



На правах рукописи

**ГАНДЖА Дмитрий Сергеевич**

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКА  
ПРИНЦИПИАЛЬНЫХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО  
ПРИВОДА ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОГО УСИЛИТЕЛЯ МОЩНОСТИ**

2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Самара - 2026

Работа выполнена на кафедре технологии автоматизированного машиностроения Федерального государственного автономного образовательного учреждения «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)».

Научный руководитель: **Ардашев Дмитрий Валерьевич**, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры технологии автоматизированного машиностроения Федерального государственного автономного образовательного учреждения «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)»

Официальные оппоненты: **Зюзов Анатолий Михайлович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург;

**Иванников Юрий Николаевич**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры Электромеханика и автомобильное электрооборудование ФГАОУ ВО «Самарский государственный технический университет», г. Самара.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» г. Пермь

Защита диссертации состоится «14» апреля 2026 г. в 12 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.377.06 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Самарский государственный технический университет» по адресу: г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, Главный корпус, ауд. №200.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Самарского государственного технического университета (ул. Первомайская, 18), и на сайте ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» <https://24237706.samgtu.ru>.

Отзывы по данной работе в двух экземплярах, заверенных печатью, просим направлять по адресу: Россия, 443100, Самара, ул. Молодогвардейская, 244, Главный корпус, Самарский государственный технический университет, ученому секретарю диссертационного совета 24.2.377.06; факс: (846) 278-44- 00, e-mail: [a-ezhova@yandex.ru](mailto:a-ezhova@yandex.ru).

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2026 г.

Ученый секретарь диссертационного совета 24.2.377.06

кандидат технических наук, доцент



Е.В. Стрижакова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** К современному производству для выпускаемой продукции предъявляются высокие требования по всем показателям, включая показатели надежности. Изделия должны проектироваться и, соответственно, проверяться, на воздействие внешних факторов, включая механические, климатические, радиационные, электромагнитные, химические, биологические и другие воздействия. Это особо актуально для устройств специального назначения, авиационного, морского и космического базирования. Наиболее трудоемкими являются испытания на эксплуатационные и транспортные механические воздействия. Их достаточно сложно смоделировать в лабораторных условиях. Проблема осложняется для изделий больших габаритов и массы, а именно: ракетной техники, авиационных устройств, железнодорожного состава, крупных наземных транспортных средств. Одним из направлений решения этой проблемы является использование крупного испытательного оборудования, построенного на базе следящего гидропривода (гидроусилителя). Принцип работы гидроусилителей всех типов заключается в том, что усилие на исполнительный орган (вибростенд) формируется за счет открытия или закрытия магистрали маслопровода в золотниковой паре. Теоретически коэффициент усиления такого устройства, то есть отношение выходной энергии на исполнительный орган к входной энергии на воздействие штока золотниковой пары приближается к бесконечности. Относительно незначительные усилия при перемещении поршня золотниковой пары за счет гидроусилителя создают усилия в несколько тонн на платформу испытательного стенда. Это позволяет, например, снять осциллограмму реального механического воздействия при транспортировке изделия на большие расстояния с помощью вибродатчиков и затем в лабораторных условиях имитировать это воздействие на испытуемом объекте, практически приближаясь к натурным испытаниям.

Наиболее ответственным узлом в гидроусилителе является электромеханический привод золотниковой пары (ЭМП). Именно он формирует управляющее воздействие на исполнительный орган. Он должен удовлетворять всем требованиям по быстродействию и амплитуде перемещения штока золотника. В силу различных сложившихся обстоятельств отечественный производитель следящих гидроприводов вынужден был импортировать этот блок для своих стендов из-за рубежа. Международные санкции против России первоначально осложнили эти поставки, а в последствии прекратили их. Учитывая стратегическое значение этого изделия, перед российской промышленностью встала задача не просто импортозамещения важного технического устройства, но и разработка принципиальных решений, позволяющих превзойти импортный аналог по основным показателям и характеристикам. С этой точки зрения представляемые к защите научные исследования актуальны, имеют научную значимость и практическую ценность.

**Степень научной разработанности исследуемой темы.** Российская промышленность и академическое сообщество имеют большие заделы по этой проблематике. Свой вклад в развитие теории следящего гидропривода внесли ученые: Московского авиационного института) Гамынин Н. С., Карев В. И., Баженов А.И, Селиванов А. М.; Московского энергетического института Шейкин М.О., Шилин

С.Н., Феденков В.В.; МГТУ им. Баумана Ломакин В.О., Шумилов И.С., Щербачев П.В., Петров А.И.; Пермского национального исследовательского политехнического университета Кавалеров Б.В., Килин Г.А., Судаков А.И., Чабанов Е.А., Чирков Д.А.; Ивановского государственного энергетического университета имени В.И. Ленина Казаков Ю.Б., Морозов Н.А., Океанский А.П., Шумилов Е.А.; Самарского государственного технического университета Зубков Ю.В., Ануфриев А.С., Макаричев Ю.А., Верещагин В.Е.; Южно-Уральского государственного университета Спиридонов Е. К., Форенталь В. И., Ардашев Д.В., Коробатов Д.В., Согрин А.И., Неустроев Н.И.; Уральского инжинирингового центра Бодров В.В., Багаутдинов Р.М., Багаутдинов А.Р., Гойдо М.Е., Батулин А.А., Суворов К.В .

Из зарубежных научных результатов следует отметить Наньянский технологический университет, Сингапур (Nanyang Technological University, Singapore), ученый Liang Yan, Пекинский университет Бэйхан, Китай (University Beijing, China) ученый Shuai Wu, факультет автоматизации и электротехники Пекинского университета авиации и космонавтики (Faculty of Automation and Electrical Engineering of Beijing University of Aeronautics and Astronautics), ученые Zongxia Jiao и Juntao Yu, школа автоматизации и электротехники Университета Бэйхан (School of Automation Science and Electrical Engineering University Beijing, China).

Федеральный институт промышленной собственности содержит обширную базу патентов на изобретения и полезные модели по вариантам конструкции ЭМП для следящего гидропривода. Неоспоримым мировым лидером среди ведущих производителей гидравлических и связанных с ними автоматизированных систем, включая электромеханические приводы, является фирма Yuken, Япония.

В инженерной среде сложилось мнение, что достигнуть основные параметры и характеристики приводов фирмы Yuken с использованием отечественных материалов и технологий является сложной задачей.

Большое количество опубликованного по этой проблеме научного материала и инженерной информации говорит о том, что тема актуальна и востребована. При достаточно широком диапазоне исследований следует отметить, что в целом они носят разрозненный характер. Гидродинамические и электродинамические исследования идут параллельно друг другу. Отсутствует комплексный подход к проектированию. Для ЭМП исследуется в основном только одна конструкция: это радиальная система возбуждения с постоянными магнитами и цилиндрическим якорем с гильзой из алюминиевого сплава. Отсутствует анализ распределения потерь в системе. Нет работ по оптимизации основных размеров привода. Отсутствует проектная система по проектированию ряда этих устройств. Система охлаждения привода при предельных нагрузках приводит к критичному нагреву якорной обмотки и постоянных магнитов и требует совершенствования. Возникла практическая потребность не просто импортозамещения привода, а разработка принципиальных решений, позволяющих превысить существующие основные показатели. Это делает исследования актуальными и востребованными особенно в контексте интенсивного развития современного следящего гидропривода.

**Цель диссертационного исследования.** Основной целью диссертационного исследования является улучшение эксплуатационных характеристик электромеханического привода электрогидравлического усилителя мощности за

счет научно-инженерных решений на основе физического, математического и компьютерного моделирования.

