая во внимание большие линейные размеры объекта демпфирования и наличие малых допустимых значений разнонаправленных смещений трубопровода, учитывая высокую скорость отклика МР и ФЖ устройств на сигнал управления и их хорошие динамические характеристики (переходные процессы в МР / ФЖ системах составляют менее 200 мс), возможен расчет сигнала управления, основываясь на результатах динамического опроса датчиков вибрации:

1. Первоначально определяются требуемые динамические характеристики системы ВЗ, допустимые объемы потребления электроэнергии и производится выбор рационального соотношения между динамикой и энергопотреблением.
2. Принимается решение о выборе рационального схемного метода повышения скорости отклика на сигнал управления и/или снятия остаточной намагниченности индуктора.
3. Выбирается рациональный режим генерирования управляющего ЭМП.
4. Производится численное моделирование рабочего процесса аппарата (системы) на основе уравнений: Максвелла и гидродинамики.
5. Рационализация рабочего процесса производится путем выбора частот и скоростей управляющих ЭМП с учетом специфики их распространения в рабочих средах (МР или ФЖ). Так как электрический сигнал, подаваемый на блоки управления – ЭМ не требует трансформации, а сигнал обратной связи, поступающий от датчиков вибрации, также является электрическим, возможна реализация коррекции сигнала управления и задание сигнала управления пропорционально изменению сигнала обратной связи. Регулирование производится путем адаптации вольт-амперной и частотно-амплитудной характеристик сигнала управления к параметрам динамических измерений датчиков вибрации.

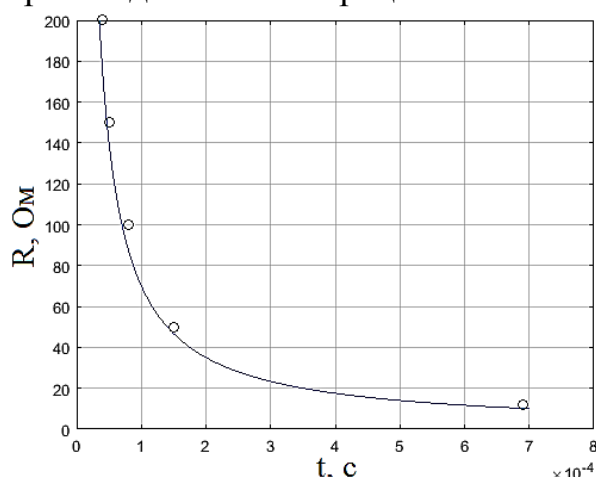


Рисунок 19 – Зависимость времени отработки сигнала управления МР / МД устройством от сопротивления электрической цепи индуктора. Точки – экспериментальные данные



Рисунок 20 – Алгоритм управления МР / ФЖ устройствами

Учитывая большой объем получаемых с датчиков данных и сложный алгоритм многопараметрической коррекции комбинированного сигнала, расчет кор-

ректирующего сигнала целесообразно проводить в режиме параллельных вычислений. Реализация алгоритмов управления, Рисунок 20. В ходе экспериментов параллельные вычисления произведены в пакете прикладных программ MATLAB (Signal Toolbox, Control и SimuLink). Программный алгоритм с учетом математической модели анализа результатов опроса датчиков, формирования сигнала управления и формирования сигнала коррекции, Таблица 1, дает возможность определять вольт-амперные, частотно-амплитудные и частотно-фазовые параметры управляющего сигнала МР / ФЖ систем. Мониторинг температуры позволяет осуществлять расчет изменения вязкости рабочей среды и производить коррекцию управляющего сигнала.

Входными неэлектрическими параметрами, требуемыми для осуществления обратной связи и коррекции сигнала управления в МР / ФЖ системе являются:
1. Значения измерений температуры рабочей среды (рационализация температуры рабочей среды производится на основании значений магнитной восприимчивости);
2. Значения измерений температуры окружающей среды;

Таблица 1. Метод формирования сигнала управления и формирования сигнала коррекции

Алгоритм управления	Численные зависимости	Режим работы устройства
МР системы в режиме генерирования регулирующей акустической волны	$H_a = B / \mu(1 + \chi) \operatorname{sh} k_w l; H^2 = H_a^2 \left[\operatorname{sh}^2 k_w x + \sin^2(k_w z - \omega_m t) \right];$ $\eta_s = \left(\frac{\tau_{sh}}{\dot{\gamma}} + \eta_v \right) + \frac{1}{4} \cdot \frac{\tau_n M(H)}{1 + (\tau_n \tau_s HM(H)) / J}; A_m = \mu \chi H_a^2 / 4;$ $b_m = \left[\eta_v + \left(\frac{4}{3} \right) \eta_s \right] / \rho; \operatorname{tg} \varphi_{vz} = \frac{2b_m \omega_m}{c_f^2 - \left(\frac{\omega_m}{k_w} \right)^2};$ $v_{za} = \frac{\left(\frac{A_m}{\rho} \right) \cdot \omega / k_w}{\left[\left[c_f^2 - \left(\frac{\omega}{k_w} \right)^2 \right]^2 + 4\omega_m^2 b_m^2 \right]^{1/2}}; v_z = v_{za} \cos \left[2(k_w z - \omega_m t) + \varphi_{vz} \right].$	<p>Режим демпфирования и виброгашения $\omega_{em} < 0,5\omega_{gh}; v_z = v_{gh} = v_{em} /$ Режим ВИ $-0,5 \omega_{em} = \omega_{gh} ; v_z = v_{gh} = v_{em}$ $\omega_{em}; \omega_{gh}$ – частота электромагнитной; акустической волны $v_{em}; v_{gh}$ – скорость электромагнитной; акустической волны</p>
ФЖ системы в режиме генерирования регулирующих осцилляций и модуляции восстанавливающей силы	$\omega_m = \sqrt{\frac{c}{m}}; F_r = \frac{F}{m} + PS; \theta = \frac{c}{2m}; \ddot{z} + 2\theta\dot{z} + \omega_m^2 z = F_r \sin \omega_m t;$ $v_{os} = F_m \omega_m \cos(\omega_m t + \varphi_0); a_{os} = -F_m \omega_m^2 \sin(\omega_m t + \varphi_0);$ $z = F_m \sin(\omega_m t + \varphi_0).$	<p>Режим приближения частоты регулирующих осцилляций ω_{os} к частоте колебаний объекта ω_o, но в интервале низших тонов $\omega_{os} < \omega_o$ / Режим противофаз $- \omega_{os} = \omega_o$ / Режим модуляции восстанавливающей силы в рабочей камере $P \uparrow; \omega_{os} < \omega_o$ или $P \uparrow; - \omega_{os} = \omega_o$ или $P \uparrow; \omega_{os} = 0$</p>
МР системы в режиме неоднородно распределения диссипативно-жесткостных характеристик и модуляции гидростатической подъемной силы	$\eta_s = \left(\frac{\tau_{sh}}{\dot{\gamma}} + \eta \right) + \frac{1}{4} \cdot \frac{\tau_n M(H)}{1 + (\tau_n \tau_s HM(H)) / J};$ $F_{GT} = \pm gV\rho'_1 \pm gV\rho'_2 \pm gV\rho'_3 \pm gV\rho'_n; \rho' = \rho - \frac{M}{g} \cdot \frac{\partial H}{\partial z};$ $m\ddot{z} + K_1\dot{z} + K_2z = F \sin \omega t \pm F_{GT} \sin \omega_m t; K_1 = \frac{\eta_s S_C v_{os}}{h_v F}.$	<p>Режим неоднородно распределенных диссипативно-жесткостных свойств – вязкость в пределах от $0,5\eta_s$ до $0,95\eta_s$, для предыдущего дифференциального ЭМ и в пределах от $1,2\eta_s$ до $2\eta_s$, для последующего дифференциального ЭМ / Режим модуляции гидростатической подъемной силы $\rho' \uparrow$</p>

