

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)»
ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)»



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

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель –
доктор технических наук,
доцент
Ардашев Д.В.

Челябинск – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТЕРЬ В ОСНОВНЫХ ЧАСТЯХ	
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРИВОДА ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ	
КОНСТРУКТИВНЫХ ИСПОЛНЕНИЙ ИНДУКТОРА.....17	
1.1. Анализ потерь для различных вариантов исполнения якоря и индуктора	
конструкции 1.....	20
1.2. Анализ потерь для различных вариантов исполнения якоря и индуктора	
конструкции 2.....	27
1.3. Анализ потерь для различных вариантов исполнения якоря и индуктора	
конструкции 3.....	30
1.4. Сравнение конструкции 1, конструкции 2 и конструкции 3 по уровню	
выделяемых потерь.....	34
2. РАЗРАБОТКА ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ	
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРИВОДА СЛЕДЯЩЕГО ГИДРОУСИЛИТЕЛЯ.37	
2.1. Определение индукции в рабочем воздушном зазоре для математической	
модели расчета ЭМП.....	37
2.2. Математическая модель динамического режима ЭМП.....	42
2.3. Алгоритм вычислений параметров ЭМП.....	45
3. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭМП	
НА ОСНОВЕ МНОГОУРОВНЕВОЙ ОДНОКРИТЕРИАЛЬНОЙ	
ОПТИМИЗАЦИИ.....	49
3.1. Формализация математической модели для оптимизации ЭМП	49
3.1.1. Константы математической модели.....	50
3.1.2. Ограничения.....	51
3.1.3. Независимые переменные.....	52
3.1.4. Выходной критерий оптимизации.....	52
3.2. Постановка задачи оптимизации для ЭМП.....	53
3.2.1. Полная оптимизация.....	54
3.2.2. Частичная оптимизация при фиксированном диаметре центра.....	55

3.2.3. Частичная оптимизация при фиксированной активной длине.....	55
3.2.4. Частичная оптимизация при фиксированной высоте обмотки якоря.....	55
3.2.5. Частичная оптимизация при фиксированной высоте постоянного магнита.....	56
3.2.6. Частичная оптимизация при фиксированном диаметре центра и высоте обмотки якоря.....	56
3.2.7. Частичная оптимизация при фиксированном диаметре центра и высоте постоянного магнита.....	56
3.2.8. Проверочный расчет.....	57
3.3. Выбор метода оптимизации.....	57
3.4. Разработка проектной системы ЭМП.....	58
4. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ. РЕЗУЛЬТАТЫ ЛАБОРАТОРНЫХ ИСПЫТАНИЙ. РАЗРАБОТКА ПЕРСПЕКТИВНОЙ БАЗОВОЙ КОНСТРУКЦИИ.....	64
4.1. Вентиляционный расчет двухконтурной системы охлаждения.....	65
4.2. Термодинамический расчет двухконтурной системы охлаждения.....	69
4.3. Формирование электронного блока управления для ЭМП.....	73
4.4. Результаты натурных испытаний опытного образца комплекса ЭМП и ЭБУ.....	94
4.4.1. Определение активного сопротивления и индуктивности.....	94
4.4.2. Исследование индукции в рабочем зазоре.....	95
4.4.3. Испытание ЭМП в динамическом режиме под нагрузкой в составе ЭГУМ.....	96
4.5. Разработка перспективной конструкции ЭМП.....	98
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	107
Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки.....	109
ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ.....	110
СПИСОК ТЕРМИНОВ.....	111
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	115

ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Распределение потерь в частях ЭМП конструкции 2 для различных исполнений якоря.....	128
ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Распределение потерь в частях ЭМП конструкции 3 для различных исполнений якоря.....	131
ПРИЛОЖЕНИЕ 3. Программный код расчета магнитной системы по методу конечных элементов в программной среде Delphi.....	133
ПРИЛОЖЕНИЕ 4. Программный код расчета динамического режима ЭМП в программной среде Delphi.....	142
ПРИЛОЖЕНИЕ 5. Спецификация и сборочный чертеж конструкции ЭМП с радиально-тангенциальной системой и диамагнитным якорем	144
ПРИЛОЖЕНИЕ 6. Оценка динамических параметров ЭМП.....	146
ПРИЛОЖЕНИЕ 7. Акт использования результатов диссертационной работы	150

ВВЕДЕНИЕ

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 усложняется для изделий больших габаритов и массы: 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 встал 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. При анализе информационного фонда следует иметь в виду, что ЭМП – это устройство, которое включает в себя комплексные исследования по гидродинамике и электромагнитодинамике.

Ученые Московского авиационного института (национально исследовательского университета) Гамынин Н. С., Карев В. И., Баженов А. И. Селиванов, А. М. развили теорию гидравлических приводов летательных аппаратов [4,11,12].

В Московском энергетическом институте (национальном исследовательском университете) Шейкин М.О., Шилин С.Н., Феденков В.В. занимались дискретными пневмоклапанами в составе позиционных и следящих пневмоприводов [63].

Ученые Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Ломакин В.О., Шумилов И.С., Щербачев П.В. Петров А.И. создали научные заделы по математическому моделированию электрогидравлических следящих приводов [38-41].

В Пермском национальном исследовательском политехническом университете Кавалеров Б.В., Килин Г.А., Судаков А.И., Чабанов Е.А., Чирков Д.А. получили научные результаты по анализу режимов работы линейного электродвигателя [48].

Ученые Ивановского государственного энергетического университета имени В.И. Ленина Казаков Ю.Б., Морозов Н.А., Океанский А.П., Шумилов Е.А. опубликовали ряд работ по анализу электромагнитного состояния электромеханических устройств с учетом рекуперации энергии в сеть [31, 87].

В Самарском государственном техническом университете ученые Зубков Ю.В., Ануфриев А.С., Макаричев Ю.А., Верещагин В.Е. изучали различные конфигурации магнитных систем для электромеханических устройств [29, 30].

Ученые Южно-Уральского государственного университета Спиридов Е. К., Форенталь В. И., Ардашев Д.В., Коробатов Д.В., Согрин А.И., Неустроев Н.И. создали ряд научных заделов по гидродинамике и моделирование блоков управления электрогидравлическим усилителем мощности [2, 59, 90].

Большие научные и практические заделы накоплены сотрудниками Уральского инжинирингового центра Бодровым В.В., Багаутдиновым Р.М., Багаутдиновым А.Р., Гойдо М.Е., Батуриным А. А., Суворовым К. В. [2, 90].

Из многочисленных зарубежных научных результатов отметим наиболее близкие и значимые к рассматриваемой проблеме.

Наньянский технологический университет, Сингапур (Nanyang Technological University, Singapore). Ученый Liang Yan опубликовал исследования по разработке системы управления электромеханическим приводом гидроусилителя [92, 94, 108, 112].

Пекинский университет Бэйхан, Китай (University Beijing, China). Ученым Shuai Wu представлены варианты различных конструктивных исполнений электромагнитного привода гидроусилителя [108].

Факультет автоматики и электротехники Пекинского университета аэронавтики и космонавтики (Faculty of Automation and Electrical Engineering of Beijing University of Aeronautics and Astronautics). Учеными Zongxia Jiao и Juntao Yu показаны преимущества магнитной сборки Халбаха для электромагнитного привода гидроусилителя [108].

Школа автоматики и электротехники Университета Бэйхан (School of Automation Science and Electrical Engineering University Beijing, China). Ученый Rui Zhang

представил цифровое моделирование ЭМП в составе следящего гидропривода [108, 109].

Федеральный институт промышленной собственности (ФИПС) 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 [94]. Основное преимущество приводов фирмы заключается в следующем:

- Yuken предлагает продукцию, которая сочетает в себе преимущества гидравлических систем, высокую эффективность и точность электроники;
- электромеханические приводы Yuken позволяют точно контролировать движения и процессы, что делает их идеальными для автоматических и полуавтоматических систем;
- в ассортименте Yuken представлена линия различных моделей и конфигураций электромеханических приводов, что позволяет выбрать оптимальный вариант для специфических приложений;
- приводы Yuken спроектированы с учетом обратной связи и интеллектуальных систем управления, что позволяет минимизировать потребление энергии и сокращать эксплуатационные расходы;
- приводы Yuken можно легко интегрировать в существующие производственные процессы и системы, что экономит время и обеспечивает минимальный объем работ по настройке.

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 тепловых 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 бурного 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 распределения 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° , 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° , 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 следящих гидроприводов. Доказано, что вихревые токи в магнитопроводе и электропроводящих частях якоря помимо выделения тепловых 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 З. 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 специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы, следующим пунктам: п.1. Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, анализ системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и

компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем, включая электромеханические, электромагнитные преобразователи энергии и электрические аппараты, системы электропривода, электроснабжения и электрооборудования; п.2. Разработка научных основ проектирования, создания и эксплуатации электротехнических комплексов, систем и их компонентов; п.3. Разработка, структурный и параметрический синтез, оптимизация электротехнических комплексов, систем и их компонентов, разработка алгоритмов эффективного управления. п.4. Исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов, систем и их компонентов в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях, диагностика электротехнических комплексов. п.5. Разработка эффективного, экологичного и безопасного полного жизненного цикла электротехнических комплексов, включающего создание, эксплуатацию и утилизацию их компонентов.

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. Основные параметры и характеристики электромеханического привода были проверены на опытных образцах в ходе натурных испытаний, которые были изготовлены по договору с Уральским инженерным центром.

Апробация работы. Основные положения результатов диссертационной работы и отдельные ее части 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 опубликована 20 научных работ, из них по теме диссертации: 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. Во введении показана актуальность выбранной темы. Представлены: 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 гидравлического усилителя мощности, определена его структурно-функциональная схема, показано место и значение электромеханического привода. В главе проведен анализ распределения потерь в частях ЭМП. Было выбрано 3 конструкции ЭМП и 5 исполнений якоря. Для всех конструкций и исполнений были разработаны компьютерные модели. в программной

среде Ansys Electronics Desktop в режиме Eddy Current, который анализирует квазистатические режимы работы электромеханических устройств. Для всех конструкций и исполнений для основной рабочей характеристики были рассчитаны потери в частях ЭМП. Распределение потерь позволило выявить влияние вихревых токов для разных конструкций и исполнений. По результатам анализа выявлена конструкция с минимальными потерями. Это ЭМП с радиально-тangenциальным индуктором и якорем с диэлектрической гильзой.

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. Методика легла в основу для динамической модели работы ЭММ. Конечным итогом расчета по модели является количество энергии, которую тратит привод на четверти хода рабочей характеристики. По данной математической модели составлен алгоритм расчета, который реализован на программном языке Delphi.

В третьей главе разработана методики 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 от полной оптимизации до поверочного расчета. 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. С помощью проектной системы определена оптимальная геометрия базового варианта

В четвертой главе предложена двухконтурная система охлаждения закрытой конструкции ЭМП. Первый контур хладагента циркулирует внутри и переносит тепло от обмотки якоря к внешней поверхности ЭМП. Второй контур осуществляет рассеивание теплового потока с наружной поверхности естественной конвекцией. Проведены аэродинамические и термодинамические расчеты. Показана эффективность двухконтурной системы охлаждения. В главе приведены основные схемотехнические решения электронного блока управления (ЭБУ), который преобразует входные и выходные аналоговые и цифровые сигналы и подводит питание к ЭМП. Приведены результаты натурных испытаний ЭМП при реальных нагрузках в системе следящего гидроусилителя. Показано соответствие расчетных параметров по разработанным моделям с измеренными величинами. Приводится конструкторская проработка перспективной базовой конструкции. Описаны основные конструкторские решения.

Заключение содержит выводы, сделанные по результатам всей работы, показано, что основные цели и задачи исследования достигнуты. Определены направления дальнейших исследований в области теории и инженерной практики.

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.

В 7 приложениях содержится дополнительный справочный материал.

1. АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТЕРЬ В ОСНОВНЫХ ЧАСТЯХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРИВОДА ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ КОНСТРУКТИВНЫХ ИСПОЛНЕНИЙ ИНДУКТОРА

Вводные замечания

Электрогидравлические усилители предназначены для управления гидравлическими исполнительными механизмами пропорционально электрическому управляющему сигналу, причем, управление это осуществляется изменением дросселирования и реверсированием направления движения потока рабочей жидкости, подаваемой на исполнительный механизм. Электрогидравлический усилитель представляет собой устройство, в котором объединены электромеханический преобразователь и гидроусилитель. В этом устройстве управляемым элементом электромеханического преобразователя служит управляющий элемент гидроусилителя. Электрогидравлический усилитель — это устройство, состоящее из электромеханического преобразователя и гидроусилителя (ГУ). ГУ по своей структуре представляет достаточно сложную систему регулирования с обратной связью по силовой нагрузке на золотник, которая характеризуется собственной полосой пропускания, частотой среза, коэффициентом усиления и качеством переходного процесса [5, 6, 10, 11].

На рис.В1. представлена структурная схема ЭГУМ

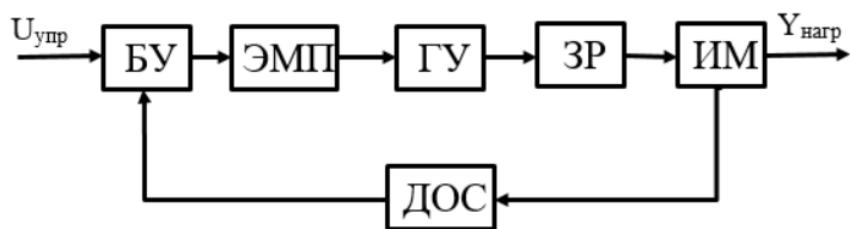


Рис.В1. Структурная схема ЭГУМ

Функциональные блоки на схеме имеют следующее обозначение:

БУ – блок управления;

ЭМП – электромеханический привод;

ГУ – предварительная ступень гидроусилителя;

ЗР – золотниковый распределитель (основная ступень усиления);

ИМ – исполнительный механизм (гидроцилиндр);

ДОС – датчик обратной связи по перемещению.

На рис.В2 представлена функциональная схема ЭГУМ [108].

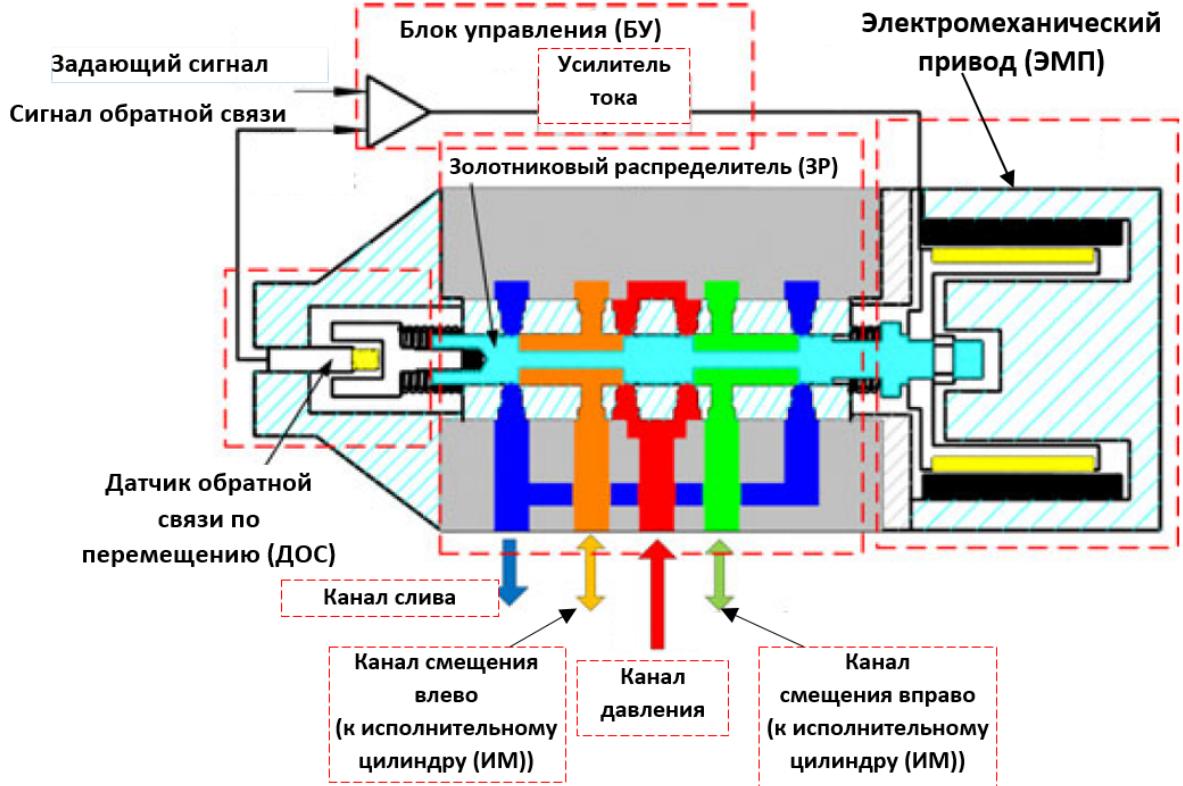


Рис.В2. Функциональная схема ЭГУМ.

По заданию блока управления (БУ) электромеханический привод (ЭМП) перемещает шток золотниковой пары в заданное положение, при этом золотниковый распределитель открывает каналы давления для исполнительного цилиндра для движения его в заданном направлении на заданную величину, которую контролирует датчик обратной связи по перемещению (ДОС).

На рис.В3 изображен вариант конструкции ЭГУМ.

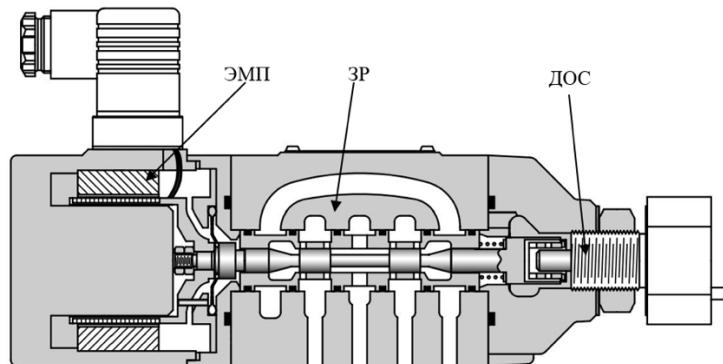


Рис. В3. Эскиз ЭГУМ

Из функциональной схемы видно, что ЭМП обеспечивает качество работы всего гидропривода. Именно ЭМП должен обеспечить перемещение штока ЗР на заданную амплитуду с требуемой частотой ЭМП,

Не смотря на простую конструкцию электромагнитные процессы, происходящие в нем достаточно сложны. ЭМП должен:

- обеспечить требуемое быстродействие следящего гидропривода;
- длительно и надежно работать без перегрева якорной обмотки и постоянных магнитов;
- иметь высокую защиту от проникновения воды и мелких твердых дисперсных частиц;
- выдерживать большое количество циклов при вибрационной нагрузке;
- быть технологичным в производстве;
- быть надежным в эксплуатации.

В качестве индустриального партнера данного проекта выступает Уральский инжиниринговый центр г. Челябинск. Он заинтересован в разработке и совершенствовании ЭГУМ конкретного мощностного ряда со следующими основными параметрами:

1. Номинальный расход рабочей жидкости, при перепаде рабочего давления на кромке ЗП 3,5 МПа, л/мин, до 2 – 20.
2. Внутренние утечки, л/мин, до – 1,7.
3. Частота, соответствующая сдвигу ФЧХ на 90°, при амплитуде управляющего сигнала 25 %, Гц, не менее – 300.
4. Гистерезис, %, до – 0,1.
5. Температура рабочей жидкости, °С, – +5...+60 вязкость рабочей жидкости, мм²/с, 10...380.
6. Класс чистоты рабочей жидкости по ГОСТ 17216-2001, не грубее – 12.

Если конкретизировать п.3 требований, то он означает, что ЭГУМ должен обеспечить перемещение штока золотниковой пары на величину +-0.2 мм при частоте 300 Гц.

Снижение потребляемой мощности и тепловых потерь является одной из

ключевых задач ЭМП, так как якорная обмотка находится в ограниченном, и при этом изолированном от внешней среды пространстве.

Проведем анализ тепловых потерь для различных вариантов исполнения.

1.1. Анализ потерь для различных вариантов исполнения якоря и индуктора конструкции 1

На первом этапе исследуем распределение потерь для ЭМП фирмы Yuken, который является прототипом и детально исследован (конструкция 1) [94,108]. Он может служить эталоном для верификации цифровой модели. Образец имеет следующие основные размеры, определяющие его параметры и характеристики (табл.1.1.1)

Таблица 1.1.1. Параметры и характеристики образца ЭМП фирмы Yuken

№ п.п.	Наименование размера	Величина
1	Диаметр якоря, мм	41.36
2	Активная длина якоря, мм	29.56
3	Толщина гильзы якоря, мм	0.6
4	Диаметр центра, мм	34.0
5	Зазор между центром и внутренним диаметром гильзы якоря, мм	0.1
6	Зазор между диаметром якоря и внутренним диаметром гильзы магнитов, мм	0.1
7	Толщина гильзы магнитов, мм	0.8
8	Высота радиальных магнитов, мм	7.8
9	Осьевая длина центра, мм	58.0
10	Осьевая длина торца индуктора, мм	11.0
11	Высота спинки индуктора, мм	5.45
12	Диаметр голого провода обм. якоря. мм	0.38
13	Число слоев намотки	4
14	Расчетное число витков	270
15	Активное сопротивление. Ом	4.7

Для моделирования электромагнитных процессов был применен программный комплекс Ansys Electronics Desktop [1, 78-82]. В гильзе якоря имеется

прорезь, величина которой влияет на распределение вихревых токов. Эта прорезь исключает осевую симметрию ЭМП, поэтому для моделирования была применена графическая среда Maxwell 3D Design. На практике обмотка якоря питается высокочастотными знакопеременными прямоугольными импульсами. Из общей теории электрических машин известно, что при разложении в ряд Фурье прямоугольного меандра первая гармоника по площади составляет более 80%, по этой причине пренебрежем влиянием гармоник другого порядка для упрощения расчета. Это позволит использовать режим Eddy Current, который проводит анализ квазистатических характеристик, изменяющихся по гармоническому закону. Этот режим точно рассчитывает влияние вихревых токов, при этом требует гораздо меньше компьютерных ресурсов, чем, например, режим Transient [78-82].

Трехмерная модель ЭМП с обозначением основных частей представлена на рис.1.1.1. Для представленного на рис.1.1.1 варианта радиальной магнитной системы проведем анализ следующих модификаций якоря:

- с прорезью и одной перемычкой (вариант 1, рис.1.1.2.а);
- с прорезью и двумя перемычками (вариант 2, рис.1.1.2.б);
- без прорези (вариант 3, рис.1.1.2.в);
- со сплошной прорезью без перемычек (вариант 4, рис.1.1.2.г);
- якорь с диэлектрической гильзой из неэлектропроводного материала (вариант 5, рис.1.1.2.д).

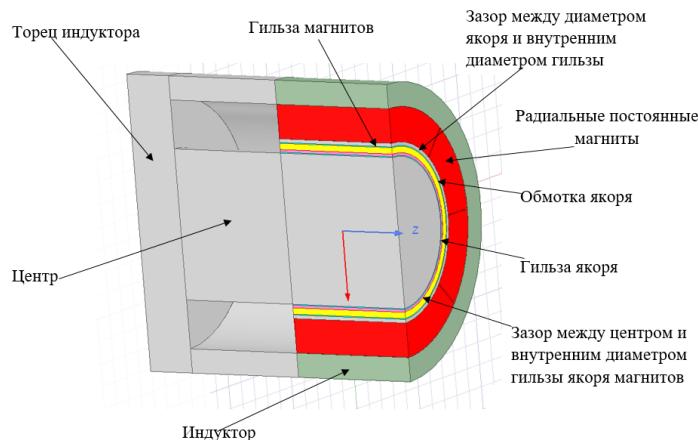


Рис.1.1.1. Трехмерная модель ЭМП (конструкция 1)

Варианты исполнения якоря представлены на рис.1.1.2.



Рис.1.1.2. Варианты исполнения якорей

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 вариантов исполнения якоря 1-4 в качестве материала был выбран алюминий, для варианта 5 – пластик.

По результатам лабораторных исследований прототипа действующее значение тока составило 4.9 А. Обмотка подключалась к источнику синусоидального напряжения 300 Гц. В модели был включен режим расчета вихревых токов всех электропроводящих частях ЭМП. Электрические потери от тока якоря и вихревых токов определялись в следующих элементах: обмотке якоря, гильзе якоря, гильзе магнитов, в постоянных магнитах, центре, индукторе.

Результаты расчёта магнитного поля для варианта 1 представлены на рис.1.1.3.

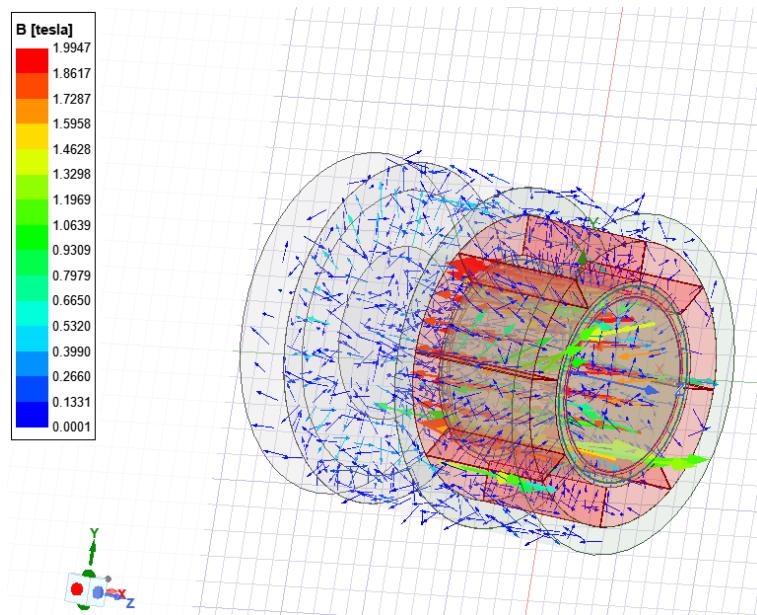


Рис.1.1.3. Результаты расчета магнитного поля ЭМП (конструкция 1, вариант 1)

Расчеты распределения потерь в частях ЭМП сведены в табл.1.1.2.

Таблица 1.1.2. Распределение потерь в частях ЭМП (вариант 1, одна перемычка)

№ п.п.	Наименование частей ЭМП	Величина потерь, Вт
1	Обмотка якоря	83.52
2	Гильза якоря	192.24
3	Гильза магнитов	15.59
4	Центр	29.84
5	Индуктор	2.70
6	Постоянные магниты	6.879
7	Общие потери	330.764
8	Демпферные потери	55.004

Следует отметить, что потери, которые не связаны с объемом подвижных частей (обмотка якоря и гильза якоря) помимо выделения тепловых потерь создают усилие, тормозящее якорь, которое надо преодолевать.

Вихревые токи создают свое магнитное поле. Это поле направлено встречно полю индуктора и приводит к его ослаблению.

Таким образом, вихревые токи оказывают комплексное отрицательное воздействие: вызывают ослабление поля возбуждения, создают тормозное усилие, вызывают дополнительный нагрев.

Эти потери собраны в отдельные, так называемые демпферные потери.

В последующих таблицах 1.1.3-1.1.6 приведены результаты цифрового тестирования вариантов 2-5.

Анализ приведенных зависимостей позволяет сделать следующие выводы. Вихревые токи оказывают существенное влияние на работу ЭМП. Они вызывают нагрев частей привода и создают тормозные силы, препятствующие линейному движению якоря. Это уменьшает быстродействие привода. Для преодоления

демпферных сил необходимо увеличивать ток, что в свою очередь снова приводит к увеличению тепловых потерь от тока в квадрате.

Таблица 1.1.3. Распределение потерь в частях ЭМП (вариант 2, две перемычки)

№ п.п.	Наименование частей ЭМП	Величина потерь, Вт
1	Обмотка якоря	83.55
2	Гильза якоря	190.33
3	Гильза магнитов	8.77
4	Центр	13.61
5	Индуктор	1.27
6	Постоянные магниты	3.51
7	Общие потери	301.04
8	Демпферные потери	27.164

Таблица 1.1.4. Распределение потерь в частях ЭМП (вариант 3, без прорези)

№ п.п.	Наименование частей ЭМП	Величина потерь, Вт
1	Обмотка якоря	83.76
2	Гильза якоря	163.04
3	Гильза магнитов	5.0
4	Центр	6.53
5	Индуктор	0.87
6	Постоянные магниты	1.98
7	Общие потери	261.17
8	Демпферные потери	14.37

Таблица 1.1.5. Распределение потерь в частях ЭМП (вариант 4, полный разрез без перемычек)

№ п.п.	Наименование частей ЭМП	Величина потерь, Вт
1	Обмотка якоря	83.31
2	Гильза якоря	45.48
3	Гильза магнитов	36.3
4	Центр	94.15
5	Индуктор	6.89
6	Постоянные магниты	20.47
7	Общие потери	286.6
8	Демпферные потери	157.81

Таблица 1.1.6. Распределение потерь в частях ЭМП (вариант 5, якорь с диэлектрической гильзой)

№ п.п.	Наименование частей ЭМП	Величина потерь, Вт
1	Обмотка якоря	83.26
2	Гильза якоря	0
3	Гильза магнитов	50.91
4	Центр	122.07
5	Индуктор	15.86
6	Постоянные магниты	0
7	Общие потери	272.01
8	Демпферные потери	188.75

На диаграмме рис.1.1.4 представлены суммарные потери для всех вариантов исполнения якоря.

На диаграмме 1.1.5 показано распределение потерь по частям ЭМП.

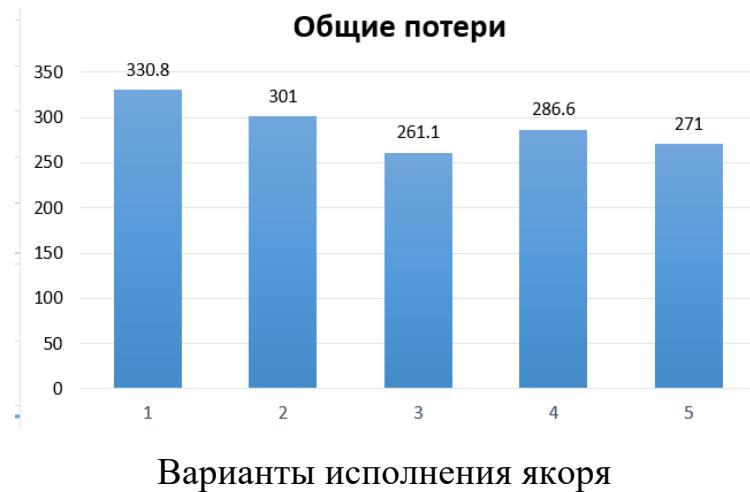


Рис.1.1.4. Диаграмма общих потерь для 5 вариантов исполнения якоря конструкции 1

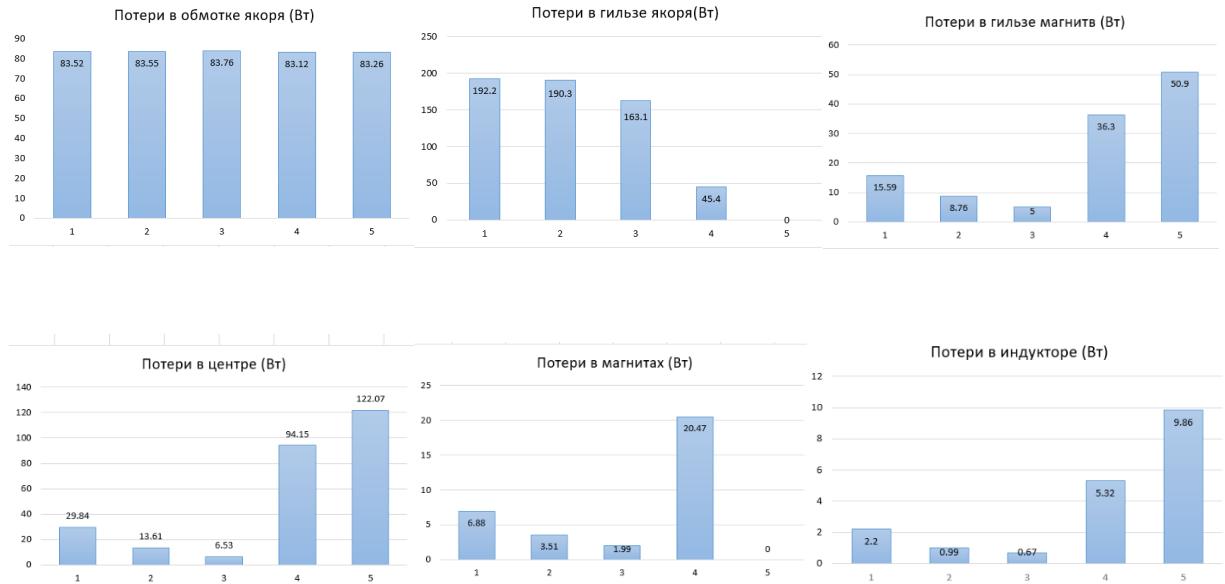


Рис.1.1.5. Диаграмма потерь в частях ЭМП для 5 вариантов исполнения якоря конструкции 1

Конструкция ЭМП очень близка к конструкции однофазного трансформатора с высокой частотой питания первичной обмотки. В качестве витков вторичных обмоток служат все токопроводящие контуры магнитной системы: гильза якоря, гильза постоянных магнитов, обойма постоянных магнитов, центр, корпус индуктора, торец индуктора.

Разрез в алюминиевой гильзе якоря влияет на величину вихревых токов этого токопроводящего контура. Наличие одной или двух перемычек при этом мало влияет на вихревые токи, так как замкнутые контуры в гильзе остаются. Если гильзу полностью разрезать в осевом направлении, то потери уменьшаются в

несколько раз. Сделать это технологически сложно, но возможно. Однако это не дает существенного преимущества в уменьшении общих потерь. Начинают увеличиваться потери в других элементах конструкции, которые представляют собой токопроводящие контуры. В основном это центр и корпус индуктора. В конструкции 1 избавиться от этих контуров практически невозможно. Применение якоря с диэлектрической гильзой, который не имеет электрических потерь подтверждает этот вывод. Для варианта 5 резко возрастают потери в центре, гильзе магнитов. При этом общие потери снижаются, но не существенно.

Для всех рассмотренных 5 вариантов исполнения якоря общие потери находятся в пределах 330-270 Вт. Вариант якоря с диэлектрической гильзой имеет преимущество перед другими вариантами по потерям, но он вызывает дополнительный нагрев магнитов и демпферные усилия на якорь.

1.2. Анализ потерь для различных вариантов исполнения якоря и индуктора конструкции 2.

Для увеличения быстродействия ЭМП необходимо уменьшить электромагнитную постоянную времени, которая представляет собой отношение индуктивности обмотки якоря к ее активному сопротивлению. Индуктивность обмотки в значительной степени зависит от наличия вокруг нее ферромагнетиков с большой магнитной проницаемостью. При этом известно, что магнитная проницаемость высококоэрцитивных постоянных магнитов близка в магнитной проницаемости воздуха. По этой причине имеет смысл рассмотреть радиальную магнитную систему, в которой магниты образуют наружную и внутреннюю обоймы, а якорная обмотка располагается между ними. Таким образом обмотка якоря будет окружена средой близкой по магнитной проницаемости воздуху. Трехмерная модель этой магнитной системы показана на рис. 1.2.1.

Проведем анализ распределения потерь для этой конструкции. Для сравнения в равных условиях выберем геометрические размеры для модели такими, чтобы размер якоря был одинаковым с конструкцией 1. Высоту магнитов первой и второй обойм возьмем равной половине высоты магнита конструкции 1. Для якоря

выберем аналогичные 5 вариантов конструкции: с прорезью и одной перемычкой, с прорезью и двумя перемычками, без прорези, со сплошной прорезью, с диэлектрической гильзой. Электрические потери от тока якоря и вихревых токов определялись в следующих элементах: обмотке якоря, гильзе якоря, гильзе магнитов, в постоянных магнитах первой обоймы, в постоянных магнитах второй обоймы, центре, индукторе.

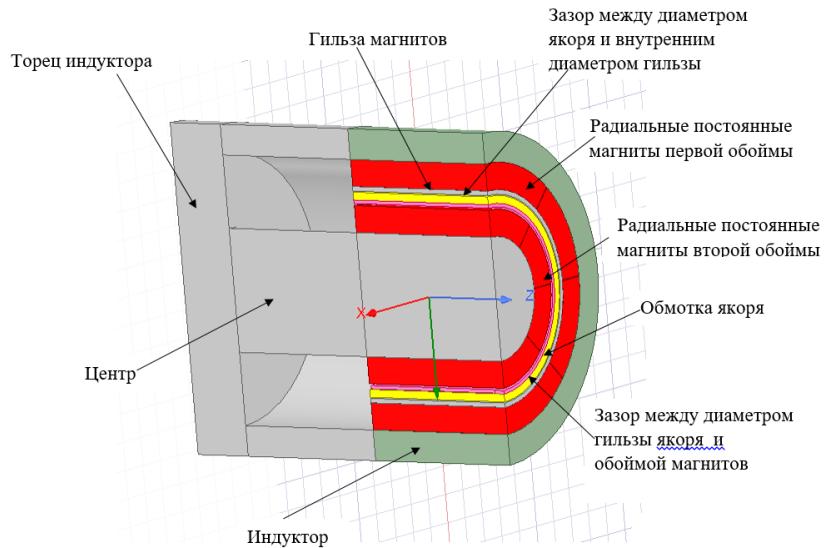


Рис.1.2.1. Трехмерная модель ЭМП конструкции 2

Результаты расчета магнитного поля конструкции 2 варианта 1 представлены на рис.1.2.2.