**Задачи исследования.** Для достижения этой цели необходимо последовательно решить следующие задачи:

1. Разработать компьютерные модели электромеханического привода гидроусилителя различных конструктивных исполнений для анализа распределение потерь в активных частях якоря и индуктора. По минимуму суммарных потерь выбрать оптимальную конструкцию.

2. Разработать методику расчета магнитной системы электромеханического привода, которая позволила бы создать простую, но приемлемую по точности определения основных параметров магнитного поля математическую модель, способную работать в итерационных циклах оптимизации конструкции.

3. Разработать математическую модель работы привода, позволяющую оценить его энергетические затраты при достижении основной рабочей характеристики: частоты 300 Гц, соответствующей сдвигу фазочастотной характеристики на  $90^\circ$ , при амплитуде управляющего сигнала 25 %.

4. Разработать оптимизационную модель, позволяющую определить наилучшую геометрию по критерию минимальной потребляемой энергии при достижении основной рабочей характеристики. На основании результатов оптимизации выбрать базовую модель для рекомендации к внедрению в серийное производство.

5. На основе теплового расчета по методу эквивалентных тепловых схем замещения и вентиляционного расчета по методу аэродинамических схем замещения определить динамику нагрева активных частей привода при выполнении им основной рабочей характеристики. По результатам исследования оценить возможность применения двухконтурной системы охлаждения для отвода тепловых потерь.

6. Провести натурные испытания опытного образца электромеханического привода в составе электротехнического комплекса следящего гидропривода с целью подтверждения корректности разработанных математических, компьютерных и имитационных моделей и принятых инженерных решений.

7. По результатам исследований разработать конструкторскую документацию на макетный образец перспективной конструкции электромеханического привода, который по своим параметрам и характеристикам составил бы конкуренцию импортным аналогам электромеханических приводов данного класса.

Таким образом, **объектом исследования** является электромеханический привод гидроусилителя мощности следящей системы.

**Предметом исследования** являются конструкции электромеханического привода, методы анализа его магнитного и теплового состояния на основе физического, математического имитационного и компьютерного моделирования, методы проектирования приводов данного типа, методы исследования работоспособности и качества функционирования при различных нагрузочных режимах.

**Методология и методы исследования.** Поставленные научные задачи решены с применением общей теории электрических машин, методов проектирования на

основе схем замещения, методов нелинейного программирования для решения задачи оптимизации, метода конечных элементов для решения задач электромагнитного и теплового анализа, методов физического моделирования, методов трехмерного твердотельного моделирования.

**Научная новизна.** К научной новизне следует отнести следующее:

1. Предложена математическая модель электромеханического привода гидроусилителя, отличающаяся возможностью определения энергетических затрат при достижении основной рабочей характеристики и оценки демпферных усилий от вихревых токов.

2. Разработана методика расчета магнитной системы электромеханического привода гидроусилителя на основе метода конечных элементов, отличающаяся параметризацией геометрии магнитной системы и неизменным, заранее определенным числом конечных элементов.

3. Разработана методика однокритериальной оптимизации геометрии электромеханического привода гидроусилителя по критерию минимума потребления энергии при достижении основной рабочей характеристики, отличающаяся разбиением процедуры оптимизации на уровни, на которых часть варьируемых параметров может быть зафиксирована по условиям технического задания, а часть включается в оптимизационные циклы.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Построенные на основе метода конечных элементов компьютерные модели ЭМП различных конструктивных исполнений, **отличающиеся тем**, что они позволяют на основе моделирования нагрузки в различных эксплуатационных режимах, оценить распределение потерь во всех основных частях привода.

2. Методика расчета магнитной системы ЭМП на основе метода конечных элементов, **отличающаяся тем**, что за счет заранее заданного числа элементов, которое обеспечивают требуемую точность расчета основных параметров поля, расчетная модель содержит ограниченное количество уравнений, что позволяет включать ее в большое число оптимизационных циклов.

3. Математическая модель работы привода в основном рабочем режиме при частоте 300 Гц, соответствующей сдвигу фазочастотной характеристики на  $90^\circ$ , при амплитуде управляющего сигнала 25 %, **отличающаяся тем**, что она позволяет определить влияние демпферных усилий от действия вихревых токов.

4. Методика оптимального проектирования на основе многоуровневой однокритериальной оптимизации, **отличающаяся тем**, что она позволяет реализовывать различные проектные ситуации по требованию заказчика.

5. Конструкция ЭМП на основе радиально-тангенциального индуктора и якоря с диэлектрической гильзой, **отличающаяся тем**, что она позволяет уменьшить энергопотребление привода за счет исключения в якоре потерь от вихревых токов в широком диапазоне изменения частоты питания обмотки якоря.

**Теоретическая значимость.** Проведенные исследования вносят вклад в дальнейшее развитие теории проектирования линейных электромеханических приводов электрогидравлических усилителей мощности. Доказано, что вихревые токи в магнитопроводе и электропроводящих частях якоря помимо выделения потерь оказывают сильное тормозное воздействие на подвижную часть привода,

что снижает быстродействие системы. Указаны пути уменьшения этого влияния за счет исключения короткозамкнутых контуров в конструкции 3. Выявлены места насыщения частей магнитопровода, которые снижают индукцию в рабочем зазоре и уменьшают усилие электромагнитного привода. Изменение конфигурации этих мест позволило увеличить электромагнитную силу и повысить быстродействие системы.

**Практическая значимость.** Основным практическим результатом диссертации является разработка конструкции привода, которая позволяет по основным параметрам и характеристикам превзойти зарубежный прототип фирмы Yuken, который является признанным лидером на рынке электромеханических приводов следящих гидроусилителей. Разработанная конструкция более технологична и проста при производстве. Проведенные исследования позволяют разрабатывать ряд электромеханических приводов для других размеров и габаритов.

**Соответствие паспорту специальности.** Диссертация соответствует паспорту специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы, следующим пунктам: п.1., п.2, п.3, п.4, п.5.

**Внедрение результатов работы.** Работа выполнялась при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства «Создание высокотехнологичного производства электрогидравлических усилителей мощности с электромеханическим преобразователем электродинамического типа с расширенным частотным диапазоном» с использованием мер государственной поддержки, предусмотренных Постановлением Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218 по Соглашению №075-11-2023-005 от 13.02.2023г

**Степень достоверности результатов работы.** Достоверность полученных научных результатов подтверждается корректным использованием известных методов анализа и синтеза, применяемых в общей теории электромеханических преобразователей, таких как метод эквивалентных схем замещения, метод конечных элементов, методы нелинейного программирования. Параметры и характеристики электромеханического привода были проверены на опытных образцах, изготовленных по договору с ООО «Уральский инжиниринговый центр» г. Челябинск.

**Апробация работы.** Основные положения результатов диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научно-технических конференциях и семинарах:

Научный семинар аспирантов «IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry» (Магнитогорск 2022);

Научный семинар аспирантов «IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry» (Магнитогорск 2023);

Всероссийская конференции по электрическим машинам в рамках Международной научно-практической конференции. (Уфа, 2023);

Научный семинар аспирантов «IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry» (Магнитогорск 2024).

**Публикации по теме диссертации.** Всего по теме диссертации опубликовано 15 научных работ, из них: 4 статьи в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК РФ, 2 патента на полезную модель, 2 свидетельства на регистрацию программ ЭВМ.

**Личный вклад автора в диссертационное исследование.** Все научные результаты, включенные в диссертацию и представленные к защите, получены лично автором. Личный вклад диссертанта в работах, опубликованных в соавторстве, состоит в определении направлений исследований, постановке задач, разработке математических и имитационных моделей.