ФЖ системы в режиме вязкоупругого демпфирования и ВИ	$\eta_s = \left(\frac{\tau_s h}{\dot{\gamma}} + \eta \right) + \frac{1}{4} \cdot \frac{\tau_n M(H)}{1 + (\tau_n \tau_s HM(H)) / J};$ $v_{os} = F_m \omega_m \cos(\omega_m t + \varphi_0); a_{os} = -F_m \omega_m^2 \sin(\omega_m t + \varphi_0);$ $m\ddot{z} + \zeta\dot{z} + c(t)z = F \sin \omega_m t; \zeta = \frac{\eta_s S_c v_{os}}{h_s F}; z = F_m \sin(\omega_m t + \varphi_0).$	Режим вязкоупругого демпфирования и ВИ $\eta_s \uparrow; - \omega_{os} = \omega_o $ / Режим ВИ $\eta_s \uparrow; \omega_{os} = 0$
ФЖ камерой	$\rho = \frac{\eta^*}{g}; \eta^* = \eta + \frac{1}{4} \cdot \frac{\tau_n M(H)}{1 + (\tau_n \tau_s HM(H)) / J};$ $P_{em} = const - \rho g z + \int_0^H M(H) dH;$ $P = P_{em} + P_g.$ <p>P_g – гидравлическая составляющая давления.</p>	Режим управления ФЖ камерой
ФЖ элементами	$E = E_g + u_{mag} + E_s; E_s = 2\pi\gamma_e a_e b_e \left[\frac{1}{k} + \arcsin\left(\frac{1}{e}\right) \right]; k = \frac{a_e}{b_e};$ $e = \sqrt{(a_e^2 - b_e^2)} / a_e; E_g = \rho a_e g V; \rho = \frac{\eta^*}{g}; u_{mag} = -V \int_0^H M(H) dH;$ $\eta^* = \eta + \frac{1}{4} \cdot \frac{\tau_n M(H)}{1 + (\tau_n \tau_s HM(H)) / J}; Q_n = \frac{\Delta p_n \pi d_n^3 \delta_n^3}{2\eta^* l_n \cdot 10^5};$ $V = Q_n t.$ <p>γ_e – коэффициент поверхностного натяжения, $a_e; b_e$ – оси эллипса.</p>	Режим управления сферическими ФЖ элементами

3. Значения измерений давления в рабочих полостях; **4.** Значения измерений линейных перемещений поршня / объекта; **5.** Значения частоты нагружения опоры; **6.** Значения скорости течения рабочей среды.

Определив критические амплитудно-частотные характеристики колебательного процесса объекта, выбирается способ и оптимальный алгоритм управления.

Выходными электрическими параметрами сигнала управления и коррекции являются: **1.** Значения частоты включения индивидуальных управляющих ЭМП; **2.** Значения скорости переключения индукторов; **3.** Значения частоты тока управляющего сигнала; **4.** Значения силы тока и напряжения управляющего электрического сигнала блоков электромагнитного управления.

В случае необходимости применения в системе демпфирования комбинации МР / ФЖ камер и реологических рабочих камер, заполненных немагнитными средами, с целью сохранения высоких динамических характеристик и низкого энергопотребления, целесообразно в немагнитных жидкостных регулирующих контурах применение ФЖ элементов. Для регулирования характеристик ФЖ рабочих камер рационально применение алгоритма управления учитывающего изменение электромагнитной составляющей давления в объеме рабочей среды. Комбинация ФЖ камер и ФЖ элементов позволяет создавать оригинальные ГГ устройства различного назначения с динамическими характеристиками, превосходящими классические гидравлические устройства, а также с высокими показателями надежности и энергоэффективности. Повышение энергоэффективности и упрощение алгоритма при автоматизации рабочего процесса реализуются за счет подачи сигналов управления на биполярные транзисторные ключи (NPN) управляющие ЭМ. Положительная часть переменных синусоидальных сигналов управления откры-