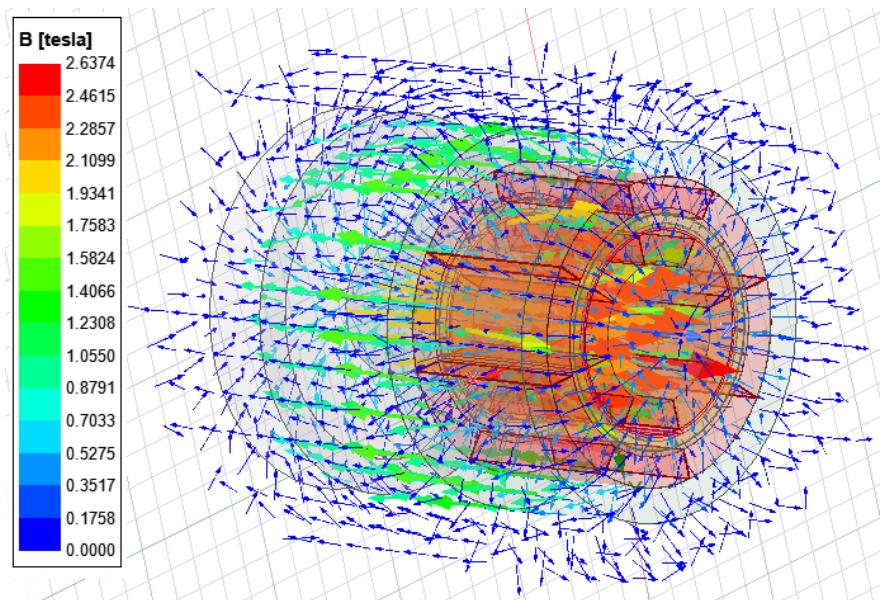


Рис.1.2.2. Результаты расчета магнитного поля ЭМП (конструкция 2, вариант 1)

Таблицы с результатами распределения потерь этого варианта представлены в

Приложении 1. Покажем диаграммы расчета этого варианта



Рис.1.2.3. Диаграмма общих потерь для 5 вариантов исполнения якоря конструкции 2

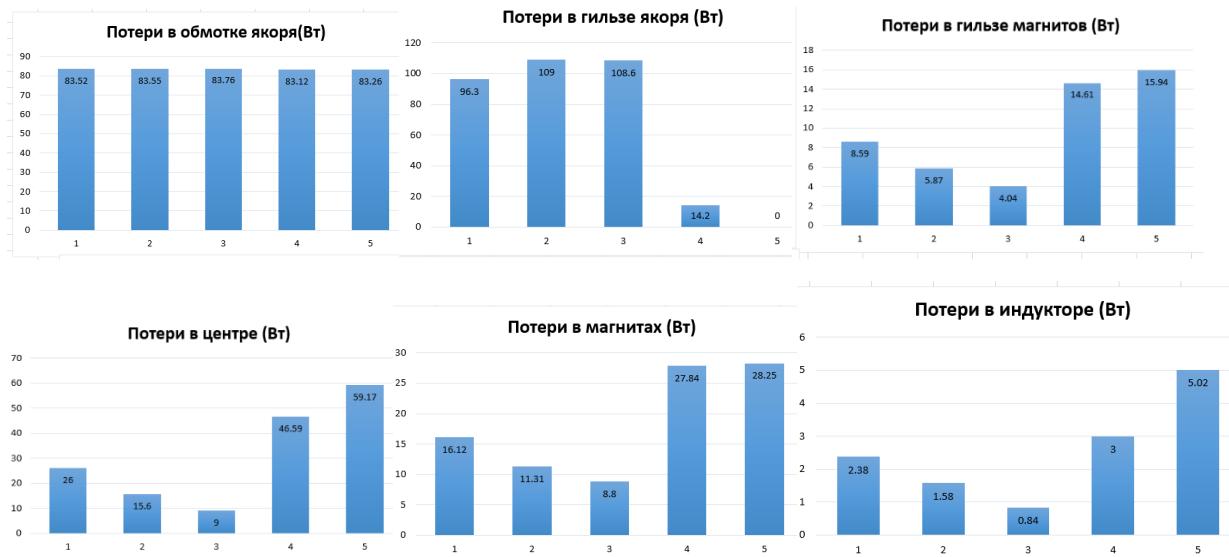


Рис.1.2.4. Диаграмма потерь в частях ЭМП для 5 вариантов исполнения якоря конструкции 2

Анализ полученных расчетов для конструкции подтверждает общую тенденцию влияния вихревых токов на распределение потерь. Размещение в якоре с алюминиевой гильзой прорези с перемычками несколько снижает потери в самом якоре, но увеличивает потери в других токопроводящих контурах. К такому же эффекту приводит применение якоря с диэлектрической гильзой. При этом общие

потери остаются примерно на одинаковом уровне. Следует отметить, что уровень общих потерь для конструкции 2 всех вариантов стал ниже по сравнению с конструкцией 1 и составил 191- 233 Вт. Это можно объяснить тем, что электрическое сопротивление токопроводящих контуров для конструкции 2 несколько возросло за счет применения двух обойм постоянных магнитов. В общем, конструкция 2 может быть рекомендована, как более предпочтительная по сравнению с конструкцией 1. При этом следует учесть усложнение технологии изготовления этой конструкции. Еще одним отрицательным фактором для конструкции 2 является то, что при одинаковых размерах якоря диаметр центра уменьшается за счет второй обоймы магнитов. Это может привести к перенасыщению центра, уменьшению индукции в рабочем воздушном зазоре и, как следствие, снижение быстродействия при перемещении якоря на больших частотах.

1.3. Анализ потерь для различных вариантов исполнения якоря и индуктора конструкции 3

Усилие, действующее на якорь, находящегося в магнитном поле индуктора, по закону Ампера определяется векторным произведением тока и магнитного потока. Увеличивать магнитный поток для ЭМП очень выгодно, так как при этом не увеличивается потребление электроэнергии из питающего источника, и уменьшается ток якоря для заданного усилия. Уменьшения тока якоря приводит к снижению суммарных потерь и уменьшению нагрева. По этой причине имеет смысл рассмотреть магнитные системы, которые за счет концентраторов могут создать значительные потоки в воздушном зазоре. Такой магнитной системой может служить радиально-тангенциальное расположение магнитов. В радиально-тангенциальной магнитной системе направление намагниченности постоянных магнитов направлен под углом к радиусу цилиндра якоря. Это отличает данную магнитную систему от радиальной магнитной системы и тангенциальной магнитной системы.

Трехмерная модель ЭМП с этой магнитной системой представлена на рис.1.3.1.

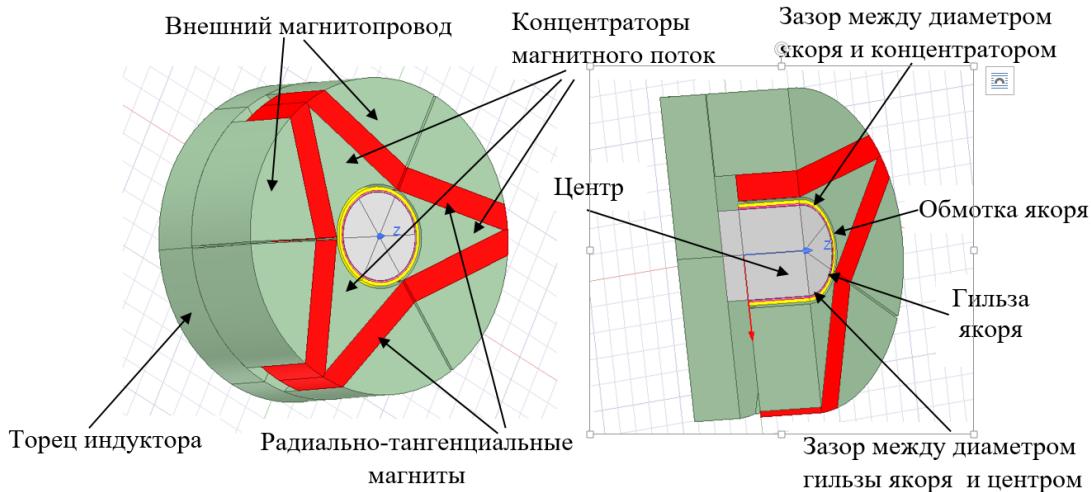


Рис.1.3.1. Трехмерная модель ЭМП конструкции 3

Концентраторы магнитного потока могут создать индукцию в рабочем воздушном зазоре, которая ограничивается только насыщением всей магнитной цепи. Если внешние габариты существенных ограничений не имеют, то величина этой индукции может быть достаточно высокой за счет увеличения размеров концентратора, что приведет к снижению потребляемого тока и общих потерь.

Проведем анализ распределения потерь для этой конструкции. Для корректности сравнения данной конструкции с конструкциями 1 и 2 примем размеры якоря одинаковыми для всех вариантов.

Результаты расчета магнитного поля для части полюсного деления представлены на рис.1.3.2.

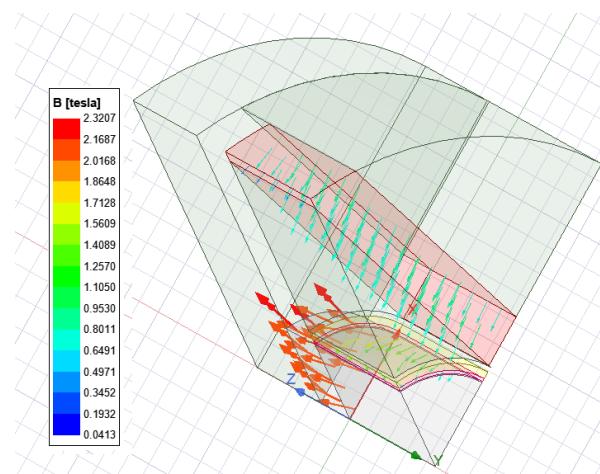


Рис.1.3.2. Результаты расчета магнитного поля конструкции 3

По аналогии с предыдущими вариантами проведем расчеты для 5-ти исполнений якоря, включая различные виды разрезов и якорь с диэлектрической гильзой.

Результаты расчета в табличной форме представлены в Приложении 2.

Покажем результаты расчета в виде диаграмм. Результаты расчета общих потерь представлены на рис.1.3.3.

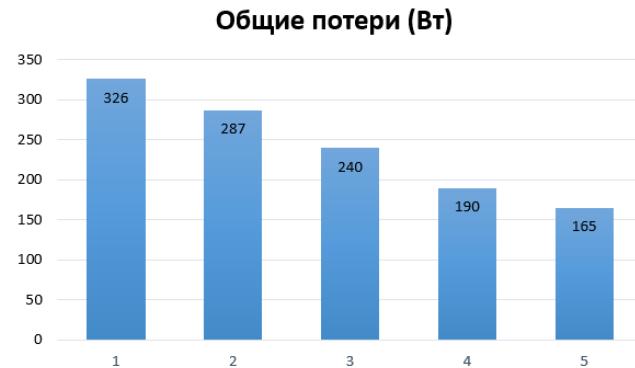


Рис.1.3.3. Результаты расчета общих потерь для 5 вариантов конструкции 3

На рис.1.3.4. показано распределение потерь в частях ЭМП для различных вариантов исполнения якоря.

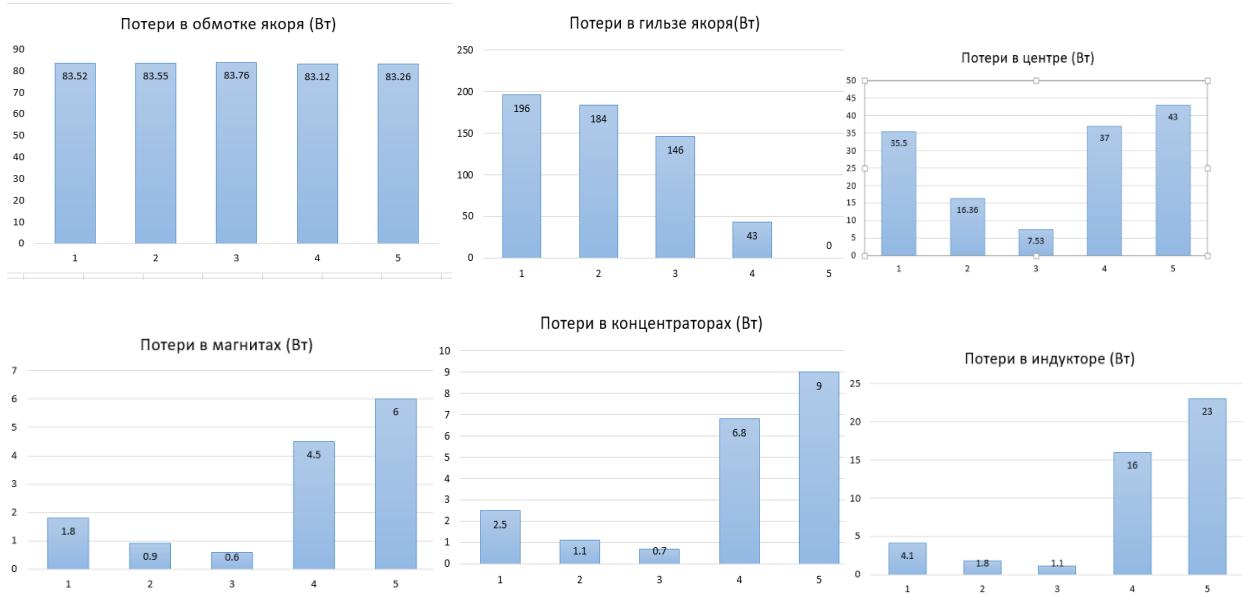


Рис.1.3.4. Распределение потерь в частях ЭМП для различных вариантов исполнения якоря конструкции 3

Анализ полученных зависимостей показывает общую тенденцию влияния вихревых токов на общие потери. При увеличении разреза и применении якоря с диэлектрической гильзой потери уменьшаются. Для конструкции с радиально-

тангенциальными магнитами циркуляция вихревых токов в индукторе еще более затруднена из-за того, что индуктор собирается из отдельных частей. Общие потери для вариантов 4 (с полным разрезом) и 5 (якорем с диэлектрической гильзой) меньше потерь в конструкция 2 (с прорезью и двумя перемычками) и конструкции 3 (без прорези).

Следует отметить, что для конструкции 3 не представляет никакой технологической сложности электрически изолировать все сборочные единицы друг от друга. Это можно выполнить оксидированием или покраской этих частей. Для гильзы якоря можно выбрать подходящий диэлектрический материал. Такая конструкция позволяет существенно уменьшить уровень вихревых токов. В системе практически останутся только электрические потери в обмотке якоря. Это позволит не только уменьшить перегрев привода, но и повысить его быстродействие за счет уменьшения тормозящих демпферных усилий.

Результаты распределения потерь в частях ЭМП с электрически изолированными частями магнитопровода представлены на диаграмме рис.1.3.5.

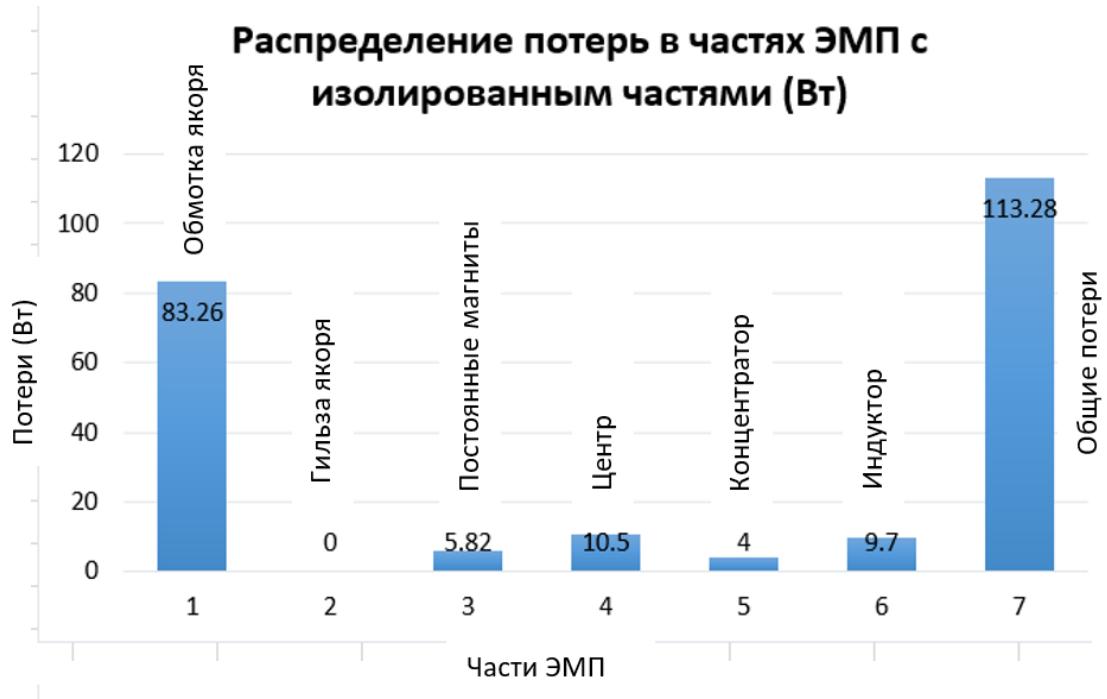


Рис.1.3.5. Результаты распределения потерь в частях ЭМП с электрически изолированными частями магнитопровода

Из приведенной диаграммы видно, что в приводе ЭМП для такой конструкции существенными остались только потери в меди обмотки якоря. Следует отметить,

что эти потери мало зависят от частоты, поэтому при эксплуатации привода на более высоких частотах уровень общих потерь существенно не повысится.

Проведем сравнительный анализ рассмотренных конструкций, выберем базовый вариант для рекомендации в серийное производство.

1.4. Сравнение конструкции 1, конструкции 2 и конструкции 3 по уровню выделяемых потерь

Распределение потерь внутри частей ЭМП имеют важное теоретическое значение, но для практики это малозначимо, так как для эксплуатации и разработки системы охлаждения существенны общие потери. Диаграммы общих потерь для всех конструкций представлены на рис.1.4.1.

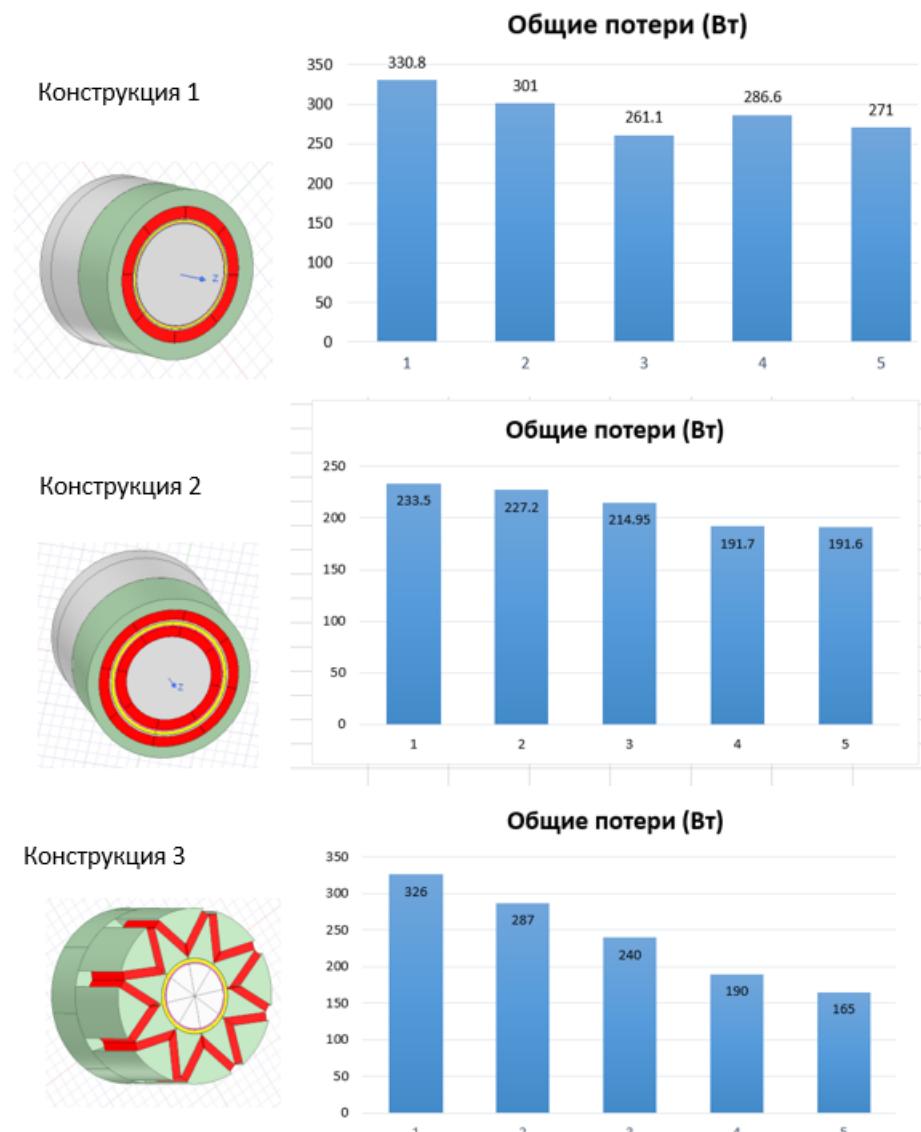


Рис.1.4.1. Диаграммы общих потерь для конструкции 1, конструкции 2 и конструкции 3

Предварительно следует отметить, что вариант со сплошной осевой прорезью без перемычек (вариант 4) представляет собой чисто теоретический интерес для изучения влияния величины вихревых токов. На практике такую конструкцию, которая бы надежно работала на больших вибрационных частотах, изготовить очень сложно. Остается замкнутый контур с торца якоря, к которому крепиться шток золотника. Несмотря на то, что для всех конструкций этот вариант показал хорошие результаты, исключим его из сравнительного анализа.

Сравнительный анализ диаграмм показывает, что для варианта с одной прорезью, который имеет прототип, потери конструкции 1 и конструкции 3 приблизительно одинаковые. Преимущество имеет конструкция 2 примерно на 100 Вт. Эта же конструкция показала преимущество и для варианта якоря без прорези (вариант 3). Следует отметить, что с точки зрения технологии эту конструкцию изготовить сложнее из-за наличия большого количества магнитов, вставленных в 2 обоймы. Если преодолеть технологические сложности, эту конструкцию можно рекомендовать для производства, причем для гильзы без прорези.

Наилучшие результаты для всех конструкций показал якорь с диэлектрической гильзой. Не смотря на перераспределение потерь в короткозамкнутых контурах магнитной системы, общие потери для всех конструкций получились меньше, чем у вариантов с якорем с алюминиевой гильзой. При этом конструкция 3 показала наименьшие потери. Теоретически это объясняется тем фактором, что в этой конструкции магнитная система собирается из отдельных частей, что приводит к увеличению сопротивления для контуров вихревых токов. Конструкция с электрически изолированными частями магнитопровода показала наименьшие потери, которые концентрируются в меди обмотки якоря.

Конструкцию 3 с электрически изолированными частями магнитопровода и якорем с диэлектрической гильзой следует рекомендовать в качестве базовой для внедрения в производство. Эта конструкция потребует меньшего токопотребления для заданной частоты и амплитуды перемещения штока золотниковой пары и будет иметь минимальный перегрев.

Выводы по главе

1. Вихревые токи в элементах конструкции ЭМП оказывают существенное влияние на распределение потерь и динамические характеристики. Для их анализа разработаны компьютерные модели в программной среде Ansys Electronics Desktop для трех конструкций, которые отличаются конфигурацией магнитной системы. Анализ проведен для 4-х исполнений якоря с различными прорезями и для якоря с диэлектрической гильзой в рабочем режиме питания обмотки якоря 300 Гц 4.9 А.

2. Анализ общих потерь и потерь в элементах конструкции показал, что вихревые токи перераспределяются в элементах конструкции для различных вариантов исполнения якоря. Перераспределение происходит по электрически замкнутым контурам магнитопровода. Режим работы ЭМП близок к режиму работы однофазного высокочастотного трансформатора с короткозамкнутыми витками во вторичной обмотке.

3. Сравнительный анализ потерь выявил преимущества конструкций, которые имеют большие сопротивления в короткозамкнутых контурах для вихревых токов. Наилучший результат 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.

2. РАЗРАБОТКА ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРИВОДА СЛЕДЯЩЕГО ГИДРОУСИЛИТЕЛЯ

Вводные замечания

Электромеханический привод представляет собой линейный электродвигатель, который создает осевое усилие на шток ЗР. Усилие, развиваемое ЭМП пропорционально току обмотки якоря и индукции в рабочем зазоре, которую создает индуктор. Это усилие $F_{emp}(t)$ можно определить по уравнению:

$$F_{emp}(t) = B_\delta i(t)\pi D_{sr}W, \quad (2.1)$$

где B_δ – индукция в рабочем воздушном зазоре;

D_{sr} – средний диаметр обмотки якоря ЭМП;

W – число витков обмотки якоря ЭМП;

Усилие, развиваемое ЭМП, уравновешивается динамическими усилиями преодоления инерционной массы подвижных частей, гидравлическими силами золотникового распределителя, силами трения в опорах.

Из (2.1) видно, что одним из важных факторов определения $F_{emp}(t)$ является определение индукции B_δ в рабочем воздушном зазоре ЭМП.

2.1. Определение индукции в рабочем воздушном зазоре для математической модели расчета ЭМП

На практике существует большое количество методик анализа магнитного поля в электромеханических устройствах. Их можно разделить на аналитические и численные. Преимуществом аналитических методик является их простота. Как правило они содержат несколько десятков уравнений, которые можно включить в итерационный цикл при оптимизационных расчетах, но для сложных магнитных систем, которые должны учесть рабочие потоки и потоки рассеяния, они дают неприемлемую точность. При этом от качества расчета магнитного поля зависит точность определения характеристик всего привода.

Численные методы, основанные на методе конечных элементов (МКЭ), обладают хорошей точностью, но пригодны, в основном, для анализа, когда надо

одноразово определить параметры поля. Программные средства, реализующие эти методы, требуют больших компьютерных ресурсов и расчетного времени даже для одной точки характеристики. Их практически невозможно применить для циклической оптимизации.

Возникает противоречие: с одной стороны, необходимы простые методики для включения их в большое количество оптимизационных циклов, с другой стороны, нужны точные методики для анализа магнитного поля, которые не могут быть включены в эти циклы из-за их сложности.

В данном исследовании это противоречие было разрешено следующим образом. В качестве базового метода был выбран МКЭ. Магнитная система ЭМП заранее разбивалась на фиксированное, предварительно заданное количество узлов и конечных элементов. Магнитную систему без потери точности можно упростить, используя осевую симметрию и решение перевести в двухмерную постановку задачи. Эскиз геометрии с параметризацией основных размеров представлен на рис.2.1.1

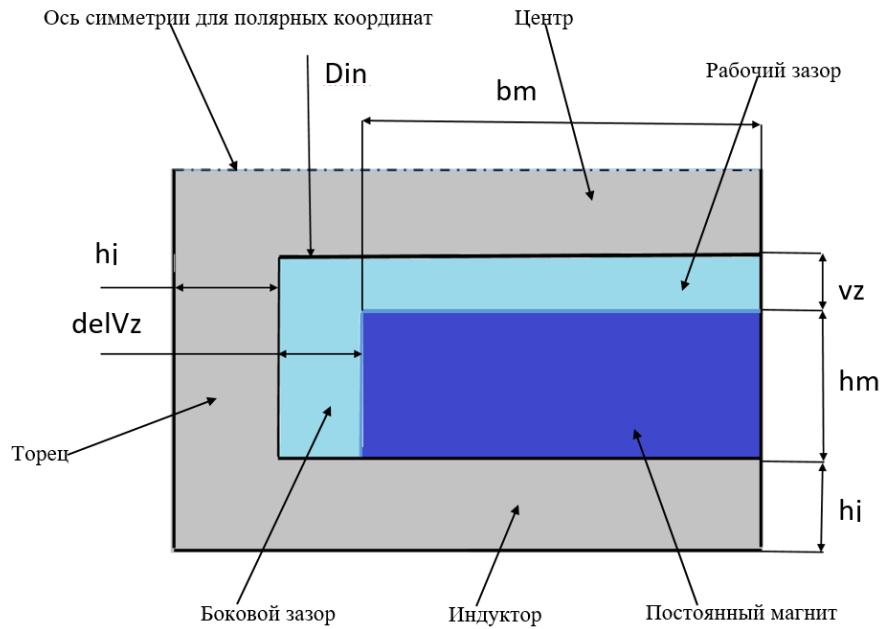


Рис.2.1.1. Эскиз геометрии магнитной системы ЭМП с параметризацией основных размеров

Количество узлов и конечных элементов определяется опытным путем по показателям точности определения индукции в воздушном зазоре. Заранее было

подобрано 60 элементов и 41 узел. Разбиение геометрии магнитной системы на узлы и элементы представлено на рис.2.1.2.

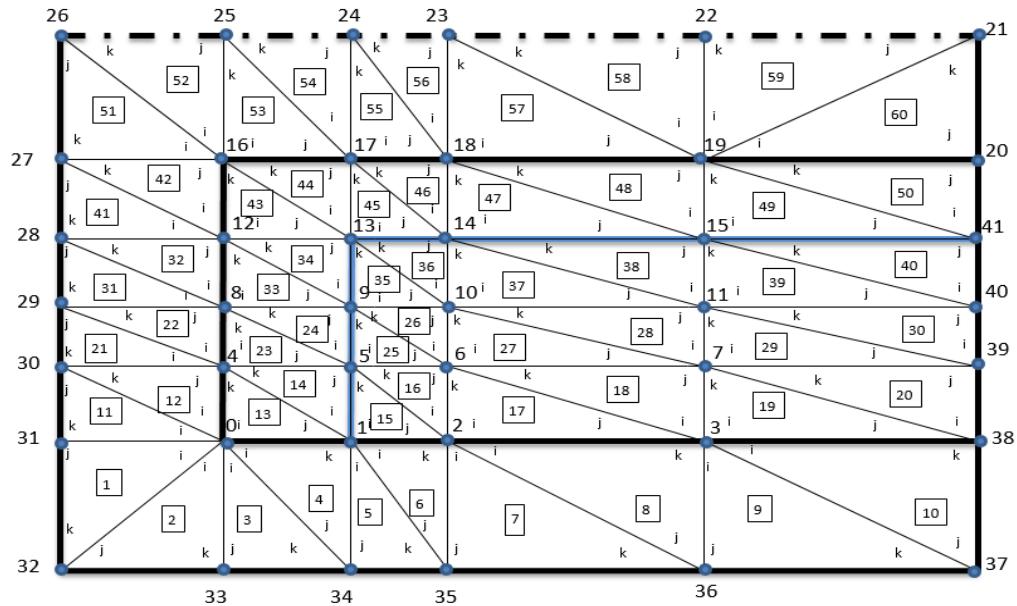


Рис.1.1.2. Разбиение геометрии магнитной системы на узлы и элементы

Таким образом, при изменении геометрии изменялись только параметры, которые эту геометрию определяли. При этом менялись координаты узлов и самих элементов. Количество узлов и элементов оставалось постоянным (60 элементов, 41 узел).

При формировании системы уравнений обход узлов i , j , k в элементах был выбран против часовой стрелки.

На магнитную систему были наложены граничные условия Дирихле с нулевым магнитным потенциалом. Допускалось, что за пределы выделенного контура магнитной системы силовые линии не выходят. Нумерация узлов была выбрана таким образом, что последние узлы с 20 по 41 находились на границе. Поскольку по условию Дирихле им был присвоен нулевой магнитный потенциал, то глобальную матрицу жесткости удалось сократить до размеров 20×20 , то есть 20 строк и 20 столбцов.

При формировании системы алгебраических уравнений, составляющих основу МКЭ, первоначально записывались локальные уравнения для каждого элемента [1].

Координаты узлов элемента:

$$\begin{aligned} X_i &:= x_{nyi} & Y_i &:= y_{nyi} \\ X_j &:= x_{nyj} & Y_j &:= y_{nyj}, \\ X_k &:= x_{nyk} & Y_k &:= y_{nyk} \end{aligned} \quad (2.1.1)$$

Площадь элемента:

$$S = 0.5 \cdot \begin{vmatrix} 1 & X_i & Y_i \\ 1 & X_j & Y_j \\ 1 & X_k & Y_k \end{vmatrix}, \quad (2.1.2)$$

Коэффициенты для вычисления локальной матрицы жесткости:

$$\begin{aligned} C_i &:= X_k - X_j & B_i &:= Y_j - Y_k \\ C_j &:= X_i - X_k & B_j &:= Y_k - Y_i, \\ C_i &:= X_j - X_i & B_k &:= Y_i - Y_j \end{aligned} \quad (2.1.3)$$

Определение элементов локальной матрицы жесткости:

$$\begin{aligned} aa_{nyi,nyi} &:= \frac{1}{4 \cdot mu \cdot S} (C_i^2 + B_i^2) \\ aa_{nyi,nyj} &:= \frac{1}{4 \cdot mu \cdot S} (C_i \cdot C_j + B_i \cdot B_j) \\ aa_{nyi,nyk} &:= \frac{1}{4 \cdot mu \cdot S} (C_i \cdot C_k + B_i \cdot B_j) \\ aa_{nyj,nyi} &:= \frac{1}{4 \cdot mu \cdot S} (C_i \cdot C_j + B_i \cdot B_j) \\ aa_{nyi,nyj} &:= \frac{1}{4 \cdot mu \cdot S} (C_j^2 + B_j^2) \\ aa_{nyj,nyk} &:= \frac{1}{4 \cdot mu \cdot S} (C_j \cdot C_k + B_j \cdot B_k) \\ aa_{nyj,nyk} &:= \frac{1}{4 \cdot mu \cdot S} (C_i \cdot C_k + B_i \cdot B_k) \\ aa_{nyk,nyj} &:= \frac{1}{4 \cdot mu \cdot S} (C_j \cdot C_k + B_j \cdot B_k) \\ aa_{nyk,nyk} &:= \frac{1}{4 \cdot mu \cdot S} (C_k^2 + B_k^2) \end{aligned} \quad , \quad (2.1.4)$$

Формирование вектора свободных членов:

$$b_{nyi} := \frac{Hc}{3}, \quad b_{nyj} := \frac{Hc}{3}, \quad b_{nyk} := \frac{Hc}{3}. \quad (2.1.5)$$

Сложение элементов локальной матрицы жесткости с элементами глобальной матрицы жесткости:

$$a := a + aa. \quad (2.1.6)$$

После формирования глобальной матрицы жесткости и глобального вектора свободных членов система уравнений составлена и может быть решена относительно магнитных потенциалов в узлах элементов:

$$A := a^{-1} \cdot b. \quad (2.1.7)$$

Через значения магнитных потенциалов в узлах элементов можно определить все характеристики магнитной системы.

Средняя индукция в воздушном зазоре:

$$B_{delta} := \frac{A_{17}}{b_m}. \quad (2.1.8)$$

Средняя индукция на поверхности магнита:

$$B_{mag} := \frac{A_{13}}{b_m}. \quad (2.1.9)$$

Средняя индукция в нейтральном сечении магнита:

$$B_n := \frac{A_1}{b_m}. \quad (2.1.10)$$

Магнитный поток:

$$F_{mag} := A_{13}. \quad (2.1.11)$$

Для того, чтобы проверить точность разработанной методики, ее надо сравнить с другой программой анализа магнитного поля, которая была бы проверенной и заведомо точной. В качестве такой программы был выбран

комплекс Ansys Electronics Desktop. Фрагмент расчета магнитной системы ЭМП в этом комплексе по описанной методике приведен на рис.1.1.3.

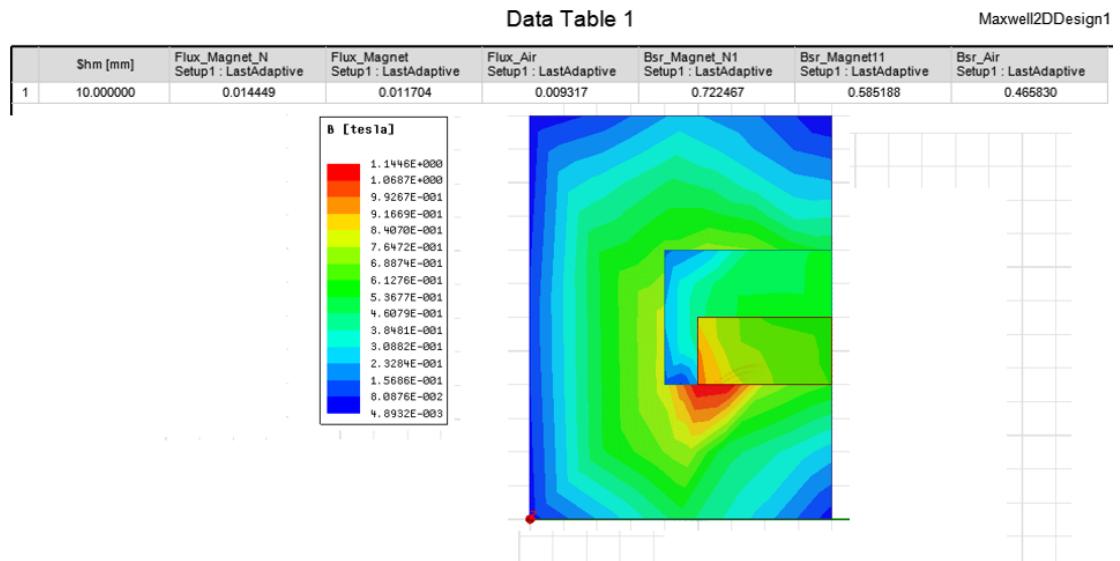


Рис.1.1.3. Расчет магнитного поля ЭМП в плоской постановке задачи

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 %. Такой результат следует признать удовлетворительным и методику можно применять для расчета параметров ЭМП и оптимизационных расчетов.

Данная методика реализована с использованием программного языка Delphi. Программный код методики представлен в Приложении 3.

2.2. Математическая модель динамического рабочего режима ЭМП

Основным рабочим режимом ЭМП является линейное колебательное перемещение штока золотниковой пары с частотой 300 Гц, соответствующего сдвигу характеристики на 90°, при амплитуде управляющего сигнала 25 %. Для ЭМП прототипа это смещение на величину +0.2 мм с частотой 300 Гц. ЭМП должен обладать этим быстродействием, преодолев усилие инерционных масс и усилий сопротивления движению штока за счет гидравлики, трения и вихревых токов.

Геометрия ЭМП определяется следующей совокупностью основных размеров:

- D_{in} – диаметр центра якоря;
- $vz1$ – воздушный зазор между центром и внутренним диаметром гильзы якоря;
- hal – толщина гильзы якоря;
- hcu – толщина обмотки якоря по меди;
- $vz2$ – воздушный зазор между наружным диаметром обмотки якоря и внутренним диаметром гильзы магнитов;
- $hgil$ – толщина гильзы магнитов;
- hm – толщина магнита;
- hj – толщина корпуса индуктора;
- La – активная длина якоря.

Из указанных размеров независимыми варьируемыми размерами, которые можно менять для оптимизации параметров являются: D_{in} , hcu , hm , La .

Остальные размеры $vz1$, hal , $vz2$, $hgil$ выбираются минимально возможными по технологии изготовления.

Определим систему уравнений, описывающих функционирование ЭМП.

Средний диаметр обмотки якоря:

$$D_{sr} = \frac{D_{in} + 2vz1 + 2hal + hcu}{2}. \quad (2.2.1)$$

Число витков обмотки якоря:

$$W = \frac{La n_{sl}^2}{hcu}. \quad (2.2.2)$$

Диаметр провода обмотки якоря:

$$d_a = \frac{hcu k_{zm}}{n_{sl}}, \quad (2.2.3)$$

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

Сечение провода обмотки якоря:

$$q_a = \frac{\pi d_a^2}{4}. \quad (2.2.4)$$

Активное сопротивление обмотки якоря

$$R_a = \frac{\rho_{cu75} \pi D_{sr} W}{q_a}, \quad (2.2.5)$$

где ρ_{cu75} – удельное сопротивление меди при рабочей температуре обмотки якоря.

Индуктивность обмотки якоря (эмпирическая формула) [52]:

$$L = \frac{2.5\pi\mu_0 W^2 D_{sr}^2}{4.5D_{sr} + 25L_a}. \quad (2.2.6)$$

Электромагнитная постоянная времени обмотки якоря:

$$T = \frac{L}{R_a}. \quad (2.2.7)$$

Масса обмотки якоря:

$$M_{cu} = g_{cu}\pi D_{sr} h_{cu} L_{ak} k_{zm}, \quad (2.2.8)$$

где g_{cu} – удельная плотность меди.

Масса гильзы якоря:

$$M_{al} = g_{Al} \left(\frac{(D_{in} + 2vz1 + 2hal)^2 - (D_{in} + 2vz1)^2}{4} La + \frac{(D_{in} + 2vz1 + 2hal)^2}{4} 0.002 \right), \quad (2.2.9)$$

где g_{Al} – удельная плотность алюминия:

Масса подвижных частей ЭМП:

$$M_a = M_{cu} + M_{al}. \quad (2.2.10)$$

Работа ЭМП опишется следующими уравнениями.

Период цикла колебаний штока:

$$\tau = \frac{1}{f_{zad}}. \quad (2.2.11)$$

Четверть периода колебаний: $t_1 = 0.25 \tau$.

Ток в обмотке якоря определяется из условия равновесия напряжений

$$U = R_a i + L \frac{di}{dt} + E_{emf}, \quad (2.2.12)$$

где U – напряжение на клеммах обмотки якоря (В) от блока управления;

E_{emf} – противо ЭДС в обмотке якоря от его движения в поле индуктора.