**Структура и объем диссертации.** Работа содержит 150 страниц, из них 114 основного текста, 59 рисунков, 18 таблиц, 60 формул и математических выражений. В диссертации приведены, обозначения и сокращения, список терминов, список использованных источников из 128 наименований, 7 приложений.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность выбранной темы. Показаны степень научной разработанности исследуемой темы, задачи исследования, объект и предмет исследования, примененные в работе методы исследования, научная новизна и положения, выносимые на защиту, соответствие паспорту специальности, практическая значимость и результаты внедрения, апробация и публикации по теме диссертационного исследования.

**В первой главе** описан принцип работы электрогидравлического усилителя мощности (ЭГУМ), определена его структурно-функциональная схема (рис.1), показано место и значение электромеханического привода (ЭМП).

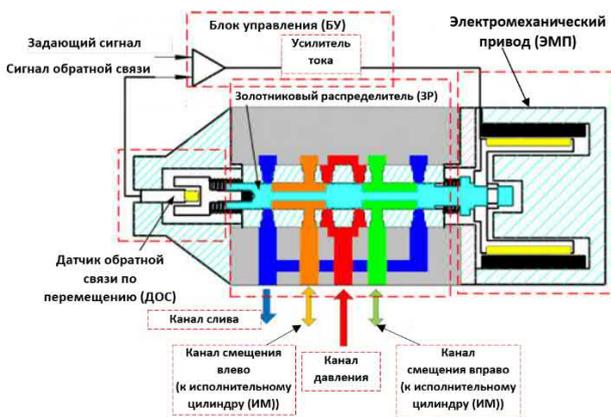


Рис.1. Функциональная схема ЭГУМ

ЭМП обеспечивает качество работы всего гидропривода. Именно ЭМП должен обеспечить перемещение штока ЗР на заданную амплитуду с требуемой частотой ЭМП (применительно к разрабатываемому приводу перемещение штока золотниковой пары на величину  $\pm 0.2$  мм при частоте 300 Гц). В главе проведен анализ распределения потерь в частях ЭМП

Было выбрано 3 конструкции ЭМП и 5 вариантов исполнения якоря (рис.2).

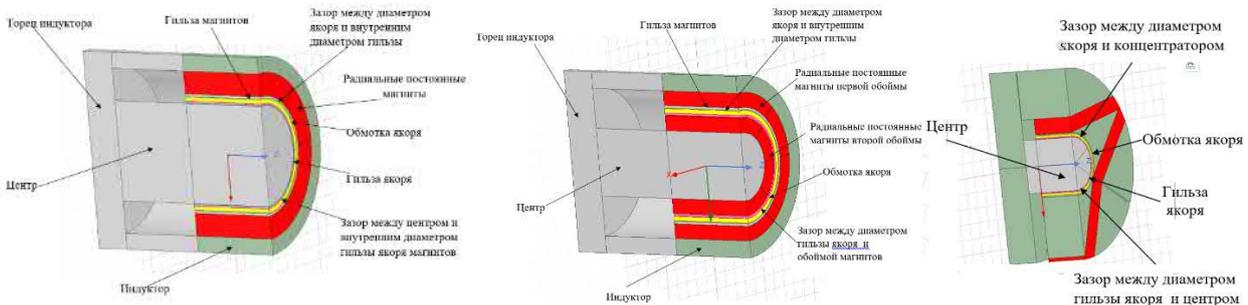




Рис.2. Конструкции (1,2,3,) ЭМП и варианты якоря

Варианты исполнения якоря: а) с алюминиевой гильзой и прорезью, имеющей одну перемычку; б) с алюминиевой гильзой и прорезью, имеющей две перемычки; в) с алюминиевой гильзой без прорези; г) с алюминиевой гильзой и сплошной прорезью; д) с диэлектрической гильзой.

Для всех конструкций и исполнений были разработаны компьютерные модели. Модели были построены в программной среде Ansys Electronics Desktop в режиме Eddy Current, который анализирует квазистатические режимы работы электромагнитных устройств. Цифровое тестирование проводилось для частоты 300 Гц. Определялись электрические, магнитные и потери от вихревых токов. Результаты расчета магнитного поля конструкций 1.2.3 представлен на рис.3.

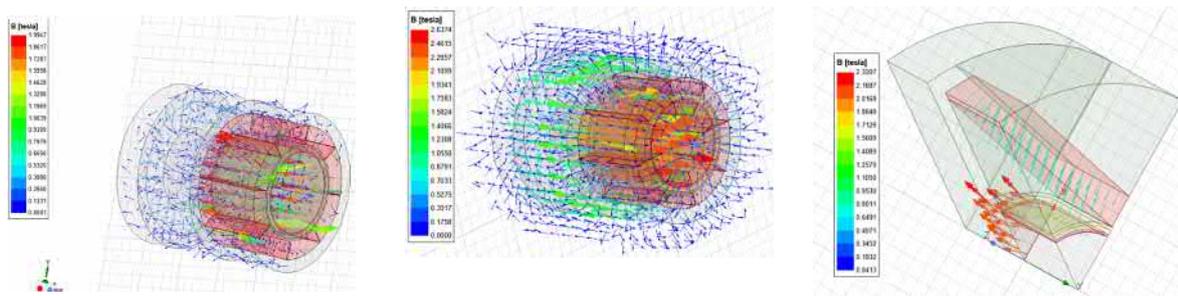


Рис.3. Результаты расчета магнитного поля констр.1, констр.2 и констр. 3

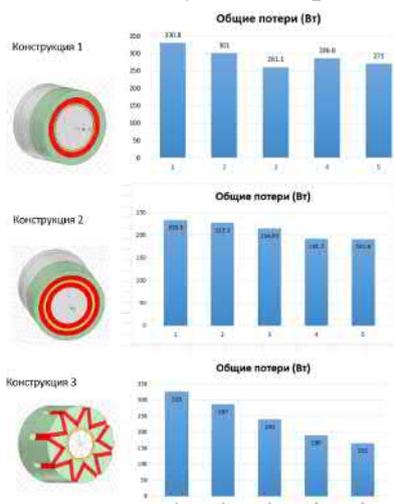


Рис.4. Диаграмма потерь

Сравнительный анализ всех вариантов представлен на рис.4, который показал:

- вихревые токи в элементах конструкции ЭМП оказывают существенное влияние на распределение потерь и динамические характеристики;
- вихревые токи перераспределяются в элементах конструкции. Перераспределение происходит по электрически замкнутым контурам магнитопровода. Режим работы ЭМП близок к режиму работы однофазного высокочастотного трансформатора с короткозамкнутыми витками во вторичной обмотке.

- наилучший результат по минимуму потерь показала конструкция ЭМП с тангенциально-радиальной магнитной системой с изолированными частями магнитопровода и якорем с диэлектрической гильзой. Она рекомендована в качестве базовой для внедрения в производство.

**Во второй главе** представлена разработка динамической модели работы ЭМП. Для расчета магнитного поля предложена специальная методика. Основу ее составляет метод конечных элементов. Особенность методики заключается в том, что модель магнитной системы параметризована и разбита на заранее определенное число конечных элементов. Это позволило сформировать небольшое количество уравнений для расчета параметров поля, которые можно включить в оптимизационный цикл. На рис.5. показана параметризация геометрии магнитной системы ЭМП и разбиение ее на конечные элементы. Таким образом получилась простая, но приемлемая по точности модель для определения средней индукции в воздушном зазоре.