вают NPN транзисторные ключи электрических контуров ФЖ элементов, для NPN транзисторного ключа в электрическом контуре ФЖ камеры, заполненной магнитной жидкостью, задается прямоугольный положительный сигнал. Проведено автоматизированное тестирование МР системы ВЗ посредством разработки тестовых сценариев. Выбран случай снижения амплитуды колебания без подавления распространения возмущающих колебаний, также возможно наложение регулирующих осцилляций в противофазе с учетом коэффициента подавления. На полученных осциллограммах наблюдается некоторое изменение характера колебательного процесса, что связано с малым запаздыванием формирования регулирующих осцилляций, но в целом результаты свидетельствуют об угнетении колебательного процесса и уменьшении амплитуды колебаний на порядок. При сверхбольшой грузоподъемности опоры, не удается полностью исключить использование классической гидравлической регулирующей аппаратуры в МР / ФЖ управляющих контурах, что делает актуальным проблему их защиты от явлений гидравлического удара. Высокоэффективно в данных случаях применение устройств защиты, рабочий процесс которых основан на модуляции вязкости МР / ФЖ среды и генерировании регулирующих акустических волн во внешних ЭМП. В отличие от работ С.В. Дьяченко рассмотрен вариант прикладного метода оптимизации рабочего процесса и алгоритмов управления. В случаях, когда грузоподъемность опор и рабочие давления приводов систем ВЗ позволяют, целесообразно применять МР и МД регулирующие аппараты, Рисунки 21–22 (Патенты: RU 2624082, RU 2634163, RU 2634166).

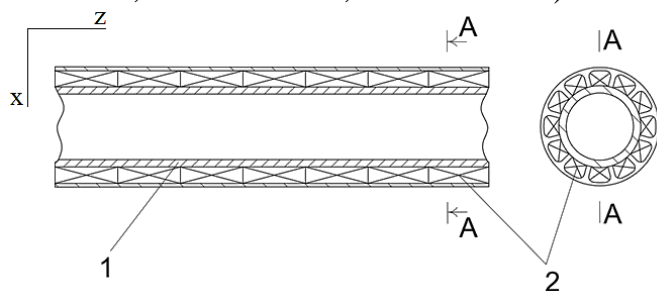


Рисунок 21 – Устройство защиты МР систем высокого давления от гидроудара: 1 – корпус, 2 – каскад блоков электромагнитного управления потоком

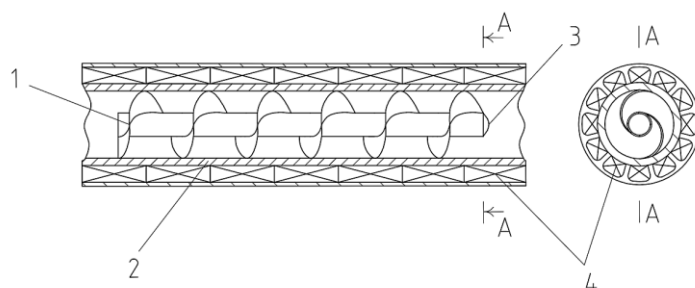


Рисунок 22 – МД насос: 1 – шнек, 2 – корпус, 3 – обтекатель, 4 – каскад дифференциальных блоков электромагнитного управления потоком

Применение трехфазного алгоритма включения дифференциальных электромагнитных блоков управления или многофазное включение, при котором количество фаз кратно трем объясняется особенностями сигналов управления задаваемых по синусоидальному или косинусоидальному законам и близких к ним. Трехфазный алгоритм повышает эффективность отклика МР рабочей среды на регулирование дифференциальным блоком электромагнитного управления при моделировании многокритериального сигнала управления и реализации обратной связи по ряду параметров. Получены стабильные скоростные характеристики в зоне регулирования и достаточная для генерирования гидродинамического эффекта – жидкий поршень динамика компрессии участков МР среды. Стабильность расходных характеристик в зоне регулирования при трехфазном алгоритме включения сборки дифференциальных индукторов также удовлетворяет требова-

ния, предъявляемые к приводным системам. Разработанные алгоритмы управления реализуют генерирование нестационарных управляющих ЭМП, что как уже было отмечено ранее в значительной степени повышает энергоэффективность систем ВЗ. Применение приведенных алгоритмов управления и предложенных оригинальных конструкций МР / ФЖ аппаратов позволяет осуществлять комбинированное управление рабочим процессом МР систем ВЗ по ряду параметров, существенно улучшая их динамические характеристики. Эффективность разработанных алгоритмов управления подтверждена в ходе автоматизированного тестирования в MATLAB. Снижается максимальный интервал изменения входного сигнала, в пределах которого выходной сигнал сохраняет свое значение неизменным, что достигается посредством применения комбинированного управления расходом, приводящего к снижению зависимости параметров входного сигнала МР системы от температуры и вязкостных характеристик рабочей среды, существенно уменьшая зону нечувствительности МР привода.

В шестой главе с целью повышения эффективности и динамики процессов теплообмена рабочей среды предложены конструкции устройств и метод расчета системы термостатирования, имеющей в своем составе устройство оригинальной запатентованной конструкции, реализующее рабочий процесс за счет применения термоэлектрических элементов с жидкостным охлаждающим контуром. Процесс проектирования и расчета целесообразно разделить на два этапа: 1 этап рационализация параметров термоэлектрических элементов и 2 этап рационализация параметров компрессорной установки, осуществляющей регуляцию температурных характеристик охлаждающего контура. На этапе рационализации параметров термоэлектрических элементов введем допущение постоянности объемов рабочей среды и хладагента, и определим конструктивные параметры термоэлектрических элементов: **1.** Выбор хладагента с учетом критериев рационализации термодинамических процессов и допустимых предельных гидравлических и тепловых нагрузок. **2.** Решение системы уравнений теплопроводности послойно. **3.** На основании теплового расчета системы производится рационализация геометрических и вольт-амперных характеристик термоэлектрических элементов.