Мгновенное усилие на шток определиться уравнением:

$$F_{emp}(t) = B_\delta i(t) \pi D_{sr} W - F_{demp} - F_g - F_{fr}, \quad (2.2.13)$$

где B_δ – средняя индукция в воздушном зазоре; F_{demp} – демпферное усилие на шток ЗР от действия вихревых токов; F_g – гидравлические силы ЗР, оказывающие сопротивление движению штока ЗР; F_{fr} – силы трения в опорах.

Мгновенное значение ускорения штока:

$$a(t) = \frac{F_{emp}(t)}{M_a}. \quad (2.2.14)$$

Мгновенное приращение скорости штока:

$$dV(t) = a(t)dt. \quad (2.2.15)$$

Мгновенное приращение смещения штока:

$$dS(t) = dV(t)dt + \frac{a(t)^2 dt}{2}. \quad (2.2.16)$$

Мгновенное значение потребляемой энергии:

$$dE(t) =Ui(t)dt. \quad (2.2.17)$$

Перемещение штока за четверть периода:

$$S = \int_0^{t_1} dS(t)dt. \quad (2.2.18)$$

Потребляемая энергия за четверть периода:

$$E = \int_0^{t_1} dE(t)dt. \quad (2.2.19)$$

Из системы уравнений следует, что значение питаемого напряжения при заданной геометрии является функцией заданного смещения S_{zad} за время четверти периода t_1 :

$$U = f(S_{zad}). \quad (2.2.20)$$

Решим приведенную систему уравнений численным методом. Для этого всю последовательность вычислений сведем в алгоритм.

2.3. Алгоритм вычислений параметров ЭМП

Задача алгоритма определения параметров ЭМП заключается в следующем: для заданной геометрии, материалов магнитопровода, постоянного магнита и обмотки якоря, частоты и величины смещения штока определить требуемую энергию за время, равное четверти периода.

Алгоритм представим в виде следующей последовательности шагов и циклов:

1. Задание свойств материала постоянного магнита H_c, B_r , магнитной проницаемости воздуха μ_0 , удельного сопротивления меди ρ_{cu75} , удельной плотности алюминия g_{Al} , удельной плотности меди $g_{Al} \cdot W$.

2. Задание геометрических размеров D_{in} , $vz1$, hal , hcu , $vz2$, $hgil$, hm , hj , La .
3. Определение параметров обмотки якоря W , d_a , q_a , R_a , L , T по уравнениям 2.2.1 – 2.2.7.
4. Определение массы подвижных частей M_{cu} , M_{al} , M_a по уравнениям 2.2.8 – 2.2.10.
5. Определение периода цикла колебаний и четверти периода по уравнению 2.2.11.
6. Задание числа точек N , на которые делится четверть интервала. Определение приращения времени Δt в цикле. Задание начальной нулевой скорости $V_0 = 0$.
7. Задание начального значения напряжения U . Для напряжения берется минимальное значение, которое будет наращиваться.
8. Расчет индукции в воздушном зазоре по методике п.2.1.
9. Начало цикла по времени.

В цикле рассчитываются текущие значения для заданного времени тока I , усилия на шток F_{emp} , ускорения a , скорости V , перемещения штока dS , энергии на временном интервале dE по уравнениям 2.2.12 -2.2.20.

В цикле рассчитывается массив указанных значений для всех временных интервалов.

10. Определяются интегральные значения перемещения S и энергии E путем суммирования этих значений на интервале.

11. Проверяется условие равенства пройденному смещению S заданному смещению.

Если реальное смещение меньше заданного, напряжение получает приращение и цикл повторяется с пункта 8.

Если реальное смещение S больше или равно заданному смещению S_{zad} , расчет заканчивается.

Результатом расчета является затраченная энергия за четверть интервала цикла.

Четверть интервала выбрана для упрощения расчетной модели. На оставшихся трех циклах модели энергетические процессы повторяются.

Блок схема алгоритма расчета ЭМП представлена на рис.2.3.1.

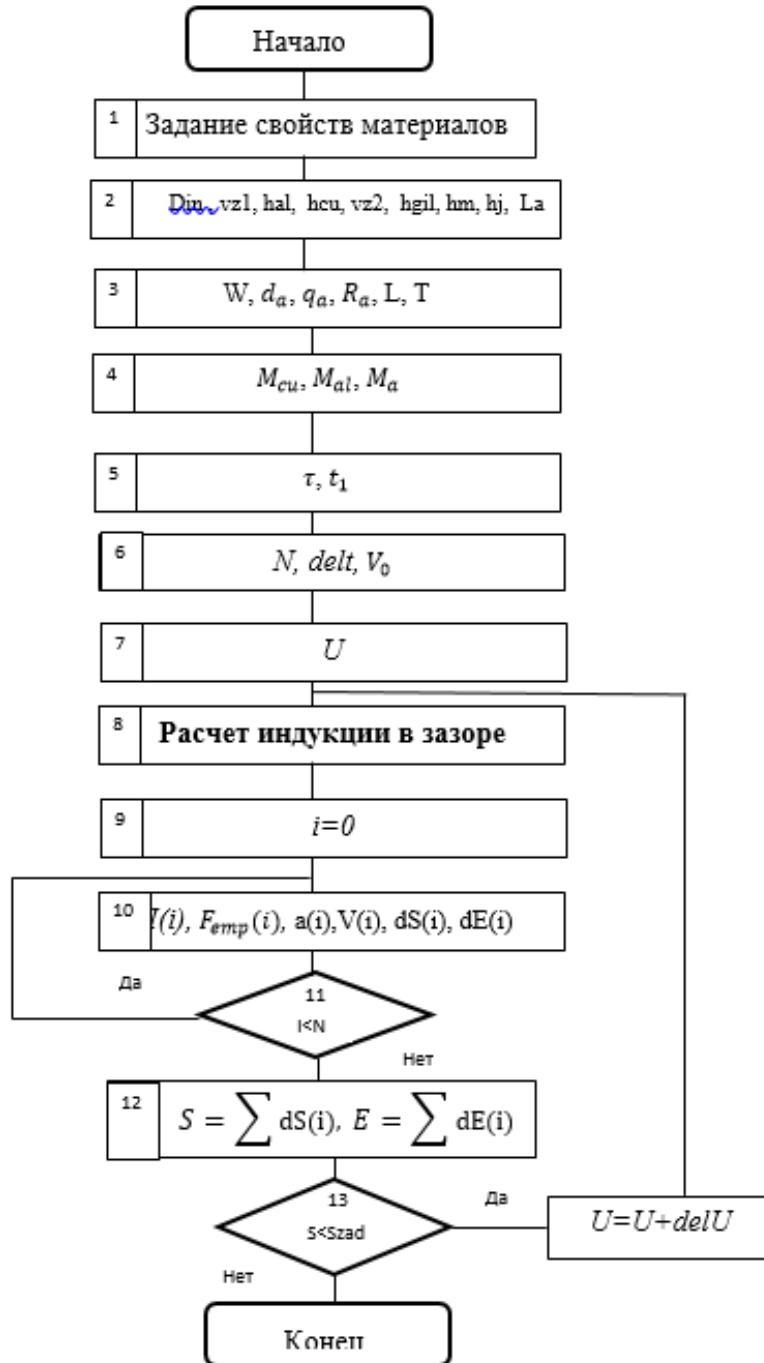


Рис.2.3.1. Блок схема алгоритма расчета ЭМП

Математическая модель разработана таким образом, что она вполне подходит ко всем 3 конструкциям, рассмотренным выше. Основу ее составляет индукция в воздушном зазоре. С помощью какого типа индуктора создан этот параметр существенного значения не имеет. Это задача блока расчета индукции в зазоре.

Указанные обстоятельства позволяют сделать математическую модель гибкой и применить для всех рассмотренных конструктивных вариантов.

Данный алгоритм реализован на программном языке Delphi. Программный код алгоритма представлен в приложении 4.

Выводы по главе

1. Одним из наиболее важных параметров, определяющих точность расчета характеристик ЭМП, является индукция магнитного поля в рабочем зазоре якоря. При этом методики расчета индукции должны быть простыми, так как в перспективе они должны быть включены в итерационные циклы оптимизации. Предложена методика на основе метода конечных элементов с ограниченным числом элементов и узлов. Точность расчета индукции в зазоре по этой методике составляет 3-5 %.

2. Разработана динамическая модель работы ЭМП на основе дифференциальных уравнений апериодического процесса нарастания тока в обмотке якоря. Система дифференциальных уравнений решена численным методом.

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

3. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭМП НА ОСНОВЕ МНОГОУРОВНЕВОЙ ОДНОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

Вводные замечания

Разработанная математическая модель расчета динамических характеристик показала, что очевидным критерием качества является количество энергопотребления приводом для основной рабочей характеристики при заданных геометрических размерах, то есть возникает необходимость решения вариационной задачи по минимизации энергетического функционала. Это типовая задача для нелинейного программирования. Для ее решения необходимо формализовать математическую модель, определив в ней константы, ограничения и независимые переменные, выбрать метод перебора независимых переменных, определить уровни оптимизации. По результатам этого исследования необходимо создать проектную систему, позволяющую реализовывать различные проектные ситуации, возникающие на практике.

3.1. Формализация математической модели для оптимизации ЭМП.

Одним из требований, которому должна удовлетворять проектная система ЭМП, является универсальность [1, 82]. Это означает, что в систему необходимо включить как можно больше проектных вариантов, которые могут быть реализованы на практике. В главе 1 был проведен анализ трех конструкций ЭМП с различными вариантами исполнения якоря. Следует отметить, что математическая модель расчета динамических характеристик разработана таким образом, что основу ее составляет индукция в рабочем воздушном зазоре, при этом, каким образом получена величина индукции, значения для модели не имеет. Этую задачу решает индуктор, который может иметь разные исполнения. Определение индукции в зазоре может быть оформлено разными блоками, отражающими особенности конструкций 1, 2 и 3. В остальном последовательность расчета остается одинаковой для всех конструкций. Это во многом упрощает задачу формирования универсальной расчетной модели для оптимизации ЭМП.

Традиционно математическая модель расчета электромеханического устройства включает в себя три вида входных параметров (константы, ограничения и независимые переменные) и выходной параметр, который представляет собой критерий качества.

Рассмотрим отдельно каждую группу параметров, так как они имеют важное значение для формирования оптимизационной проектной модели.

3.1.1. Константы математической модели

Основными константами математической модели являются данные технического задания на проектирование ЭМП. Для ЭМП рассматриваемого типа таким параметром является основная характеристика при заданной частоте, соответствующая сдвигу фазочастотной характеристики на заданный угол для заданного управляющего сигнала, то есть в качестве констант ТЗ должны быть заданы:

- частота управляющего сигнала;
- амплитуда сдвига штока;
- время, равное четверти периода колебания.

Следующей группой констант являются геометрические размеры, которые по условиям технологии изготовления должны быть заданы. К ним относятся:

- воздушный зазор между центром и внутренним диаметром гильзы якоря;
- толщина гильзы якоря;
- толщина торцевой части гильзы якоря;
- воздушный зазор между обмоткой якоря и внутренним диаметром гильзы магнитов;
- толщина гильзы якоря;
- толщина торца индуктора;
- толщина корпуса индуктора.

Следующей группой констант являются магнитные и электрические свойства материалов, применяемых в конструкции. Понятно, что для разных материалов

постоянных магнитов получатся разные результаты оптимизации. К этой группе относятся:

- остаточная индукция постоянного магнита;
- коэрцитивная сила постоянного магнита;
- магнитная проницаемость электротехнической стали;
- магнитная проницаемость меди;
- магнитная проницаемость воздуха;
- удельное электрическое сопротивление меди;
- удельная плотность меди;
- удельная плотность алюминия;
- коэффициент заполнения обмотки якоря голой медью.

Данные группы констант универсальны для всех конструктивных исполнений.

3.1.2. Ограничения

Среди ограничений следует выделить технологические ограничения и эксплуатационное ограничения.

К технологическим ограничениям следует отнести минимальные и максимальные размеры, которые не могут быть нарушены из-за ограниченных возможностей производства. В основном они касаются производства постоянных магнитов, а также обмоточных проводов:

- минимальная высота магнита;
- максимальная высота магнита;
- минимальная длина магнита;
- максимальная длина магнита;
- минимальный диаметр обмоточного провода;
- максимальный диаметр обмоточного провода.

К эксплуатационным ограничениям в основном относятся параметры, определяющие перегрев элементов конструкции:

- максимальная температура нагрева постоянных магнитов;

- максимальная плотность тока обмотки якоря (этот параметр определяет нагрев обмоточной меди для соответствующего класса нагревостойкости изоляции).

По габаритам и массе для данного типа ЭМП ограничения отсутствуют. Это во многом облегчает решение оптимизационной задачи.

3.1.3. Независимые переменные

К независимым переменным следует отнести размеры, которые можно менять произвольно, независимо друг от друга. Как раз к этим размерам предъявляется требование оптимизации. Именно эти размеры должны в процессе оптимального перебора обеспечить наилучшее значение показателю качества.

Для всех рассматриваемых конструкций ЭМП это следующие размеры:

- диаметр центра;
- активная длина обмотки якоря;
- высота обмотки якоря;
- высота магнита.

Остальные геометрические размеры зависят от констант и независимых переменных и могут быть определены по приведенным выше формулам.

Небольшое количество переменных позволяет применить упрощенные методы оптимизации, которые не требуют больших компьютерных мощностей.

3.1.4. Выходной критерий оптимизации

В самом общем случае при формировании оптимизационной задачи следует рассматривать многокритериальную задачу, то есть задачу с несколькими показателями качества. Следует указать, что такая задача достаточно сложна [78-82]. Это связано с тем, что, как правило, критерии связаны между собой противоречивыми требованиями. Улучшение одного критерия приводит к ухудшению другого и наоборот. Например, повышение КПД влечет за собой увеличение габаритов и стоимости. Уменьшение массы приводит к дополнительным потерям и перегреву.

В случае проектирования ЭМП задача существенно упрощается. Представленная выше математическая модель имеет один явно выраженный критерий – потребляемая энергия при выполнении основной рабочей характеристики. Именно этот критерий примем в качестве основного и сформулируем оптимизационную задачу как однокритериальную. Это во многом упростит алгоритм оптимизации и поиск оптимальных размеров.

3.2. Постановка задачи оптимизации для ЭМП

Для однокритериальной задачи можно сформулировать оптимизацию в классической постановке [81]: **для заданных констант и принятых технологических ограничений необходимо выбрать независимые переменные таким образом, чтобы они обеспечили наилучшее значение показателю качества.**

Графическое изображение задачи оптимизации представлено на рис.3.2.1.



Рис.3.2.1. Блок-схема задач оптимизации

Таким образом, применительно к ЭМП задача оптимизации сводится к поиску диаметра центра, высоты слоя меди, активной длины и высоты магнита при заданной остальной геометрии и материалах, которые обеспечили бы минимум потребляемой энергии при выполнении приводом смещения штока золотника на ± 0.2 мм при частоте дешифратора 300 Гц.

Математическая модель содержит 4 независимых переменных, которые можно изменять для поиска минимума потребляемой энергии, но на практике часто возникают ситуации, когда заказчик накладывает ограничение на изменение того или иного размера. Например, он заранее закупил определенный тип и размеры постоянного магнита и хочет использовать этот задел, прежде чем приступить к изготовлению новой партии изделий. При этом в оптимизационной задаче должны быть зафиксированы высота магнита и активная длина. Такая же ситуация может сложиться с обмоточным проводом. В этом случае фиксируется высота обмотки якоря. Поскольку ЭМП является встраиваемым изделием в золотниковый клапан, может быть наложено ограничение на изменение диаметра штока, или активной длины якоря.

Следует понимать, что данные ограничения уводят решение от поиска глобального оптимума, но они реальны и часто встречаются на практике. Такие ограничения должны быть заложены в проектную задачу. Эти ограничения осложняют формирование оптимизационной задачи, но при этом они делают систему гибкой, позволяющей реализовать различные проектные ситуации.

Рассчитав проекты с одним и тем же ТЗ, но разными ограничениями, у разработчика появляется возможность убедить заказчика в результатах полной оптимизации, или согласится с ограничениями по причине их несущественности.

Таким образом, общая задача оптимизации может быть разбита на уровни [82]. Самый высокий и сложный уровень – это полная оптимизация, при которой вартируются все 4 параметра. Более низкий уровень оптимизации возникает при фиксации одной, двух или трех переменных. Разобьем нашу общую оптимизационную задачу на уровни оптимизации.

3.2.1. Полная оптимизация

При этом типе оптимизации в силе остаются выше принятые константы и ограничения. Варьируются все параметры:

- диаметр центра;
- активная длина обмотки якоря;

- высота обмотки якоря;
- высота магнита.

Критерием оптимизации служит минимум потребляемой энергии.

3.2.2. Частичная оптимизация при фиксированном диаметре центра

Константы и ограничения остаются прежними. Диаметр центра фиксируется и остается постоянным. Варьируются следующие параметры:

- активная длина обмотки якоря;
- высота обмотки якоря;
- высота магнита.

Критерием оптимизации служит минимум потребляемой энергии.

3.2.3. Частичная оптимизация при фиксированной активной длине

Константы и ограничения не меняются. Фиксируется осевая длина.

Варьируются следующие параметры:

- диаметр центра;
- высота обмотки якоря;
- высота магнита.

Критерием оптимизации служит минимум потребляемой энергии.

3.2.4. Частичная оптимизация при фиксированной высоте обмотки якоря

Эта проектная ситуация встречается довольно часто, поскольку обмоточные провода могут быть взяты только из промышленного ряда проводов. Высота обмотки якоря определяется выбранным проводом и количеством слоев намотки.

В процессе оптимизации она не меняется. Варьируются следующие параметры:

- диаметр центра;
- активная длина обмотки якоря;
- высота магнита.

Критерием оптимизации служит минимум потребляемой энергии.

3.2.5. Частичная оптимизация при фиксированной высоте магнита.

Эта проектная ситуация тоже является типичной для практики. Изготовитель магнитов делает их из стандартного размерного ряда, определяемого каталогом предприятия. Эти магниты имеют минимальную цену. Магниты под заказ с произвольными размерами стоят на порядок дороже. Высота магнита фиксируется и исключается из оптимизационного цикла. Варьируются следующие параметры:

- диаметр центра;
- активная длина обмотки якоря;
- высота обмотки якоря;

Критерием оптимизации служит минимум потребляемой энергии.

3.2.6. Частичная оптимизация при фиксированном диаметре центра и высоте обмотки якоря.

Данная проектная ситуация возникает при заданных габаритах ЭМП. Константы и ограничения остаются прежними. Варьируются только 2 размера:

- высота обмотки якоря;
- высота магнита.

Критерием оптимизации служит минимум потребляемой энергии.

3.2.7. Частичная оптимизация при фиксированном диаметре центра и высоте постоянного магнита

Эта проектная ситуация встречается на практике, но довольно редко. Константы и ограничения не меняются. Варьируются два параметра при фиксированном диаметре центра и высоте магнита:

- активная длина обмотки якоря;
- высота обмотки якоря;

Критерием оптимизации служит минимум потребляемой энергии.

Теоретически можно еще подобрать комбинации фиксированных и варьируемых параметров, но они являются не типичными для практики и по этой причине не рассматриваются.

3.2.8. Проверочный расчет

При всех четырех фиксированных размерах конструкция ЭМП полностью определена. Процесс оптимизации сводится к простому проверочному расчету, при котором все размеры фиксируются. Необходимость в ограничениях отпадает, так как изменения в размерах не происходит. Результатом расчета является энергия, которая тратится на функционирование ЭМП.

Проверочный расчет имеет самостоятельное значение. Он позволяет изменять размеры вручную. Если возникает проектная ситуация, которая не вошла в перечень перечисленных выше проектных ситуаций, проектный расчет позволяет перебрать интересуемые размеры самостоятельно без блока оптимизатора, тем самым гибкость проектной системы возрастает.

3.3. Выбор метода оптимизации

Практика применения методов нелинейного программирования показывает, что наиболее быстрым является градиентный метод поиска минимума. Суть этого метода заключается в том, что движение при поиске минимума идет в направлении градиента изменения параметров. Для использования этого метода необходимо определение частных производных по всем варьируемым параметрам. Это обеспечивает движение в направлении максимального наклона целевой функции. Эта же практика выявила следующие основные недостатки метода. Он не работает на границе диапазона переменных, так как в этих точках целевая функция имеет разрыв первого рода и не имеет производной. Метод штрафных функций несколько ослабляет проблему, делая целевую функцию непрерывной на границе, но полностью не решает проблему, создавая локальные минимумы. Второй проблемой применения градиентного метода является зависание в локальных минимумах, не доходя до глобального минимума. Ситуацию можно исправить, если стартовать с разных начальных точек, генерируемых случайным образом, но это тоже осложняет процедуру оптимизации.

В ситуации с ЭМП эффективными могут быть прямые детерминированные методы. Они не критичны к наличию границы, поскольку не связаны с

нахождением частных производных. Они в меньшей степени подвержены влиянию локальных минимумов. В связи с этим, после ряда тестовых расчетов была сделана ориентация на метод покоординатного спуска (метод Гаусса-Зейделя) [1]. В этом методе последовательно перебирается одна переменная при фиксированных других. Таким образом вся область допустимых значений целевой функции многократно пронизывается итерационными шагами, не оставляя места локальным минимумам, что многократно повышает надежность работы алгоритма.

Недостатком метода служит большое количество итерационных циклов, которое многократно возрастает при увеличении числа переменных. Применительно к ЭМП мы имеем только 4 переменных при достаточно простой математической модели расчета. Эти обстоятельства позволяют успешно использовать это метод в проектной системе ЭМП.

Данный метод позволяет реализовать концепцию многоуровневой оптимизации без особых сложностей. При покоординатном спуске необходимая переменная фиксируется и исключается из перебора. Для реализации этой концепции в алгоритм вводится так называемый вектор оптимизации. Размерность вектора равна размерности оптимизационной задачи. Значения элементов вектора могут принимать значение 0 или 1. При значении 0 переменная, соответствующая по номеру этому элементу, фиксируется, при значении 1 включается в процесс оптимизационного перебора. Таким образом, задавая значения элементам вектора 0 или 1, мы определяем параметр как фиксируемый или переменный.

Предлагаемая многоуровневая оптимизация была реализована на программном языке Delphi, программный код которой приведен в приложении 5.

3.4. Разработка проектной системы ЭМП

При разработке проектной системы ЭМП следует иметь в виду, что она должна состоять из двух взаимосвязанных частей. Первая часть должна осуществлять синтез устройства на основе оптимизационных расчетов по данному ТЗ. Теоретическая часть и практическая реализация синтеза создана и описана в

предыдущих главах. Она представляет собой многоуровневую оптимизацию на основе математической модели и метода оптимизации покоординатного спуска с вектором оптимизации. При соединении вместе они представляют собой подсистему синтеза ЭМП.

Следует отметить, что проектная система должна включать в себя систему анализа. Она необходима для снятия технических рисков при проектировании привода. Дело в том, что математическая модель для синтеза была преднамеренно упрощена для того, чтобы можно было включить ее в большое число циклов оптимизации. При этом электромагнитные процессы в приводе достаточно сложны и требуют глубокого анализа. Это подтверждается исследованием главы 1, где был сделан анализ распределения потерь и влияния вихревых токов. Программа Ansys Electronics Desktop вполне пригодна для этого анализа. Необходимо только объединить эти две части синтеза и анализа в одну проектную оболочку.

Такая возможность имеется. Все модели для Ansys Electronics Desktop параметризованы. Это означает, что если передать в программу все необходимые размеры по результатам оптимизации, то программа в автоматическом режиме выстроит модель в своей среде и эту модель можно использовать для подробного анализа. Такую связь можно организовать через специально разработанный программный код, связывающий Delphi и Ansys Electronics Desktop [1].

Программная оболочка для данной проектной системы была создана и проверена на практике. Она включает в себя все рассмотренные конструктивные модификации: конструкцию 1, конструкцию 2 и конструкцию 3.

Проектная система работает следующим образом. На первом этапе системе задаются константы и ограничения, накладываемые на проект.

На втором этапе выбирается уровень расчета:

- 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;
- поверочный расчет.

Проводится расчет. На этапе синтеза анализируются полученные результаты. При необходимости параметры расчета меняются, и цикл повторяется.

Далее вызывается опция анализа. Исходные данные оптимизации передаются в программу анализа Ansys Electronics Desktop. Программа автоматически создает геометрию по результатам оптимизации. Созданную на основе МКЭ модель можно анализировать с применением инструментария Ansys Electronics Desktop.

На рис. 3.4.1 представлена структура проектной системы



Рис. 3.4.1 Структура проектной системы

Интерфейс описанной оболочки проектной системы ЭМП представлен на рис.3.4.2.

Проектная система была опробована на варианте конструкции 3 с радиально-тангенциальной системой возбуждения с изолированными частями магнитопровода и якорем с диэлектрической гильзой. Была проведена полная оптимизация.

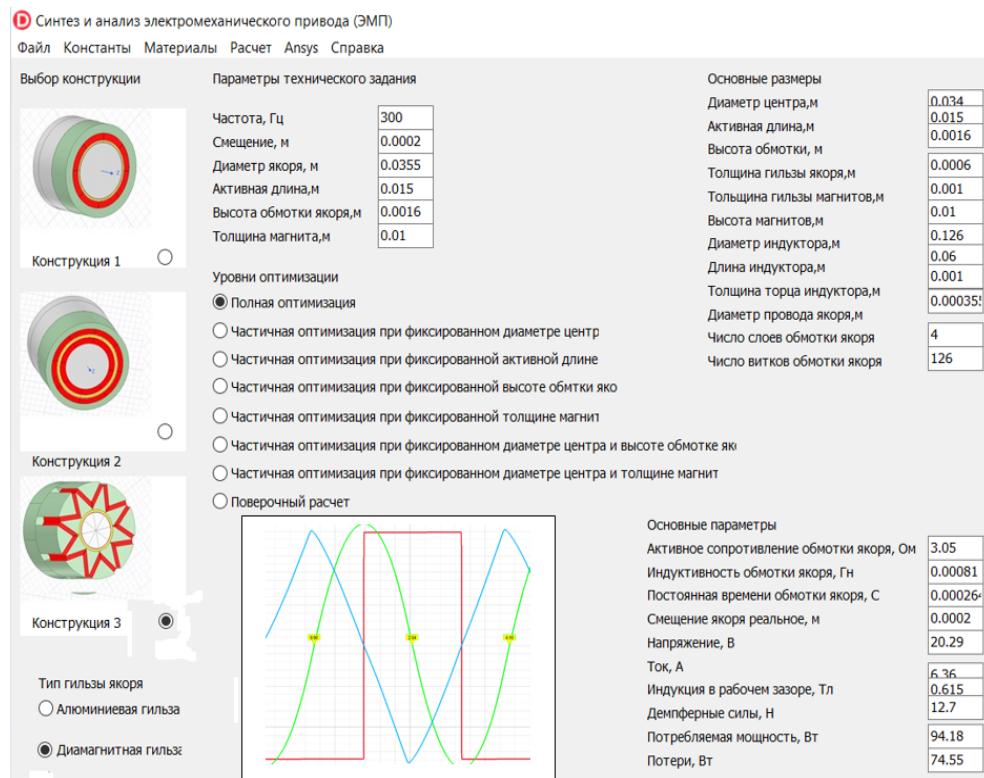


Рис. 3.4.2. Интерфейс описанной оболочки проектной системы ЭМП

Результаты анализа конструкции в программной среде Ansys Electronics Desktop приведены на рис.3.4.3.

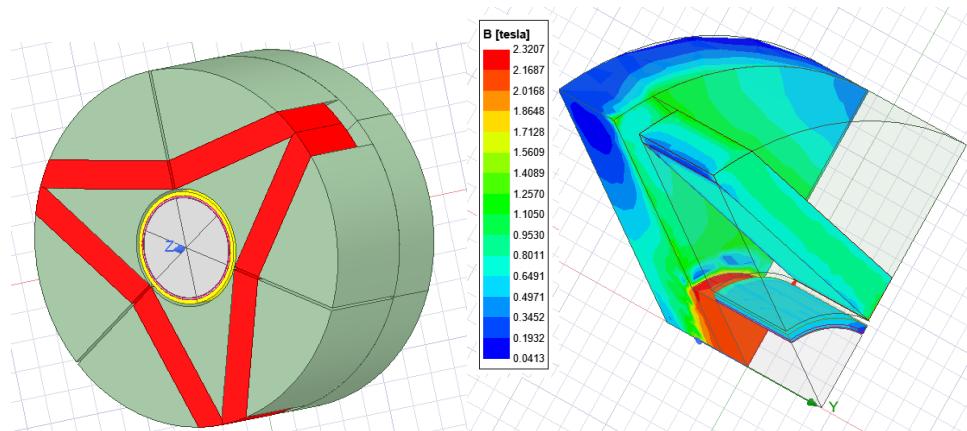


Рис.3.4.3. Фрагменты анализа конструкции 3 в программе Ansys Electronics Desktop

Основные результаты сведены в таблицу 3.4.1. В таблице приведены основные размеры, обмоточные данные, напряжение питания блока управления, потребляемая мощность, тормозное усилие от действия вихревых токов, индукция в воздушном зазоре, рассчитанная по приведенной выше методике.

Таблица 3.4.1. Результаты полной оптимизации конструкции 3 с тангенциально-радиальной магнитной системой с изолированными частями магнитопровода и якорем с диэлектрической гильзой.

№ п.п.	Параметр	Значение
1	Частота дешифратора,	300 Гц
2	Смещение штока золотниковой пары	+0.2 мм
3	Напряжение питания	20.29 В
4	Мгновенное значение тока якоря в конце цикла	6.36 А
5	Демпферное усилие вихревых токов	12.75 Н
6	Индукция в зазоре	0.612 Тл
7	Средняя потребляемая мощность за цикл	94.2 Вт
8	Средние потери в меди за цикл	74.55 Вт
9	Диаметр центра	0.0355 м
10	Активная длина якоря	0.015 м
11	Высота активного слоя меди	0.0016 м
12	Высота постоянного магнита	0.01 мм
13	Толщина гильзы якоря	0.0006 м
14	Величина зазора между центром и якорем	0.0002 м
15	Величина зазора между якорем и индуктором	0.0002 м
16	Диаметр провода обмотки якоря	0.000355 м
17	Число витков обмотки якоря	126
18	Активное сопротивление обмотки якоря	3.05 Ом
19	Индуктивность обмотки якоря	0.000808 Гн
20	Постоянная времени обмотки якоря	0.0002646 с

Тестовая проверка проектной системы на поверочных расчетах для прототипа Yuken показала удовлетворительную сходимость результатов расчета и тестирования натурного образца. Так расхождении по потерям составили около 7.3%, расхождение по индукции в рабочем зазоре составили 5.7 %.

Выводы по главе

- Для математической модели ЭМП formalizованы константы, представляющие собой данные технического задания и информацию о свойствах применяемых материалов, технологические и эксплуатационные ограничения и

независимые переменные, являющиеся размерами основных активных частей. Определен критерий оптимальности, представляющий собой потребляемую энергию за четверть колебательного цикла.

2. Разработана методика оптимального проектирования на основе многоуровневой однокритериальной оптимизации Однокритериальная оптимизация разбита на уровни, которые определяют различные проектные ситуации. Всего уровней 7. Поверочный расчет вписался в оптимизацию как последний уровень со всеми фиксированными переменными.

3. Выбран метод покоординатного спуска (Гаусса-Зейделя) для блока оптимизатора. Метод обеспечивает хорошую сходимость на границе и не критичен к локальным минимумам. Для блока оптимизатора определен вектор оптимизации, который реализует концепцию нескольких уровней. Блок-оптимизатор реализован в программной среде Delphi.

4. Разработана проектная система по созданию ЭМП, которая состоит из подсистемы синтеза на основе оптимационных циклов и подсистемы анализа на базе программного комплекса Ansys Electronics Desktop. Проектная система опробована на различных конструктивных вариантах и показала хорошую сходимость с результатами натурного тестирования. Для определения потерь погрешность составила 7.2 %, для определения индукции в рабочем зазоре 5.7 %.

4. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ. РЕЗУЛЬТАТЫ ЛАБОРАТОРНЫХ ИСПЫТАНИЙ. РАЗРАБОТКА ПЕРСПЕКТИВНОЙ БАЗОВОЙ КОНСТРУКЦИИ

Вводные замечания

Анализ теплового состояния при различных режимах работы привода является важной компонентой общего проектирования, поскольку изделие, удовлетворяющее ТЗ по основным характеристикам может при этом иметь недопустимый перегрев якорной обмотки и постоянных магнитов и по это причине быть неработоспособным. Предварительный анализ показал, что к явно выраженным потерям в обмотке могут добавляться потери от вихревых токов в электрически замкнутых контурах магнитной системы. Для различных конструкций потери находятся в диапазоне 100-350 Вт. Несмотря на то, что ЭМП имеет массивную конструкцию, которая может аккумулировать тепло, нарастание температуры в переходных режимах может быть настолько динамичным, что тепловые потоки не смогут быстро распределиться по объему, что приведет к местным перегревам. Особенно к этому критичны постоянные магниты. Если кратковременный перегрев приводит к уменьшению срока службы изоляции, то перегрев магнитов резко снижает их эффективность, которую восстановить невозможно. По этой причине система охлаждения должна быть надежной и эффективной.

Отвести быстро и эффективно указанные выше потери из небольшого объема активных частей ЭМП достаточно сложно. При этом по условиям эксплуатации конструкция должна быть закрытой. Жидкостное охлаждения значительно осложняет весь привод в целом. Кроме этого, она может быть не эффективной, так как жидкий хладагент не может быть подведен к подвижной части ЭМП, которая является источником наибольшего тепловыделения. В этой ситуации имеет смысл рассмотреть возможность применения двухконтурного воздушного охлаждения. Суть его заключается в следующем. Внутренний объем остается герметичным, но при помощи встроенного вентилятора в нем циркулирует воздушный поток, который переносит тепловые потери от нагретых частей якоря к наружным

элементам индуктора. Наружные элементы индуктора имеют развитую поверхность, и тепло с этих поверхностей рассеивается без особых сложностей. Проведем термодинамический и аэродинамические расчеты предлагаемой системы охлаждения.

4.1. Вентиляционный расчет двухконтурной системы охлаждения

Расчет проведем для наиболее перспективной базовой конструкции ЭМП с радиально-тangenциальной системой охлаждения и диамагнитным якорем.

Циркуляция хладагента для внутреннего и внешнего контуров показана на рис.4.1.1.

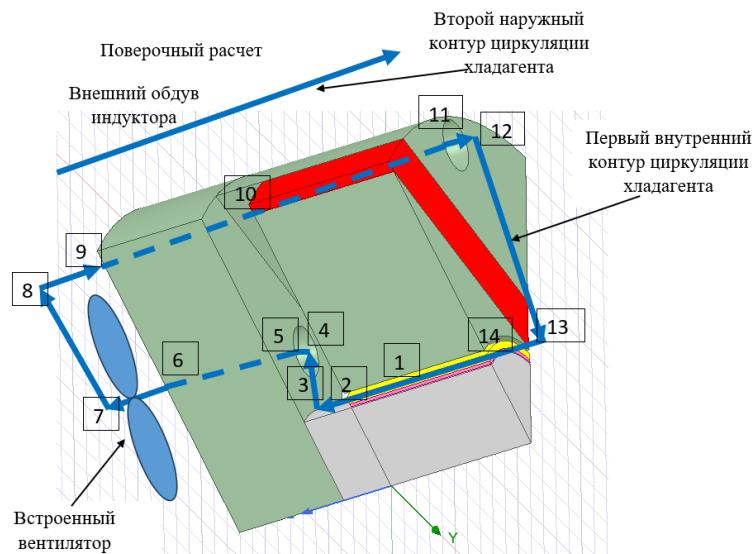


Рис.4.1.1. Схема циркуляции хладагента для внутреннего и внешнего контура
На схеме участки для расчета аэродинамических сопротивлений показаны цифрами в квадратных контурах.

На рисунке 4.1.2 показана аэродинамическая схема первого внутреннего контура движения хладагента.

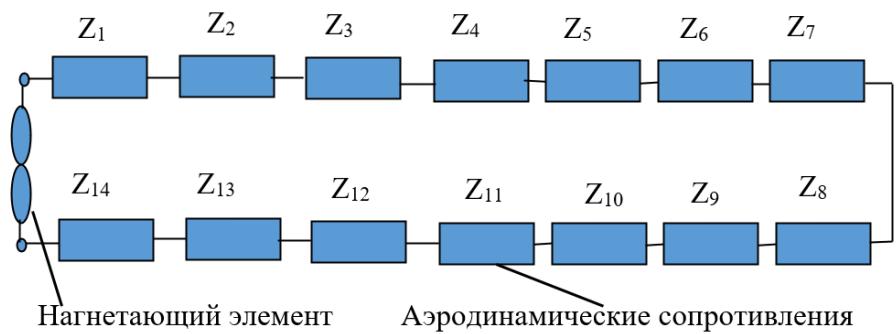


Рис.4.1.2. Аэродинамическая схема внутреннего контура движения хладагента

Определим аэродинамические сопротивления первого внутреннего контура охлаждения.

1. Сопротивление трения хладагента в рабочем зазоре Z_1 (кг/м⁷)

$$Z_1 = \xi_{\text{тр1}} \frac{\rho}{2S_1^2} = 35.8 \frac{0.946}{20.000118^2} = 1.215 \cdot 10^9, \quad (4.1.1)$$

где $\xi_{\text{тр1}}$ – коэффициент аэродинамического сопротивления трения хладагента в рабочем зазоре при ламинарном течении;

ρ – удельная плотность нагретого хладагента (кг/м³);

S_1 – площадь канала в рабочем зазоре (м²).

2. Сопротивление внезапного расширения хладагента при выходе из рабочего зазора Z_2 (кг/м⁷):

$$Z_2 = \xi_{\text{р2}} \frac{\rho}{2S_2^2} = 5.48 \frac{0.946}{20.00359^2} = 2.016 \cdot 10^9, \quad (4.1.2)$$

где $\xi_{\text{р2}}$ – коэффициент аэродинамического внезапного расширения хладагента при выходе из рабочего зазора;

S_2 – площадь расширения после рабочего зазора (м²).

3. Сопротивление внезапного поворота струи хладагента при выходе из рабочего зазора Z_3 (кг/м⁷):

$$Z_3 = \xi_{\alpha3} \frac{\rho}{2S_3^2} = 1.0 \frac{0.946}{2*0.000118^2} = 3.394 \cdot 10^7, \quad (4.1.3)$$

где $\xi_{\alpha3}$ – коэффициент аэродинамического внезапного расширения хладагента при повороте после рабочего зазора;

S_3 – площадь поворота струи после рабочего зазора (м²).

4. Сопротивление внезапного поворота струи хладагента при входе в каналы торца индуктора Z_4 (кг/м⁷):

$$Z_4 = \xi_{\alpha4} \frac{\rho}{2S_4^2} = 1.0 \frac{0.946}{2*0.000118^2} = 3.394 \cdot 10^7, \quad (4.1.4)$$

где $\xi_{\alpha4}$ – коэффициент аэродинамического поворота струи хладагента при входе в каналы торца индуктора;

S_4 – площадь канала торца индуктора (м²).

5. Сопротивление внезапного сужения струи хладагента при входе в каналы торца индуктора Z_5 (кг/м⁷):

$$Z_5 = \xi_{c5} \frac{\rho}{2S_5^2} = 1.0 \frac{0.946}{2*0.000118^2} = 3.394 \cdot 10^7, \quad (4.1.5)$$

где ξ_{c5} – коэффициент аэродинамического внезапного сужения хладагента при входе в каналы торца индуктора;

S_5 – площадь канала сужения в торце индуктора (м^2).