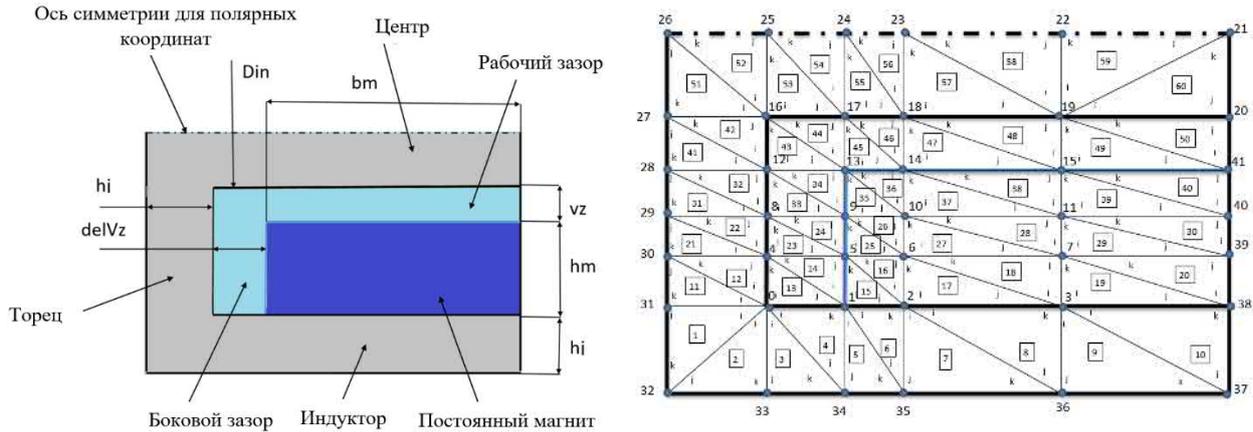


Рис.5. Параметризация геометрии магнитной системы ЭМП и разбиение ее на конечные элементы

Сравнительный анализ расчета по методике и по программе Ansys Electronics Desktop показал, что ошибка по определению индукции в рабочем зазоре, в нейтральном сечении магнита, на поверхности магнита, индукции рассеяния не превышает 3-5 %.

Методика легла в основу для динамической модели работы ЭМП. Функционирование ЭМП можно описать следующей системой уравнений:

$$\text{Средний диаметр обмотки якоря: } D_{sr} = \frac{D_{in} + 2vz + 2hal + hcu}{2}, \quad (1)$$

где  $D_{in}$  – внутренний диаметр втулки якоря,  $hal$  – толщина втулки якоря,  $hcu$  – высота медного слоя обмотки якоря,  $vz$  – воздушный зазор между якорем и индуктором.

$$\text{Число витков обмотки якоря: } W = \frac{L_a n_{sl}^2}{hcu}, \quad (2)$$

где  $L_a$  – активная длина якоря,  $n_{sl}$  – число слоев обмотки якоря.

$$\text{Диаметр провода обмотки якоря: } d_a = \frac{hcu k_{zm}}{n_{sl}}, \quad (3)$$

где  $k_{zm}$  – коэффициент заполнения голый медью обмоточного слоя якоря.

$$\text{Сечение провода обмотки якоря: } q_a = \frac{\pi d_a^2}{4}. \quad (4)$$

$$\text{Активное сопротивление обмотки якоря: } R_a = \frac{\rho_{cu75} \pi D_{sr} W}{q_a}, \quad (5)$$

где  $\rho_{cu75}$  – уд. сопротивление меди при рабочей температуре обмотки якоря.

$$\text{Индуктивность обмотки якоря: } L = \frac{2.5\pi\mu_0 W^2 D_{sr}^2}{4.5D_{sr} + 25L_a}. \quad (6)$$

$$\text{Электромагнитная постоянная времени обмотки якоря: } T = \frac{R_a}{L}. \quad (7)$$

$$\text{Масса обмотки якоря: } M_{cu} = g_{cu} \pi D_{sr} h_{cu} L a k_{zm}, \quad (8)$$

где  $g_{cu}$  – удельная плотность меди.

$$\text{Масса подвижных частей: ЭМП: } M_a = M_{cu} + M_{al}. \quad (9)$$

Работа ЭМП опишется следующими уравнениями:

$$\text{Период цикла колебаний штока: } \tau = \frac{1}{f_{zad}}. \quad (10)$$

$$\text{Четверть периода колебаний: } t_1 = 0.25 \tau.$$

Ток в обмотке якоря определяется из условия равновесия напряжений

$$U = R_a i + L \frac{di}{dt} + E_{emf}, \quad (11)$$

Мгновенное усилие на шток определится уравнением:

$$F_{demp}(t) = B_{\delta} i(t) \pi D_{sr} W - F_{demp} - F_g - F_{fr}, \quad (12)$$

где  $B_{\delta}$  – средняя индукция в воздушном зазоре, определяемая по отдельным алгоритмам для выбранной конструкции (Тл),  $F_{demp}(t)$  – усилие на шток ЗР от действия вихревых токов в ЭМП (Н),  $F_g$  – гидравлические силы золотникового распределителя, оказывающие сопротивление движению штока ЗР (Н),  $F_{fr}$  – силы трения в опорах.

$$\text{Мгновенное значение ускорения штока: } a(t) = \frac{F_{emp}(t)}{M_a}. \quad (13)$$

$$\text{Мгновенное приращение скорости штока: } dV(t) = V + a(t) dt. \quad (14)$$

$$\text{Мгновенное смещение штока: } dS(t) = dV(t) dt + \frac{a(t)^2 dt}{2}. \quad (15)$$

$$\text{Мгновенное значение потребляемой энергии: } dE(t) = U i(t) dt. \quad (16)$$

$$\text{Перемещение штока за четверть периода: } S = \int_0^{t_1} dS(t) dt. \quad (17)$$

$$\text{Потребляемая энергия за четверть периода: } E = \int_0^{t_1} dE(t) dt. \quad (18)$$

$$\text{Значение питаемого напряжения: } U = f(S_{zad}). \quad (19)$$

Данная система уравнений была решена численным методом. Алгоритм решения представлен на рис.6. Исследования главы 2 дали следующие результаты:

- предложена методика расчета параметров магнитного поля с ограниченным числом элементов и узлов. Точность расчета средней индукции в зазоре по этой методике составляет 3-5 %;

- разработана динамическая модель работы ЭМП с использованием дифференциальных уравнений аperiodического процесса нарастания тока в обмотке якоря. Система дифференциальных уравнений решена численным методом;

- математическая модель составила основу оптимизации геометрии ЭМП по критерию минимальной потребляемой мощности. В качестве варьируемых переменных выбраны 4 основных размера активной части ЭМП. Математическая модель реализована на языке Delphi.

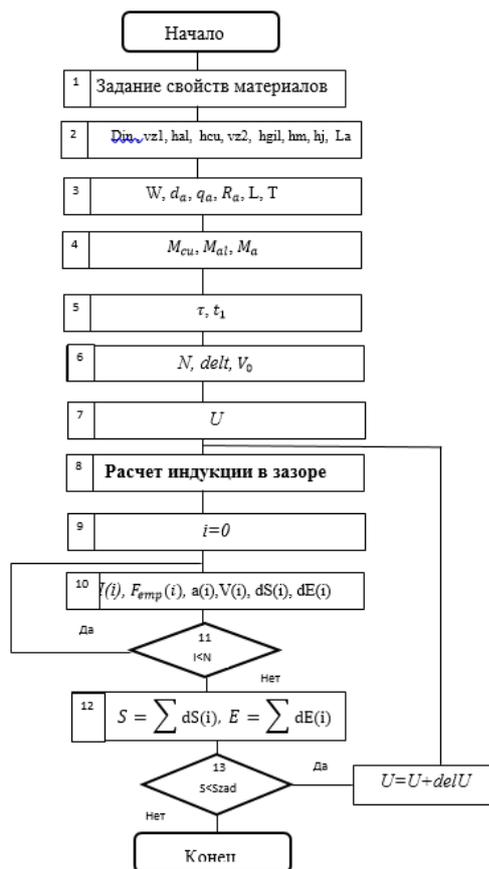


Рис.6. Алгоритм определения потребляемой энергии для заданного перемещения

**В третьей главе** разработана методика оптимального проектирования ЭМП на основе многоуровневой однокритериальной оптимизации. Сформулирована задача однокритериальной оптимизации. Введено понятие уровней однокритериальной оптимизации. Уровень оптимизации определяется количеством фиксированных переменных, определенных техническим заданием заказчика и количеством варьируемых переменных, включенных в оптимизационный цикл. Введение уровней оптимизации в проектную систему позволяет сделать ее более гибкой и способной реализовывать различные проектные ситуации. Для ЭМП определено 7 уровней оптимизации:

- полная оптимизация;
- частичная оптимизация при фиксированном диаметре центра;
- частичная оптимизация при фиксированной активной длине;
- частичная оптимизация при фиксированной высоте обмотки якоря;
- частичная оптимизация при фиксированной высоте постоянного магнита;
- частичная оптимизация при фиксированном диаметре центра и высоте обмотки якоря;
- частичная оптимизация при фиксированном диаметре центра и высоте постоянного магнита.

На основе этой концепции разработана проектная система, включающая в себя синтез и анализ. Синтез осуществляет оптимизацию геометрии, анализ проводит поверочный расчет полученного результата с использованием программной среды

Ansys Electronics Desktop. Проектная система реализована на программном языке Delphi. Интерфейс программной оболочки показан на рис.7.

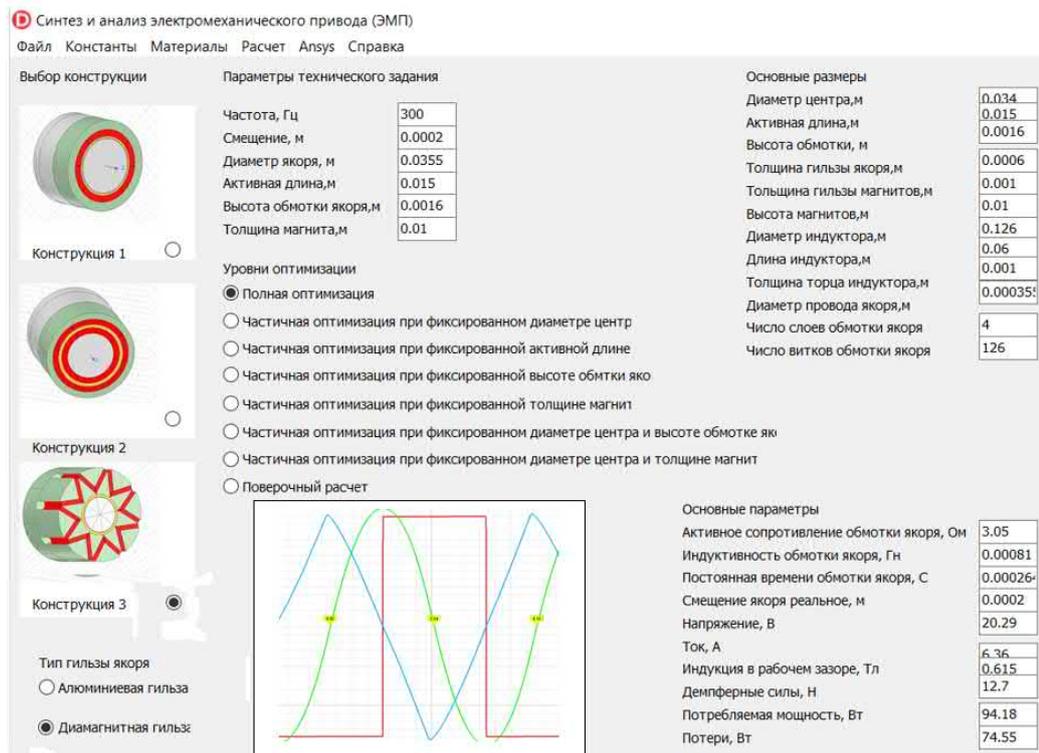


Рис.7. Интерфейс программной оболочки

С помощью проектной системы определена оптимальная геометрия базового варианта

В четвертой главе предложена двухконтурная система охлаждения закрытой конструкции ЭМП. Хладагент циркулирует внутри замкнутого объема и переносит тепло от обмотки якоря к внешней поверхности ЭМП. С наружной поверхности тепло рассеивается естественной конвекцией. Схема двухконтурного охлаждения и эквивалентная аэродинамическая схема представлены на рис.8.

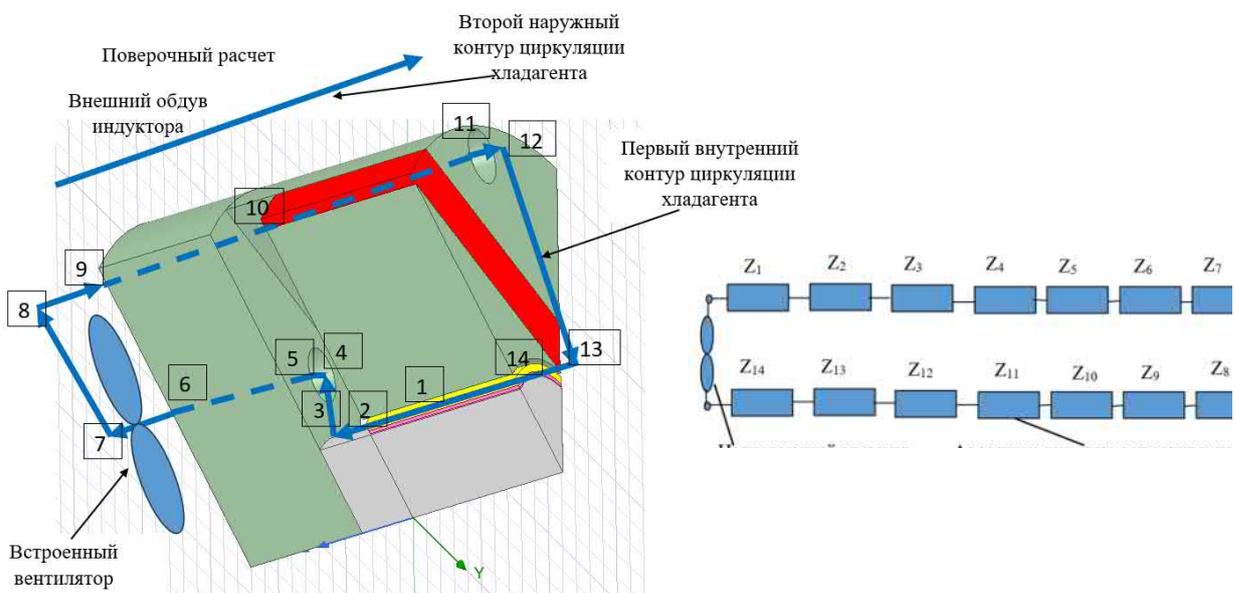


Рис.8. Схема двухконтурного охлаждения и эквивалентная аэродинамическая схема ЭМП

Для двухконтурного охлаждения составлена эквивалентная тепловая схема замещения (рис.9).