На этапе рационализации параметров компрессорной установки оценим динамику процессов в объемах рабочей среды и хладагента: **1.** Решение системы уравнений теплопроводности для рабочей и охлаждающей сред с учетом эффектов термомагнитной конвекции, протекающих в рабочей среде. **2.** На основании термодинамического и феррогидродинамического расчета системы производится рационализация геометрических и рабочих характеристик компрессорной установки. Уравнение теплопроводности примет вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho_i c_{\rho i} T_i) - \operatorname{div}(\lambda_i \operatorname{grad} T_i) &= S_{Ti}; \operatorname{div}(\lambda_i \operatorname{grad} T_i); S_{Ti} = S_{Ci} + S_{Pi} T_i; \\ (-\lambda_{CF} \operatorname{grad} T, \vec{n}) \Big|_{\Gamma_A} &= \alpha_{CF} (T_{CF} - T_{\Gamma_A}) \Big|_{\Gamma_A}; (-\lambda_{MRF} \operatorname{grad} T, \vec{n}) \Big|_{\Gamma_{Fin}} = \alpha_{MRF} (T_{MRF} - T_{\Gamma_{Fin}}) \Big|_{\Gamma_{Fin}}; \\ (-\lambda_{MRF} \operatorname{grad} T, \vec{n}) \Big|_{\Gamma_{Fout}} &= \alpha_{MRF} (T_{MRF} - T_{\Gamma_{Fout}}) \Big|_{\Gamma_{Fout}}; \\ S_{CCF} = 0; S_{PCF} &= -\frac{\lambda_{CF} A_{CF}}{V_{CF}}; S_{CMRF} = \frac{\lambda_{MRF}}{V_{MRF}} \frac{dT}{dx} A_{MRF}; S_{PMRF} = 0. \end{aligned} \quad (17)$$

$S_{Ci}; S_{Pi}$ – тепловые эффекты, ρ_i – плотность, $c_{\rho i}$ – теплоемкость, T_i – температура, λ_i – коэффициент теплопроводности, A_i – площадь соприкосновения, α_i – средний по поверхности коэффициент теплоотдачи среде. Параметры с индексами относятся: MRF МР среда, CF хладагент, ΓA граница с окружающей средой, ΓFin ; $\Gamma Fout$ границы проточной части. Термогидромагнитные эффекты описываются системой уравнений феррогидродинамики Розенцвейга-Нойрингера с учетом изменений магнитной проницаемости в нестационарных ЭМП, задав ее в виде функции от напряженности магнитного поля:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial(v_1 T)}{\partial x} + \frac{\partial(v_2 T)}{\partial y} &= \frac{1}{Pr} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right); \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} = -\Phi \left[v_1 = \frac{\partial \Psi}{\partial y}, v_2 = -\frac{\partial \Psi}{\partial x} \right]; \\ \frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{\partial(v_1 \Phi)}{\partial x} + \frac{\partial(v_2 \Phi)}{\partial y} &= \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + Gr \frac{\partial T}{\partial x} + Gr_m \left(\frac{\partial H}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial y} - \frac{\partial H}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial x} \right); \\ Gr_m = \mu(H) \lambda_m d_h^3 \frac{(T_1 - T_0) [\nabla H]}{g^2 \rho}; \lambda_m = k_{pm} + \beta_V M_{r0}; \mu(H) &= \mu e^{-i\varphi} m; B = B_m \sin(\omega_m t + \varphi_m); [\nabla H] = \frac{2I}{\pi l^2}; \\ \frac{\partial}{\partial t} (\rho_i T_i) + \text{div}(\rho_i u_i T_i) &= \text{div}(D_i \text{grad} T_i) + S_{Ti}; \text{div}(\rho_i u_i T_i) = \text{div} \left(\frac{\lambda_i}{c_{\rho i}} \text{grad} T_i \right) + \frac{S_{hi}}{c_{\rho i}}; \\ (D_i \text{grad} T_i) &= D_0 \exp \left(-\frac{E_a}{R \frac{dT_i}{dx}} \right); \left(-\frac{\lambda_{CF}}{c_{\rho CF}} \text{grad} T \right) \Big|_{\Gamma CF} = \alpha_{CF} \rho_{CF} (T_1 - T_{\Gamma CF}) \Big|_{\Gamma CF}; \\ \left(-\frac{\lambda_{MRF}}{c_{\rho MRF}} \text{grad} T \right) \Big|_{\Gamma MRF} &= \alpha_{MRF} \rho_{MRF} (T_2 - T_{\Gamma MRF}) \Big|_{\Gamma MRF}; \alpha_i = \frac{q_i}{dT_i}; q_i = -\lambda_i A_i \frac{dT_i}{dx}; \\ S_{Ti} = S_{Ci} + S_{Pi} T; S_{CCF} = 0; S_{PCF} &= -\frac{\lambda_{CF} A_{CF}}{V_{CF}}; S_{CMRF} = \frac{\lambda_{MRF}}{V_{MRF}} \frac{dT}{dx} A_{MRF}; S_{PMRF} = 0. \end{aligned} \quad (18)$$

$v_1; v_2$ – компоненты скорости, Ψ – функция тока, Φ – завихренность потока, Pr – критерий Прандля, Gr – критерий Грасгофа, k_{pm} – пиромагнитный коэффициент, M_{r0} – равновесное значение магнитного момента единицы объема жидкости, I – сила тока, β_V – коэффициент объемного расширения, d_h – ширина слоя, S_{hi} – объемная скорость выделения теплоты, D_i – коэффициент диффузии, D_0 – значение коэффициента диффузии, при температуре T_0 , E_a – энергия активации, q_i – плотность теплового потока, u_i – скорость. Учитывая магнитные свойства рабочей среды, с целью поддержания заложенных параметров стабильности рабочих процессов и повышения надежности системы разработана методика расчета и настройки охлаждающего элемента, предусматривающая параметрическую рационализацию динамических характеристик МР системы по значению градиента магнитной восприимчивости и комплексной магнитной проницаемости рабочей среды. Научное обоснование предложенного метода основано на эффекте термомагнитной конвекции в МР / ФЖ средах, которая протекает в соответствии с законом Кюри-Вейса и связана с парамагнитными свойствами и со снижением маг-