6. Сопротивление внезапного расширения струи хладагента при выходе из каналов торца индуктора Z_6 ($\text{кг}/\text{м}^7$):

$$Z_6 = \xi_{p6} \frac{\rho}{2S_6^2} = 1.0 \frac{0.946}{2*0.0005^2} = 1.037 \cdot 10^5, \quad (4.1.6)$$

где ξ_{p6} – коэффициент аэродинамического внезапного сужения хладагента при входе в каналы торца индуктора;

S_6 – площадь канала внезапного расширения в торце индуктора (м^2).

7. Сопротивление внезапного поворота струи хладагента при выходе из каналов торца индуктора Z_7 ($\text{кг}/\text{м}^7$):

$$Z_7 = \xi_{\alpha7} \frac{\rho}{2S_7^2} = 1.0 \frac{0.946}{2*0.0004^2} = 2.597 \cdot 10^6, \quad (4.1.7)$$

где $\xi_{\alpha7}$ – коэффициент аэродинамического поворота струи хладагента при входе в каналы торца индуктора;

S_7 – площадь канала торца индуктора (м^2).

8. Сопротивление внезапного поворота струи хладагента при входе в верхние каналы торца индуктора Z_8 ($\text{кг}/\text{м}^7$):

$$Z_8 = \xi_{\alpha8} \frac{\rho}{2S_8^2} = 1.0 \frac{0.946}{2*0.0004^2} = 2.597 \cdot 10^6, \quad (4.1.8)$$

где $\xi_{\alpha8}$ – коэффициент аэродинамического поворота струи хладагента при входе в каналы торца индуктора;

S_8 – площадь канала торца индуктора (м^2).

9. Сопротивление внезапного сужения струи хладагента при входе в верхние каналы торца индуктора Z_9 ($\text{кг}/\text{м}^7$):

$$Z_9 = \xi_{c9} \frac{\rho}{2S_9^2} = 1.0 \frac{0.946}{2*0.000118^2} = 3.394 \cdot 10^7, \quad (4.1.9)$$

где ξ_{c9} – коэффициент аэродинамического внезапного сужения хладагента при входе в верхние каналы торца индуктора;

S_9 – площадь канала сужения в торце индуктора (м^2).

10. Сопротивление трения хладагента в каналах индуктора Z_{10} (кг/м⁷):

$$Z_{10} = \xi_{\text{тр10}} \frac{\rho}{2S_{10}^2} = 286.4 \frac{0.946}{2*0.000945^2} = 1.52 \cdot 10^8, \quad (4.1.10)$$

где $\xi_{\text{тр10}}$ – коэффициент аэродинамического сопротивления трения хладагента в каналах индуктора;

S_{10} – площадь каналов индуктора (м²).

11. Сопротивление внезапного расширения струи хладагента при выходе из каналов индуктора Z_{11} (кг/м⁷):

$$Z_{11} = \xi_{\text{p11}} \frac{\rho}{2S_{11}^2} = 1.0 \frac{0.946}{2*0.0005^2} = 1.037 \cdot 10^5, \quad (4.1.11)$$

где ξ_{p11} – коэффициент аэродинамического внезапного сужения хладагента при входе в каналы индуктора;

S_{11} – площадь канала внезапного расширения в индукторе (м²).

12. Сопротивление внезапного поворота струи хладагента при выходе из верхних каналов индуктора Z_{12} (кг/м⁷):

$$Z_{12} = \xi_{\alpha12} \frac{\rho}{2S_{12}^2} = 1.0 \frac{0.946}{2*0.00359^2} = 3.677 \cdot 10^4, \quad (4.1.12)$$

где $\xi_{\alpha12}$ – коэффициент аэродинамического поворота струи хладагента при входе в каналы торца индуктора;

S_{12} – площадь канала торца индуктора (м²).

13. Сопротивление внезапного поворота струи хладагента при выходе из верхних каналов индуктора Z_{13} (кг/м⁷):

$$Z_{13} = \xi_{\alpha13} \frac{\rho}{2S_{13}^2} = 1.0 \frac{0.946}{2*0.00359^2} = 3.677 \cdot 10^4, \quad (4.1.13)$$

где $\xi_{\alpha13}$ – коэффициент аэродинамического поворота струи хладагента при входе в каналы торца индуктора;

S_{13} – площадь канала торца индуктора (м²).

14. Сопротивление внезапного сужения струи хладагента при входе в рабочий зазор Z_{14} (кг/м⁷):

$$Z_{14} = \xi_{c14} \frac{\rho}{2S_{14}^2} = 1.0 \frac{0.946}{2*0.000118^2} = 1.17 \cdot 10^7, \quad (4.1.14)$$

где ξ_{c14} – коэффициент аэродинамического внезапного сужения хладагента при входе в верхние каналы торца индуктора;

S_{14} – площадь канала сужения при входе в воздушный зазор (м^2).

15. Суммарное эквивалентное аэродинамическое сопротивление внутреннего первого контура охлаждения ($\text{кг}/\text{м}^7$):

$$Z_{\text{экв}} = \sum_{i=1}^{14} Z_i = 3.536 * 10^9. \quad (4.1.15)$$

Расход хладагента при обдуве якоря равным $W_p = 1.0 \text{ м}/\text{с}$ составит ($\text{м}^3/\text{с}$):

$$Q_p = W_p S_{\text{як}} = 1.0 * 0.000118 = 1.18 * 10^{-4}. \quad (4.1.16)$$

Напор вентилятора, который обеспечит данный расход при прохождении хладагента по первому внутреннему контуру охлаждения составит ($\text{Н}/\text{м}^2$):

$$H_p = Q_p^2 Z_{\text{экв}} = 1.18^2 * 3.536 * 10^9 = 114.5 \quad . \quad (4.1.17)$$

Мощность вентилятора можно определить по формуле (Вт):

$$P_{\text{вент}} = \frac{Q_p H_p}{\eta_{\text{вент}}} = \frac{1.18 * 10^{-4} * 114.5}{0.02} = 1.03 . \quad (4.1.18)$$

Таким образом, для циркуляции воздуха по первому внутреннему контуру охлаждения вполне будет достаточно мощности стандартного вентилятора, применяемого для охлаждения внутреннего объема системных блоков персональных компьютеров.

4.2. Термодинамический расчет двухконтурной системы охлаждения

Двухконтурное охлаждение было выбрано из-за требований герметичности конструкции по условиям эксплуатации. Задача первого контура циркуляции хладагента заключается в переносе тепловых потерь от обмотки якоря к наружной поверхности индуктора, с которой тепло может быть рассеяно естественной конвекцией.

Для оценки динамики нагрева применим метод эквивалентных схем замещения с учетом накопления тепловой энергии в частях ЭМП [71]. В предлагаемой конструкции такими частями служат обмотка якоря и массивные части индуктора. Тепловой поток первоначально переходит в хладагент, затем в массивные части индуктора и после этого сходит с наружной поверхности

индуктора. На рис.4.2.1. Показано направление движения теплового потока в частях ЭМП.

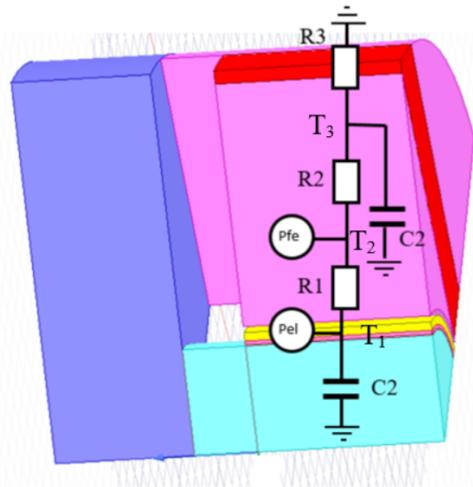


Рис.4.2.1. Направление движения теплового потока в частях ЭМП

На рис.4.2.2. Представлена тепловая схема замещения ЭМП

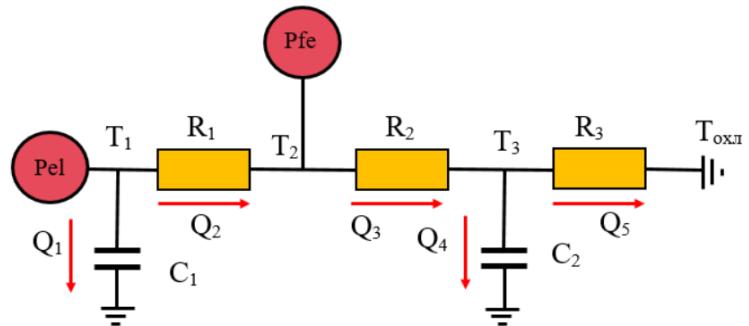


Рис.4.2.2. Тепловая схема замещения ЭМП

Элементы схемы имеют следующий физический смысл:

Pel – ‘электрические потери в обмотке якоря’;

Pfe – потери в частях ЭМП от вихревых токов;

R₁ – сопротивление тепловому потоку при переходе его из обмотки якоря в хладагент;

R₂ – сопротивление тепловому потоку при движении его в массивных частях магнитопровода;

R₃ – сопротивление тепловому потоку при сходе его с наружной поверхности ЭМП;

C₁ – накопитель тепловой энергии в меди обмотки якоря;

C_2 – накопитель тепловой энергии в массивных частях магнитопровода;

T_1 – температура обмотки якоря;

T_2 – температура массивных частей магнитопровода;

T_3 – температура наружной поверхности магнитопровода, с которой сходи тепловой поток;

$T_{\text{охл}}$ – температура окружающей среды;

Q_1, Q_2, Q_3, Q_4, Q_5 – тепловые потоки в частях ЭМП.

Определим тепловые сопротивления и тепловые емкости схемы замещения для конкретной конструкции ЭМП с радиально-тангенциальной системой возбуждения и якорем с диэлектрической гильзой.

Сопротивление тепловому потоку при сходе тепла с обмотки якоря в хладагент первого контура охлаждения ($\text{м}^\circ\text{C}/\text{Вт}$):

$$R_1 = \frac{1}{\alpha_{air} S_{\text{як}}} = \frac{1}{120 * 0.00723} = 1.151, \quad (4.2.1)$$

где – α_{air} коэффициент теплоотдачи с поверхности обмотки якоря при ламинарном движении хладагента со скоростью обдува 1 м/с ($\text{Вт}/(\text{м}^2 \text{°C})$);

$S_{\text{як}}$ – поверхность якоря, обдуваемая хладагентом (м^2).

Сопротивление тепловому потоку при его движении в массивных частях индуктора ($\text{м}^\circ\text{C}/\text{Вт}$):

$$R_2 = \frac{L_{fe}}{\lambda_{fe} S_{fe}} = \frac{0.01}{30 * 0.019} = 0.017, \quad (4.2.2)$$

где L_{fe} – средняя толщина массивных частей магнитопровода (м);

S_{fe} – поперечное сечение на пути движения теплового потока с наружной поверхности ЭМП (м^2);

λ_{fe} – средняя удельная теплопроводность массивных частей магнитопровода ($\text{Вт}/(\text{м}^\circ\text{C})$).

Сопротивление тепловому потоку при сходе с внешней поверхности индуктора ($\text{м}^\circ\text{C}/\text{Вт}$):

$$R_3 = \frac{1}{\alpha_{\text{охл}} S_{\text{охл}}} = \frac{1}{50 * 0.03} = 0.661, \quad (4.2.3)$$

где $\alpha_{\text{охл}}$ – коэффициент теплоотдачи с внешней поверхности индуктора ($\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{C})$);

$S_{\text{охл}}$ – площадь схода телового потока с внешней поверхности индуктора (м^2).

Емкость накопителя тепловой энергии в обмотке якоря (м^2):

$$C_1 = C_{cu} M_{cu} = 400 * 0.063 = 25.236, \quad (4.2.4)$$

где C_{cu} – удельная теплоемкость меди ($\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{C})$);

M_{cu} – масса якорной обмотки (кг).

Емкость накопителя тепловой энергии в частях индуктора ($\text{Вт} \cdot \text{с}/\text{C}$):

$$C_2 = C_{fe} M_{fe} = 500 * 3.6 = 1803, \quad (4.2.5)$$

где C_{fe} – удельная теплоемкость стали ($\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{C})$);

M_{fe} – масса массивных частей магнитопровода индуктора (кг).

Расчеты проводились для электрических потерь в обмотке якоря 100 Вт и потерь от вихревых токов 40 Вт.

Составим систему уравнений теплового равновесия:

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{el} = Q_1 + Q_2 \\ P_{fe} + Q_2 = Q_3 \\ Q_3 = Q_4 + Q_5 \\ Q_1 = C_1 \frac{dT_1(t)}{dt} \\ Q_2 = R_1(T_1(t) - T_2(t)) \\ Q_3 = R_2(T_2(t) - T_3(t)) \\ Q_4 = C_2 \frac{dT_3(t)}{dt} \\ Q_5 = R_3(T_3(t) - T_{\text{охл}}) \end{array} \right. \quad (4.2.6)$$

Система содержит 8 уравнений и 8 неизвестных. Среди неизвестных тепловые потоки Q_1 , Q_2 , Q_3 , Q_4 , Q_5 и температуры в узлах схемы T_1 , T_2 , T_3 . Для решения системы уравнений стандартными процедурами преобразуем ее к следующему матричному виду:

$$\begin{bmatrix} \frac{dT_1(t,T)}{dt} \\ \frac{dT_3(t,T)}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{P_{el} - R_1 T_1(t) + R_1 \frac{P_{fe} + R_1 T_1(t) + R_2 T_3(t)}{R_2 + R_1}}{C_1} \\ \frac{R_2 \left(\frac{P_{fe} + R_1 T_1(t) + R_2 T_3(t)}{R_2 + R_1} - T_3(t) \right) - R_3 (T_3(t) - T_{\text{охл}})}{C_2} \end{bmatrix} \quad 4.2.7$$

Данная система уравнений была решена в Mathcad методом Рунге-Кутта.

Результаты решения в интервале времени 0-180 с представим в графическом виде для температуры обмотки якоря и температуры наружной поверхности корпуса (рис.4.2.3)

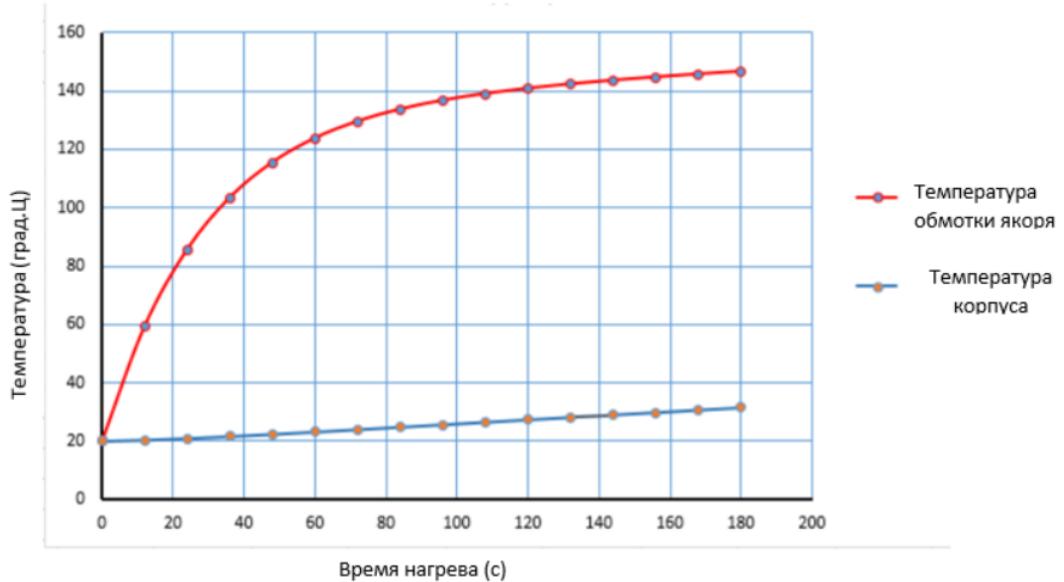


Рис.4.2.3. Температура обмотки якоря и температура наружной поверхности корпуса в зависимости от времени нагрева

Тепловая модель показывает эффективность двухконтурной системы охлаждения. Нагрев обмотки якоря не превышает класса нагревостойкости изоляции F. Температура наружной части магнитопровода (корпуса) не превышает 40 градусов Цельсия. Постоянные магниты находятся в непосредственном соприкосновении с концентратором и вкладышем (деталями корпуса), следовательно, температура постоянных магнитов находится ниже рабочей температуры для сплава неодим-железо-бор 150 °C.

4.3. Формирование электронного блока управления для ЭМП

ЭМП для функционирования в составе гидроусилителя подключается к электронному блоку управления (ЭБУ) [90]. ЭМП и ЭБУ представляют собой единый электротехнический комплекс следящего гидроусилителя.

ЭБУ формирует управляющий электрический сигнал на ЭМП в зависимости от электрического сигнала задания и обеспечения обратной связи по перемещению золотника.

ЭБУ должен быть с цифровой системой управления, при этом иметь возможность обработки аналоговых сигналов. Программирование микроконтроллера для ЭБУ должно осуществляться машинно-ориентированным языком низкого уровня с закрытым кодом алгоритма.

Опишем кратко схемотехнические решения, принятые для ЭБУ.

Дискретные входы

Входными сигналами для ЭБУ служат:

- вход задания положения;
- вход разрешения работы;
- вход выбора датчика обратной связи (гидроцилиндр, золотник);
- интерфейс датчика положения поршня-штока гидроцилиндра;
- интерфейс датчика положения золотника.

Входные сигналы должны удовлетворять следующим требованиям:

- максимально допустимое напряжение на дискретных входах (разрешения работы и выбора датчика обратной связи) 50 В;
- напряжение на дискретных входах, при котором должен быть зафиксирован переход от низкого логического уровня к высокому логическому уровню от 8 до 12 В;
- максимально допустимое напряжение на дискретных входах (разрешения работы и выбора датчика обратной связи) 50 В;
- напряжение на дискретных входах, при котором должен быть зафиксирован переход от высокого логического уровня к низкому логическому уровню от 1 до 5 В;
- минимально допустимое напряжение на дискретных входах –50 В.

На Рис.4.3.1 показана цепь обработки дискретных входных сигналов для одного из дискретных входов. Такая же цепь используется для всех остальных входов обработки сигнала.

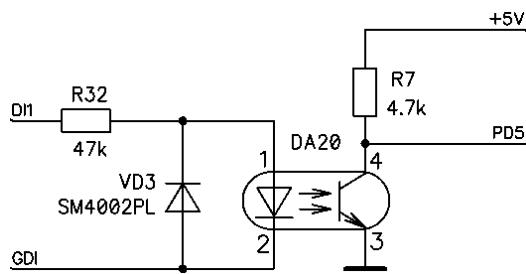


Рис.4.3.1 Цепь обработки сигнала дискретного входа

Цепи дискретных входов и выходов должны быть гальванически изолированы от остальных цепей ЭБУ. Для удовлетворения этого требования применяется оптрон DA20. В качестве оптрана выбрана микросхема 817С-С, которая является распространенной и доступной [120]. Входной сигнал подается между общей для всех дискретных входов цепью GDI и цепью DI1 (цепи DI2, DI3 для других входов). Входной ток оптрана ограничивается на уровне 0,5 мА резистором R32, номинальное сопротивление которого выбрано равным 47 кОм. Рассеиваемая мощность на резисторе R32 при стандартном входном напряжении 24 В составляет 12,3 мВт, а при максимально допустимом напряжении 50 В – 53 мВт. Диод VD3 защищает диод оптрана DA20 от пробоя обратным напряжением в том случае, если напряжение в цепи DI1 станет отрицательным. Это может произойти в результате воздействия помех на кабель, соединяющий дискретный вход с источником сигнала.

В коллекторной цепи оптрана DA20 установлен резистор R7 номиналом 4,7 кОм, подключенный к цепи питания +5V ЭБУ. Сопротивление резистора выбрано таким образом, чтобы обеспечить необходимые пороги напряжения переключения между низким и высоким логическими уровнями на коллекторе оптрана, подключенном к цепи PD5. Эта цепь подключена к порту PD5 дискретного ввода микроконтроллера, имеющему при выбранном напряжении питания 3 В порог переключения от низкого уровня к высокому 2 В и порог переключения от высокого уровня к низкому, равный 1 В. Для подбора сопротивления резистора R7 было выполнено моделирование режимов работы схемы. Результат расчета передаточной характеристики приведен на Рис.4.3.2.

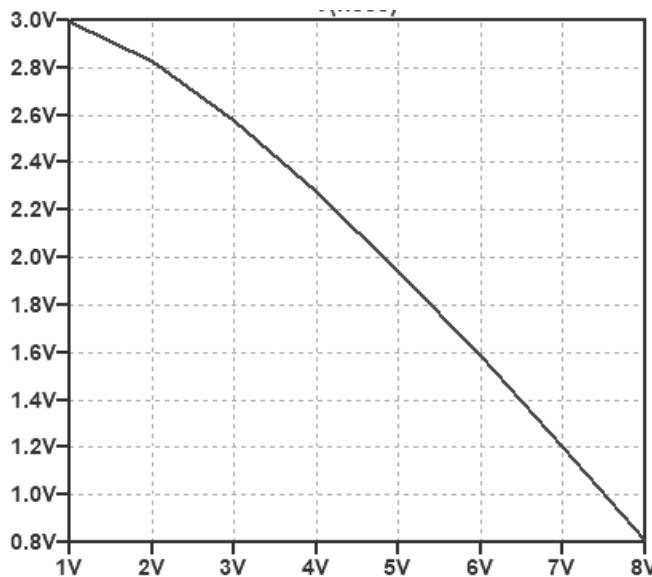


Рис.4.3.2. Передаточная характеристика каскада с оптроном

Результаты расчета подтверждают выполнение требований к пороговым напряжениям логических уровней. Низкий уровень (с учетом инверсии) будет зафиксирован при напряжении 4,8 В (должно быть от 1 В до 5 В). Высокий уровень будет зафиксирован при напряжении 8,1 В (должно быть от 8 В до 12 В).

Дискретные выходы

ЭБУ должен сигнализировать о текущем режиме работы и текущем состоянии с помощью формирования дискретных выходных сигналов, сигнализирующих:

- о выполнении позиционирования;
- о завершении позиционирования;
- о возникновении неисправностей или ошибок в работе.

Для ЭБУ установлены следующие требования:

- максимально допустимое напряжение, приложенное к дискретным выходам,

50 В;

- максимально допустимый ток через дискретные выходы 50 мА;

С учетом требования о гальванической изоляции входных и выходных цепей от остальных цепей ЭБУ была составлена принципиальная электрическая схема, приведенная на рис.4.3.3. Принципиальная схема одинакова для всех трех дискретных выходов, поэтому показан только один выходной каскад.

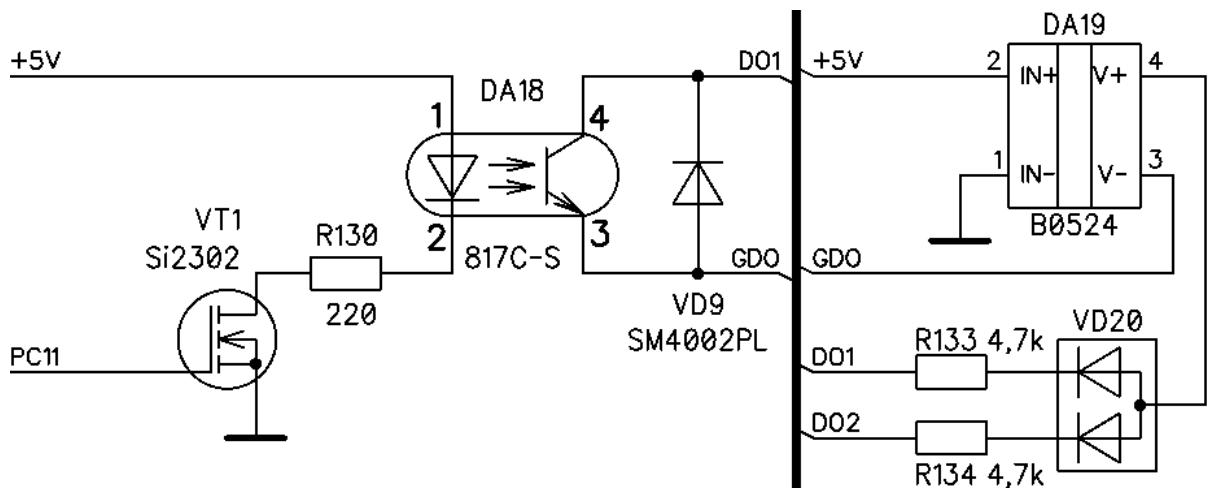


Рис.4.3.3. Схема дискретного выходного каскада

Выходной сигнал подключается между цепями D01 и GDO. При этом, цепь GDO является общей для всех дискретных выходов. Диод VD9 защищает выходной транзистор оптранса от пробоя обратным напряжением, которое может возникнуть при неправильном подключении выходных цепей, или в результате воздействия помех на выходные цепи. Гальваническая изоляция выходных цепей обеспечивается применением оптранса DA18. Выбранный оптранс 817C-S обеспечивает выполнение требований в части максимально допустимого напряжения (50 В) и максимально допустимого тока (50 мА). Приведенная на рис.4.3.3 схема обеспечивает тип дискретного выхода, называемый «открытый коллектор», что определяет способ подключения нагрузки – последовательно между положительным выводом внешнего источника питания и коллектором выходного транзистора оптранса DA18. Для повышения функциональности дискретных выходов в состав электрической схемы ЭБУ дополнительно введен изолированный источник питания изолированных цепей, выполненный на микросхеме DA19 со стандартным выходным напряжением 24 В. Напряжение этого источника подается на дискретные выходы через развязывающие диоды VD20 и токоограничивающие резисторы R133, R134. Светодиод оптранса анодом подключен к источнику напряжения 5В, а катодом - к управляющей цепи, состоящей из токоограничивающего резистора R130 и полевого транзистора VT1. Управление этой цепью осуществляется через затвор VT1, подключенный к порту PC11 (PD8, PB15) микроконтроллера DD1. Полевой транзистор VT1 выбран с

целью упрощения цепи управления и минимизации мощности, затрачиваемой на управление, что обеспечивает снижение и стабилизацию нагрузки на стабилизатор DA11, обеспечивающий напряжение питания цифровых и аналоговых цепей микроконтроллера DD1, чувствительных к пульсациям напряжения питания, а также временному и температурному дрейфу этого напряжения.

Аналоговые входы

ЭБУ должен содержать вход задания положения (для задания положения золотника и положения поршня).

Приведем технические характеристики аналоговых входов:

- диапазон входных напряжений для входов задания положения золотника и задания положения поршня-штока гидроцилиндра по напряжению от -10 до $+10$ В;
- диапазон входных токов для входов задания положения золотника и задания положения поршня-штока гидроцилиндра по току от -20 до $+20$ мА;

Таким образом, входы задания положения должны иметь два режима работы: по напряжению и по току.

Представленная на рис.4.3.4 принципиальная схема реализует вышеуказанные требования.

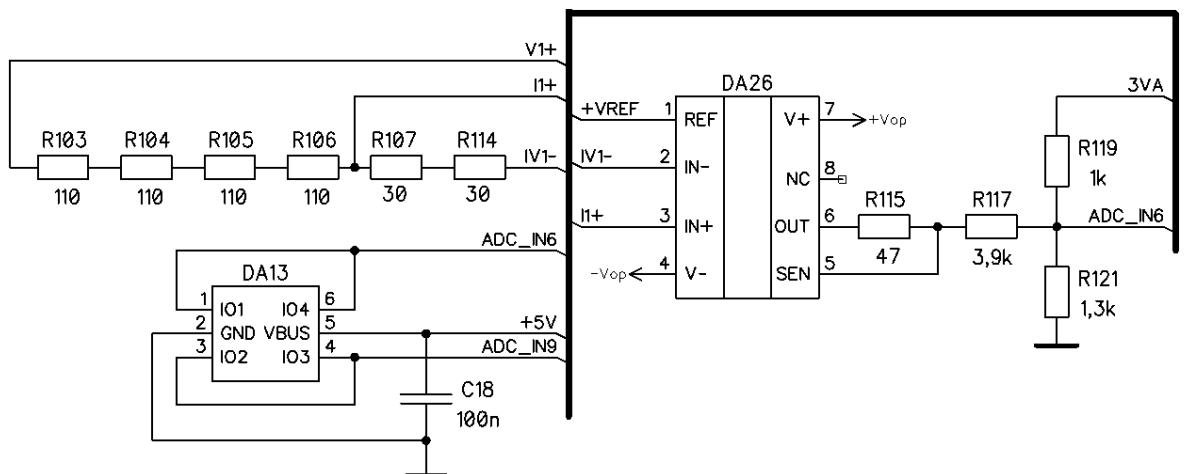


Рис.4.3.4 Принципиальная схема аналоговых входов

Для получения высокого коэффициента подавления синфазных помех (100 дБ и более) в качестве основного элемента для приема входных сигналов используется дифференциальный усилитель марки TPA9361-SO1R (позиционное обозначение DA26) с коэффициентом усиления 1 [119].

В режиме входа по току входной сигнал подключается непосредственно к инвертирующему и не инвертирующему входам дифференциального усилителя, зашунтированным последовательно соединенными измерительными резисторами R107, R114, которые выполняют преобразование тока в напряжение. Сопротивление резисторов R107, R114 подобрано таким образом, чтобы при изменении тока на аналоговом входе в диапазоне ± 25 мА получить падение напряжения в диапазоне $\pm 1,5$ В.

В режиме входа по напряжению входной сигнал подается между цепями V1+, IV1- и, таким образом, оказывается подключенным к цепочке из последовательно соединённых резисторов R103...R106, R107, R114. Эквивалентное сопротивление этой цепочки подобрано таким образом, чтобы при входном напряжении ± 10 В ток, протекающий по цепи, был равен ± 20 мА. Таким способом обеспечивается выполнение установки диапазонов входных напряжений и токов для аналоговых входных сигналов.

Резистор R115, подключенный к выходу DA26, ограничивает выходной ток дифференциального усилителя и демпфирует колебания в переходных процессах при скачкообразном изменении входных сигналов, а также при резком изменении нагрузки на выходе микросхемы. Цепочка резисторов R117, R119, R121 представляет собой делитель напряжения, который масштабирует выходной сигнал дифференциального усилителя и, одновременно, добавляет к нему смещение. Указанные элементы необходимы для преобразования выходного напряжения дифференциального усилителя в диапазоне ± 10 В к диапазону напряжений 0...3 В, необходимому для работы встроенного АЦП микроконтроллера DD1. Для защиты входов АЦП микроконтроллера DD1 от недопустимо высоких и недопустимо низких напряжений используется специализированная распространенная микросхема USBLC-4 (DA13).

Аналоговые выходы

Для ЭБУ предусмотрена возможность мониторинга текущих параметров с помощью аналоговых выходов, предназначенных для этого. Дополнительно устанавливается диапазон токов на аналоговых выходах мониторинга текущих

параметров, мА, от -20 , до $+20$. Для удовлетворения указанных требований составлены два варианта принципиальной схемы для реализации аналоговых выходов, а также проведены расчеты и моделирование работы этих схем.

Первый вариант использует в качестве базового элемента специализированную интегральную микросхему XTR305, которая представляет собой промышленный драйвер аналогового выхода с режимами работы как по току, так и по напряжению. Особенностями этой микросхемы являются:

- конфигурация выхода: по току, по напряжению;
- выходное напряжение: ± 10 В (до ± 17.5 В при питании ± 20 В);
- выходной ток: ± 20 мА;
- напряжение питания: до 40 В;
- выход наличия короткого замыкания или обрыва цепи;
- тепловая защита;
- защита от перегрузки.

Основным преимуществом такого решения являются высокие эксплуатационные показатели в части стабильности (отклонение не более 10^{-6}) и нелинейности (не более 0,1%) коэффициента усиления. Принципиальная схема для одного выходного канала приведена на рис.4.3.5.

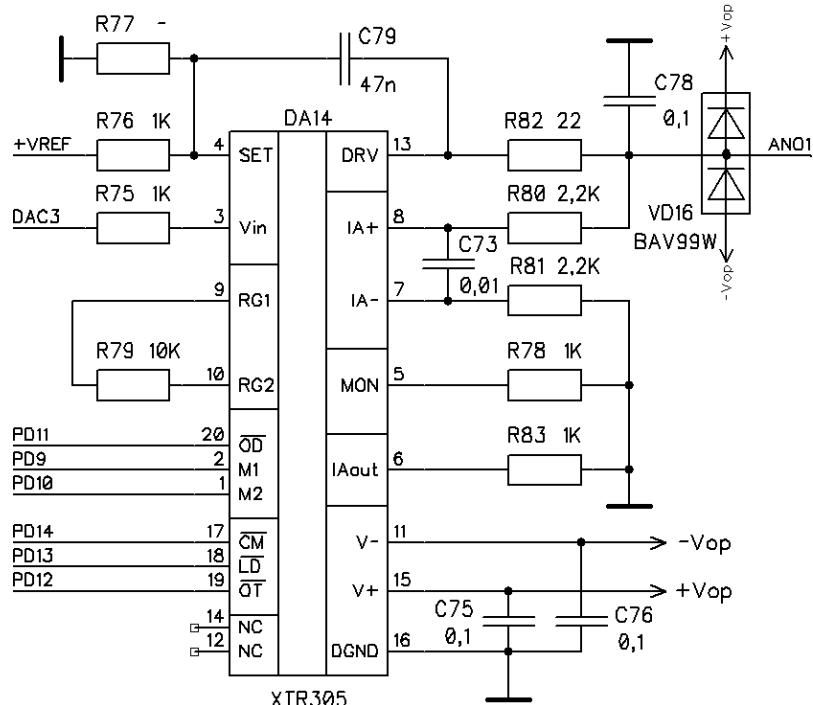


Рис.4.3.5. Схема формирования сигнала аналогового выхода

Для микросхемы XTR305 используется стандартная схема включения, приведенная в её техническом описании [118].

Интерфейс датчиков положения

ЭБУ должен обеспечивать формирование напряжения на обмотке якоря ЭМП в зависимости от сигналов, поступающих на его входы, в том числе:

- интерфейс датчика положения поршня-штока гидроцилиндра;
- интерфейс датчика положения золотника.

В качестве датчика положения поршня-штока гидроцилиндра и датчика положения золотника ВЗП были выбраны датчики, имеющие одинаковый принцип работы, чувствительным элементом (первичным преобразователем) которых является линейный дифференциальный трансформатор (далее – ЛДТ). Интерфейсы датчиков имеют идентичные схемотехнические решения и одинаковые номиналы элементов, поэтому рассматривается только интерфейс датчика положения поршня-штока гидроцилиндра. Для работы ЛДТ необходимо сформировать переменное напряжение, подаваемое на первичную обмотку трансформатора и измерить переменное напряжение, получаемое со вторичной обмотки.

На рис. 4.3.6 показана схема формирования напряжения возбуждения. На вход DAC1 поступает синусоидальное напряжение, сформированное встроенным цифро-аналоговым преобразователем микроконтроллера DD1. Также рассматривался вариант, когда на входе DAC1 с помощью одного из встроенных таймеров-счетчиков микроконтроллера DD1 формируется импульсное напряжение, модулированное по синусоидальному закону. Для выделения среднего значения импульсного сигнала используется фильтр низких частот третьего порядка, выполненный на операционном усилителе DA6.1 и элементах C28, C29, C32, C33, R33, R35, R36, R37 по схеме с несколькими обратными связями.

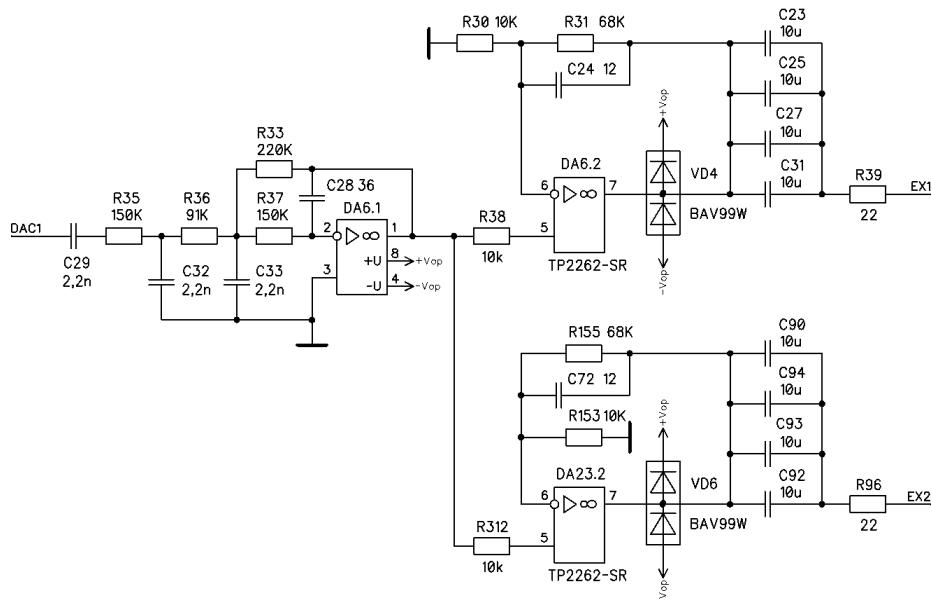


Рис.4.3.6. Формирование напряжения возбуждения для датчиков положения

Частота среза фильтра выбрана равной частоте напряжения возбуждения ЛДТ, которая, в свою очередь, выбрана равной 3 кГц. Номиналы элементов фильтра низких частот рассчитаны и оптимизированы для уменьшения влияния разброса их параметров на характеристики фильтра. Далее выполнено численное моделирование электрических процессов фильтра. Результат моделирования показан на рис.4.3.7. При моделировании в качестве входного сигнала $V(\text{in})$ был сформирован импульсный сигнал с широтно-импульсной модуляцией синусоидальным напряжением и несущей частотой 90 кГц. На рис.4.3.7 видно, что выходной сигнал $V(\text{out})$ представляет собой кривую без видимых пульсаций напряжения и имеет постоянное смещение (около 7,5 В), которое было устранено путем добавления в схему формирования разделительного конденсатора С29.

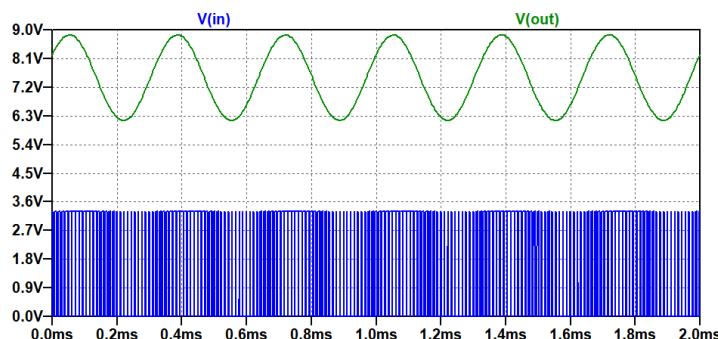


Рис.4.3.7. Результаты моделирования фильтра низких частот

Для оценки качества полученного на выходе фильтра синусоидального напряжения был выполнен его спектральный анализ. Спектр сигнала показан на рис.4.3.8. Все составляющие спектра сигнала справа от частоты среза фильтра имеют амплитуды с уровнями ниже -80 дБ от уровня основной гармоники. Наибольшие амплитуды имеют 3 гармоника (-82 дБ) и несколько гармоник с частотами, близкими к несущей частоте импульсного сигнала (90 кГц). Вычисленное по результатам моделирования значение коэффициента гармонических искажений выходного сигнала составило $0,002\%$, что позволяет оценить использование предложенного способа формирования сигнала возбуждения и схемотехнических решений для его реализации, как обеспечивающих высокое качество напряжения и потенциально высокую точность измерений, выполняемых с помощью датчиков положения.