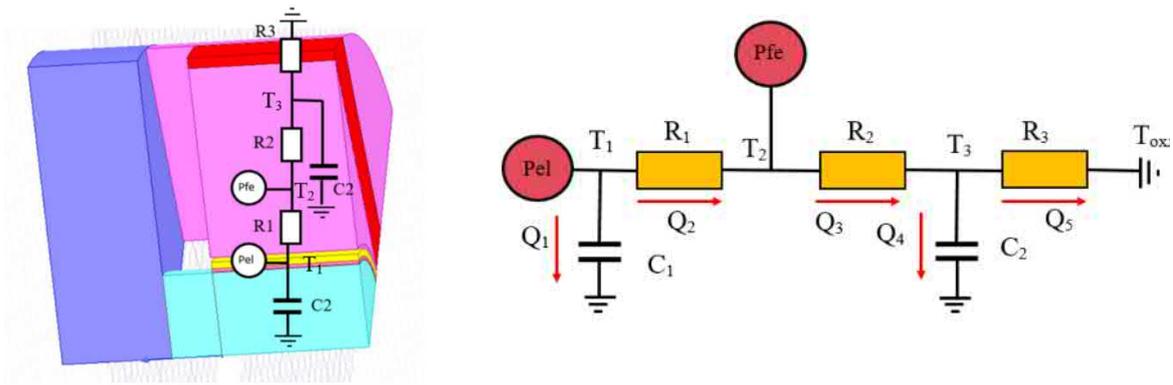


Рис.9. Эквивалентная тепловая схема замещения

Ниже представлена система дифференциальных уравнений теплового равновесия (20).

$$\left\{ \begin{array}{l} Pel = Q_1 + Q_1 \\ Pfe + Q_2 = Q_3 \\ Q_3 = Q_4 + Q_5 \\ Q_1 = C_1 \frac{dT_1(t)}{dt} \\ Q_2 = R_1(T_1(t) - T_2(t)) \\ Q_3 = R_2(T_2(t) - T_3(t)) \\ Q_4 = C_2 \frac{dT_3(t)}{dt} \\ Q_5 = R_3(T_3(t) - T_{окл}) \end{array} \right. \left[ \begin{array}{l} \frac{dT_1(t, T)}{dt} \\ \frac{dT_3(t, T)}{dt} \end{array} \right] = \left[ \begin{array}{l} \frac{Pel - R_1 T_1(t) + R_1 \frac{Pfe + R_1 T_1(t) + R_2 T_3(t)}{R_2 + R_1}}{C_1} \\ R_2 \left( \frac{Pfe + R_1 T_1(t) + R_2 T_3(t)}{R_2 + R_1} - T_3(t) \right) - R_3(T_3(t) - T_{окл}) \\ C_2 \end{array} \right]. \quad (20)$$

Данная система уравнений была решена методом Рунге-Кутты.

Динамика нагрева обмотки якоря и корпуса представлена на рис.10.

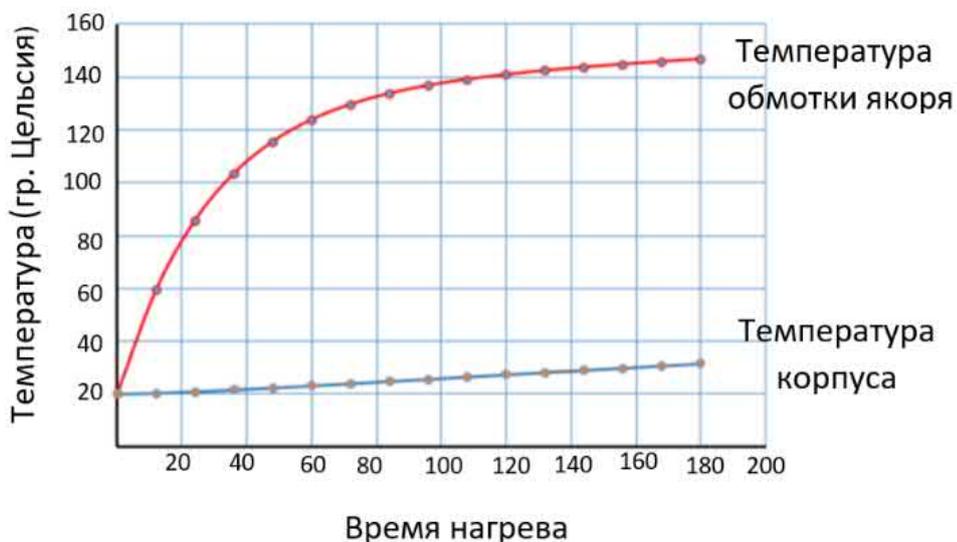


Рис.10. Динамика нагрева обмотки якоря и корпуса

Проведены аэродинамические и термодинамические расчеты. Показано, что двухконтурная система охлаждения обеспечивает эффективный отвод тепла из

внутреннего объема ЭМП. Температура якоря не превышает класса нагревостойкости изоляции F 155 °С. Постоянные магниты нагреваются до температуры 40 °С, что ниже рабочей температуры 150 °С для сплава неодим-железо-бор.

В главе приведены основные схмотехнические решения электронного блока управления (ЭБУ), который преобразует входные и выходные аналоговые и цифровые сигналы и подводит питание к ЭМП. Фрагмент принципиальной схемы ЭБУ (электрическая схема силовой части) представлен на рис.11.

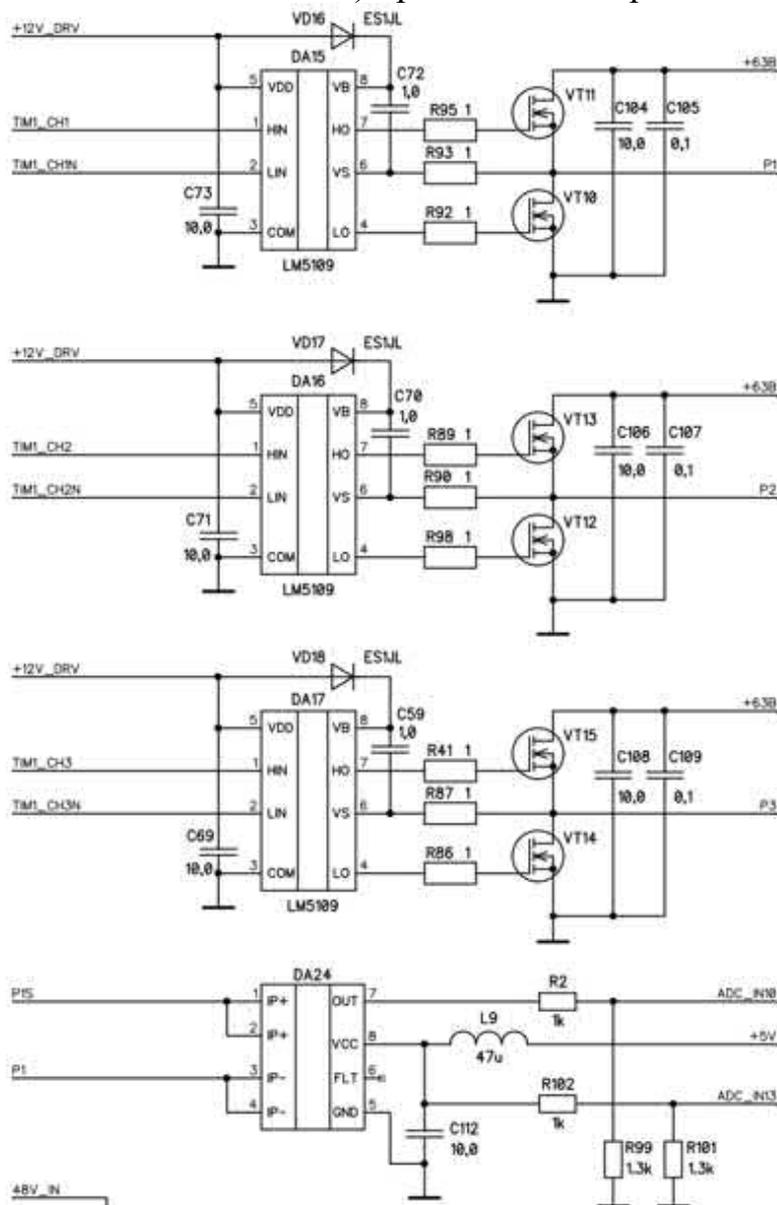


Рис. 11. Электрическая схема силовой части ЭБУ

В главе приведены результаты натурных испытаний опытного образца ЭМП (рис.12). Результаты замера индуктивности использовались для настройки коэффициентов математической модели подсистемы синтеза. Измерения индукции в воздушном зазоре подтвердили корректность предложенной математической модели на основе ограниченного количества конечных элементов. Результаты тестирования ЭМП в рабочем режиме подтвердили совпадение измеренных потерь с расчетными

потерями цифровой модели (рис.13). По индукции расхождение между расчетом и измерением не превысили 5%, по потерям 10 %.