нитной восприимчивости частиц магнетика при росте температуры рабочей среды. Тепловыделения в слое объема МР среды, по мере приближения к источнику ЭМП, возрастают, создавая по объему градиент магнитной восприимчивости. Очевидно, что частицы магнетика холодного объема МР жидкости обладают большей магнитной восприимчивостью и притягиваются сильнее, чем частицы магнетика горячего объема, что приводит к самоциркуляции рабочей жидкости, но также и к неоднородности магнитных свойств в объеме. Поэтому динамику тепловых процессов в объеме МР рабочей среды следует оценивать исходя из условия однородности магнитных свойств. Высокое значение термосопротивления элементов регулирования термодинамических параметров системы термостатирования свидетельствует о высокой эффективности процесса создания значительных перепадов температур на их сторонах даже в однокаскадных полупроводниковых термоэлектрических устройствах. Полученные значения поглощаемой тепловой мощности доказывают, что предлагаемая конструкция охлаждающей системы обладает хорошими мощностными показателями, Рисунок 23, а реализация регулирования рабочих параметров системы термостатирования за счет коррекции вольт-амперных характеристик эффективна. Графические зависимости иллюстрируют хороший отклик охлаждающей системы на повышение силы тока сигнала управления и значительное увеличение поглощаемой термоэлектрическим элементом тепловой мощности при малом росте силы тока. Как известно, именно плотность заполнения рассматриваемого объема молекулами среды определяет интенсивность процессов теплопроводности и диффузии в нем, поэтому основным параметром оценки реологических и термодинамических характеристик рабочей среды прием ее плотность, так как изменение плотности оказывает влияние на значение каждого члена уравнения, описывающего тепловые процессы, протекающие в рабочей среде. Результаты численного моделирования свидетельствуют о достаточной скорости изменения значений плотности рабочей среды и в целом о высокой эффективности разработанной системы термостатирования, не смотря на ее малые размеры и низкую мощность одноступенчатой компрессорной установки, Рисунок 24. Проведен ряд мероприятий направленных на повышение надежности МР систем ВЗ и элементов их приводов, сформулированы и обоснованы базовые положения прикладной теории повышения надежности МР и ФЖ системы ВЗ. В качестве основных критериев надежности выбраны безотказность и ремонтпригодность, а решение поставленных задач по повышению надежности МР систем ВЗ и элементов их приводов произведено путем совершенствования конструкций. Разработанные конструкторско-схемные решения, позволили исключить использование регулирующих аппаратов, имеющих в своей конструкции механические элементы и производить управление рабочими процессами, не создавая механических связей. При этом достигнуто повышение их эффективности, выражающееся в улучшении динамических характеристик систем ВЗ и элементов их приводов и в повышении стабильности их рабочих процессов, а также увеличен КПД МД регулирующих аппаратов.

Основываясь на статистике отказов различных элементов гидравлических систем, в которых преобладают отказы механических элементов и на том, что в МР системах отсутствуют элементы механики, установлено, в МР системах менее

надежными являются элементы электромагнитной части. Также учтена экономическая целесообразность проведения мероприятий нацеленных на восстановление работоспособности отдельных элементов, а именно стоимость материалов и человеко-часов, требуемых для ремонтных работ.

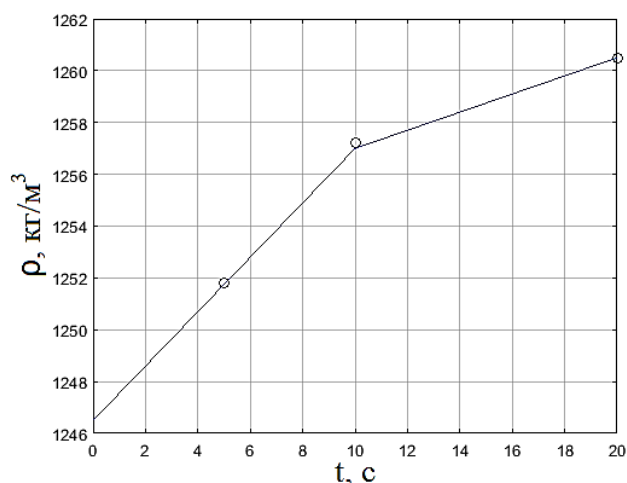
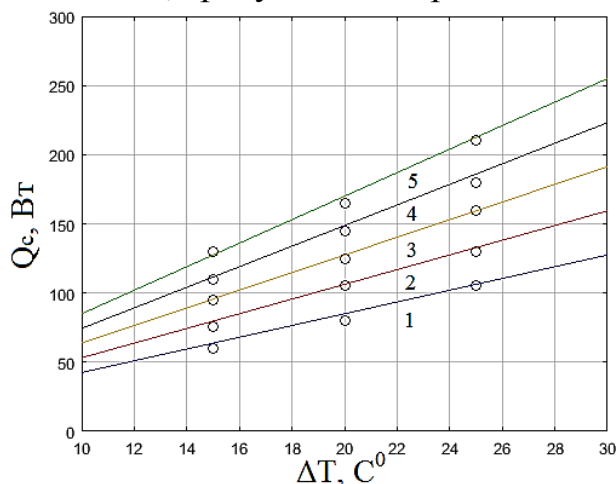


Рисунок 23 – Зависимость поглощаемой тепловой мощности в системе термостатирования от разницы температур МР рабочей среды и хладагента при силе тока управляющего сигнала 1: I=1 А; 2: I=1.25 А; 3: I=1.5 А; 4: I=1.75 А; 5: I=2 А. Точки – экспериментальные данные

Рисунок 24 – Динамика изменения значений плотности МР среды во времени. Точки – экспериментальные данные

Численные значения вероятности восстановления конструктивных элементов также подтвердили преимущества МР систем ВЗ над гидравлическими системами. Очевидно и то, что основным параметром, определяющим вероятность возникновения события (отказа) является число испытаний (количество элементов), поэтому уменьшение количества элементов системы в целом, снижает вероятность возникновения отказа. Следовательно, исключение из приводов систем ВЗ механической части (снижения числа элементов конструкции), в случае эксплуатации МР систем, понижает вероятность отказов. Рассмотренные критерии надежности: безотказность и ремонтпригодность, и произведенное сопоставление их численных значений для гидравлических и МР приводных систем, подтверждает более высокую степень надежности МР приводных систем в сравнении с гидравлическими приводными системами.