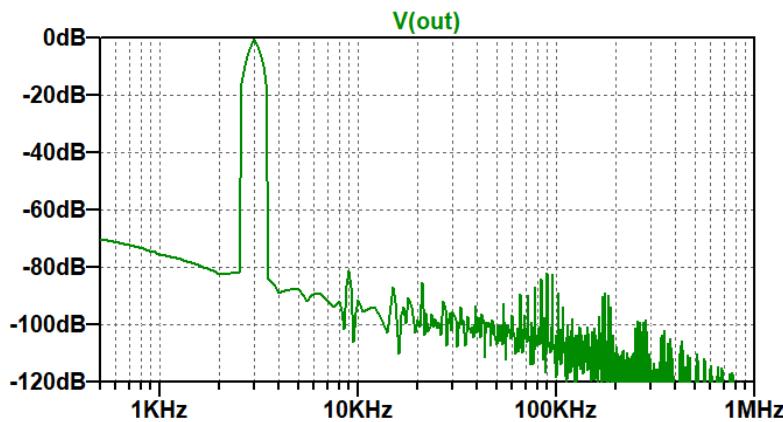


Рис.4.3.8. Спектр сигнала возбуждения ЛДТ

Полученный на выходе фильтра сигнал масштабируется с помощью операционного усилителя DA6.2 (DA23.2 для интерфейса датчика положения золотника ВЗП) для получения на выходах возбуждения датчиков положения EX1, EX2 синусоидального напряжения с амплитудой ± 10 В. Для окончательной фильтрации постоянной составляющей в схему формирования введены конденсаторы C23, C25, C27, C31. Диодная сборка VD4 защищает выход операционного усилителя DA6.2 от недопустимо высоких и низких напряжений, а также от протекания аварийных токов.

Для обработки сигнала вторичной обмотки ЛДТ датчика положения поршня-штока разработана схема, приведенная на рис.4.3.9. Цепи обработки сигнала имеют два канала, поскольку кроме напряжения вторичной обмотки, обрабатывается также сигнал возбуждения, поступающий на первичную обмотку. Таким способом существенно уменьшается погрешность измерения, связанная с нестабильностью напряжения возбуждения, а также уменьшается влияние погрешности аналого-цифрового преобразователя DA32, в качестве которого выбран доступный аналог АЦП PCM1808 – MS1808 [121]. Использование внешнего АЦП при наличии встроенного АЦП микроконтроллера DD1 обусловлено необходимостью получения высокой разрешающей способности определения положения, принятой равной 1 мкм при полном ходе поршня-штока 100 мм.

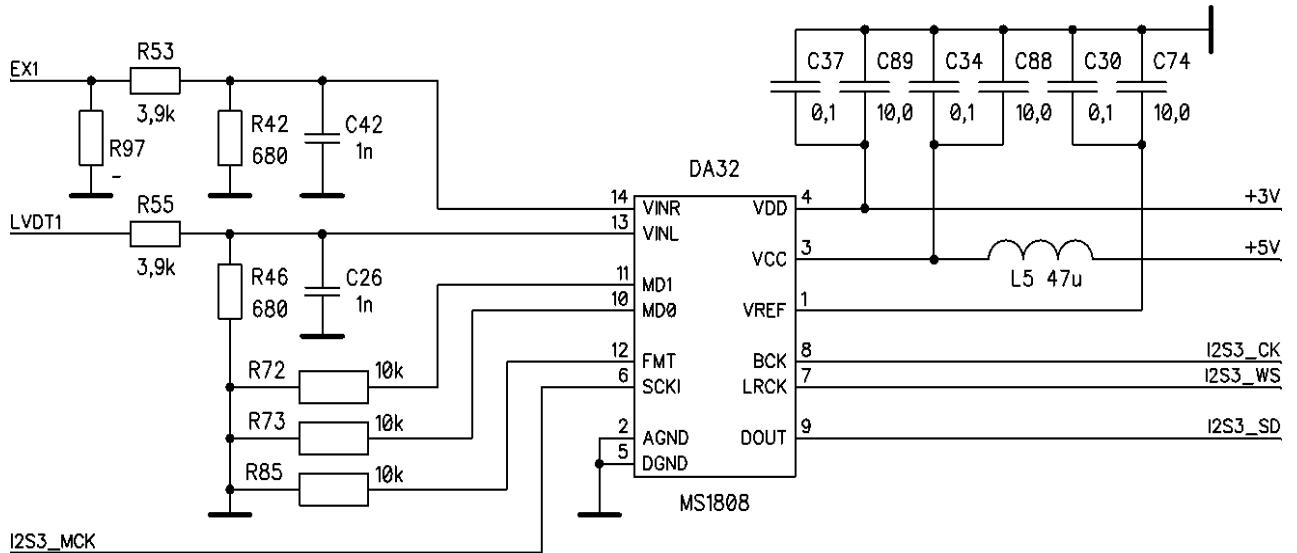


Рис.4.3.9. Схема обработки сигнала положения поршня-штока

Сигнал возбуждения EX1 и сигнал, поступающий со вторичной обмотки ЛДТ имеют амплитуду 10 В, поэтому для ослабления до уровня 1,5 В, необходимого для работы АЦП, в схему обработки введены делители напряжения R53, R42 и R55, R46. Остальные элементы обеспечивают питание и необходимый режим работы DA32 и выбраны в соответствии с рекомендациями, приведенными в техническом описании. Для передачи оцифрованных данных, АЦП DA32 подключен к интерфейсу I2S3 микроконтроллера DD1.

Для обработки сигнала вторичной обмотки ЛДТ датчика положения золотника ВЗП разработана схема, приведенная на рис.4.3.10 Для оцифровки сигнала

используется встроенный АЦП микроконтроллера DD1 с разрешающей способностью, обеспечиваемой 12-разрядной архитектурой АЦП последовательного приближения. Этого вполне достаточно для определения положения золотника ВЗП. Для согласования уровней напряжения на вторичной обмотке ЛДТ и на входе АЦП, а также для уменьшения уровня синфазных помех, в схеме обработки используются дифференциальные усилительные каскады, выполненные на операционных усилителях DA4.1, DA4.2. Элементы R6, R8, R14, R15 (R18, R19, R24, R25) обеспечивают необходимый коэффициент усиления, их номиналы рассчитаны таким образом, чтобы при напряжении на входе 10 В, выходное напряжение дифференциальных усилителей было 3,3 В.

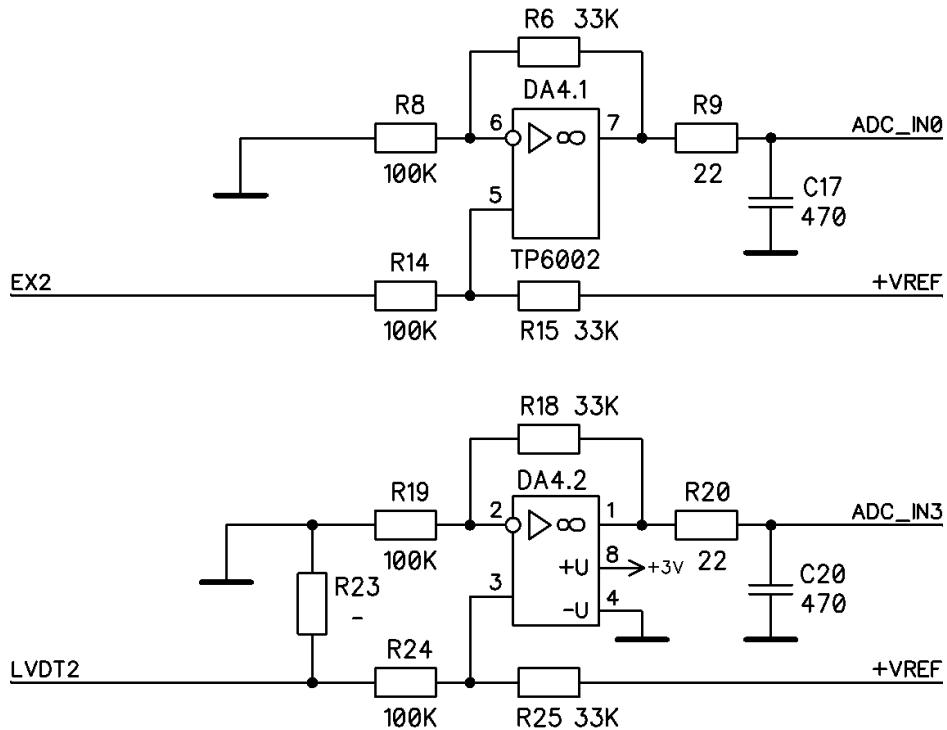


Рис.4.3.10. Схема обработки сигнала положения золотника ВЗП

Интерфейс USB

ЭБУ должен обеспечивать формирование напряжения на обмотке якоря ЭМП в зависимости от сигналов, поступающих на его входы, в том числе, через интерфейс USB. Там же должна быть предусмотрена возможность настройки режимов работы, мониторинга текущих параметров и управления ЭБУ с помощью цифрового интерфейса USB.

Для выполнения указанных требований был выбран микроконтроллер DD1, имеющий встроенный интерфейс USB, а в состав электрической схемы ЭБУ введены элементы, показанные на рис.4.3.11. Разъем XP1 предназначен для подключения к ЭБУ внешним кабелем. Тип соединителя выбран в соответствии со стандартом USB Type-C. Диод VD1 обеспечивает питание информационных цепей ЭБУ от подключенного в разъем USB внешнего кабеля в процессе настройки и регулировки при изготовлении ЭБУ, обновления встроенного программного обеспечения, а также в процессе наладки системы управления заказчиком. Микросхема DA2 введена в состав электрической схемы ЭБУ для защиты линий интерфейса USB от перенапряжений, возникающих при разряде статических зарядов, накопленных на внешних конструкциях или на теле человека.

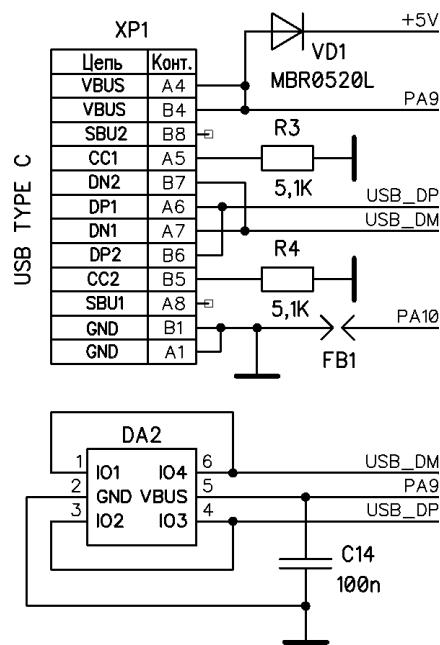


Рис.4.3.11. Принципиальная схема интерфейса USB

Интерфейс Ethernet

ЭБУ должен обеспечивать формирование напряжения на обмотке якоря ЭМП в зависимости от сигналов, поступающих на его входы, в том числе, по интерфейсу Ethernet. Должна быть предусмотрена возможность настройки режимов работы, мониторинга текущих параметров и управления ЭБУ с помощью интерфейса Ethernet. Интерфейс Ethernet должен обеспечивать сквозное прохождение сигналов при отсутствии питания или при зафиксированном нарушении нормального

функционирования ЭБУ. Конструктивные требования предусматривают подключение интерфейса Ethernet с помощью стандартного соединителя RJ45.

Для выполнения указанных требований разработана принципиальная электрическая схема, представленная на рис.4.3.12.

Аппаратный и канальный уровень интерфейса обеспечивается микросхемой DA32 (KSZ8963RLLI) [122], имеющей в составе три приемопередатчика, два из которых подключены к физическим интерфейсам Ethernet, а третий подключен к микроконтроллеру с помощью интерфейса RMII. Такая организация позволяет построить с помощью имеющихся интерфейсов Ethernet информационную сеть с кольцевой топологией, причем без использования дополнительных маршрутизаторов, что позволяет получить высокую скорость обработки сетевых сообщений, необходимую для систем управления реального времени.

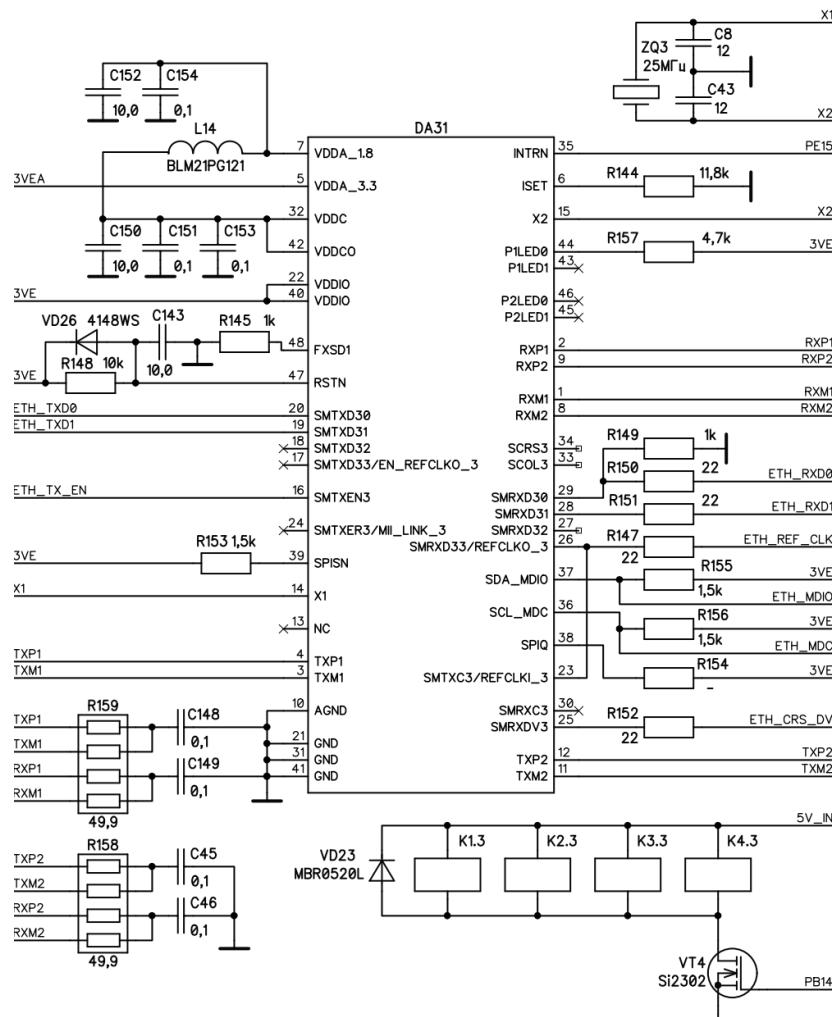


Рис.4.3.12. Принципиальная схема интерфейса Ethernet

Для получения информации о сквозном прохождении сигналов в схему интерфейса введены реле K1...K4. Транзистор VT4 обеспечивает подключение обмоток этих реле к напряжению источника питания 5В. Контакты реле коммутируют сигналы, поступающие от разъемов RJ45 (TX1+, TX1–RX1+, RX1–, TX2+, TX2–, RX2+, RX2–). При отключенном питании ЭБУ нормально замкнутые контакты реле обеспечивают прямое соединение (Bypass) одноименных сигналов с индексами 1 и 2. При включении питания ЭБУ происходит автоматическая стартовая проверка состояния всех узлов и в случае, если будет зафиксировано исправное состояние проверяемых узлов, микроконтроллер установит высокий уровень на выводе PB14, что приведет к включению катушки реле и переключению их контактов. В этом состоянии выводы интерфейсов будут подключены к трансформаторам T16 T2, которые обеспечивают гальваническую изоляцию. Вторичные обмотки трансформаторов подключены непосредственно к выводам DA32, и, параллельно с ними, к терминирующим резисторным сборкам R158, R159. Остальные элементы схемы обеспечивают необходимые режимы работы микросхемы DA32 и выбраны в соответствии с её техническим описанием [121].

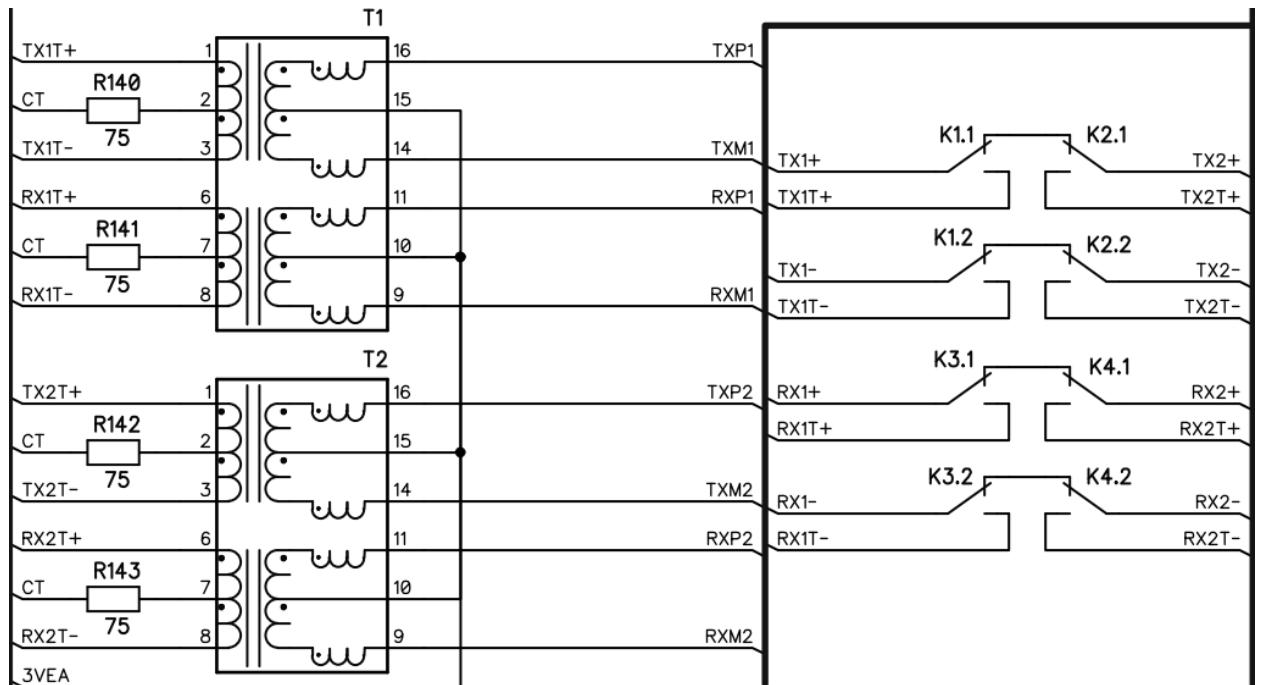


Рис.4.3.13. Коммутация сигналов интерфейса Ethernet

Силовая часть

Силовая часть электрической схемы ЭБУ предназначена для выполнения требований в части формирования управляющего электрического сигнала (напряжения) на обмотке якоря электромеханического преобразователя. При этом параметры силовой части были рассчитаны таким образом, чтобы обеспечить выполнение следующих требований:

- частота изменения среднего значения выходного напряжения не менее 300 Гц;
- номинальный действующий выходной ток в длительном режиме не менее 5 А;
- максимальный действующий выходной ток в течение 0,1 с, не менее – 16 А;
- напряжение питания от 18 до 52 В;
- род потребляемого тока – постоянный;
- потребляемая мощность при номинальном выходном токе не более 300 Вт.

В ЭБУ должны быть реализованы защиты следующих цепей от превышения максимально допустимых токов:

- цепей, подключаемых к источнику питания;
- цепей, подключаемых к ЭМП.

В результате проектирования была составлена электрическая схема силовой части ЭБУ (рис.4.3.14), удовлетворяющая указанным выше требованиям. Поток электрической энергии, поступающей от источника питания ЭБУ, регулируется с помощью полевых транзисторов VT10...VT15, (IRFB3607PBF), управляемых непосредственно от микроконтроллера DD1. Микросхемы DA15...DA17 (LM5109BMAX/NOPB) обеспечивают формирование управляющих напряжений для транзисторов VT10...VT15, имеющих нижеуказанные параметры:

- тип транзистора: MOSFET;
- полярность: N;
- максимальная рассеиваемая мощность (Pd): 140 W;
- предельно допустимое напряжение сток-исток |Uds|: 75 V;
- предельно допустимое напряжение затвор-исток |Ugs|: 20 V;

- пороговое напряжение включения $|U_{gs(th)}|$: 4 V;
- максимально допустимый постоянный ток стока $|Id|$: 80 A;
- максимальная температура канала (T_j): 175 °C;
- общий заряд затвора (Q_g): 56 nC;
- время нарастания (tr): 110 ns;
- выходная емкость (C_d): 280 pF;
- сопротивление сток-исток открытого транзистора (R_{ds}): 0.009 Ohm;
- тип корпуса: TO-220AB.

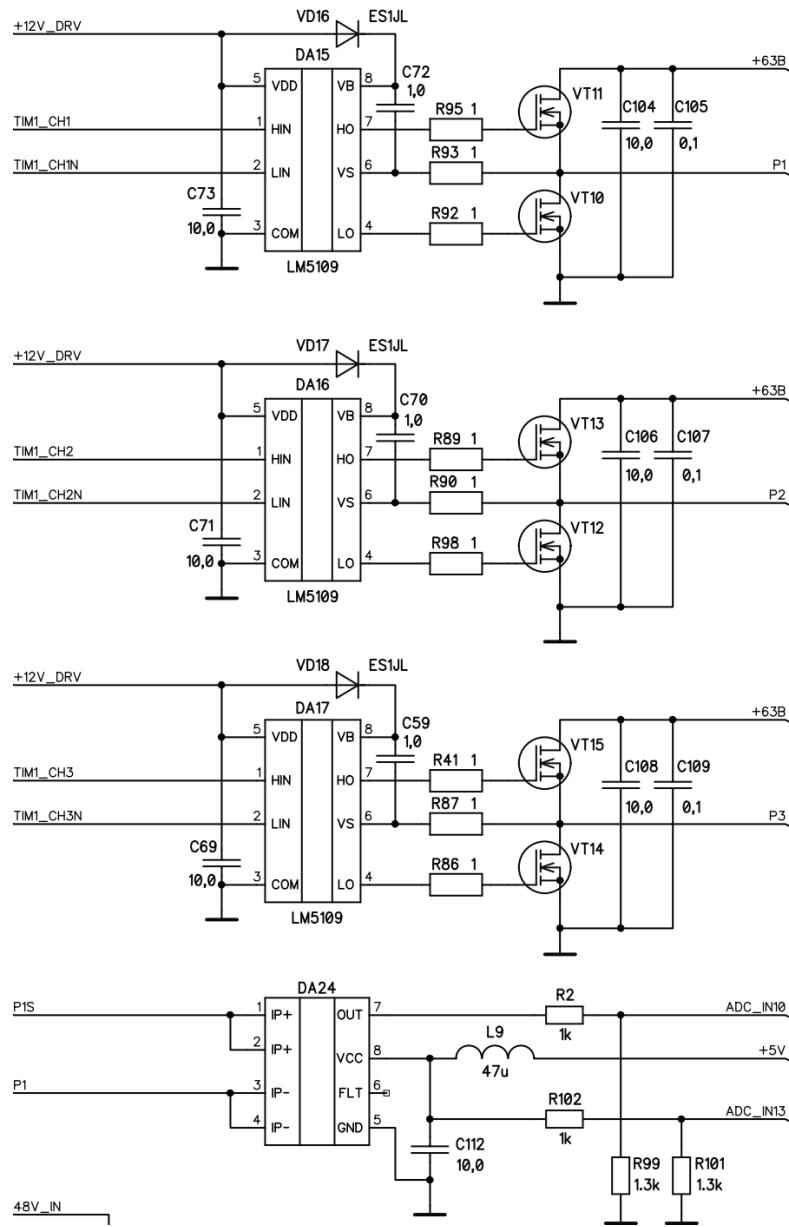


Рис. 4.3.14. Электрическая схема силовой части ЭБУ

Схема соединения транзисторов VT10...VT15 представляет собой трехфазный транзисторный мост, состоящий из трех одинаковых полумостов, в каждом из которых включено по два транзистора. Транзисторы VT14, VT15 совместно с дросселем L6 (рис.4.3.14) выполняют функцию преобразователя напряжения для питающих напряжений (от 18 В до 52 В). Для любого значения напряжения питания из требуемого диапазона с помощью повышающего преобразователя внутри ЭБУ формируется стабилизированное напряжение 52 В для питания обмотки якоря ЭМП в длительном режиме и напряжение 63 В для питания в кратковременном режиме (в течение 0,1 с). Полумосты на транзисторах VT10, VT11 и VT12, VT13 обеспечивают питание обмотки якоря ЭМП переменным напряжением, получаемым из постоянного напряжения, получаемого на выходе повышающего преобразователя напряжения. Алгоритмы управления транзисторами обеспечивают необходимые режимы работы ЭМП. На рис.4.3.14 показаны входные цепи питания силовой части ЭБУ. Защита цепи питания от превышения максимально допустимых токов обеспечивается быстродействующим предохранителем FU1 с номинальным током 10А. Микросхема DA24 (рис.4.3.14) включена в состав электрической схемы ЭБУ для измерения тока в обмотке якоря ЭМП и представляет собой датчик тока NSM2012-20B5R-DSPR, основанный на эффекте Холла с гальванической изоляцией измеряемой цепи. Датчик тока имеет радиометрический выход, то есть его выходное напряжение линейно зависит от питающего напряжения, что позволяет скорректировать соответствующую погрешность датчика за счет измерения с помощью встроенного АЦП микроконтроллера DD1 обоих параметров (напряжение питания и выходного напряжения датчика). Оцифрованный сигнал датчика используется во встроенном ПО микроконтроллера для реализации алгоритма управления ЭМП, а также для реализации защиты цепей ЭМП от превышения допустимых токов.

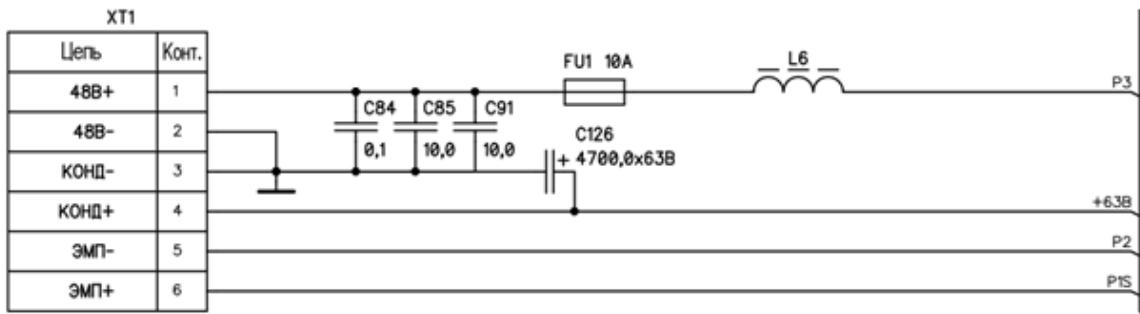


Рис..4.3.15. Цепи питания силовой части ЭБУ

Сформированный силовой сигнал выходит на контакты 5 и 6 разъема XT1, к которым подключается ЭМП (рис.4.3.15).

В состав силовой части ЭБУ также входят цепи, обеспечивающие преобразование, стабилизацию, фильтрацию и ограничение напряжений питания функциональных узлов ЭБУ. В процессе разработки электрической схемы ЭБУ была разработана электрическая схема этих цепей, показанная на рис.4.3.16. Для формирования основного питающего напряжения величиной 5 В предназначен импульсный стабилизатор напряжения на основе микросхемы DA3 (LM2575_HVR5.0). Напряжение питания ЭБУ через предохранитель FU2 и фильтрующую цепь L4, C80, C81, C128 поступает на вывод 1 микросхемы DA3. Импульсное напряжение с вывода 4 фильтруется цепью L7, C86, C87, C17 для получения уровня пульсаций не более 50 мВ. Это напряжение далее используется как входное для повышающего стабилизатора напряжения, обеспечивающего напряжения +12 В, -12 В для питания аналоговых цепей. Повышающий стабилизатор напряжения выполнен на микросхеме DA10 (AP3012KTR-G1) и элементах L3, VD14. Отрицательное напряжение (-12 В) обеспечивается элементами C55, VD12, VD13. Фильтрующая цепь L2, C60 обеспечивает дополнительную фильтрацию питающего напряжения 5 В, обеспечивая уровень пульсаций не более 10 мВ. Линейный стабилизатор, выполненный на микросхеме DA11 (TPL903230), обеспечивает напряжение +3 В для питания микроконтроллера DD1. Отдельный стабилизатор напряжения, выполненный на микросхеме DA25, обеспечивает питание цепей интерфейса Ethernet.

Выполнение функций ЭБУ обеспечивается микроконтроллером DD1, работающим под управлением программы, записанной в его энергонезависимую память.

Программное обеспечение микроконтроллера реализовывает алгоритмы, поддерживающие выполнение требований к ЭБУ. Также алгоритмы аналого-цифрового и цифро-аналогового преобразования должны поддерживать ввод и вывод аналоговых сигналов в диапазонах:

- по току: от -20 мА до $+20$ мА; от 4 мА до 20 мА;
- по напряжению: от -10 В до $+10$ В; от 0 до 10 В; от 0 до 5 В.

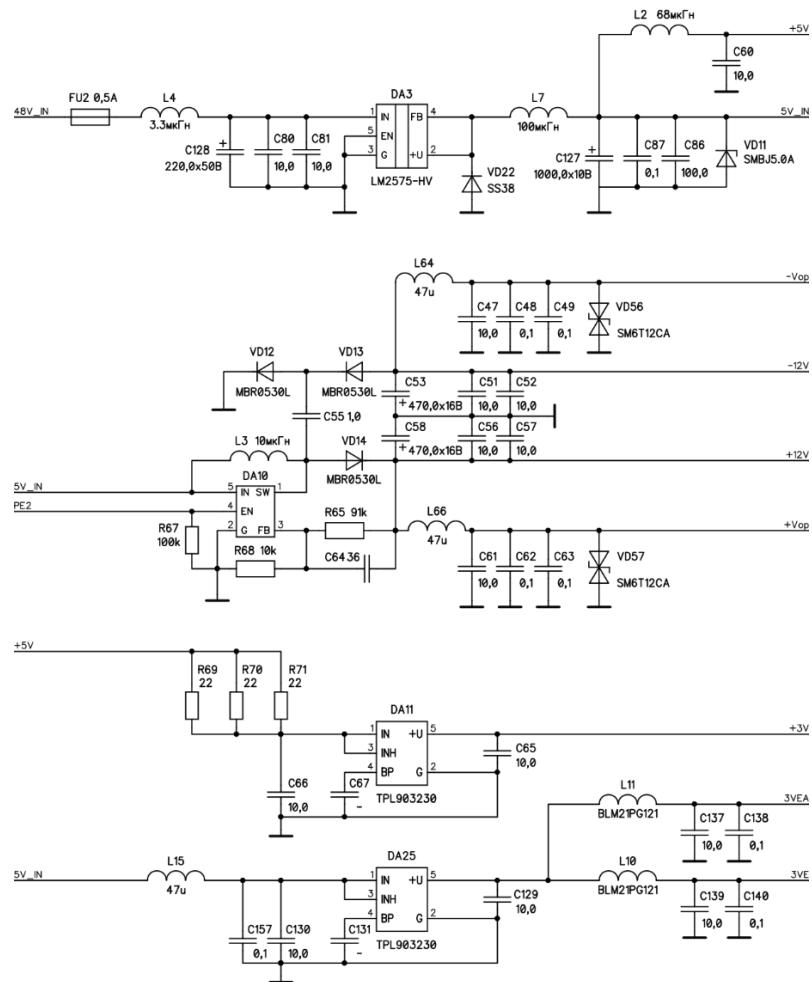


Рис.4.3.16. Цепи формирования питающих напряжений

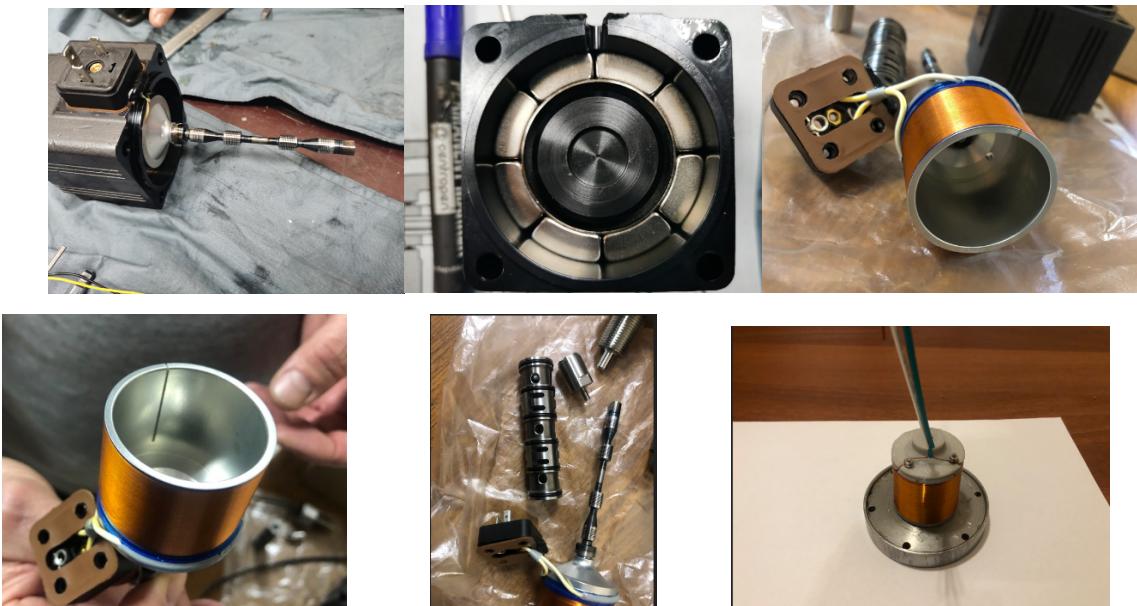
Программирование микроконтроллера реализовано на машинно-ориентированном языке низкого уровня с закрытым кодом алгоритма. Оно осуществлялось на языке «С» с применением низкоуровневых программных библиотек, машинно-ориентированных на применяемый микроконтроллер.

4.4. Результаты натурных испытаний опытного образца комплекса ЭМП и ЭБУ

По результатам проведенных исследований по конструктивному варианту 1 была разработана документация на опытный образец ЭМП.

4.4.1. Определение активного сопротивления и индуктивности

Составные части опытного образца представлены на рис.4.4.1.



4.4.1. Опытный образец ЭМП (конструкция 1)

На первоначальном этапе были измерены активное сопротивление и индуктивность обмотки якоря. Эти параметры являются одними из основных для обеспечения быстродействия привода, так как определяют электрическую постоянную времени. Для исследования был выбран образец со следующими обмоточными данными:

- диаметр обмоточного провода по голой меди 0.4 мм;
- число слоев 4;
- число витков 304;
- гильза якоря с прорезью с одной перемычкой.

Активное сопротивление для образца при температуре окружающей среды составило 5.2 Ом. Для сравнения, активное сопротивление прототипа фирмы Yuken оставило 4.7 Ом.

Сопротивление изоляции составило не менее 20 Мом.

Индуктивность обмотки измерялась в двух состояниях: свободном (вне магнитопровода) и при вставленном якоре в магнитную систему:

- индуктивность в свободном состоянии 1.8 мГн;
- индуктивность при вставленном якоре в магнитную систему 1.95 мГн;

Электрическая постоянная времени составила 0.000375 с.

Эти данные были использованы для корректировки математической модели проектной системы ЭМП в части активного сопротивления и индуктивности.

4.4.2. Исследование индукции в рабочем зазоре

Магнитная индукция в воздушном зазоре замерялась миллитеслометром TD8620 фирмы Tunkia. Ввиду неоднородности магнитного поля в воздушном зазоре, измерение магнитной индукции проведено в четырех точках, изображенных на рисунке 1:

1. Точка 1 – радиальное положение на внешнем диаметре воздушного зазора (внутренний диаметр гильзы магнитов).
2. Точка 2 – радиальное положение на внутреннем диаметре воздушного зазора (внешний диаметр центрального цилиндра магнитной системы).
3. Точка 3 – радиальное положение на внешнем диаметре воздушного зазора (внутренний диаметр гильзы магнитов).
4. Точка 4 – радиальное положение на внутреннем диаметре воздушного зазора (внешний диаметр центрального цилиндра магнитной системы).

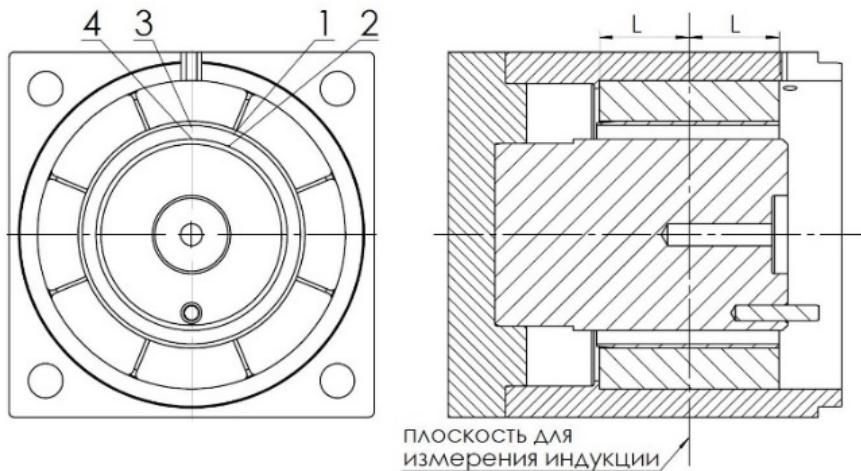


Рис.4.4.2.1- Схема измерения магнитной индукции в воздушном зазоре.

Результаты измерений сведены в таблицу 4.4.2.1.

4.4.2.1 – Результаты измерений магнитной индукции в воздушном зазоре

	Значение индукции, мТл			
	Точка 1	Точка 2	Точка 3	Точка 4
ЭМП №1 производства УрИЦ	696	717	575	603

Среднее значение индукции в рабочем зазоре составило 650 мТл, или 0.65 Тл.

По результатам расчетов магнитной системы по методике, приведенной в главе 2 для данной геометрии, среднее значение индукции составило 0.67 Тл, что составляет 3.07 % в оптимистичную сторону. Таким образом, данные лабораторного тестирования магнитного поля показали корректность использования приведенной методики на основе ограниченного числа конечных элементов.

4.4.3. Испытание ЭМП в динамическом режиме под нагрузкой в составе ЭГУМ

Испытания проводились для опытного образца конструкции 1 на испытательном оборудовании Уральского инжинирингового центра г. Челябинск.

Из всех динамических испытаний была выбрана проверка основной характеристики, то есть определение тока, напряжения потребляемой мощности при частоте возвратно-поступательного движения 300 Гц и амплитуде смещения штока золотниковой пары +0.2 мм при рабочем давлении в гидравлической системе. Программно-измерительный комплекс задавал плавное изменение частоты от 10 до 300 Гц. Датчик линейного перемещения, стоящий в цепи обратной связи, задавал амплитуду перемещения +0.2 мм. В процессе испытаний фиксировались значения потребляемого тока, напряжения и мощности. При достижении частоты 300 Гц испытания останавливались из-за повышенного нагрева ЭМП, который фиксировался тепловизором. Измеряемые параметры фиксировались в табличном и графическом форматах на экране монитора. Результаты одного из этапов испытаний представлены на рис 4.4.3.3. Графические зависимости показаны для логарифмических шкал по осям х и у.