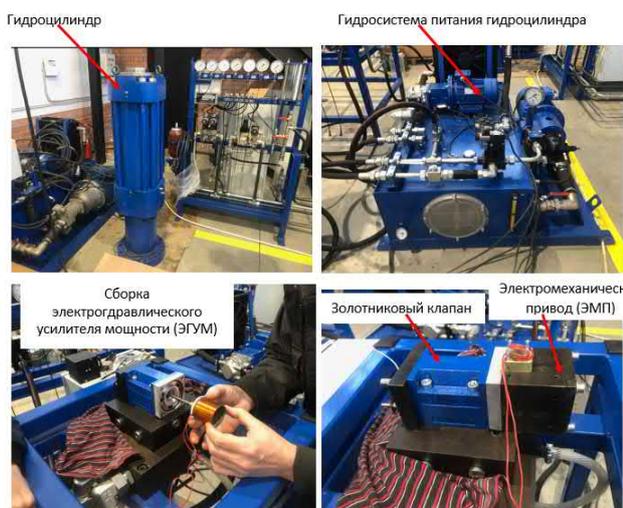


Рис.12. Фрагмент натурных испытаний

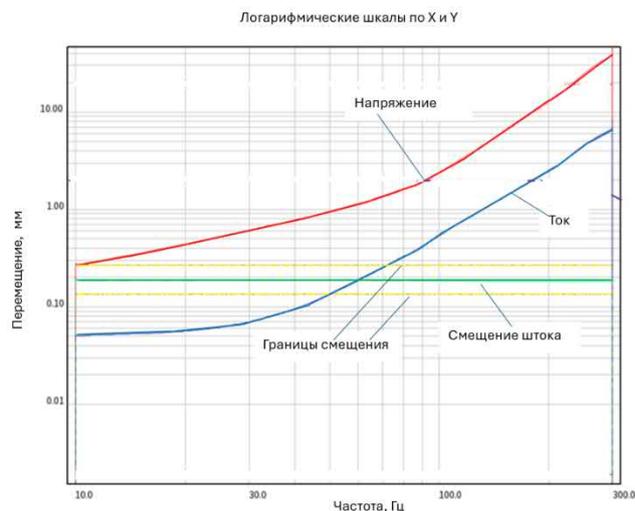


Рис.13. Зависимости тока, напряжения от частоты при задании амплитуды колебаний  $\pm 0.2$  мм

В данной главе представлена проработка перспективной базовой конструкции ЭМП.

В конструкции применены следующие инновационные решения:

- якорь с диэлектрической гильзой, позволяющий полностью исключить потери от вихревых токов в гильзе;
- радиально-тангенциальная магнитная система с изолированными частями, позволяющая уменьшить потери от вихревых токов в магнитопроводе;
- двухконтурная система охлаждения, позволяющая эффективно отводить тепло в закрытой конструкции.

Для перспективной конструкции разработан комплект КД на опытный образец. Фрагменты конструкторской проработки представлены на рис.14.

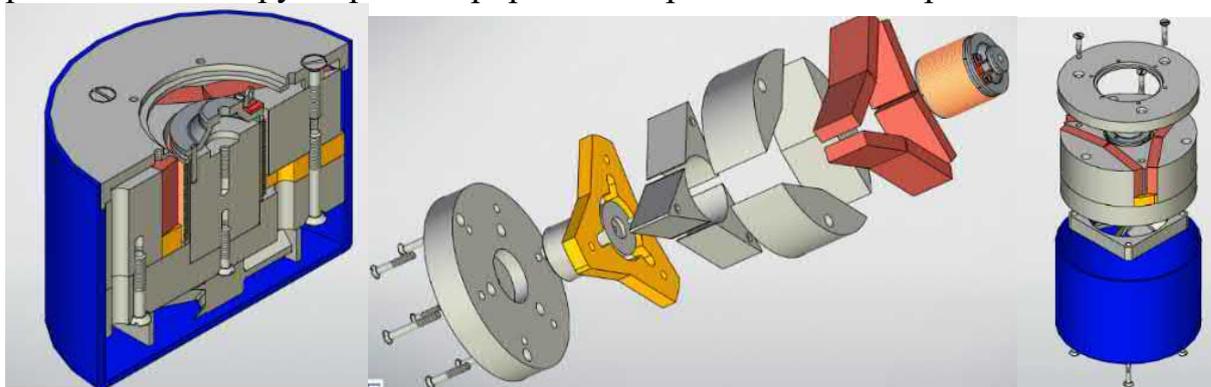


Рис.14. Фрагмент конструкторской проработки базовой модели

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По проведенным исследованиям можно сделать следующие основные выводы и рекомендации:

1. Разработаны компьютерные модели электромеханического привода гидроусилителя различных конструктивных исполнений на основе компьютерного моделирования электродинамического состояния в различных эксплуатационных режимах. Модели позволили провести анализ распределения потерь для трех вариантов конструкций и 5 вариантов исполнения якоря, на основе которого выбрана перспективная базовая конструкция ЭМП с радиально-тангенциальной магнитной системой и диамагнитным якорем. За счет уменьшения влияния вихревых токов потери в базовой конструкции по сравнению с прототипом уменьшены с 330.8 Вт до 165.0 Вт, то есть на 50 %.

2. Разработана методика расчета магнитной системы ЭМП на основе метода конечных элементов. Особенность методики заключается в том, что геометрия магнитной системы параметризована, а число конечных элементов определено заранее и при дальнейших расчетах не меняется. Данный подход позволил получить простую, но точную математическую модель расчета магнитного поля с погрешностью определения основных параметров не выше 5 %. Математическая модель расчета магнитной системы составила часть математической модели работы привода.

3. Разработана математическая модель работы привода, которая позволяет определить потребляемую мощность при достижении основной рабочей характеристики: частоте 300 Гц, соответствующей сдвигу фазочастотной характеристики на  $90^\circ$  при амплитуде управляющего сигнала 25 %. С помощью расчетов на модели можно найти усилия от вихревых токов, действующих на якорь. Модель легла в основу оптимизации геометрии ЭМП.

4. Разработана модель оптимизации геометрии ЭМП по критерию минимальной потребляемой энергии при достижении основной рабочей характеристики. Особенностью модели является разбиение общей процедуры оптимизации на уровни, на которых часть варьируемых параметров может быть зафиксирована по условиям технического задания, а часть - включается в оптимизационные циклы. Это позволило создать гибкую проектную систему, позволяющую реализовывать различные проектные ситуации. Всего сформировано 7 уровней оптимизации проектной системы.