Основные результаты и выводы выполненных экспериментальных и теоретических исследований заключаются в следующем:

1. Основным принципом разработки МР и ФЖ аппаратов нового класса является выбор в качестве управляющих элементов дифференциальных электромагнитных блоков управления, которые позволяют создавать динамические ЭМП сложных геометрических конфигураций, обладающих хорошими динамическими характеристиками (скорость отработки сигнала на уровне нескольких миллисекунд) и большой глубиной регулирования, допускающей точность перемещения плунжера до 1 нм. Рост эффективности работы МР и ФЖ аппаратов достигнут за счет применения схемных методов повышения скорости отклика на сигнал управления, что рационализирует характеристики дифференциальных электро-

магнитных блоков и сокращает время переходных процессов в пределах 1 мс. При генерировании вращающихся и бегущих управляющих ЭМП предпочтительно использование трехфазных алгоритмов управления. Приведенные методы расчета параметров дифференциальных электромагнитных блоков управления обладают высокой точностью за счет простоты алгоритма реализации управления, применимы в инженерной практике и не требуют больших вычислительных мощностей. Реализация нестационарных ЭМП требует существенно меньших затрат электроэнергии, до 35–50 %.

2. Созданы математические модели, на основе которых разработаны методы проектирования и расчета МР приводов систем ВЗ комбинированного типа, доведенные до алгоритмов и программной реализации. Методология основана на применении комплекса разработанных методов, позволяющих определять вклад широкого ряда способов трансформации механической энергии, входящих в комбинированные методы и производить оценку динамики МР / ФЖ системы ВЗ в совокупности с динамикой регулирующей аппаратуры МР управляющего контура. На тестовых примерах расчета получены высокие динамические характеристики систем с предельным временем диссипации механических нагрузений от 1 мс до 100 мс. В рамках нового подхода совершенствования и рационализации процессов ВЗ разработан научно-обоснованный обобщенный метод прогнозирования эффективности МР систем ВЗ комбинированного типа, который имеет хорошую воспроизводимость результатов при оценке вклада отдельных составляющих комбинированного способа на показатели работы МР системы ВЗ.

3. На основе анализа рабочего процесса МР систем ВЗ комбинированного типа установлены закономерности, позволяющие определить пути повышения их эффективности. С целью прогнозирования роста эффективности МР систем ВЗ устанавливается ряд критериев. Критерием рационализации соотношения вклада импульсного изменения электромагнитной составляющей давления и вклада колебательных движений частиц магнетика в вихревых ЭМП в реализацию осцилляций в ФЖ системе ВЗ, с учетом эффекта вязкостной диссипации механической энергии, является допустимая минимизация значений вольт-амперных характеристик вихревой катушки индуктивности (параметров управляющего ЭМП для ФЖ осциллятора) в соответствии с заданными значениями вольт-амперных характеристик кольцевой катушки индуктивности (со значениями восстанавливающей силы в рабочей полости ФЖ системы и выраженностью вязкостной диссипации механической энергии). Критерием рационализации количества перегородок, разделяющих рабочую камеру на субполости и оценки влияния их установки на процесс вязкостной диссипации механической энергии и подавления ударных волн путем формирования во внешних ЭМП, регулирующих акустических волн, распространяющихся в объеме МР жидкости, принято значение смещения перегородок. Впервые выявлены закономерности, определяющие допустимый градиент распределения диссипативно-жесткостных характеристик в неоднородных МР камерах, численно зависящие от соотношения значений гидравлического сопротивления каналов, выполненных в перегородках, и вязкости МР рабочих сред. Создание гидростатической подъемной силы в МР камерах позволяет изменять ди-

намику перемещения плунжера и повышать грузоподъемность систем без существенного изменения скоростных параметров перемещения плунжера.

4. Разработанные методы расчета МР систем ВЗ, применяющих комбинации регулирующих воздействий, дают возможность рационализировать их статические и динамические характеристики и существенно снизить материально-технические затраты на проектирование регулирующих МР аппаратов. Применение МР камер с адаптивными диссипативно-жесткостными свойствами в комбинации с управляющими акустическими волнами увеличивает глубину регулирования процесса вязкостной диссипации механической энергии. Рационализацию процесса вязкостной диссипации механической энергии в МР рабочей камере предпочтительней производить по частотно-фазовому принципу. В качестве критерия рационализации характеристик рабочих МР сред управляющих контуров, проявляющих неньютоновские свойства целесообразно применять динамическую вязкость, заданную в виде функции $\eta(T, H, \tau_{sh})$.

5. Впервые разработано методическое и программное обеспечение включающее:

- математическую модель, описывающую рабочие процессы МР систем ВЗ комбинированного типа на основе, которой созданы инженерные и научно-обоснованные методы проектирования и расчета.

- математическую модель и алгоритм расчета, позволяющие произвести расчет и настройку охлаждающего элемента в соответствии с требуемым значением градиента магнитной восприимчивости и комплексной магнитной проницаемости рабочей среды и рационализации их значений с учетом требуемых динамических характеристик МР системы комбинированного типа.

- методы проектирования и расчета МР / ФЖ систем активной ВЗ способные учитывать особенности рабочего процесса при совместном применении ФЖ осциллятора, вязкоупругого демпфирования и регулирующих МР / МД аппаратов комбинированного типа, реализованные в программном коде.

- методы проектирования и расчета, адаптивных МР систем ВЗ способные учитывать особенности рабочего процесса МР камер с неоднородно распределенными диссипативно-жесткостными свойствами, реализованные в программном коде.

- алгоритм управления ФЖ регулирующих элементов ГГ аппаратов и рационализации динамических характеристик устройств, обладающих комбинацией ФЖ камер и ФЖ регулирующих элементов, реализованный в программном коде.