Фрагменты испытаний представлены на рис.4.4.3.1.



Рис.4.4.3.1. Испытание электромеханического преобразователя в составе электрогидравлического усилителя мощности

При достижении частоты колебаний 300 Гц получились следующие характеристики (рис. 4.4.3.2):

- потребляемый ток 7.234 А;
- напряжение питания обмотки якоря 45.14 В
- потребляемая мощность 326 Вт.

Частота, Гц	Ток, А	А:	Частота, Гц	Напряженность, В	Частота, Гц	ДИ15/7: П	Частота, Гц	Отклики: П	Частота, Гц
-------------	--------	----	-------------	------------------	-------------	-----------	-------------	------------	-------------

300	7.234818		300	45.14778		300	0.191052		300	0.191052	602.2002	0.342491
300	4.858561		300	30.35355		300	0.125848		300	0.125848	606.3985	0.337765

Рис.4.4.3.2. Вывод результатов измерений в цифровом формате

По результатам моделирования потерь для варианта 1 конструкции 1 расчетные потери составили 330.8 Вт.

Разница между расчетом и экспериментом по потерям не превысила 10 %, что является приемлемым результатом. Таким образом, цифровые модели настроены очень хорошо и расчетным результатам можно доверять.

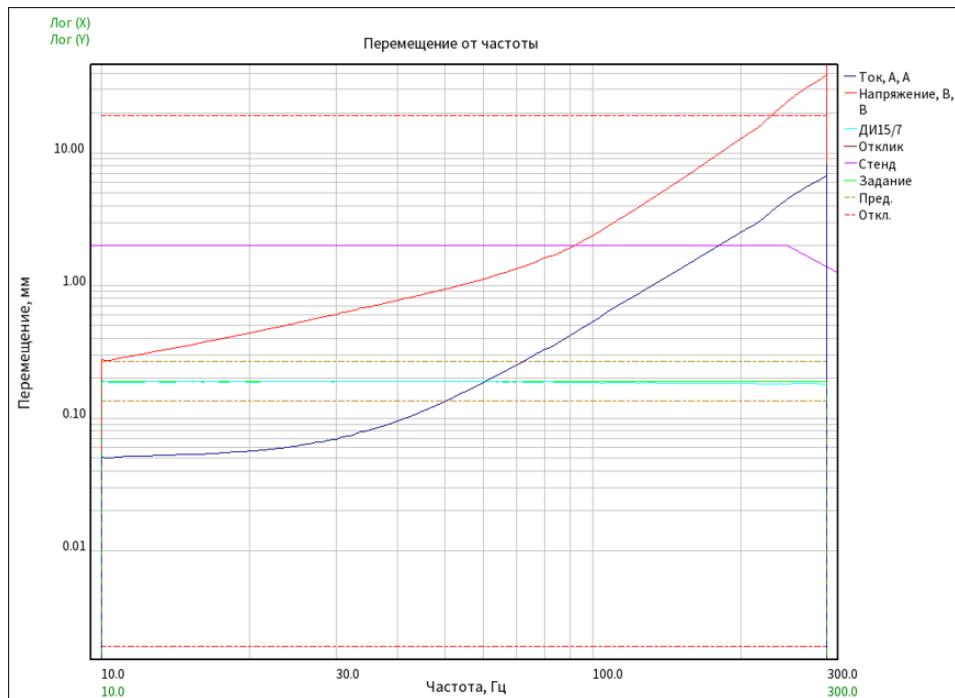


Рис.4.4.3.2. Зависимости тока, напряжения от частоты при задании амплитуды колебаний ± 0.2 мм.

Оценка динамических параметров ЭМП на цифровых моделях приведена в приложении 6.

Анализ динамики теплового нагрева показал, что при этой нагрузке и частоте обмотка якоря нагревается от температуры 20 градусов Цельсия до 120 градусов Цельсия за 90 с, то есть эксплуатировать привод при этой нагрузке можно только в повторно-кратковременном режиме. Для эксплуатации в продолжительном режиме работы система должна иметь эффективную принудительную систему охлаждения.

4.5. Разработка перспективной конструкции ЭМП

Результаты анализа главы 1 показали, что если в качестве критерия качества конструкции выбрать минимальные потери ЭМП при выполнении основной

характеристики: перемещение $+/-0.2$ мм при частоте колебаний 300 Гц, то явное преимущество имеет конструкция с радиально-тангенциальной магнитной системой и якорем с диэлектрической гильзой. Объясняется это наименьшими потерями от вихревых токов в электропроводящих частях магнитопровода. На основании этого была проведена детальная проработка этой конструкции и разработан комплект конструкторской документации.

Одним из ключевых конструкторских решений было применение якоря с диэлектрической гильзой взамен якоря с алюминиевой гильзой и различными вариантами разрезов. Такой подход имеет следующие преимущества:

- материал диэлектрической пластмассы имеет меньшую удельную плотность, чем алюминий и другие металлы. Это позволит уменьшить общую массу подвижных частей;

- якорь с диэлектрической гильзой не надо изолировать от обмотки. Обмоточный провод можно укладывать непосредственно на каркас гильзы. Это упрощает технологию намотки и повышает надежность. В процессе проведенных испытаний возникали случаи перетирания изоляции на больших частотах и замыкания обмотки якоря на корпус. Кроме этого, отсутствие изоляции также облегчает якорь и увеличивает быстродействие:

- в якоре с диэлектрической гильзой не наводятся вихревые токи. Это позволяет уменьшить общие потери привода. Потери уменьшаются непосредственно в частях магнитопровода, кроме этого, уменьшаются усилия, противодействующие линейному перемещению штока золотниковой пары, а это, в свою очередь, уменьшает потребляемый ток и потери в меди обмотки;

- диэлектрическую гильзу можно изготовить на 3D принтере с применением современных аддитивных технологий, что упрощает технологию по сравнению с токарно-фрезерными работами.

Из негативных свойств якоря с диэлектрической гильзой следует отметить меньшую механическую прочность материала по сравнению с металлической гильзой, что может повлиять на срок службы привода.

Варианты изготовления макетного образца якоря с диэлектрической гильзой с

применением технологии 3D принтера показаны на рис.4.5.1.

Вторым инновационным решением применительно к конструкции ЭМП является использование радиально-тangенциальной системы возбуждения для магнитной цепи. Сама радиально-тangенциальная система для постоянных магнитов применяется давно и достаточно хорошо изучена [82], но применительно к ЭМП она имеет следующие преимущества:

- использование данной магнитной системы позволяет получать большие значения магнитной индукции в рабочем зазоре за счет использования концентраторов. Эти индукции могут быть больше, чем значение остаточной индукции для радиальной системы расположения магнитов. Увеличение индукции в рабочем зазоре при заданном быстродействии позволяет уменьшить ток якоря и сократить общие потери;

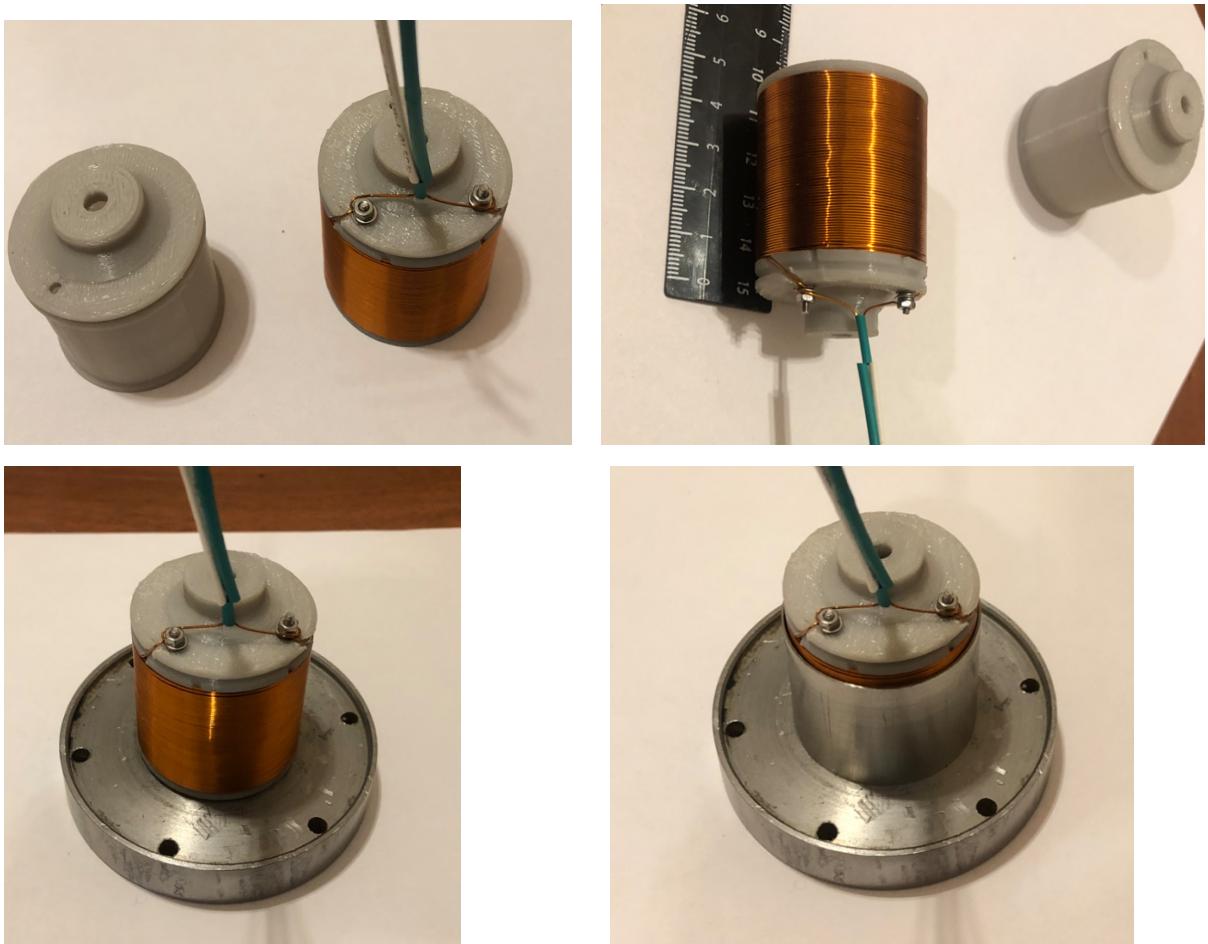


Рис.4.5.1. Макетный образец якоря с диэлектрической гильзой

- магнитная система ЭМП создает однополярную намагниченность в рабочем зазоре. Это вынуждает использовать торцевой магнитопровод для замыкания

общего потока. Торцевой магнитопровод удобно использовать для крепления концентраторов, что упрощает сборку магнитной системы;

- исследования показали, что традиционный внешний магнитопровод, выполненный в виде электропроводящего кольца, создает контур для вихревых токов. Радиально-тангенциальный магнитопровод выполнен из отдельных частей (концентраторов), которые можно электрически изолировать друг от друга и, тем самым, разорвать контур для вихревых токов. Это позволит существенно сократить общие потери и повысить быстродействие;

- для радиально-тангенциальной системы нужны призматические магниты, в отличие от подковообразных для радиальной системы. Призматические магниты в производстве намного дешевле магнитов другой формы;

- магнитное поле ЭМП в рабочем зазоре имеет одну полярность. Для радиальной системы установить однополярные постоянные магниты во внешний магнитопровод достаточно сложно, так как они отталкиваются друг от друга. Для высококоэрцитивных магнитов сила отталкивания значительна и необходима специальная технологическая оснастка для этой процедуры. Для радиально-тангенциальной системы силы взаимного отталкивания компенсируются за счет наличия концентраторов. Постоянные магниты будут сами втягиваться в магнитную систему при установке, что облегчит технологию изготовления индуктора;

- в радиально-тангенциальной системе уменьшен риск перегрева постоянных магнитов в процессе эксплуатации, так как они находятся между концентраторами. Выделяемый якорной обмоткой тепловой поток проходит в концентраторы и сходит с обдуваемой наружной поверхности индуктора (рис.4.2.1). Это позволяет выбрать марку постоянных магнитов с большой остаточной индукцией и меньшими рабочими температурами, что еще позволит увеличить индукцию в рабочем зазоре и повысить быстродействие.

На рис.4.5.2 показана технологическая цепочка сборки радиально-тангенциальной магнитной системы ЭМП.

Следующим ключевым конструкторским решением является применение

двухконтурной системы охлаждения. По условиям эксплуатации ЭГУМ конструкция привода должна быть защищена от проникновения пыли, грязи и воды и иметь исполнение IP55. Расчеты показывают, что даже при применении всех мероприятий по уменьшению общих потерь, они при разных режимах эксплуатации ЭГУМ составляют не менее 100-150 Вт. Отвести эти потери из ограниченного объема путем естественной конвекции достаточно сложно. Ситуация осложняется еще тем, что в результате динамической нагрузки потери выделяются очень быстро, а отвод тепла теплопроводностью имеет инерцию, что способствует перегреву отдельных частей.

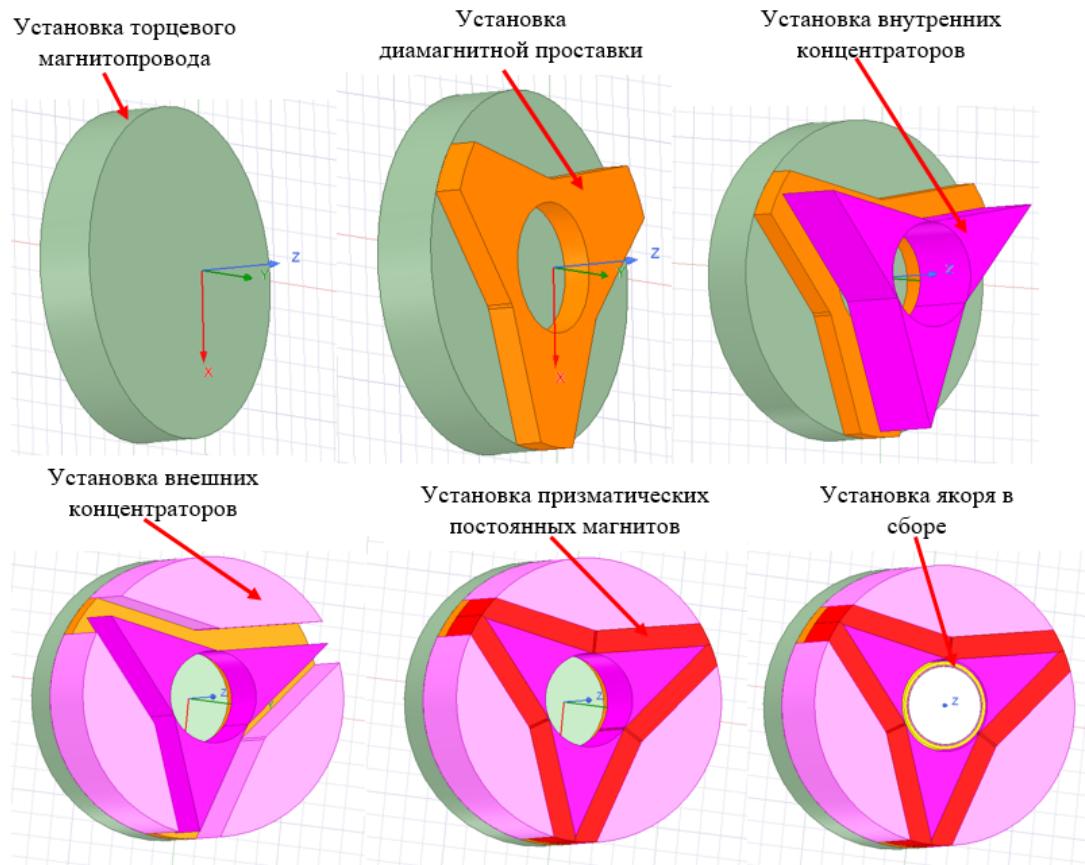


Рис.4.5.2. Сборка ЭМП с радиально-тангенциальной системой расположения постоянных магнитов

Наиболее критичными к этому перегреву являются постоянные магниты и обмотка якоря. Перечисленные причины вынуждают применить более эффективную систему охлаждения по сравнению с естественной конвекцией. В условиях закрытой конструкции и воздушного охлаждения это может быть только двухконтурная система охлаждения.

Суть ее заключается в следующем. Первый закрытый контур охлаждения за счет принудительной конвекции переносит тепло к внешней поверхности ЭМП. С внешней поверхности тепловой поток может быть удален за счет естественной конвекции, так как она развита и имеет большую площадь для схода тепла. Вентиляционные и тепловые расчеты этой главы подтвердили работоспособность этой концепции.

Для регулировки интенсивности внутреннего объема за счет встроенного вентилятора в систему заложен датчик температуры. Датчик температуры контактирует с обмоткой якоря, как с наиболее нагретой частью привода. Он крепится к выходной клемме обмотки якоря. Пути циркуляции хладагента внутреннего контура показаны на рис.4.1.1. Для нагнетания хладагента по внутреннему контуру достаточно расхода и напора стандартного вентилятора, применяемого для охлаждения системных блоков персональных компьютеров, который по габаритам надо встроить в конструкцию.

В предлагаемой конструкции изменен токоподвод к обмотке якоря. В прототипе Yukon токоподвод осуществляется со стороны радиальной поверхности гильзы якоря. Это ограничивает ход якоря, так как токоподвод упирается в торцевую поверхность магнитной системы. Для исключения этого фактора токоподвод необходимо перенести на торцевую поверхность якоря. Конструктивные решения торцевого токоподвода показаны на рис.4.5.3.

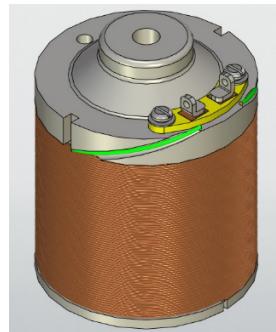


Рис.4.5.3. Расположение токоподвода с торца якоря

Перечисленные конструкторские решения были положены в основу перспективной конструкции ЭМП.

Для данной конструкции был разработан комплект рабочих чертежей на опытный образец. Сборочный чертеж из комплекта КД и спецификация на сборку представлены в Приложении 5.

Конструкция технологична. Она не имеет сложных деталей и узлов для изготовления. Для сборки нет необходимости в применении специальной оснастки. Постоянные магниты имеют простую призматическую форму. ЭМП имеет улучшенное охлаждение, позволяющее эксплуатировать его в более широком диапазоне перемещения клапана золотника и с большей частотой пропорциональных колебаний. Аналитические расчеты показывают, что предлагаемый привод имеет меньшее потребление электроэнергии и меньшие потери по сравнению с прототипом.

Трехмерная модель конструкции представлена на рис. 4.5.4.

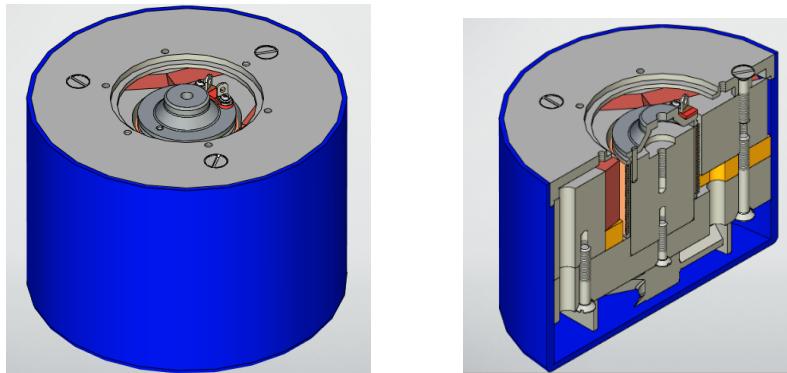


Рис.4.5.4. Трехмерная модель конструкции ЭМП с радиально-тангенциальной системой и якорем с диэлектрической гильзой

На рис. 4.5.5. Показана конструкция радиально-тангенциального индуктора без вентиляционной системы

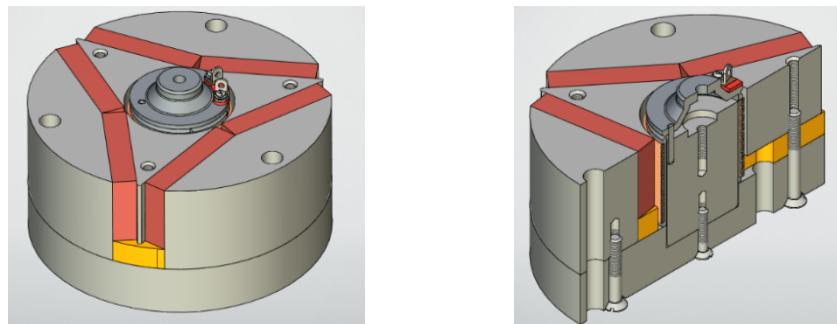


Рис. 4.5.5. Конструкция радиально-тангенциального индуктора ЭМП

На рис. 4.5.6. показана модель привода с разнесенными по оси основными деталями.

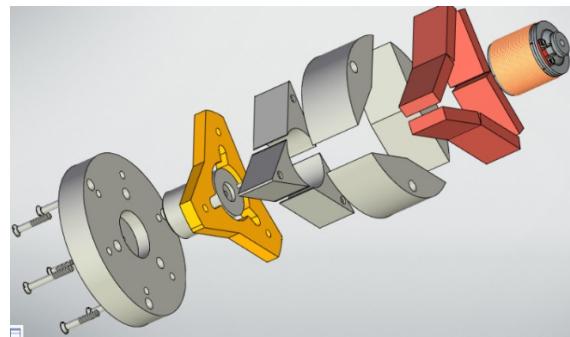


Рис.4.5.6. Разнесенная конструкция радиально-тангенциального индуктора

На рис. 4.5.7. показана разобранная модель привода для более детального понимания конструктивных особенностей.

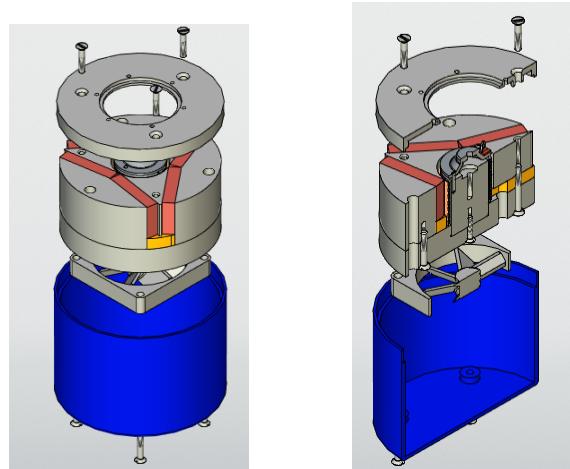


Рис. 4.5.7. Разобранная модель привода

Для проверки собираемости и технологичности была изготовлена имитационная модель по технологии 3 D принтера, представленная на рис. 4.5.8.



Рис.4.5.8. Имитационная модель ЭМП конструкции 3

Предлагаемая конструкция имеет большие габариты и массу по сравнению с зарубежным аналогом, но для мощных следящих гидроприводов этот показатель не существенный на фоне массы и габаритов всего испытательного оборудования. При лучших технических характеристиках по потребляемой мощности,

быстродействию частотному диапазону предлагаемый вариант в рамках импортозамещения может успешно конкурировать с прототипом фирмы Yuken.

Выводы по главе

1. Для охлаждения была выбрана двухконтурная система воздушного охлаждения, позволяющая для закрытой конструкции перенести тепловой поток от нагретых частей к наружной поверхности ЭМП. Проведенный аэродинамический расчет показал, что для циркуляции хладагента по расходу и напору достаточно мощности стандартного вентилятора, применяемого для охлаждения системных блоков ПК.

2. Проведенный динамический тепловой расчет на основе эквивалентных тепловых схем замещения показал эффективность двухконтурной системы охлаждения. В рабочем режиме при потерях порядка 120-150 Вт перегрев якорной обмотки не превысил температурного класса изоляции F. Нагрев постоянных магнитов не превышает рабочую температуру 150 градусов для материала неодим-железо-бор.

3. Приведены основные решения по принципиальным схемам электронного блока управления ЭБУ. Показана структура блока, приведены схемотехнические решения по обработке входных и выходных аналоговых и цифровых сигналов.

4. Приведены результаты натурных испытаний опытного образца ЭМП. Результаты замера индуктивности использовались для настройки математической модели для проектной системы. Измерение индукции в воздушном зазоре подтвердили точность предложенной математической модели на основе ограниченного количества конечных элементов. Результаты тестирования ЭМП в режиме выполнения основной рабочей характеристики подтвердили совпадения измеренных потерь с расчетными потерями по приведенным цифровым моделям.

5. Предложена перспективная базовая конструкция ЭМП с радиально-тангенциальной системой и якорем с диэлектрической гильзой. Описаны основные конструкторские решения магнитной системы, якоря, двухконтурной системы охлаждения, торцевого токоподвода.

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 распределение потерь для трех вариантов конструкций и 5 вариантов исполнения якоря, на основе которого выбрана перспективная базовая конструкция ЭМП с радиально-тangenциальной 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° 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

захвачена 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 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 1.5 %.

7. Разработана трехмерная твердотельная модель на перспективную конструкцию ЭМП на основе радиально-тангенциального индуктора и якоря 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. Совершенствование системы охлаждения электромеханического привода герметичной конструкции.

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

БУ – блок управления;

ГУ – гидроусилитель;

ДОС – датчик обратной связи по перемещению;

ЗР – золотниковый распределитель;

ИМ – исполнительный механизм;

КД – конструкторская документация;

МКЭ – метод конечных элементов;

НИУ – научно-исследовательский университет;

ТЗ – техническое задание;

УрИЦ – ООО «Уральский инжиниринговый центр»;

ФИПС – Федеральный институт промышленной собственности;

ФЧХ – фазочастотная характеристика;

ЭМП – электромеханический преобразователь;

ЭБУ – электронный блок управления;

ЭГУМ – электрогидравлический усилитель мощности;

ЮУрГУ – федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)».

Все аналитические выражения в диссертации приводятся для единиц измерения системы СИ.

СПИСОК ТЕРМИНОВ

В диссертации применяются следующие термины с соответствующими определениями.

Анализ электромеханического устройства: определение необходимых параметров и характеристик при заданной геометрии, материалах и режимах работы (поверочный расчет).

Вибростенд: испытательное оборудование для моделирования механических вибрационных и ударных воздействий на проверяемое изделие.

Вибродатчик: преобразователь механической вибрации в электрический сигнал.

Вихревой ток: индукционный объёмный электрический ток, возникающий в электропроводных материалах при изменении во времени магнитного потока, действующего на них.

Двухконтурная система охлаждения: система охлаждения электромеханических устройств, в которых циркулируют два контура хладагента. Первый контур переносит тепловой поток к поверхности схода тепла. Второй контур переносит тепловой поток в окружающую среду.

Демпферные потери: электрические потери в электромеханическом преобразователе, которые помимо нагрева создают тормозную силу на движущийся якорь.

Детерминированные методы оптимизации: методы оптимизации, которые для движения к оптимуму используют прямое изменение варьируемых переменных без нахождения производных.

Золотник, золотниковый клапан: устройство, направляющее поток жидкости путём смещения подвижной части относительно окон в поверхности, по которой она скользит. Золотник работает по отсечным острым кромкам гильзы. Принцип работы — это законы гидравлики.

Имитационное моделирование: метод исследования, при котором изучаемая система заменяется моделью, с достаточной точностью описывающей реальную систему (построенная модель описывает процессы так, как они проходили бы в

действительности), с которой проводятся эксперименты с целью получения информации об этой системе.

Индуктор: часть электромеханического устройства, которая создает рабочий магнитный поток.

Итерационный цикл: это цикл оптимального проектирования, для которого число повторений заранее неизвестно. В итерационных циклах на каждом шаге вычислений происходят последовательное приближение и проверка условия достижения искомого результата. Выход из итерационного цикла осуществляется в случае выполнения заданного условия.

Компьютерная модель: отдельная программа либо программный комплекс, которые позволяют при помощи вычислений и графического отображения результатов воспроизводить реальные объекты и процессы

Класс нагревостойкости изоляции: способность изоляции обмоток электромеханических устройств выдерживать максимальную заданную температуру в течение срока службы (как правило 15 лет).

Математическая модель: это совокупность уравнений и соотношений между ними, адекватно отображающая свойства и поведение исследуемого объекта.

Метод конечных элементов: это численный метод решения дифференциальных уравнений с частными производными и интегральных уравнений, возникающих при решении задач прикладной физики.

Метод покоординатного спуска: это алгоритм оптимизации, основанный на последовательном поиске оптимальных значений переменных вдоль каждой координатной оси. Суть метода заключается в пошаговом приближении к точке минимума функции путём последовательных вариаций одной из координат при фиксированных значениях остальных.

Многоуровневая однокритериальная оптимизация: метод однокритериальной оптимизации, при которой процедура оптимизации в зависимости от проектной ситуации может быть разбита на подзадачи, для которых

часть варьируемых переменных может быть зафиксирована при изменении остальных переменных.

Натурные испытания: это испытания, которые предусматривают исследование объекта в реальных условиях — условиях его будущего использования.

Основная рабочая характеристика: режим работы электрогидравлического усилителя мощности для заданной частоты и перемещения штока золотника. Применяется для сравнения различных электрогидравлических усилителей мощности по критерию качества.

Оптимизационная модель: это математическая модель, предназначенная для определения наилучшего показателя качества при выполнении заданных ограничений. Включает в себя математическую модель устройства и математическую модель варьирования независимыми переменными.

Проектная ситуация: техническое задание на проектирование электрической машины, в котором строго оговорено, какие независимые переменные могут варьироваться для выбора наилучшего варианта, а какие должны быть зафиксированы.

Проектная система: набор программных средств, работающих совместно для выполнения задачи синтеза и задачи анализа электромеханического устройства.

Полная оптимизация: оптимизация, при которой для выбора наилучшего варианта варьируются все независимые переменные.

Параметризация: процесс определения параметров и их описание для определения конкретной геометрии электромеханического устройства.

Радиально-тангенциальная магнитная система: магнитная система с постоянными магнитами, в которых ось намагничивания расположена под некоторым углом к оси якоря.

Синтез электромеханического устройства: разработка геометрии электромеханического устройства с определенными техническим заданием параметрами и характеристиками.

Трехмерная твердотельная модель: компьютерная графическая модель объекта, содержащая информацию об объеме и свойствах материалов.

Физическое моделирование: метод экспериментального изучения физических объектов, основанный на использовании модели, имеющей ту же физическую природу, что и изучаемый объект. Метод заключается в создании лабораторной физической модели явления в уменьшенных масштабах и проведении экспериментов на этой модели. Выводы и данные, полученные в этих экспериментах, распространяются затем на явление в реальных масштабах.

Хладагент: это рабочее вещество, которое переносит тепло или холод от одного теплообменника к другому.

Частичная оптимизация: оптимизация, при которой для выбора наилучшего варианта часть независимых переменных варьируется, часть независимых переменных остается фиксированными в соответствии с проектной ситуацией.

Якорь: часть электромеханического устройства, которая преобразует электрическую энергию в механическую и наоборот.

Якорь с диэлектрической гильзой: якорь электромеханического устройства, который кроме якорной обмотки не содержит электропроводящих материалов.

Ansys Electronics Desktop: CAD система, позволяющая рассчитывать электрические и магнитные поля сложных систем на основе метода конечных элементов. Позволяет создавать цифровые двойники электромеханических систем

Delphi: язык программирования высокого уровня.

Eddy Current: режим программы **Ansys Electronics Desktop** который позволяет проводить анализ квазистатических характеристик.

Transient: режим программы **Ansys Electronics Desktop** который позволяет проводить анализ динамических характеристик с учетом взаимного перемещения статора и ротора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аминов Д.С., Теоретические основы разработки водопогружных гидрогенераторов, используемых в качестве возобновляемых источников электроэнергии малых и средних рек. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Екатеринбург, 2020 г. <https://www.disscat.com/content/teoreticheskie-osnovy-razrabotki-vodopogruzhnykh-gidrogeneratorov-ispolzuemykh-v-kachestve> (дата обращения 22.10.2024 г).
2. Бодров В. В., Багаутдинов Р. М., Багаутдинов А.Р., Суворов К. В., Ардашев Д.В., Неустроев Н. И., Согрин А. И., Коробатов Д. В. Электромеханический преобразователь электрогоидравлического усилителя. Патент на полезную модель РФ №2222690. Заявка № 2023126530, приоритет 17.10.2023
3. Бабин А.И., Санников С. П. Автоматизация технологических процессов. Элементы и устройства пневмогидроавтоматики: Учеб. пособие. – Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2002. – 144 с.
4. Баженов А.И., Гамынин Н.С., Карев В. И. и др.; Проектирование следящих гидравлических приводов летательных аппаратов/ Под ред. Гамынина Н.С. - М.: Машиностроение, 1981. - 312 с., ил.
5. Башта, Т.М. Гидравлические приводы летательных аппаратов / Т.М. Башта. - М.: Машиностроение, 1967. -496с.
6. Башта, Т. М. Гидравлика, гидравлические машины и гидравлические приводы: учебник / Т. М. Башта, С. С. Рудnev. – М.: Машиностроение, 1982. – 424 с.
7. Бесекерский, В.А. Теория систем автоматического регулирования. Изд. 2-е / В.А. Бесекерский, Е.П. Попов. - М.: Наука, 1972. -768с.
- 8.Бирюков А.Н., Воронин С.М., Шумилов Е.А., Казаков Ю.Б. Методика выбора параметров обмотки статора асинхронных двигателей общепромышленного исполнения для частотно-регулируемого электропривода // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2018. № 2. С. 41-49. (*ВАК, РИНЦ*)

9. Беязов И.Й. Аналоговые гидроусилители /Пер. с болг. - Л.: Машиностроение, 1983. - 151 с.
10. Галдин Н.С. Основы гидравлики и гидропривода: Учеб. пособие. – Омск: Изд-во СибАДИ, 2006. – 145 с.
11. Гамынин, Н. С. Основы следящего гидравлического привода. - Москва: Оборонгиз, 1962. - 293 с.: черт. 22 см.
12. Гамынин Н.С. Гидравлический привод систем управления. - М.: Машиностроение, 1972. - 376 с.
13. Ганджа С.А., Шабаа А.Х.Х., Ганджа Д.С. Анализ характеристик линейного датчика положения штока следящего гидропривода на основе цифрового моделирования электромагнитного состояния. Электротехнические системы и комплексы. с. 78-84, ISSN: 2311-8318, doi: 10.18503/2311-8318
14. С.А. Ганджа, Джанабат С. Д. М., Д.С. Ганджа. Разработка математической модели вентильного электродвигателя постоянного тока для оптимизации его геометрии на основе метода конечных элементов. Вестник ПНИУ. Серия: Электротехника, информационные технологии, системы управления
15. Гидравлика, гидравлические машины и гидравлические приводы / Т.М. Башта, С.С. Руднев, Б.Б. Некрасов и др.; под общ. ред Т.М. Башты. – М.: Машиностроение, 1970. - 504с.
16. Гидравлический следящий привод /Н.С. Гамынин и др.; Под ред. В.А. Лещенко. - М.: Машиностроение, 1968. - 563 с.
17. Гомельский Ю.С. Электрические элементы электрогидравлических устройств автоматики. - М.: Энергия, 1968. - 144 с.
18. Гойдо М.Е. Теория и проектирование гидроприводов: Учебное пособие. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 1998. -255 с.
19. ГОСТ 17398-72. Насосы. Термины и определения – Госстандарт СССР – 06.01.1972. – М.: Изд-во стандартов, 1972. – 39 с.
20. ГОСТ 17411-91 Гидроприводы объемные. Общие технические требования – Госстандарт России – 22.05.1991. – М.: Изд-во стандартов, 1991. – 7 с.

21. ГОСТ 17752-81 (СТ СЭВ 2455-80) Гидропривод объемный и пневмопривод. Термины и определения. – Госстандарт России – 31.12.1981. – М.: Изд-во стандартов, 1991. – 71 с.
22. ГОСТ 2.704—2011 Единая система конструкторской документации. Правила выполнения гидравлических и пневматических схем. – М.: СтандартИнформ, 2012 – 16 с.
23. ГОСТ 2.704-76 ЕСКД. Правила выполнения гидравлических и пневматических схем – Госстандарт СССР – 30.12.1976. – М.: Изд-во стандартов, 1977. – 18 с.

305

24. ГОСТ 2.781-96 ЕСКД. Обозначения условные графические. Аппараты гидравлические и пневматические, устройства управления и приборы контрольно-измерительные – Госстандарт России – 07.04.1997. – М.: Изд-во стандартов, 1997. – 18 с.
25. ГОСТ 2.782-96 ЕСКД. Обозначения условные графические. Машины гидравлические и пневматические – Госстандарт России – 07.04.1997. – М.: Изд-во стандартов, 1997. – 16 с.
26. Гудинов. В. Н., Скабкин Н.Г., Семенова И.А. Гидропневмоавтоматика: Учебное пособие / Сост.– Омск: СибАДИ, 2012. – 92 с.
27. Даршт, Я.А. Гидроавтоматика и гидропривод: методические указания к лабораторным работам / Я.А. Даршт, Ю.В. Сергеев. – Ковров: КГТА, 2000.
28. Домогаров, А.Ю. Справочно-нормативные материалы на рабочие жидкости и смазки / А.Ю. Домогаров [и др.]. - М.: МА-ДИ(ГТУ), 2004. -124с.
29. Зубков, Ю.В. Экспериментальное исследование бесщеточного генератора с интегрированным возбудителем / Ю.В. Зубков // Вестник СамГТУ. Технические науки. – 2018. №2(58). С.110 -117.
30. Зубков, Ю.В. Методология проектирования бесщеточных генераторов с магнитоэлектрическим возбуждением с учетом результатов анализа магнитного поля / Ю.В. Зубков // Вестник транспорта Поволжья. 2018, №2(68). С.20-27.