5. На основе имитационного моделирования нагрузок для основной рабочей характеристики выполнены аэродинамические и тепловые расчеты, которые позволили оценить тепловое состояние базовой конструкции ЭМП. По результатам расчетов обоснована целесообразность применения двухконтурного охлаждения ЭМП. Двухконтурное охлаждение обеспечивает работу привода в широком диапазоне нагрузок без превышения допустимых температур для класса изоляции F (155 градусов Цельсия).

6. Проведены натурные испытания опытного образца ЭМП в составе электротехнического комплекса следящего гидропривода. Испытания подтвердили корректность разработанных математических, компьютерных и имитационных

моделей. Расхождение расчетных параметров и измеренных величин по магнитному полю не превысили 5 %, по потребляемой мощности и потерям составили 10 %.

7. Разработана трехмерная твердотельная модель на перспективную конструкцию ЭМП на основе радиально-тангенциального индуктора, якорем с диэлектрической гильзой и двухконтурной системой охлаждения. На данную конструкцию разработан альбом рабочих чертежей на опытный образец. В рамках импортозамещения перспективная конструкция по своим параметрам и характеристикам (потребляемая мощность, предельная рабочая частота, диапазон перемещения штока) может составить конкуренцию импортному аналогу фирмы Yuken.

В результате диссертационного исследования расширена научная и инженерная база по разработке электромеханических приводов электрогидравлических усилителей мощности.

### **Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки**

Проведенные научные исследования по созданию электромеханических приводов электрогидравлических усилителей мощности следящих гидроусилителей можно развивать в следующих основных направлениях:

1. Расширение частотного диапазона и амплитуды колебаний золотниковой пары на основе предложенных решений в базовой конструкции.
2. Разработка комплексных математических компьютерных и имитационных моделей, которые были бы способны решать связанные задачи электродинамики, теплодинамики и гидродинамики.
3. Улучшение системы охлаждения электромеханического привода герметичной конструкции.

### **ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

**Статьи в научных изданиях из Перечня рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК**

1. **Ганджа, Д.С.** Проектная система электромеханического привода электрогидравлического усилителя мощности / Д.С. Ганджа, Д.В. Ардашев // *Электричество*, №5 (2025):Выпуск №5,с. 74-83.
2. **Ганджа, Д.С.** Анализ влияния вихревых токов на характеристики электромеханического привода электрогидравлического усилителя мощности / Д.С. Ганджа, Д.В. Ардашев // *Вестник ПНИПУ. Серия: Электротехника, информационные технологии, системы управления*, № 56, 2025, с. 70-76.
3. **Ганджа, Д.С.** Разработка двухконтурной системы охлаждения электромеханического привода электрогидравлического усилителя мощности / Д.С. Ганджа, Д.В. Ардашев // *Электротехнические системы и комплексы*.2025, с. 68-74.
4. **Ганджа, С.А.** Анализ характеристик линейного датчика положения штока следящего гидропривода на основе цифрового моделирования электромагнитного состояния / С.А. Ганджа, А.Х.Х. Шабаа, **Д.С. Ганджа** // *Электротехнические системы и комплексы*. 2024, с. 78-84.

### **Зарегистрированные объекты интеллектуальной собственности**

5. Патент на полезную модель № 234042 Российская Федерация МПК F15B 13/044 (2006.01). Магнитная система с постоянными магнитами для линейного

двигателя. № 2025103909: заявл. 21.02.05: опубл. 16.05.2025/ **Ганджа Д.С.**, Ардашев Д.В., Суворов К.В.; заявитель ФГАОУ ВО "ЮУрГУ (НИУ)". -11.с. ил.

6. Патент на полезную модель № 234391 Российская Федерация МПК F15B 13/044 (2006.01) H02K 9/00 (2006.01). Система охлаждения для электромеханического преобразователя электрогидравлического усилителя мощности. № 2025103934: заявл. 21.02.05: опубл. 28.05.2025/ **Ганджа Д.С.**, Ардашев Д.В., Суворов К.В.; заявитель ФГАОУ ВО "ЮУрГУ (НИУ)". -14.с. ил.

7. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2025615023 Российская Федерация. Программный код расчета магнитной системы по методу конечных элементов в программной среде Delphi. № 2025613108: регистрация 21.02.2025: опубл. 28.02.2025/ Ардашев Д.В., **Ганджа Д.С.** – заявитель ФГАОУ ВО "ЮУрГУ (НИУ)"; 9 с.

8. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2025615496 Российская Федерация. Программный код расчета динамического режима электромеханического привода в программной среде Delphi. № 2025613087: регистрация 21.02.2025: опубл. 05.03.2025/ Ардашев Д.В., **Ганджа Д.С.** – заявитель ФГАОУ ВО "ЮУрГУ (НИУ)"; 2 с.

9. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2023613204 Российская Федерация. Программа синтеза оптимальных конструкций вентильных электрических машин комбинированного возбуждения. №2023612149: регистрация 09.02.2023: опубл. 13.02.2023/ **Ганджа Д.С.**, Чуйдук И.А. – заявитель ФГАОУ ВО "ЮУрГУ (НИУ)". 9 с.

#### **Другие значимые публикации**

10. **Ганджа, С.А.** Анализ электромагнитных процессов в магнитогидродинамическом насосе трансформатного типа для транспортировки жидких металлов / С.А. **Ганджа**, Я.С. Ульман, **Д.С. Ганджа** // *Электричество*, №10. 2024, с.57-66.

11. **Ганджа, С.А.** Разработка математической модели вентильного электродвигателя постоянного тока для оптимизации его геометрии на основе метода конечных элементов / С.А. **Ганджа**, С. Д. М. Джанабат, **Д.С. Ганджа**.// *Вестник ПНИПУ. Серия: Электротехника, информационные технологии, системы управления*.2024,с.57-81.

12. Gandzha, S. Brushless Electric Machines with Axial Magnetic Flux: Analysis and Synthesis / S. Gandzha, D. **Gandzha** //Intechopen. Published: February 14th 2021. DOI: 10.5772/intechopen.95945.

13. Gandzha, S.A. Digital Simulation of a Magnetohydrodynamic Pump for Mixing Aluminium Melt during Recycling / S.A. Gandzha, I.S. Ulman, **D.S. Gandzha** //Proceedings - 2024 International Ural Conference on Electrical Power Engineering, UralCon 2024, 2024, pp. 437–442, DOI: 10.1109/UralCon62137.2024.10718986.

14. Gandzha, S.A. Development of a Mathematical Model of a Brushless Direct Current Motor Based on the Finit Element Method to Optimize Motor's Geometry / S.A. Gandzha, S.D.M. Janabat, , D.S. **Gandzha**// *Proceedings - 2024 International Ural Conference on Electrical Power Engineering, UralCon 2024, 2024, pp. 424–431, DOI: 10.1109/UralCon62137.2024.10718888.*

15. Gandzha, S.A. Analysis of the Characteristics of a Linear Rod Position Sensor of a Tracking Hydraulic Drive Based on Digital Modeling of the Electromagnetic State / S.A. Gandzha, A.H.H. Shabaa, **D.S. Gandzha** // Proceedings - 2024 International Ural Conference on Electrical Power Engineering, UralCon 2024, 2024, pp. 432–436, ISSN: 2311-8318, DOI: 10.18503/2311-8318.

В статье [1] автору принадлежит разработка структуры подсистемы анализа и синтеза проектной системы, в [2] разработка цифровой модели расчета вихревых токов, в [3] обоснование применения двухконтурной системы охлаждения, в [4] описание цифровой модели линейного датчика перемещения.

Автореферат отпечатан с разрешения диссертационного совета 24.2.377.06 ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» (протокол №\_4\_ от 05.02.2026)

Подписано в печать                      Формат 60×84/16. Тираж 80 экз. Заказ

Отпечатано в типографии Издательского центра ЮУрГУ.

454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 76.