6. Для устройств, обладающих комбинацией ФЖ камер и ФЖ регулирующих элементов, установлены рациональные последовательности и длительности включения управляющих ЭМ, а также описаны численные зависимости формирующие сигналы управления и их взаимное согласование. Разработаны рекомендации по совершенствованию конструктивно-схемных решений систем и способов ВЗ комбинированного типа, а также ответственных элементов их приводов, наиболее удачные конструкции получили промышленное внедрение. МР и ФЖ регулирующие элементы позволяют значительно упростить реализацию управления расходными характеристиками гидравлических аппаратов, повышают точность и скорость отклика на сигнал управления. Показано, что снижение количе-

ства прецизионных пар трения, обладающих значительно более высокой вероятностью отказа в сравнении с элементами, работающими в статическом режиме, уменьшает количество отказов на порядок, а полное исключение подвижных элементов из конструкции, повышает надежность в 20–30 раз. Также упрощение геометрии проточных полостей, приводит к снижению общего числа элементов конструкции и уменьшению выраженности эрозионных процессов, повышает надежность регулирующих аппаратов приводов систем ВЗ в 5–10 раз. Простота конструкций разработанных аппаратов значительно снижает затраты на их производство и эксплуатацию. Модульность предложенных конструктивных решений для дифференциальных электромагнитных блоков и проточных полостей устройств обеспечивает унификацию конструктивных элементов, что позволяет сократить расходы на организацию технологических процессов, упростить ремонтные работы и модернизацию оборудования, с целью повышения значений или увеличения интервала рабочих параметров. Созданные конструкции МР и МД аппаратов позволили снизить зависимость характеристик, от температуры рабочей среды, стабилизировав их значения во времени и повысили к.п.д. МД насосов в 2–3 раза.

Перспективы дальнейшей разработки темы:

- дальнейшая разработка методов совершенствования рабочих процессов и повышения эффективности приводов МР систем ВЗ комбинированного типа, исследования новых способов создания комбинированного регулирующего воздействия;
- развитие методов численного моделирования МР систем ВЗ комбинированного типа.

По теме диссертации опубликовано 60 работ, основные из которых:

Работы, опубликованные в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

Работы, опубликованные в изданиях, рекомендованных ВАК РФ по специальности 05.02.02.:

1. Редников С.Н., **Найгерт К.В.** / Математическое описание теплогидравлических и химических свойств рабочих жидкостей гидроприводов высокого давления // Известия Самарского научного центра российской академии наук. – 2013. – Т. 15, – № 4(2) – С. 571–574.
2. Редников С.Н., **Найгерт К.В.** / Зависимость внутренней энергии однокомпонентной углеводородной системы от размера частиц при снятии вязкостной характеристики в ротационном вискозиметре высокого давления // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. – 2014. – № 36 – С. 143–154.
3. Редников С.Н., **Найгерт К.В.** / Фазовые переходы в системах углеводородов при давлениях выше 150 МПа // Известия Самарского научного центра российской академии наук. – 2014. — Т. 16, – № 1(2) – С. 515–517.
4. **Найгерт К.В.**, Редников С.Н. / Автоматизация рабочего процесса магнитореологического дросселирующего устройства // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2016. – Т. 16, – № 2. – С. 23–32.
5. **Найгерт К.В.**, Редников С.Н. / Технологии управления расходными характеристиками потока посредством изменения реологических свойств рабочих сред // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2016. – Т. 16, – № 2. – С. 52–60.
6. **Найгерт К.В.**, Редников С.Н., Япарова Н.М. / Процессы полимеризации рабочей среды в зазорах золотниковых пар // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. – 2016. – № 46. – С. 172–190.
7. **Найгерт К.В.**, Редников С.Н., Прокудина Л.А. / Методика расчета адсорбционных процессов в малых зазорах проточной части приводов высокого давления // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2017. – Т. 17, № 1. – С. 21–32.

8. **Найгерт К.В.**, Целищев В.А. / Численное описание неньютоновских эффектов в рабочих средах магнитореологических приводных систем высокого давления комбинированного типа управления // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2018. – № 53. – С. 30–42.
9. **Найгерт К.В.**, Редников С.Н., Прокудина Л.А. / Предсказание релаксационных эффектов в рабочих средах углеводородного состава при высоких давлениях // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2018. – Т. 18, № 1. – С. 24–33.
10. **Найгерт К.В.**, Целищев В.А. / Влияние внешних электромагнитных полей на значение градиента скорости сдвига слоев магнитореологической рабочей среды // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2018. – Т. 18, № 2. – С. 15–22.
11. **Найгерт К.В.**, Целищев В.А. / Конструктивное исполнение высокоэффективных систем терморегулирования гидравлических и магнитореологических приводов мобильных машин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2018. – Т. 18, №3. – С. 39–48.
12. **Найгерт К.В.**, Целищев В.А. / О быстродействии электромагнитных блоков управления магнитореологических систем нового поколения // Вестник УГАТУ. Серия «Электротехника». – 2018. – Т.22, № 4(82). С. 109–118.
13. **Найгерт К.В.**, Целищев В.А. / Разработка корпуса магнитореологических устройств из композитных материалов // Вестник УГАТУ. Серия «Машиностроение и Машиноведение». – 2018. – Т.22, № 4(82). – С.19–29.
14. **Найгерт К.В.**, Целищев В.А. / Особенности расчета рабочих параметров гибридных гидравлических систем с магнитожидкостными управляющими элементами // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2018. – Т. 18, № 4. – С. 38–47.
15. **Найгерт К.В.**, Целищев В.А. / Реологические системы демпфирования, применяющие комбинированные и ротационные магнитореологические технологии // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2019. – Т. 19, № 1. – С. 26–36.
16. **Найгерт К.В.**, Целищев В.А. Конструктивные особенности систем демпфирования и виброгашения, базирующихся на принципе неоднородного распределения диссипативно-жесткостных свойств рабочей среды // Вестник ПНИПУ Серия «Машиностроение, материаловедение». – 2019. – Т. 21, № 2. – С. 40–46.
17. **Найгерт К.В.**, Целищев В.А. / Расчет и проектирование магнитореологических камер гидравлического оборудования / Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2019. – Т. 19, № 2. С. 55–65.
18. **Найгерт К.В.**, Целищев В.А. / Оценка температурных факторов, влияющих на рабочие процессы магнитореологических систем нового поколения // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2019. – Т. 21, № 3. – С. 93–99.
19. **Найгерт К.В.**, Целищев В.А. / Параметрическая оптимизация рабочих процессов магнитореологических приводных систем // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2019. Т. – 19, № 4. С. 39–49.