31. Казаков Ю.Б., Морозов Н.А., Океанский А.П., Шумилов Е.А. Метод диагностики дефектов синхронных генераторов по изменениям внешнего электромагнитного поля // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2019. №1. – С.55 – 61.
32. Калекин, А. А. Гидравлика и гидравлические машины: учебник / А. А. Калекин. – М.: Мир, 2005. – 512 с.
33. Кириллов Ю.К., Русак А.М., Скорынин Ю.Н. Струйные гидравлические рулевые машины/ - Уфа: УГАТУ, 2002. - 284 с.: ил.
34. Крейнин Г.В, Кривц И. Л., Винницкий Е. Я., Ивлев В. И. Гидравлические и пневматические приводы промышленных роботов и автоматических манипуляторов /; Под ред. Г. В. Крейнина. – М.: Машиностроение, 1993. 304 с.
35. Лебедев, Н. И. Гидравлика, гидравлические машины и объемный гидропривод: учебник / Н. И. Лебедев. – М.: Изд-во Моск. гос. ун-та леса, 2003. – 232 с.
36. Леканова, Т.Л. Гидро- и пневмоавтоматика: учебное пособие / Т.Л. Леканова, В.Т. Чупров; Сыкт. лесн. ин-т. – Сыктывкар: СЛИ, 2012. – 52 с.
37. Лещенко, В.А. Гидравлические следящие приводы станков с программным управлением/ В.А. Лещенко. - М.: Машиностроение, 1975. – 288с.
38. Ломакин В.О., Шумилов И.С., Щербачев П.В. Математическое моделирование электрогидравлического следящего привода высокоточного регулирования вращательного движения // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2011. №10. URL: <http://izvuzmash.ru/articles/164/164.pdf> (дата обращения: 02.06.2017) 0,5 п.л./0,4 п.л.
39. Ломакин В.О., Петров А.И., Кулешова М.С. Исследование двухфазного течения в осцецентробежном колесе методами гидродинамического моделирования // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2014. № 9. URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/725724.html> (дата обращения: 02.06.2017)

40. Ломакин В.О. Краева Е.А. Гидродинамическое моделирование эффекта «запирания» дроссельных каналов и его сравнение с экспериментальными данными // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2014. №2. С.18-21
41. Ломакин В.О., Шумилов И.С., Щербачев П.В. Математическое моделирование электрогидравлического следящего привода высокоточного регулирования вращательного движения // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2011. №10. URL:
42. Мошкин В.И., Угаров Г.Г., Сошинов А.Г., Вырыханов Д.А. Источник питания длительной нагрузки постоянного тока на электрохимических конденсаторах.
В сборнике: Наука XXI века: технологии, управление, безопасность. Материалы II национальной научной конференции. Отв. редактор Е.Н. Полякова. Курган, 2022. С. 323-325
43. Мошкин В.И., Вырыханов Д.А., Угаров Г.Г., Структурный анализ процесса электромеханического преобразования энергии. Вопросы электротехнологии. 2019. № 4 (25). С. 57-64
44. Месропян А.В., Целищев В.А. Расчет статических характеристик струйных гидравлических рулевых машин: Учебное пособие - Уфа: УГАТУ, 2003. - 76 с.
45. Мошкин В.И., Елисеев С.С., Бакиров С.М., Угаров Г.Г. Обоснование параметров автономного источника электроснабжения на солнечных модулях и аккумуляторных батареях передвижных электрифицированных машин. В сборнике: Наука XXI века: технологии, управление, безопасность. Материалы II национальной научной конференции. Отв. редактор Е.Н. Полякова. Курган, 2022. С. 317-322.
46. Нагорный В. С., Денисов А. А. Устройства автоматики гидро- и пневмосистем: Учеб. пособие техн. вузов. – М.: Высш. шк., 1991. – 367 с.
47. Наземцев, А.С. Гидравлические приводы и средства автоматизации / А.С. Наземцев. – М: форум, 2005.
48. Опыт разработки линейных электродвигателей в ПНИПУ / Е.А.Чабанов, Д.А.Опарин, А.Д. Коротаев, А.Т.Ключников, Д.В.Фалалеев,

Б.В.Кавалеров // Электротехнические комплексы и системы: I Всерос. конф. по электрическим машинам в рамках Междунар. науч.-практ. конф., г. Уфа, 15-16 дек. 2022 г. . Т. 2 / М-во науки и высш. образования Рос. Федерации, Уфим. ун-т науки и технологий. - Уфа : УУНиТ, 2022. - С. 544-562. -

URL:www.ugatu.su/meia/uploads/MainSite/Ob%20universitete/Izdateli/El_izd/2022-220.

49. Пневматика и гидравлика. Приводы и системы управления. Сборник статей. Под ред. Герц Е. В. – М.: Машиностроение, 1978. – 280 с.: ил.

50. Попов Д.Н. Динамика и регулирование гидро- и пневмосистем. - М.: Машиностроение, 1976. - 423 с.

51. Потапов, А. М. Основы расчета и проектирования линейных следящих систем: Учеб. пособие: [В 5ч.]. – Ленинград: ЛМИ, 1979

52. Простые формулы расчета индуктивности катушек [Электрон. ресурс], URL: <https://coil32.net/ru/science/faq.html> (дата обращения 22.12.2023).

53. Романчиков Б.Ф. Объемный гидропривод //Итоги науки и техники. ВИНИТИ «Машиностроительные материалы, конструкции и расчет деталей машин. Гидропривод». - М.: ВИНИТИ, 1985. - 97 с.

54. Свешников В.К. Станочные гидроприводы: Справочник. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение. 1995. – 448 с.: ил. (Б-ка конструктора).

55. Следящие приводы. В 2-х кн.; под ред. Б.К.Чемоданова. - М.: Энергия, 1976.

56. Трифонов, О.Н. Автоматизированные системы приводов технологического оборудования/ О.Н. Трифонов, В.И. Иванов, Г.О. Трифонова – М.: МГТУ «СТАНКИН», 1998. -119с.

57. Справочное пособие по гидравлике, гидромашинам и гидроприводам /Я.М. Вильнер, Я.Т. Ковалев, Б.Б. Некрасов; Под ред. Б.Б. Некрасова. - Минск.: Высшая школа, 1976. - 415 с.

58. Финкельштейн, В.Г. Чебан. Гидравлика и гидропривод (краткий курс): Учеб. пособие. /Сост.: З.Л.– Алчевск: ДГМИ, 2001. – 164с.

59. Форенталь В.И., Гидравлические усилители мощности: Учебное пособие.

- Челябинск: ЮУрГУ, 2005. – 106 с.
60. Хохлов В.А. Электрогидравлический следящий привод. -М.: Наука, 1966. -239
61. Чупраков Ю.И. Гидропривод и средства гидроавтоматики. - М.: Машиностроение, 1979. - 232 с.
62. Шагинян А.С., Болотский В.В. Аналитические исследования электрогидравлического преобразователя с гидроусилителем типа «золотник - золотник» //Современные проблемы машиноведения: Материалы межд. науч.-техн. конф. - Гомель: ГПИ, 1998. - Т. 1. - С. 92-96.
- 63.** Шейкин М.О., Черкасских С.Н., Шилин Д.В., Феденков В.В. Управление электропневматическим приводом на основе нечеткой логики. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение». Вып.#1(148)/2024
64. Электрогидравлические следящие системы /Под ред. В.А. Хохлова. - М.: Машиностроение, 1971. - 341 с.
65. Элементы гидропривода: Справочник. Абрамов Е.И., Колиснеченко К.А., Маслов В.Т. – Киев: Техника, 1969. - 320 с.
66. Abdullin R. R., Bolshakov V. V., Podshibnev V. A., Rozhnin N. B., S. L. Samsonovich S. L. Published under license from IOP Publishing Ltd Journal of Physics: Conference Series, Volume 1958, XI International Scientific and Technical Conference "Problems of Improving Robotic and Intelligent Aviation Systems" (RIASIC 2020) December 10-11, 2020, Moscow, Russia, DOI: 10.1088/1757-899X/862/3/032087
67. Abdulin R R, Podshibnev V A and Samsonovich S L 2020 Determining load distribution unevenness ratio in ball-and-screw transmission with separator Aerospace MAI journal 27(3) 229–40
68. Abdulin R R, Bolshakov V V, Samsonovich S L and Podshibnev V A 2020 Analysis of load distribution unevenness in ball screw with a separator MIP: IOP Conference Series Materials Science and Engineering 862 032087 <http://izvuzmash.ru/articles/164/164.pdf> (дата обращения: 02.06.2017)

69. Aircraft Flight Control Actuation System Design/ By E.T. Raymond, P.E. with C.C. Chenoweth. Published by: Society of Automotive Engineers, Inc. 400 Commonwealth Drive Warrendale, PA 15096- 001 USA
70. Burton R., Ruan J., Ukrainetz P., "Analysis of electromagnetic nonlinearities in stage control of a stepper motor and spool valve," *J. Dyn.Syst., Meas. Control*, vol. 125, pp. 405–412, 2003.
71. Chuyduk, I.A., Gandzha, D.S. Thermal Analysis of a Motor Wheel Based on a Brushless Motor of Combined Excitation for Vehicle Electrical Transmission. Proceedings - 2023 Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research and Practice, PEAMI 2023, 2023, pp.140–144
72. Choi Y.-M., D.-G. Gweon D.-G., "A high-precision dual-servo stage using Halbach linear active magnetic bearings," *IEEE/ASME Trans.Mechatronics*, vol. 16, no. 5, pp. 925–931, Oct. 2011.
73. Crowder R. Electric drives and electromechanical systems: applications and control- 2019 - books.google.com
74. D633 and D634 series direct drive servo-proportional control valves with integrated 24V electronics, Moog Inc., East Aurora, NY, USA. Available: www.moog.com
75. Electrohydraulic valves—A technical look, Moog Inc., East Aurora, NY . Available: <http://www.moog.com/literature/ICD/Valves- Introduction.pdf>
76. Encica L., Makarovic J., Lomonova E., Vandenput A., "Space mapping optimization of a cylindrical voice coil actuator," *IEEE Trans. Ind.Appl.*, vol. 42, no. 6, pp. 1437–1444, Nov. 2006.
77. Forbes J.E, Baird S.M, Weisgerber T.W. Electrohydraulic power steering—an advanced system for unique applications. - *SAE transactions*, 1987 – JSTOR
78. Gandzha, S.A., Shabaa, A.H.H., Gandzha, D.S. Analysis of the Characteristics of a Linear Rod Position Sensor of a Tracking Hydraulic Drive Based on Digital Modeling of the Electromagnetic State. Proceedings - 2024 International Ural Conference on Electrical Power Engineering, UralCon 2024, 2024, pp. 432–436, ISSN: 2311-8318, doi 10.18503/2311-8318

79. Gandzha, S.A., Ulman, I.S., Gandzha, D.S. Digital Simulation of a Magnetohydrodynamic Pump for Mixing Aluminium Melt during Recycling Proceedings - 2024 International Ural Conference on Electrical Power Engineering, UralCon 2024, 2024, pp. 437–442
80. Gandzha, S.A., Janabat, S.D.M., Gandzha, D.S. Development of a Mathematical Model of a Brushless Direct Current Motor Based on the Finite Element Method to Optimize Motor's Geometry. Proceedings - 2024 International Ural Conference on Electrical Power Engineering, UralCon 2024, 2024, pp. 424–431
81. Gandzha, S., Chuyduk, I., Gandzha, D. Development of a design system for synthesis and analysis the motor wheel based on a valve electric motor of combined excitation for hybrid and electric vehicles. E3S Web of Conferences, 2023, 389, 05039, DOI:10.1051/e3sconf/202338905039
82. Gandzha S; Gandzha D. Brushless Electric Machines with Axial Magnetic Flux: Analysis and Synthesis. Submitted: September 22 2020. Reviewed: January 11th 2021 Published: February 14th 2021. DOI: 10.5772/intechopen.95945.
83. Gessat J. Electrically powered hydraulic steering systems for light commercial vehicles- 2007 - sae.org
84. Ho T. H., Ahn K., “Speed control of a hydraulic pressure coupling drive using an adaptive fuzzy sliding-mode control,” IEEE/ASME Trans.Mechatronics, vol. 17, no. 5, pp. 976–986, Oct. 2012.
85. Haggag S, Rosa A, Huang K, Cetinkunt S. Fault tolerant real time control system for steer-by-wire electro-hydraulic systems.- Mechatronics, 2007 - Elsevier
86. Hydraulics proportional valve series DFplus, Parker Inc., Cleveland, OH, USA. Available: <http://www.parker.com/literature/>
87. Kazakov Yu.B., Morozov A.N., Gulyaev I. V. Simulative Asymmetry of the External Electromagnetic Field in the Case of Damage to Synchronous Generators // Russian Electrical Engineering. 2019, Vol. 90 (1), pp. 11-16
88. Kim B. K., Chung W. K., Ohba K., “Design and performance tuning of sliding-mode controller for high-speed and high-accuracy positioning systems in disturbance

observer framework,” IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 56, no. 10, pp. 3798–3809, Oct. 2009.

89. Kong K., Bae J., M. Tomizuka M., “Control of rotary series elastic actuator for ideal force-mode actuation in human robot interaction applications,” IEEE/ASME Trans. Mechatronics, vol. 14, no. 1, pp. 105–118, Feb. 2009.
90. Korobatov D, Baturin A., Apdashev D., Abbasova H.M. Requirements definition, modeling, and simulation of control units of an electrohydraulic power amplifier. 2nd International Scientific-Practical Conference "Machine Building and Energy: New Concepts and Technologies. 2024, DOI: 10.4028/p-c1JZF9
91. Kurode S., Spurgeon S., Bandyopadhyay B., Gandhi P., “Sliding mode control for slosh-free motion using a nonlinear sliding surface,” IEEE/ASME Trans. Mechatronics, vol. 18, no. 2, pp. 714–724, Apr. 2013.
92. Lee S.J., Blackbum J.F. Steady-state axial forces on control-valve pistons // Trans. ASME. - 1952. - V. 74. - № 6. - P. 1005-1011.
93. Lindler J. E., Anderson E. H., “Piezoelectric direct drive servovalve,” in Proc. Smart Struct. Mater. Ind. Commercial Appl. Smart Struct. Technol., 2002, pp. 488–496.
94. Lin Y., Shi Y., Burton R., “Modeling and robust discrete-time slidingmode control design for a fluid power electrohydraulic actuator (EHA) system,” IEEE/ASME Trans. Mechatronics, vol. 18, no. 1, pp. 1–10, Feb.2013. 942 IEEE/ASME TRANSACTIONS ON MECHATRONICS, VOL. 19, NO. 3, JUNE 2014
95. LSV (H) G series high-speed linear servo valves, Yuken Kogyo Company, Ltd., Minatoku, Tokyo, Japan. Available: www.yuken.co.jp
96. Manring N. D., Hydraulic Control Systems. New York, NY, USA:Wiley, 2005.
205. Más F.R. Zhang Q., Hansen A.C. Electrohydraulic Steering Control - Mechatronics and Intelligent Systems for Off-road. - Springer
97. Miyajima T., Fujita T., Sakaki K., Kawashima K., Kagawa T., “Development of a digital control system for high-performance pneumatic servo valve,” Precis. Eng., vol. 15, pp. 1005–1024, 2007.
98. Monmasson E., Idkhajine L., Naouar M., “FPGA-based controllers,” IEEE Ind. Electron. Mag., vol. 5, no. 1, pp. 14–26, Mar. 2011.

99. Naouar M.-W., Monmasson E., Naassani A., Slama-Belkhodja I., Patin N., “FPGA-based current controllers for AC machine driver—a review,” IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 54, no. 4, pp. 1907–1925, Aug.2007.
100. Nascutiu L., “Voice coil actuator for hydraulic servo valves with high transient performances,” in Proc. IEEE Int. Conf. Autom. Quality Testing, Robot., May 2006, vol. 1, pp. 185–190.
- Neustroev N., Sogrin A., Korobatov D., Ardashev D.V., Dadashov R. The Development and Study of an Electromechanical Converter for an Electro-Hydraulic Power Amplifier of a Servo-Hydraulic Drive. Advances in Science and Technology, V. 148, pp. 163-178, 2024, DOI: <https://doi.org/10.4028/p-6hcdrD>
101. Nisihara T., Sawamura T., Naito G. The effects of load of hydraulic servomotor on its frequency characteristic //Proc. 56-th, Japan Nat., Congr. Appl. Meeh., 1955.- P.551-556. c.
102. Ninnard M. B., Gery J.-M., Hazelton A. J., “High efficiency voice coil motor,” U.S. Patent 7 368 838, 2008
103. Ohnishi K., Shibata M., Murakami T., “Motion control for advanced mechatronics,” IEEE/ASME Trans. Mechatronics, vol. 1, no. 1, pp. 56–67, Mar. 1996.
104. Pfeffer P.E, Johnston D.N, Sokola M, Harrer M. Energy consumption of electro-hydraulic steering systems- 2005 - sae.org
105. Puyal D. Barragan L., Acero J., Burdio J., Millan I., “An FPGA-based digital modulator for full- or half-bridge inverter control,” IEEE Trans. Power Electron., vol. 21, no. 5, pp. 1479–1483, Sep. 2006.
106. Sente P., Labrique F., Alexandre P., “Efficient control of a piezoelectric linear actuator embedded into a servo-valve for aeronautic applications,” IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 59, no. 4, pp. 1971–1979, Apr. 2012.
107. Sathyan A., Milivojevic N., Lee Y., Krishnamurthy M., Emadi A., “An FPGA-based novel digital PWM control scheme for BLDC motor drives,” IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 56, no. 8, pp. 3040–3049, Aug.2009.
108. Shuai Wu, Zongxia Jiao, Liang Yan, *Senior Member, IEEE*, Rui Zhang, Juntao Yu, Chin-Yin Chen. Development of a Direct-Drive Servo Valve With High-Frequency

Voice Coil Motor and Advanced Digital Controller. 2014, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. 19(3):932-942, DOI:10.1109/TMECH.2013.2264218

109. Song M.-G., Hur Y.-J., Park N.-C., Park K.-S., Park Y.-P., Lim S.-C., Park J.-H., "Design of a voice-coil actuator for optical image stabilization based on genetic algorithm," IEEE Trans.Magn., vol. 45, no. 10, pp. 4558–4561, Oct. 2009.
110. Van J., Kamp D. Electro-hydraulic steering in off road vehicles - 2002 - elibrary.asabe.org
111. Veselic B., Perunicic-Drazenovic B., Milosavljevic C., "Improved discrete-time sliding-mode position control using Euler velocity estimation,"IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 57, no. 11, pp. 3840–3847, Nov.2010.
112. Yan L., Hu J., Yao N., Jiao Z., Chen I.-M., Lee K.-M, "Flux field formulation and back-iron analysis of tubular linear machines," IEEE Trans. Magn., vol. 48, no. 10, pp. 2617–2626, Oct. 2012.
113. Xing H.-L., Jeon J.-H., Park K., Oh I.-K., "Active disturbance rejection control for precise position tracking of ionic polymer metal composite actuators," IEEE/ASME Trans. Mechatronics, vol. 18, no. 1, pp. 86–95, Feb. 2013.
114. Xu Z., Chang S., "Improved moving coil electric machine for internal combustion linear generator," IEEE Trans. Energy Convers., vol. 25, no. 2,pp. 281–286, Jun. 2010.
115. Yi J., Chang S., Shen Y., "Disturbance-observer-based hysteresis compensation for piezoelectric actuators," IEEE/ASME Trans. Mechatronics, vol. 14, no. 4, pp. 456–464, Aug. 2009.
116. Yamamoto K. Control of electromechanical systems, application on electric power steering systems.- 2017 - theses.hal.science
117. Zetterstrom S. Electromechanical steering, suspension, drive and brake modules.- Proceedings IEEE 56th Vehicular Technology, 2002 - ieeexplore.ieee.org
118. XTR305 Industrial Analog Current or Voltage Output Driver
https://queeniu.net/lit/ds/symlink/xtr305.pdf?ts=1692234923023&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FXTR305

(дата обращения: 02.11.2024)

119. TPA9361 Precision Difference Amplifier

http://file.3peakic.com.cn:8080/product/Datasheet_TPA9361.pdf

(дата обращения: 02.11.2024)

120. Оптопара транзисторная одноканальная 817S-C

<https://www.promelec.ru/fs/sources/32/87/8e/3f/3aae5a366194e3df9ee4dbdf.pdf>

(дата обращения: 02.11.2024)

121. MS1808 96 kHz, 24 Bit Δ - Σ ADC

<https://www.promelec.ru/fs/sources/f4/a1/89/33/961eb36317acb4111f1f013b.pdf>

(дата обращения: 02.11.2024)

122. KSZ8863RLL <https://www.farnell.com/datasheets/1913744.pdf>

(дата обращения: 02.11.2024)

123. IRFB3607PBF <http://irf.ru/pdf/IRFS3607.pdf> (дата обращения: 02.11.2024)

124. LM5109BMAX/NOPB

<https://www.promelec.ru/fs/sources/07/0c/2c/71/c1bdee3a72d5af95ac737127.pdf>

(дата обращения: 02.11.2024)

125. Requirements Definition, Modeling, and Simulation of Control Units of an Electrohydraulic Power Amplifier <https://www.scientific.net/AST.148.179>

(дата обращения: 02.11.2024)

126. NSM2012-20B5R-DSPR

<https://www.promelec.ru/fs/sources/07/0c/2c/71/c1bdee3a72d5af95ac737127.pdf>

127. LM2575HVR-5.0

<https://www.promelec.ru/fs/sources/a5/cc/c4/55/9d59ae7d8ff7f2012a356012.pdf>

(дата обращения: 02.11.2024)

128. MODBUS Application Protocol Specification V1.1

https://сахара.ru/thumbs/517708/ModbusApplicationProtocol_v1_1.pdf

(дата обращения: 02.11.2024)

**ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Распределение потерь в частях ЭМП конструкции 2
для различных исполнений якоря**

Таблица П.1.1. Распределение потерь в частях ЭМП (вариант 1, одна перемычка)

№ п.п.	Наименование частей ЭМП	Величина потерь, Вт
1	Обмотка якоря	83.26
2	Гильза якоря	96.3
3	Гильза магнитов	8.59
4	Центр	26.09
5	Индуктор	3.21
6	Постоянные магниты	16.13
7	Общие потери	233
8	Демпферные потери	54.06

Таблица П.1.2. Распределение потерь в частях ЭМП (вариант 2, две перемычки)

№ п.п.	Наименование частей ЭМП	Величина потерь, Вт
1	Обмотка якоря	83.26
2	Гильза якоря	109
3	Гильза магнитов	5.87
4	Центр	15.62
5	Индуктор	2.15
6	Постоянные магниты	11.31
7	Общие потери	227
8	Демпферные потери	34.9

Таблица П.1.3. Распределение потерь в частях ЭМП (вариант 3, без прорези)

№ п.п.	Наименование частей ЭМП	Величина потерь, Вт
1	Обмотка якоря	83.26
2	Гильза якоря	108.65
3	Гильза магнитов	4.04
4	Центр	8.9
5	Индуктор	1.21
6	Постоянные магниты	8.8
7	Общие потери	214
8	Демпферные потери	23

Таблица П.1.4. Распределение потерь в частях ЭМП (вариант 4, полный разрез без перемычек)

№ п.п.	Наименование частей ЭМП	Величина потерь, Вт
1	Обмотка якоря	83.26
2	Гильза якоря	14.17
3	Гильза магнитов	14.61
4	Центр	46.59
5	Индуктор	5.26
6	Постоянные магниты	27.84
7	Общие потери	191
8	Демпферные потери	94.3

Таблица П.1.5. Распределение потерь в частях ЭМП (вариант 5, якорь с диэлектрической гильзой)

№ п.п.	Наименование частей ЭМП	Величина потерь, Вт
1	Обмотка якоря	83.26
262	Гильза якоря	0
3	Гильза магнитов	15.94
4	Центр	59.17
5	Индуктор	5.02
6	Постоянные магниты	28.25
7	Общие потери	191.64
8	Демпферные потери	108

ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Распределение потерь в частях ЭМП конструкции 3 для различных исполнений якоря

Таблица П.2.1. Распределение потерь в частях ЭМП (вариант 1, одна перемычка)

№ п.п.	Наименование частей ЭМП	Величина потерь, Вт
1	Обмотка якоря	83.26
2	Гильза якоря	196
3	Центр	38.99
4	Индуктор	6.7
5	Постоянные магниты	1.8
6	Общие потери	326
7	Демпферные потери	45

Таблица П.2.2. Распределение потерь в частях ЭМП (вариант 2, две перемычки)

№ п.п.	Наименование частей ЭМП	Величина потерь, Вт
1	Обмотка якоря	83.26
2	Гильза якоря	184.25
3	Центр	16.36
4	Индуктор	2.96
5	Постоянные магниты	0.9
6	Общие потери	287.73
7	Демпферные потери	19.32

Таблица П.2.3. Распределение потерь в частях ЭМП (вариант 3, без прорези)

№ п.п.	Наименование частей ЭМП	Величина потерь, Вт
1	Обмотка якоря	83.26
2	Гильза якоря	146.23
3	Центр	7.53
4	Индуктор	1.84
5	Постоянные магниты	0.6
5	Общие потери	239.47
7	Демпферные потери	9.98

Таблица П.2.4. Распределение потерь в частях ЭМП (вариант 4, полный разрез без перемычек)

№ п.п.	Наименование частей ЭМП	Величина потерь, Вт
1	Обмотка якоря	83.26
2	Гильза якоря	43.04
3	Центр	36.93
4	Индуктор	22.9
5	Постоянные магниты	4.5
6	Общие потери	190
7	Демпферные потери	64.3

Таблица П.2.5. Распределение потерь в частях ЭМП (вариант 5, якорь с диэлектрической гильзой)

№ п.п.	Наименование частей ЭМП	Величина потерь, Вт
1	Обмотка якоря	83.26
2	Гильза якоря	0
3	Центр	43.9
4	Индуктор	32.76
5	Постоянные магниты	6
6	Общие потери	165.93
7	Демпферные потери	18.08

ПРИЛОЖЕНИЕ 3. Программный код расчета магнитной системы по методу конечных элементов в программной среде Delphi

```

unit Rmagn;

interface
uses Windows, Messages, SysUtils, Variants, Classes, Graphics, Controls, Forms,
Dialogs, StdCtrls, Optim, math, Menus, ExtCtrls, MyImage, ComCtrls, jpeg,Parameters;

procedure Rpmag_MKE(Lm,bm,hm,Vz,Br,Hc:Single;var Bdel_real,MFVZ_real,kras_real:single);
var
a:array [0..19,0..19] of single;
b, xx: array[0..19] of single;

implementation

procedure Rpmag_MKE(Lm,bm,hm,Vz,Br,Hc:Single;var Bdel_real,MFVZ_real,kras_real:single);
const
Mu0=4*pi*1e-7;
Var
delVz,hj,mumag,mufe:single;
x,y:array[0..41] of single;
i,j : integer;
a1_0_0,a2_0_0,a3_0_0,a4_0_0,a4_1_1,a4_1_0,a5_1_1,a6_1_1,a6_1_2,a6_2_1,a6_2_2,a7_2_2,a8_2_3,a8_3_2,a8_2_2,a8_3_3,a9_3_3,a1
0_3_3:single;
a11_0_0,a12_0_0,a12_0_4,a12_4_0,a13_0_0,a13_0_1,a13_0_4,a13_1_0,a13_1_1,a13_1_4,a13_4_0,a13_4_1,a13_4_4:single;
a14_1_1,a14_1_5,a14_1_4,a14_5_1,a14_5_5,a14_5_4,a14_4_1,a14_4_5,a14_4_4:single;
a15_1_1,a15_1_2,a15_1_5,a15_2_1,a15_2_2,a15_2_5,a15_5_1,a15_5_2,a15_5_5:single;
a16_2_2,a16_2_6,a16_2_5,a16_6_2,a16_6_6,a16_6_5,a16_5_2,a16_5_6,a16_5_5:single;
a17_2_2,a17_2_3,a17_2_6,a17_3_2,a17_3_3,a17_3_6,a17_6_2,a17_6_3,a17_6_6:single;
a18_3_3,a18_3_7,a18_3_6,a18_7_3,a18_7_7,a18_7_6,a18_6_3,a18_6_7,a18_6_6:single;
a19_3_3,a19_3_7,a19_7_3,a19_7_7,a20_7_7,a21_4_4,a22_4_4,a22_8_4,a22_8_8:single;
a23_4_4,a23_4_5,a23_4_8,a23_5_4,a23_5_5,a23_5_8,a23_8_4,a23_8_5,a23_8_8:single;
a24_5_5,a24_5_9,a24_5_8,a24_9_5,a24_9_9,a24_9_8,a24_8_5,a24_8_9,a24_8_8:single;
a25_5_5,a25_5_6,a25_5_9,a25_6_5,a25_6_6,a25_6_9,a25_9_5,a25_9_6,a25_9_9:single;
a26_6_6,a26_6_10,a26_6_9,a26_10_6,a26_10_10,a26_10_9,a26_9_6,a26_9_10,a26_9_9:single;
a27_6_6,a27_6_7,a27_6_10,a27_7_6,a27_7_7,a27_7_10,a27_10_6,a27_10_7,a27_10_10:single;
a28_7_7,a28_7_11,a28_7_10,a28_11_7,a28_11_11,a28_11_10,a28_10_7,a28_10_11,a28_10_10:single;
a29_7_7,a29_7_11,a29_11_7,a29_11_11,a30_11_11,a31_8_8,a32_8_8,a32_8_12,a32_12_8,a32_12_12:single;
a33_9_9,a33_9_12,a33_9_8,a33_12_9,a33_12_12,a33_12_8,a33_8_9,a33_8_12,a33_8_8:single;
a34_9_9,a34_9_13,a34_9_12,a34_13_9,a34_13_13,a34_13_12,a34_12_9,a34_12_13,a34_12_12:single;
a35_9_9,a35_9_10,a35_9_13,a35_10_9,a35_10_10,a35_10_13,a35_13_9,a35_13_10,a35_13_13:single;
a36_10_10,a36_10_14,a36_10_13,a36_14_10,a36_14_14,a36_13_10,a36_13_14,a36_13_13,a36_14_13:single;
a37_10_10,a37_10_11,a37_10_14,a37_11_10,a37_11_11,a37_11_14,a37_14_10,a37_14_11,a37_14_14:single;
a38_11_11,a38_11_15,a38_11_14,a38_15_15,a38_15_14,a38_14_11,a38_14_15,a38_14_14,a38_15_11:single;
a39_11_11,a39_11_15,a39_15_11,a39_15_15,a40_15_15,a41_12_12,a42_12_12,a42_12_16,a42_16_12,a42_16_16:single;
a43_12_12,a43_12_13,a43_12_16,a43_13_12,a43_13_13,a43_13_16,a43_16_12,a43_16_13,a43_16_16:single;
a44_13_13,a44_13_17,a44_13_16,a44_17_13,a44_17_17,a44_17_16,a44_16_13,a44_16_17,a44_16_16:single;
a45_13_13,a45_13_14,a45_13_17,a45_14_13,a45_14_14,a45_14_17,a45_17_13,a45_17_14,a45_17_17:single;
a46_14_14,a46_14_18,a46_14_17,a46_18_14,a46_18_18,a46_18_17,a46_17_14,a46_17_18,a46_17_17:single;
a47_14_14,a47_14_15,a47_14_18,a47_15_14,a47_15_15,a47_15_18,a47_18_14,a47_18_15,a47_18_18:single;
a48_15_15,a48_15_19,a48_15_18,a48_19_15,a48_19_19,a48_19_18,a48_18_15,a48_18_19,a48_18_18:single;
a49_15_15,a49_15_19,a49_19_15,a49_19_19,a50_19_19:single;
a51_16_16,a52_16_16,a53_16_16,a53_16_17,a53_17_16,a53_17_17,a54_17_17,a55_17_17,a55_17_18,a55_18_17,a55_18_18:single;
a56_18_18,a57_18_18,a57_18_19,a57_19_18,a57_19_19,a58_19_19,a59_19_19,a60_19_19:single;
begin
//hm:=0.01;
//bm:=0.04;
//Lm:=0.04;
//Vz:=0.0025;
delVz:=0.001;
hj:=0.5*bm;
//Hc:=890000;
//Br:=1.1;
mumag:=Br/Hc;
mufe:=0.01;
///////////Координаты узлов элементов///////////
x[0]:=hj;
x[1]:=hj+delVz;
x[2]:=hj+delVz+0.5*bm/5*1;
x[3]:=hj+delVz+0.5*bm/5*3;

```

```

x[4]:=hj;
x[5]:=hj+delVz;
x[6]:=hj+delVz+0.5*bm/5*1;
x[7]:=hj+delVz+0.5*bm/5*3;
x[8]:=hj;
x[9]:=hj+delVz;
x[10]:=hj+delVz+0.5*bm/5*1;
x[11]:=hj+delVz+0.5*bm/5*3;
x[12]:=hj;
x[13]:=hj+delVz;
x[14]:=hj+delVz+0.5*bm/5*1;
x[15]:=hj+delVz+0.5*bm/5*3;
x[16]:=hj;
x[17]:=hj+delVz;
x[18]:=hj+delVz+0.5*bm/5*1;
x[19]:=hj+delVz+0.5*bm/5*3;
x[20]:=hj+delVz+0.5*bm/5*5;
x[21]:=hj+delVz+0.5*bm/5*5;
x[22]:=hj+delVz+0.5*bm/5*3;
x[23]:=hj+delVz+0.5*bm/5*1;
x[24]:=hj+delVz;
x[25]:=hj;
x[26]:=0;
x[27]:=0;
x[28]:=0;
x[29]:=0;
x[30]:=0;
x[31]:=0;
x[32]:=0;
x[33]:=hj;
x[34]:=hj+delVz;
x[35]:=hj+delVz+0.5*bm/5*1;
x[36]:=hj+delVz+0.5*bm/5*3;
x[37]:=hj+delVz+0.5*bm/5*5;
x[38]:=hj+delVz+0.5*bm/5*5;
x[39]:=hj+delVz+0.5*bm/5*5;
x[40]:=hj+delVz+0.5*bm/5*5;
x[41]:=hj+delVz+0.5*bm/5*5;

```

```

y[0]:=hj;
y[1]:=hj;
y[2]:=hj;
y[3]:=hj;
y[4]:=hj+hm/3*1;
y[5]:=hj+hm/3*1;
y[6]:=hj+hm/3*1;
y[7]:=hj+hm/3*1;
y[8]:=hj+hm/3*2;
y[9]:=hj+hm/3*2;
y[10]:=hj+hm/3*2;
y[11]:=hj+hm/3*2;
y[12]:=hj+hm/3*3;
y[13]:=hj+hm/3*3;
y[14]:=hj+hm/3*3;
y[15]:=hj+hm/3*3;
y[16]:=hj+hm/3*3+Vz ;
y[17]:=hj+hm/3*3+Vz ;
y[18]:=hj+hm/3*3+Vz ;
y[19]:=hj+hm/3*3+Vz ;
y[20]:=hj+hm/3*3+Vz ;
y[21]:=hj+hm/3*3+Vz+hj;
y[22]:=hj+hm/3*3+Vz+hj;
y[23]:=hj+hm/3*3+Vz+hj;
y[24]:=hj+hm/3*3+Vz+hj;
y[25]:=hj+hm/3*3+Vz+hj ;
y[26]:=-hj+hm/3*3+Vz+hj;
y[27]:=hj+hm/3*3+Vz;
y[28]:=hj+hm/3*3;
y[29]:=hj+hm/3*2;
y[30]:=hj+hm/3*1;
y[31]:=hj ;
y[32]:=0;

```

```

y[33]:=0 ;
y[34]:=0 ;
y[35]:=0 ;
y[36]:=0 ;
y[37]:=0 ;
y[38]:=hj;
y[39]:=hj+hm/3*1;
y[40]:=hj+hm/3*2;
y[41]:=hj+hm/3*3 ;

////////////////// Обнуление глобальной матрицы/////////////////
for I:=0 to 19 do begin
for j:=0 to 19 do begin
a[i,j]:=0;
end;
end;

for j:=0 to 19 do begin
b[j]:=0;
end;

//////////////////Формирование локальных матриц////////////////
a1_0_0:=1/(2*mufe*hj*hj)*(y[32]-y[0])*(y[32]-y[0]);
////////////////
a2_0_0:=1/(2*mufe*hj*hj)*((x[33]-x[32])*(x[33]-x[32])+(y[32]-y[33])*(y[32]-y[33]));
////////////////
a3_0_0:=1/(2*mufe*hj*delVz)*((x[34]-x[33])*(x[34]-x[33]));
////////////////
a4_0_0:=1/(2*mufe*hj*delVz)*(y[34]-y[31])*(y[34]-y[31]);
a4_0_1:=1/(2*mufe*hj*delVz)*(y[34]-y[1])*(y[0]-y[34]);
a4_1_1:=1/(2*mufe*hj*delVz)*((x[34]-x[0])*(x[34]-x[0])+(y[0]-y[34])*(y[0]-y[34]));
a4_1_0:=a4_0_1 ;
////////////////
a5_1_1:=1/(0.2*mufe*bm*hj)*(x[35]-x[34])*(x[35]-x[34]);
////////////////
a6_1_1:= 1/(0.2*mufe*bm*hj)*y[2]*y[2];
a6_1_2:= 1/(0.2*mufe*bm*hj)*(y[35]-y[2])*y[1];
a6_2_1:=a6_1_2;
a6_2_2:= 1/(0.2*mufe*bm*hj)*((x[35]-x[1])*(x[35]-x[1])+(y[1]*y[1]));
////////////////
a7_2_2:= 1/(0.4*mufe*bm*hj)*((x[36]-x[35])*(x[36]-x[35]));
////////////////
a8_2_2:= 1/(0.4*mufe*bm*hj)*((x[3]-x[36])*(x[3]-x[36])+(y[36]-y[3])*(y[36]-y[3]));
a8_2_3:= 1/(0.4*mufe*bm*hj)*((x[3]-x[36])*(x[36]-x[2])+(y[36]-y[3])*(y[2]));
a8_3_2:=a8_2_3;
a8_3_3:= 1/(0.4*mufe*bm*hj)*((x[36]-x[2])*(x[36]-x[2])+(y[2])*y[2]));
////////////////
a9_3_3:= 1/(0.4*mufe*bm*hj)*((x[37]-x[36])*(x[37]-x[36])+(y[36]-y[37])*(y[36]-y[37]));
////////////////
a10_3_3:= 1/(0.4*mufe*bm*hj)*((x[38]-x[37])*(x[38]-x[37])+(y[37]-y[38])*(y[37]-y[38]));
////////////////
a11_0_0:= 1/(4*mufe*(hm*hj/6))*(x[31]-x[30])*(x[31]-x[30])+(y[30]-y[31])*(y[30]-y[31]);
////////////////
a12_0_0:= 1/(4*mufe*(hm*hj/6))*(x[30]-x[4])*(x[30]-x[4])+(y[4]-y[30])*(y[4]-y[30]);
a12_0_4:= 1/(4*mufe*(hm*hj/6))*(x[30]-x[4])*(x[0]-x[30])+(y[4]-y[30])*(y[30]-y[0]);
a12_4_4:= 1/(4*mufe*(hm*hj/6))*(x[0]-x[30])*(x[0]-x[30])+(y[30]-y[0])*(y[30]-y[0]);
////////////////
a13_0_0:= 1/(4*mu0*(hm*delVz/6))*(x[4]-x[1])*(x[4]-x[1])+(y[1]-y[4])*(y[1]-y[4]);
a13_0_1:= 1/(4*mu0*(hm*delVz/6))*(x[4]-x[1])*(x[0]-x[4])+(y[1]-y[4])*(y[4]-y[0]);
a13_0_4:= 1/(4*mu0*(hm*delVz/6))*(x[4]-x[1])*(x[1]-x[0])+(y[1]-y[4])*(y[0]-y[1]);
a13_1_0:= a13_0_1;
a13_1_1:=1/(4*mu0*(hm*delVz/6))*(x[0]-x[4])*(x[0]-x[4])+(y[4]-y[0])*(y[4]-y[0]);
a13_1_4:=1/(4*mu0*(hm*delVz/6))*(x[0]-x[4])*(x[1]-x[0])+(y[4]-y[0])*(y[0]-y[1]);
a13_4_0:= a13_0_4;
a13_4_1:= a13_1_4;
a13_4_4:=1/(4*mu0*(hm*delVz/6))*(x[1]-x[0])*(x[1]-x[0])+(y[0]-y[1])*(y[0]-y[1]);
////////////////
a14_1_1:=1/(4*mu0*(hm*delVz/6))*(x[4]-x[5])*(x[4]-x[5])+(y[5]-y[4])*(y[5]-y[4]);
a14_1_5:=1/(4*mu0*(hm*delVz/6))*(x[4]-x[5])*(x[1]-x[4])+(y[5]-y[4])*(y[4]-y[1]);
a14_1_4:=1/(4*mu0*(hm*delVz/6))*(x[4]-x[5])*(x[5]-x[1])+(y[5]-y[4])*(y[1]-y[5]);
a14_5_1:= a14_1_5;