Работы, опубликованные в изданиях, рекомендованных ВАК РФ по другим специальностям:

20. **Найгерт К.В.**, Целищев В.А. / Повышение эффективности рабочего процесса магнитодинамического насоса // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. – 2019. – Т.17, № 2. – С. 60–67.
21. **Найгерт К.В.**, Целищев В.А. / Защита приводных систем от гидроудара магнитореологическими устройствами // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2019. Т.17, №3. – С. 70–77.
22. **Найгерт К.В.**, Целищев В.А. / Методология формирования гидродинамических и реологических эффектов магнитореологической рабочей среды // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. – 2019. – №. 58. – С. 122–132.

Работы, опубликованные в журналах, включенных в международные системы цитирования (SCOPUS и Web of Sciences):

23. **Naigert K.V.**, Tselischev V.A. (2019) Hardware Implementation of Automatic Control System for New Generation Magnetorheological Supports. Proceedings of the 4th International Conference on Industrial Engineering. ICIE 2018. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham, pp. 2219–2228
24. **Naigert K.V.**, Tselischev V.A. (2019) New Generation Magnetorheological, Magnetodynamic, and Ferrofluid Control Devices with Nonstationary Electromagnetic Fields. Proceedings of the 4th International

Conference on Industrial Engineering. ICIE 2018. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham, pp. 1375–1384

25. **Naigert K.V.**, Tselishev V.A. (2019) Development of Control Units of Magnetorheological Drives. 2019 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon).

26. **Naigert K.V.**, Tselishev V.A. (2019) Modeling of Thermolectric Elements in Cooling Circuits of Drive Systems. 2019 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon).

27. **Naigert K.V.**, Tselishev V.A. / Design and calculation method of composite housings for new generation magnetorheological devices. Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering. ICIE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Volume II. Springer, Cham, pp. 1295–1303

28. **Naigert K.V.**, Tselishev V.A. / Methodology and constructive implementation of active vibration protection of large scale structures. Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering. ICIE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Volume II. Springer, Cham, pp. 1305–1313

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ:

29. Программный комплекс комбинированной оценки вязкости магнитореологической среды во внешних энергетических полях / **К.В. Найгер**т, В.А. Целищев // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ РФ № 2017662736, опублик. 15.11.2017.

30. Программный комплекс для расчета характеристик адаптивного комбинированного реологического амортизатора / **К.В. Найгер**т, Тутьнин В.Т. // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ РФ № 2018615438, опублик. 08.05.2018.

31. Программный комплекс для расчета и оптимизации управляющего сигнала в гибридных гидравлических устройствах / **К.В. Найгер**т, Тутьнин В.Т. // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ РФ № 2019662270, опублик. 19.09.2019.

Патенты:

32. Модульная система электромагнитной транспортировки жидкостей, обладающих магнитными свойствами // Патент РФ № 2624082 / **К.В. Найгер**т, С.Н. Редников, опублик. 30.06.2017 Бюл. № 19.

33. Магнитореологический привод прямого электромагнитного управления характеристиками потока верхнего контура гидравлической системы золотника // Патент РФ № 2634163 / **К.В. Найгер**т, С.Н. Редников, опублик. 24.10.2017 Бюл. № 30.

34. Магнитореологический привод прямого электромагнитного управления характеристиками потока верхнего контура гидравлической системы с гидравлическим мостиком // Патент РФ № 2634166 / **К.В. Найгер**т, С.Н. Редников, опублик. 24.10.2017 Бюл. № 30.

35. Смеситель-дозатор с магнитожидкостными управляющими элементами // Патент РФ № 2639906 / **К.В. Найгер**т, В.Т. Тутьнин, опублик. 25.12.2017 Бюл. № 36.

36. Реологический дроссель-термостат // Патент РФ № 173746 / **К.В. Найгер**т, В.Т. Тутьнин, опублик. 07.09.2017 Бюл. № 25.

37. Адаптивный комбинированный реологический амортизатор // Патент РФ № 175044 / **К.В. Найгер**т, В.Т. Тутьнин, опублик. 20.11.2017 Бюл. № 32.

38. Магнитореологическое устройство активной защиты длинномерной конструкции от резонансной вибрации / **К.В. Найгер**т, В.Т. Тутьнин // Патент РФ № 185538, опублик. 07.12.2018 Бюл. № 34.

39. Композитный корпус для магнитореологического демпфера / **К.В. Найгер**т, В.Т. Тутьнин // Патент РФ № 185305, опублик. 29.11.2018 Бюл. № 34.

40. Магнитореологический привод / **К.В. Найгер**т, В.А. Целищев, А.Ю. Атанов // Патент РФ № 192674, опублик. 26.09.2019 Бюл. № 27.

Монографии:

41. С.Н. Редников, **К.В. Найгер**т и др. / Монография «Наука и технологии» // Глава 9. Реологические аномалии в магнитореологических системах высокого давления // Избранные труды Всероссийской конференции по проблемам науки и технологий – Москва: РАН, 2014 г. – 236 с.

42. **К.В. Найгер**т, В.А. Целищев и др. / Монография «Итоги науки. Выпуск 35» // Глава 3. Физические основы проектирования магнитореологических систем нового поколения // Избранные труды Всероссийской конференции по проблемам науки и технологий – Москва: РАН, 2018 г. – 90 с.

43. **К.В. Найгер**т, В.А. Целищев и др. / Монография «Итоги науки. Выпуск 37» // Глава 2. Термоэффекты и новые устройства охлаждения в магнитореологических приводных системах // Избранные труды Международного симпозиума по фундаментальным и прикладным проблемам науки – Москва: РАН, 2018 г. – 151 с.