```

```

a14_5_5:= 1/(4*mu0*(hm*delVz/6))*(x[1]-x[4])*x[1]-x[4])+(y[4]-y[1])*y[4]-y[1]));
a14_5_4:= 1/(4*mu0*(hm*delVz/6))*(x[1]-x[4])*x[5]-x[1])+(y[4]-y[1])*y[1]-y[5]);
a14_4_1:= a14_1_4;
a14_4_5:= a14_5_4;
a14_4_4:= 1/(4*mu0*(hm*delVz/6))*(x[5]-x[1])*x[5]-x[1])+(y[1]-y[5])*y[1]-y[5]);
///////////////////////////////
a15_1_1:= 1/(4*mumag*(0.05*hm*bm/3))*(x[5]-x[2])*x[5]-x[2])+(y[2]-y[5])*y[2]-y[5]);
a15_1_2:= 1/(4*mumag*(0.05*hm*bm/3))*(x[5]-x[2])*x[1]-x[5])+(y[2]-y[5])*y[5]-y[1]);
a15_1_5:= 1/(4*mumag*(0.05*hm*bm/3))*(x[5]-x[2])*x[2]-x[1])+(y[2]-y[5])*y[1]-y[2]);
a15_2_1:= a15_1_2;
a15_2_2:= 1/(4*mumag*(0.05*hm*bm/3))*(x[1]-x[5])*x[1]-x[5])+(y[5]-y[1])*y[5]-y[1]);
a15_2_5:= 1/(4*mumag*(0.05*hm*bm/3))*(x[1]-x[5])*x[2]-x[1])+(y[5]-y[1])*y[1]-y[2]);
a15_5_1:= a15_1_5;
a15_5_2:= a15_2_5;
a15_5_5:= 1/(4*mumag*(0.05*hm*bm/3))*(x[2]-x[1])*x[2]-x[1])+(y[1]-y[2])*y[1]-y[2]);
/////////////////////////////
a16_2_2:= 1/(4*mumag*(0.05*hm*bm/3))*(x[5]-x[6])*x[5]-x[6])+(y[6]-y[5])*y[6]-y[5]);
a16_2_6:= 1/(4*mumag*(0.05*hm*bm/3))*(x[5]-x[6])*x[2]-x[5])+(y[6]-y[5])*y[5]-y[2]);
a16_2_5:= 1/(4*mumag*(0.05*hm*bm/3))*(x[5]-x[6])*x[6]-x[2])+(y[6]-y[5])*y[2]-y[6]);
a16_6_2:= a16_2_6;
a16_6_6:= 1/(4*mumag*(0.05*hm*bm/3))*(x[2]-x[5])*x[2]-x[5])+(y[5]-y[2])*y[5]-y[2]);
a16_6_5:= 1/(4*mumag*(0.05*hm*bm/3))*(x[2]-x[5])*x[6]-x[2])+(y[5]-y[2])*y[2]-y[6]);
a16_5_2:= a16_2_5;
a16_5_6:= a16_6_5;
a16_5_5:= 1/(4*mumag*(0.05*hm*bm/3))*(x[6]-x[2])*x[6]-x[2])+(y[2]-y[6])*y[2]-y[6]);
/////////////////////////////
a17_2_2:= 1/(4*mumag*(0.1*hm*bm/3))*(x[6]-x[3])*x[6]-x[3])+(y[3]-y[6])*y[3]-y[6]);
a17_2_3:= 1/(4*mumag*(0.1*hm*bm/3))*(x[6]-x[3])*x[2]-x[6])+(y[3]-y[6])*y[6]-y[2]);
a17_2_6:= 1/(4*mumag*(0.1*hm*bm/3))*(x[6]-x[3])*x[3]-x[2])+(y[3]-y[6])*y[2]-y[3]);
a17_3_2:= a17_2_3;
a17_3_3:= 1/(4*mumag*(0.1*hm*bm/3))*(x[2]-x[6])*x[2]-x[6])+(y[6]-y[2])*y[6]-y[2]);
a17_3_6:= 1/(4*mumag*(0.1*hm*bm/3))*(x[2]-x[6])*x[3]-x[2])+(y[6]-y[2])*y[2]-y[3]);
a17_6_2:= a17_2_6;
a17_6_3:= a17_3_6;
a17_6_6:= 1/(4*mumag*(0.1*hm*bm/3))*(x[3]-x[2])*x[3]-x[2])+(y[2]-y[3])*y[2]-y[3]);
/////////////////////////////
a18_3_3:= 1/(4*mumag*(0.1*hm*bm/3))*(x[6]-x[7])*x[6]-x[7])+(y[7]-y[6])*y[7]-y[6]);
a18_3_7:= 1/(4*mumag*(0.1*hm*bm/3))*(x[6]-x[7])*x[3]-x[6])+(y[7]-y[6])*y[6]-y[3]);
a18_3_6:= 1/(4*mumag*(0.1*hm*bm/3))*(x[6]-x[7])*x[7]-x[3])+(y[7]-y[6])*y[3]-y[7]);
a18_3_6:= 1/(4*mumag*(0.1*hm*bm/3))*(x[2]-x[6])*x[3]-x[2])+(y[6]-y[2])*y[2]-y[3]);
a18_7_3:= a18_3_7;
a18_7_7:= 1/(4*mumag*(0.1*hm*bm/3))*(x[3]-x[6])*x[3]-x[6])+(y[6]-y[3])*y[6]-y[3]);
a18_7_6:= 1/(4*mumag*(0.1*hm*bm/3))*(x[3]-x[6])*x[7]-x[3])+(y[6]-y[3])*y[3]-y[7]);
a18_6_3:= a18_3_6;
a18_6_7:= a18_7_6;
a18_6_6:= 1/(4*mumag*(0.1*hm*bm/3))*(x[7]-x[3])*x[7]-x[3])+(y[3]-y[7])*y[3]-y[7]);
/////////////////////////////
a19_3_3:= 1/(4*mumag*(0.1*hm*bm/3))*(x[7]-x[38])*x[7]-x[38])+(y[38]-y[7])*y[38]-y[7]);
a19_3_7:= 1/(4*mumag*(0.1*hm*bm/3))*(x[7]-x[38])*x[38]-x[3])+(y[38]-y[7])*y[3]-y[38]);
a19_7_3:= a19_3_7;
a19_7_7:= 1/(4*mumag*(0.1*hm*bm/3))*(x[38]-x[3])*x[38]-x[3])+(y[3]-y[38])*y[3]-y[38]);
/////////////////////////////
a20_7_7:= 1/(4*mumag*(0.1*hm*bm/3))*(x[39]-x[38])*x[39]-x[38])+(y[38]-y[39])*y[38]-y[39]);
/////////////////////////////
a21_4_4:= 1/(4*mu0*(hm*hj/6))*(x[39]-x[38])*x[39]-x[38])+(y[38]-y[39])*y[38]-y[39]);
/////////////////////////////
a22_4_4:= 1/(4*mu0*(hm*hj/6))*(x[29]-x[8])*x[29]-x[8])+(y[8]-y[29])*y[8]-y[29]);
a22_4_8:= 1/(4*mu0*(hm*hj/6))*(x[29]-x[8])*x[4]-x[29])+(y[8]-y[29])*y[29]-y[4]);
a22_8_4:= a22_4_8;
a22_8_8:= 1/(4*mu0*(hm*hj/6))*(x[4]-x[29])*x[4]-x[29])+(y[29]-y[4])*y[29]-y[4]);
/////////////////////////////
a23_4_4:= 1/(4*mu0*(hm*delvz/6))*(x[8]-x[5])*x[8]-x[5])+(y[5]-y[8])*y[5]-y[8]);
a23_4_5:= 1/(4*mu0*(hm*delvz/6))*(x[8]-x[5])*x[4]-x[8])+(y[5]-y[8])*y[8]-y[4]);
a23_4_8:= 1/(4*mu0*(hm*delvz/6))*(x[8]-x[5])*x[5]-x[4])+(y[5]-y[8])*y[4]-y[5]);
a23_5_4:= a23_4_5;
a23_5_5:= 1/(4*mu0*(hm*delvz/6))*(x[4]-x[8])*x[4]-x[8])+(y[8]-y[4])*y[8]-y[4]);
a23_5_8:= 1/(4*mu0*(hm*delvz/6))*(x[4]-x[8])*x[5]-x[5])+(y[8]-y[4])*y[4]-y[5]);
a23_8_4:= a23_4_8;
a23_8_5:= a23_5_8;
a23_8_8:= 1/(4*mu0*(hm*delvz/6))*(x[5]-x[4])*x[5]-x[4])+(y[4]-y[5])*y[4]-y[5]);
/////////////////////////////
a24_5_5:= 1/(4*mu0*(hm*delvz/6))*(x[8]-x[9])*x[8]-x[9])+(y[9]-y[8])*y[9]-y[8]);
a24_5_9:= 1/(4*mu0*(hm*delvz/6))*(x[8]-x[9])*x[5]-x[8])+(y[9]-y[8])*y[8]-y[5]);

```

```

a24_5_8:= 1/(4*mu0*(hm*delvz/6))*((x[8]-x[9])*(x[9]-x[5])+(y[9]-y[8])*(y[5]-y[9]));
a24_9_5:= a24_5_9;
a24_9_9:= 1/(4*mu0*(hm*delvz/6))*((x[5]-x[8])*(x[5]-x[8])+(y[8]-y[5])*(y[8]-y[5]));
a24_9_8:= 1/(4*mu0*(hm*delvz/6))*((x[5]-x[8])*(x[9]-x[5])+(y[8]-y[5])*(y[5]-y[9]));
a24_8_5:= a24_5_8;
a24_8_9:= a24_9_8;
a24_8_8:= 1/(4*mu0*(hm*delvz/6))*((x[9]-x[5])*(x[9]-x[5])+(y[5]-y[9])*(y[5]-y[9]));
///////////////////////////////
a25_5_5:= 1/(4*mumag*(0.05*hm*bm/3))*((x[9]-x[6])*(x[9]-x[6])+(y[6]-y[9])*(y[6]-y[9]));
a25_5_6:= 1/(4*mumag*(0.05*hm*bm/3))*((x[9]-x[6])*(x[5]-x[9])+(y[2]-y[5])*(y[9]-y[5]));
a25_5_9:= 1/(4*mumag*(0.05*hm*bm/3))*((x[9]-x[6])*(x[2]-x[1])+(y[2]-y[5])*(y[5]-y[6]));
a25_6_5:= a25_5_6;
a25_6_6:= 1/(4*mumag*(0.05*hm*bm/3))*((x[5]-x[9])*(x[5]-x[9])+(y[9]-y[5])*(y[9]-y[5]));
a25_6_9:= 1/(4*mumag*(0.05*hm*bm/3))*((x[5]-x[9])*(x[2]-x[1])+(y[9]-y[5])*(y[5]-y[6]));
a25_9_5:= a25_5_9;
a25_9_6:= a25_6_9;
a25_9_9:= 1/(4*mumag*(0.05*hm*bm/3))*((x[2]-x[1])*(x[2]-x[1])+(y[5]-y[6])*(y[5]-y[6]));
/////////////////////////////
a26_6_6:= 1/(4*mumag*(0.05*hm*bm/3))*((x[9]-x[10])*(x[9]-x[10])+(y[10]-y[9])*(y[10]-y[9]));
a26_6_10:= 1/(4*mumag*(0.05*hm*bm/3))*((x[9]-x[10])*(x[6]-x[9])+(y[10]-y[9])*(y[9]-y[6]));
a26_6_9:= 1/(4*mumag*(0.05*hm*bm/3))*((x[9]-x[10])*(x[10]-x[6])+(y[10]-y[9])*(y[6]-y[10]));
a26_10_6:= a26_6_10;
a26_10_10:= 1/(4*mumag*(0.05*hm*bm/3))*((x[6]-x[9])*(x[6]-x[9])+(y[9]-y[6])*(y[9]-y[6]));
a26_10_9:= 1/(4*mumag*(0.05*hm*bm/3))*((x[6]-x[9])*(x[10]-x[6])+(y[9]-y[6])*(y[6]-y[10]));
a26_9_6:= a26_6_9;
a26_9_10:= a26_10_9;
a26_9_9:= 1/(4*mumag*(0.05*hm*bm/3))*((x[10]-x[6])*(x[10]-x[6])+(y[6]-y[10])*(y[6]-y[10]));
/////////////////////////////
a27_6_6:= 1/(4*mumag*(0.1*hm*bm/3))*((x[10]-x[7])*(x[10]-x[7])+(y[7]-y[10])*(y[7]-y[10]));
a27_6_7:= 1/(4*mumag*(0.1*hm*bm/3))*((x[10]-x[7])*(x[6]-x[10])+(y[7]-y[10])*(y[10]-y[6]));
a27_6_10:= 1/(4*mumag*(0.1*hm*bm/3))*((x[10]-x[7])*(x[7]-x[6])+(y[7]-y[10])*(y[6]-y[7]));
a27_7_6:= a27_6_7;
a27_7_7:= 1/(4*mumag*(0.1*hm*bm/3))*((x[6]-x[10])*(x[6]-x[10])+(y[10]-y[6])*(y[10]-y[6]));
a27_7_10:= 1/(4*mumag*(0.1*hm*bm/3))*((x[6]-x[10])*(x[7]-x[6])+(y[10]-y[6])*(y[6]-y[7]));
a27_10_6:= a27_6_10;
a27_10_7:= a27_7_10;
a27_10_10:= 1/(4*mumag*(0.1*hm*bm/3))*((x[7]-x[6])*(x[7]-x[6])+(y[6]-y[7])*(y[6]-y[7]));
/////////////////////////////
a28_7_7:= 1/(4*mumag*(0.1*hm*bm/3))*((x[10]-x[11])*(x[10]-x[11])+(y[11]-y[10])*(y[11]-y[10]));
a28_7_11:= 1/(4*mumag*(0.1*hm*bm/3))*((x[10]-x[11])*(x[7]-x[10])+(y[11]-y[10])*(y[10]-y[7]));
a28_7_10:= 1/(4*mumag*(0.1*hm*bm/3))*((x[10]-x[11])*(x[11]-x[7])+(y[11]-y[10])*(y[7]-y[11]));
a28_11_7:= a28_7_11;
a28_11_11:= 1/(4*mumag*(0.1*hm*bm/3))*((x[7]-x[10])*(x[7]-x[10])+(y[10]-y[7])*(y[10]-y[7]));
a28_11_10:= 1/(4*mumag*(0.1*hm*bm/3))*((x[7]-x[10])*(x[11]-x[7])+(y[10]-y[7])*(y[7]-y[11]));
a28_10_7:= a28_7_10;
a28_10_11:= a28_11_10;
a28_10_10:= 1/(4*mumag*(0.1*hm*bm/3))*((x[11]-x[7])*(x[11]-x[7])+(y[7]-y[11])*(y[7]-y[11]));
/////////////////////////////
a29_7_7:= 1/(4*mumag*(0.1*hm*bm/3))*((x[11]-x[39])*(x[11]-x[39])+(y[39]-y[11])*(y[39]-y[11]));
a29_7_11:= 1/(4*mumag*(0.1*hm*bm/3))*((x[11]-x[39])*(x[39]-x[7])+(y[39]-y[11])*(y[7]-y[39]));
a29_11_7:= a29_7_11;
a29_11_11:= 1/(4*mumag*(0.1*hm*bm/3))*((x[39]-x[7])*(x[39]-x[7])+(y[7]-y[39])*(y[7]-y[39]));
/////////////////////////////
a30_11_11:= 1/(4*mumag*(0.1*hm*bm/3))*((x[40]-x[39])*(x[40]-x[39])+(y[39]-y[40])*(y[39]-y[40]));
/////////////////////////////
a31_8_8:= 1/(4*mu0*(hm*hj/6))*((x[29]-x[28])*(x[29]-x[28])+(y[28]-y[29])*(y[28]-y[29]));
/////////////////////////////
a32_8_8:= 1/(4*mu0*(hm*hj/6))*((x[28]-x[12])*(x[28]-x[12])+(y[12]-y[28])*(y[12]-y[28]));
a32_8_12:= 1/(4*mu0*(hm*hj/6))*((x[28]-x[12])*(x[8]-x[28])+(y[12]-y[28])*(y[28]-y[8]));
a32_12_8:= a32_8_12;
a32_12_12:= 1/(4*mu0*(hm*hj/6))*((x[8]-x[28])*(x[8]-x[28])+(y[28]-y[8])*(y[28]-y[8]));
/////////////////////////////
a33_9_9:= 1/(4*mu0*(hm*delvz/6))*((x[8]-x[12])*(x[8]-x[12])+(y[12]-y[8])*(y[12]-y[8]));
a33_9_12:= 1/(4*mu0*(hm*delvz/6))*((x[8]-x[12])*(x[9]-x[8])+(y[12]-y[8])*(y[8]-y[9]));
a33_9_8:= 1/(4*mu0*(hm*delvz/6))*((x[8]-x[12])*(x[12]-x[9])+(y[12]-y[8])*(y[9]-y[12]));
a33_12_9:= a33_9_12;
a33_12_12:= 1/(4*mu0*(hm*delvz/6))*((x[9]-x[8])*(x[9]-x[8])+(y[8]-y[9])*(y[8]-y[9]));
a33_12_8:= 1/(4*mu0*(hm*delvz/6))*((x[9]-x[8])*(x[12]-x[9])+(y[8]-y[9])*(y[9]-y[12]));
a33_8_9:= a33_9_8;
a33_8_12:= a33_12_8;
a33_8_8:= 1/(4*mu0*(hm*delvz/6))*((x[12]-x[9])*(x[12]-x[9])+(y[9]-y[12])*(y[9]-y[12]));
/////////////////////////////
a34_9_9:= 1/(4*mu0*(hm*delvz/6))*((x[12]-x[13])*(x[12]-x[13])+(y[13]-y[12])*(y[13]-y[12]));

```

```

a34_9_13:= 1/(4*mu0*(hm*delvz/6))*((x[12]-x[13])*(x[9]-x[12])+(y[13]-y[12])*(y[12]-y[9]));
a34_9_12:= 1/(4*mu0*(hm*delvz/6))*((x[12]-x[13])*(x[13]-x[9])+(y[13]-y[12])*(y[9]-y[13]));
a34_13_9:= a34_9_13;
a34_13_13:= 1/(4*mu0*(hm*delvz/6))*((x[9]-x[12])*(x[9]-x[12])+(y[12]-y[9])*(y[12]-y[9]));
a34_13_12:= 1/(4*mu0*(hm*delvz/6))*((x[9]-x[12])*(x[13]-x[9])+(y[12]-y[9])*(y[9]-y[13]));
a34_12_9:= a34_9_12;
a34_12_13:= a34_13_12;
a34_12_12:= 1/(4*mu0*(hm*delvz/6))*((x[13]-x[9])*(x[13]-x[9])+(y[9]-y[13])*(y[9]-y[13]));
///////////////////////////////
a35_9_9:= 1/(4*mumag*(0.05*hm*bm/3))*((x[13]-x[10])*(x[13]-x[10])+(y[10]-y[13])*(y[10]-y[13]));
a35_9_10:= 1/(4*mumag*(0.05*hm*bm/3))*((x[13]-x[10])*(x[9]-x[13])+(y[10]-y[13])*(y[13]-y[9]));
a35_9_13:= 1/(4*mumag*(0.05*hm*bm/3))*((x[13]-x[10])*(x[10]-x[9])+(y[10]-y[13])*(y[9]-y[10]));
a35_10_9:= a35_9_10;
a35_10_10:= 1/(4*mumag*(0.05*hm*bm/3))*((x[9]-x[13])*(x[9]-x[13])+(y[13]-y[9])*(y[13]-y[9]));
a35_10_13:= 1/(4*mumag*(0.05*hm*bm/3))*((x[9]-x[13])*(x[10]-x[9])+(y[13]-y[9])*(y[9]-y[10]));
a35_13_9:= a35_9_13;
a35_13_10:= a35_10_13;
a35_13_13:= 1/(4*mumag*(0.05*hm*bm/3))*((x[10]-x[9])*(x[10]-x[9])+(y[9]-y[10])*(y[9]-y[10]));
///////////////////////////////
a36_10_10:= 1/(4*mumag*(0.05*hm*bm/3))*((x[13]-x[14])*(x[13]-x[14])+(y[14]-y[13])*(y[14]-y[13]));
a36_10_14:= 1/(4*mumag*(0.05*hm*bm/3))*((x[13]-x[14])*(x[10]-x[13])+(y[14]-y[13])*(y[13]-y[10]));
a36_10_13:= 1/(4*mumag*(0.05*hm*bm/3))*((x[13]-x[14])*(x[14]-x[10])+(y[14]-y[13])*(y[10]-y[14]));
a36_14_10:= a36_10_14;
a36_14_14:= 1/(4*mumag*(0.05*hm*bm/3))*((x[10]-x[13])*(x[10]-x[13])+(y[13]-y[10])*(y[13]-y[10]));
a36_14_13:= 1/(4*mumag*(0.05*hm*bm/3))*((x[10]-x[13])*(x[14]-x[10])+(y[13]-y[10])*(y[10]-y[14]));
a36_13_10:= a36_10_13;
a36_13_14:= a36_14_13;
a36_13_13:= 1/(4*mumag*(0.05*hm*bm/3))*((x[14]-x[10])*(x[14]-x[10])+(y[10]-y[14])*(y[10]-y[14]));
///////////////////////////////
a37_10_10:= 1/(4*mumag*(0.1*hm*bm/3))*((x[14]-x[11])*(x[14]-x[11])+(y[11]-y[14])*(y[11]-y[14]));
a37_10_11:= 1/(4*mumag*(0.1*hm*bm/3))*((x[14]-x[11])*(x[10]-x[14])+(y[11]-y[14])*(y[14]-y[10]));
a37_10_14:= 1/(4*mumag*(0.1*hm*bm/3))*((x[14]-x[11])*(x[11]-x[10])+(y[11]-y[14])*(y[10]-y[11]));
a37_11_10:= a37_10_11;
a37_11_11:= 1/(4*mumag*(0.1*hm*bm/3))*((x[10]-x[14])*(x[10]-x[14])+(y[10]-y[6])*(y[10]-y[6]));
a37_11_14:= 1/(4*mumag*(0.1*hm*bm/3))*((x[10]-x[14])*(x[11]-x[10])+(y[10]-y[6])*(y[10]-y[11]));
a37_14_10:= a37_10_14;
a37_14_11:= a37_11_14;
a37_14_14:= 1/(4*mumag*(0.1*hm*bm/3))*((x[11]-x[10])*(x[11]-x[10])+(y[10]-y[11])*(y[10]-y[11]));
///////////////////////////////
a38_11_11:= 1/(4*mumag*(0.1*hm*bm/3))*((x[14]-x[15])*(x[14]-x[15])+(y[15]-y[14])*(y[15]-y[14]));
a38_11_15:= 1/(4*mumag*(0.1*hm*bm/3))*((x[14]-x[15])*(x[11]-x[14])+(y[15]-y[14])*(y[14]-y[11]));
a38_11_14:= 1/(4*mumag*(0.1*hm*bm/3))*((x[14]-x[15])*(x[15]-x[11])+(y[15]-y[14])*(y[11]-y[15]));
a38_15_11:= a38_11_15;
a38_15_15:= 1/(4*mumag*(0.1*hm*bm/3))*((x[11]-x[14])*(x[11]-x[14])+(y[14]-y[11])*(y[14]-y[11]));
a38_15_14:= 1/(4*mumag*(0.1*hm*bm/3))*((x[11]-x[14])*(x[15]-x[11])+(y[14]-y[11])*(y[11]-y[15]));
a38_14_11:= a38_11_14;
a38_14_15:= a38_15_14;
a38_14_14:= 1/(4*mumag*(0.1*hm*bm/3))*((x[15]-x[11])*(x[15]-x[11])+(y[11]-y[15])*(y[11]-y[15]));
///////////////////////////////
a39_11_11:= 1/(4*mumag*(0.1*hm*bm/3))*((x[15]-x[40])*(x[15]-x[40])+(y[40]-y[15])*(y[40]-y[15]));
a39_11_15:= 1/(4*mumag*(0.1*hm*bm/3))*((x[15]-x[40])*(x[40]-x[11])+(y[40]-y[15])*(y[11]-y[40]));
a39_15_11:= a39_11_15;
a39_15_15:= 1/(4*mumag*(0.1*hm*bm/3))*((x[40]-x[11])*(x[40]-x[11])+(y[11]-y[40])*(y[11]-y[40]));
///////////////////////////////
a40_15_15:= 1/(4*mumag*(0.1*hm*bm/3))*((x[41]-x[40])*(x[41]-x[40])+(y[40]-y[41])*(y[40]-y[41]));
///////////////////////////////
a41_12_12:= 1/(4*mufe*(hj*vz/2))*((x[28]-x[27])*(x[28]-x[27])+(y[27]-y[28])*(y[27]-y[28]));
///////////////////////////////
a42_12_12:= 1/(4*mufe*(hj*vz/2))*((x[27]-x[16])*(x[27]-x[16])+(y[16]-y[27])*(y[16]-y[27]));
a42_12_16:= 1/(4*mufe*(hj*vz/2))*((x[27]-x[16])*(x[12]-x[27])+(y[16]-y[27])*(y[27]-y[12]));
a42_16_12:= a42_12_16;
a42_16_16:= 1/(4*mufe*(hj*vz/2))*((x[12]-x[27])*(x[12]-x[27])+(y[27]-y[12])*(y[27]-y[12]));
///////////////////////////////
a43_12_12:= 1/(4*mu0*(delvz*vz/2))*((x[16]-x[13])*(x[16]-x[13])+(y[13]-y[16])*(y[13]-y[16]));
a43_12_13:= 1/(4*mu0*(delvz*vz/2))*((x[16]-x[13])*(x[12]-x[16])+(y[13]-y[16])*(y[16]-y[12]));
a43_12_16:= 1/(4*mu0*(delvz*vz/2))*((x[16]-x[13])*(x[13]-x[12])+(y[13]-y[16])*(y[12]-y[13]));
a43_13_12:= a43_12_13;
a43_13_13:= 1/(4*mu0*(delvz*vz/2))*((x[12]-x[16])*(x[12]-x[16])+(y[16]-y[12])*(y[16]-y[12]));
a43_13_16:= 1/(4*mu0*(delvz*vz/2))*((x[12]-x[16])*(x[13]-x[12])+(y[16]-y[12])*(y[12]-y[13]));
a43_16_12:= a43_12_16;
a43_16_13:= a43_13_16;
a43_16_16:= 1/(4*mu0*(delvz*vz/2))*((x[13]-x[12])*(x[13]-x[12])+(y[12]-y[13])*(y[12]-y[13]));
///////////////////////////////

```

$a44_{13_13} := 1/(4^*mu0*(delvz*vz/2))*((x[16]-x[17])*(x[16]-x[17])+y[17]-y[16])*(y[17]-y[16]);$
 $a44_{13_17} := 1/(4^*mu0*(delvz*vz/2))*((x[16]-x[17])*(x[13]-x[16])+y[17]-y[16])*(y[16]-y[13]);$
 $a44_{13_16} := 1/(4^*mu0*(delvz*vz/2))*((x[16]-x[17])*(x[17]-x[13])+y[17]-y[16])*(y[13]-y[17]);$
 $a44_{17_13} := a44_{13_17};$
 $a44_{17_17} := 1/(4^*mu0*(delvz*vz/2))*((x[13]-x[16])*(x[13]-x[16])+y[16]-y[13])*(y[16]-y[13]);$
 $a44_{17_16} := 1/(4^*mu0*(delvz*vz/2))*((x[13]-x[16])*(x[17]-x[13])+y[16]-y[13])*(y[13]-y[17]);$
 $a44_{16_13} := a44_{13_16};$
 $a44_{16_17} := a44_{17_16};$
 $a44_{16_16} := 1/(4^*mu0*(delvz*vz/2))*((x[17]-x[13])*(x[17]-x[13])+y[13]-y[17])*(y[13]-y[17]);$
 $a45_{13_13} := 1/(4^*mu0*(0.05*bm*vz))*((x[17]-x[14])*(x[17]-x[14])+y[14]-y[17])*(y[14]-y[17]);$
 $a45_{13_14} := 1/(4^*mu0*(0.05*bm*vz))*((x[17]-x[14])*(x[13]-x[17])+y[14]-y[17])*(y[17]-y[13]);$
 $a45_{13_17} := 1/(4^*mu0*(0.05*bm*vz))*((x[17]-x[14])*(x[14]-x[13])+y[14]-y[17])*(y[13]-y[14]);$
 $a45_{14_13} := a45_{13_14};$
 $a45_{14_14} := 1/(4^*mu0*(0.05*bm*vz))*((x[13]-x[17])*(x[13]-x[17])+y[17]-y[13])*(y[17]-y[13]);$
 $a45_{14_17} := 1/(4^*mu0*(0.05*bm*vz))*((x[13]-x[17])*(x[14]-x[13])+y[17]-y[13])*(y[13]-y[14]);$
 $a45_{17_13} := a45_{13_17};$
 $a45_{17_14} := a45_{14_17};$
 $a45_{17_17} := 1/(4^*mu0*(0.05*bm*vz))*((x[14]-x[13])*(x[14]-x[13])+y[13]-y[14])*(y[13]-y[14]);$
 $a46_{14_14} := 1/(4^*mu0*(0.05*bm*vz))*((x[17]-x[18])*(x[17]-x[18])+y[18]-y[17])*(y[18]-y[17]);$
 $a46_{14_18} := 1/(4^*mu0*(0.05*bm*vz))*((x[17]-x[18])*(x[14]-x[17])+y[18]-y[17])*(y[17]-y[14]);$
 $a46_{14_17} := 1/(4^*mu0*(0.05*bm*vz))*((x[17]-x[18])*(x[18]-x[14])+y[18]-y[17])*(y[14]-y[18]);$
 $a46_{18_14} := a46_{14_18};$
 $a46_{18_18} := 1/(4^*mu0*(0.05*bm*vz))*((x[14]-x[17])*(x[14]-x[17])+y[17]-y[14])*(y[17]-y[14]);$
 $a46_{18_17} := 1/(4^*mu0*(0.05*bm*vz))*((x[14]-x[17])*(x[18]-x[14])+y[17]-y[14])*(y[14]-y[18]);$
 $a46_{17_14} := a46_{14_17};$
 $a46_{17_18} := a46_{18_17};$
 $a46_{17_17} := 1/(4^*mu0*(0.05*bm*vz))*((x[18]-x[14])*(x[18]-x[14])+y[14]-y[18])*(y[14]-y[18]);$
 $a47_{14_14} := 1/(4^*mu0*(0.1*bm*vz))*((x[18]-x[15])*(x[18]-x[15])+y[15]-y[18])*(y[15]-y[18]);$
 $a47_{14_15} := 1/(4^*mu0*(0.1*bm*vz))*((x[18]-x[15])*(x[14]-x[18])+y[15]-y[18])*(y[18]-y[14]);$
 $a47_{14_18} := 1/(4^*mu0*(0.1*bm*vz))*((x[18]-x[15])*(x[15]-x[14])+y[15]-y[18])*(y[14]-y[15]);$
 $a47_{15_14} := a47_{14_15};$
 $a47_{15_15} := 1/(4^*mu0*(0.1*bm*vz))*((x[14]-x[18])*(x[14]-x[18])+y[18]-y[14])*(y[18]-y[14]);$
 $a47_{15_18} := 1/(4^*mu0*(0.1*bm*vz))*((x[14]-x[18])*(x[15]-x[14])+y[18]-y[14])*(y[14]-y[15]);$
 $a47_{18_14} := a47_{14_18};$
 $a47_{18_15} := a47_{15_18};$
 $a47_{18_18} := 1/(4^*mu0*(0.1*bm*vz))*((x[15]-x[14])*(x[15]-x[14])+y[14]-y[15])*(y[14]-y[15]);$
 $a48_{15_15} := 1/(4^*mu0*(0.1*bm*vz))*((x[18]-x[19])*(x[18]-x[19])+y[19]-y[18])*(y[19]-y[18]);$
 $a48_{15_19} := 1/(4^*mu0*(0.1*bm*vz))*((x[18]-x[19])*(x[15]-x[18])+y[19]-y[18])*(y[18]-y[15]);$
 $a48_{15_18} := 1/(4^*mu0*(0.1*bm*vz))*((x[18]-x[19])*(x[19]-x[15])+y[19]-y[18])*(y[15]-y[19]);$
 $a48_{19_15} := a48_{15_19};$
 $a48_{19_19} := 1/(4^*mu0*(0.1*bm*vz))*((x[15]-x[18])*(x[15]-x[18])+y[18]-y[15])*(y[18]-y[15]);$
 $a48_{19_18} := 1/(4^*mu0*(0.1*bm*vz))*((x[15]-x[18])*(x[15]-x[19])+y[18]-y[15])*(y[15]-y[19]);$
 $a48_{18_15} := a48_{15_18};$
 $a48_{18_19} := a48_{19_18};$
 $a48_{18_18} := 1/(4^*mu0*(0.1*bm*vz))*((x[19]-x[15])*(x[19]-x[15])+y[15]-y[19])*(y[15]-y[19]);$
 $a49_{15_15} := 1/(4^*mu0*(0.1*bm*vz))*((x[19]-x[41])*(x[19]-x[41])+y[41]-y[19])*(y[41]-y[19]);$
 $a49_{15_19} := 1/(4^*mu0*(0.1*bm*vz))*((x[19]-x[41])*(x[41]-x[15])+y[41]-y[19])*(y[15]-y[41]);$
 $a49_{19_15} := a49_{15_19};$
 $a49_{19_19} := 1/(4^*mu0*(0.1*bm*vz))*((x[41]-x[15])*(x[41]-x[15])+y[15]-y[41])*(y[15]-y[41]);$
 $a50_{19_19} := 1/(4^*mu0*(0.1*bm*vz))*((x[20]-x[41])*(x[20]-x[41])+y[41]-y[20])*(y[41]-y[20]);$
 $a51_{16_16} := 1/(4^*mufe*(0.5*hj*hj))*((x[27]-x[26])*(x[27]-x[26])+y[26]-y[27])*(y[26]-y[27]);$
 $a52_{16_16} := 1/(4^*mufe*(0.5*hj*hj))*((x[26]-x[25])*(x[26]-x[25])+y[25]-y[26])*(y[26]-y[26]);$
 $a53_{16_16} := 1/(4^*mufe*(0.5*hj*delvz))*((x[25]-x[17])*(x[25]-x[17])+y[17]-y[25])*(y[17]-y[25]);$
 $a53_{16_17} := 1/(4^*mufe*(0.5*hj*delvz))*((x[25]-x[17])*(x[16]-x[25])+y[17]-y[25])*(y[25]-y[16]);$
 $a53_{17_16} := a53_{16_17};$
 $a53_{17_17} := 1/(4^*mufe*(0.5*hj*delvz))*((x[16]-x[25])*(x[16]-x[25])+y[25]-y[16])*(y[25]-y[16]);$
 $a54_{17_17} := 1/(4^*mufe*(0.5*hj*delvz))*((x[25]-x[24])*(x[25]-x[24])+y[24]-y[25])*(y[24]-y[25]);$
 $a55_{17_17} := 1/(4^*mufe*(0.05*hj*bm))*((x[24]-x[18])*(x[24]-x[18])+y[18]-y[24])*(y[18]-y[24]);$
 $a55_{17_18} := 1/(4^*mufe*(0.05*hj*bm))*((x[24]-x[18])*(x[17]-x[24])+y[18]-y[24])*(y[24]-y[17]);$
 $a55_{18_17} := a55_{17_18};$
 $a55_{18_18} := 1/(4^*mufe*(0.05*hj*bm))*((x[17]-x[24])*(x[17]-x[24])+y[24]-y[17])*(y[24]-y[17]);$

```

a56_18_18:= 1/(4*mufe*(0.05*hj*bm))*((x[24]-x[23])*(x[24]-x[23])+(y[23]-y[24])*(y[23]-y[24]));
/////////////////////////////////////////////////////////////////////////
a57_18_18:= 1/(4*mufe*(0.1*hj*bm))*((x[23]-x[19])*(x[23]-x[19])+(y[19]-y[23])*(y[19]-y[23]));
a57_18_19:= 1/(4*mufe*(0.1*hj*bm))*((x[23]-x[19])*(x[18]-x[23])+(y[19]-y[23])*(y[23]-y[18]));
a57_19_18:= a57_18_19;
a57_19_19:= 1/(4*mufe*(0.1*hj*bm))*((x[18]-x[23])*(x[18]-x[23])+(y[23]-y[18])*(y[23]-y[18]));
/////////////////////////////////////////////////////////////////////////
a58_19_19:= 1/(4*mufe*(0.1*hj*bm))*((x[23]-x[22])*(x[23]-x[22])+(y[22]-y[23])*(y[22]-y[23]));
/////////////////////////////////////////////////////////////////////////
a59_19_19:= 1/(4*mufe*(0.1*hj*bm))*((x[22]-x[21])*(x[22]-x[21])+(y[21]-y[22])*(y[21]-y[22]));
/////////////////////////////////////////////////////////////////////////
a60_19_19:= 1/(4*mufe*(0.1*hj*bm))*((x[21]-x[20])*(x[21]-x[20])+(y[20]-y[21])*(y[20]-y[21]));
/////////////////////////////////////////////////////////////////////////

//////////////////Формирование глобальной матрицы///////////////////
a[0,0]:=a1_0_0+a2_0_0+a3_0_0+a4_0_0+a11_0_0+a12_0_0+a13_0_0;
a[0,1]:=a4_0_1+a13_0_1;
a[0,4]:=a12_0_4+a13_0_4;
a[1,0]:= a[0,1];
a[1,1]:=a4_1_1+a5_1_1+a6_1_1+a13_1_1+a14_1_1+a15_1_1;
a[1,2]:=a6_1_2+a15_1_2;
a[1,4]:=a13_1_4+a14_1_4;
a[1,5]:=a14_1_5+a15_1_5;
a[2,1]:=a[1,2];
a[2,2]:=a6_2_2+a7_2_2+a8_2_2+a15_2_2+a16_2_2+a17_2_2;
a[2,3]:=a8_2_3+a17_2_3;
a[2,5]:=a15_2_5+a16_2_5;
a[2,6]:=a16_2_6+a17_2_6;
a[3,2]:= a[2,3];
a[3,3]:=a8_3_3+a9_3_3+a10_3_3+a17_3_3+a18_3_3+a19_3_3;
a[3,6]:=a17_3_6+a18_3_6;
a[3,7]:=a18_3_7+a19_3_7;
a[4,0]:=a[0,4];
a[4,1]:=a[1,4];
a[4,4]:=a12_4_4+a13_4_4+a14_4_4+a21_4_4+a22_4_4+a23_4_4;
a[4,5]:=a14_4_5+a23_4_5;
a[4,8]:=a22_4_8+a23_4_8;
a[5,1]:=a[1,5];
a[5,2]:=a[2,5];
a[5,4]:=a[4,5];
a[5,5]:=a14_5_5+a15_5_5+a16_5_5+a23_5_5+a24_5_5+a25_5_5;
a[5,6]:=a16_5_6+a25_5_6;
a[5,8]:=a23_5_8+a24_5_8;
a[5,9]:=a24_5_9+a25_5_9;
a[6,2]:=a[2,6];
a[6,3]:=a[3,6];
a[6,5]:=a[5,6];
a[6,6]:=a16_6_6+a17_6_6+a18_6_6+a25_6_6+a26_6_6+a27_6_6;
a[6,7]:=a18_6_7+a27_6_7;
a[6,9]:=a25_6_9+a26_6_9;
a[6,10]:=a26_6_10+a27_6_10;
a[7,3]:=a[3,7];
a[7,6]:=a[6,7];
a[7,7]:=a18_7_7+a19_7_7+a20_7_7+a27_7_7+a28_7_7+a29_7_7;
a[7,10]:=a27_7_10+a28_7_10;
a[7,11]:=a28_7_11+a29_7_11;
a[8,4]:=a[4,8];
a[8,5]:=a[5,8];
a[8,8]:=a22_8_8+a23_8_8+a24_8_8+a31_8_8+a32_8_8+a33_8_8;
a[8,9]:=a24_8_9+a33_8_9;
a[8,12]:=a32_8_12+a33_8_12;
a[9,5]:=a[5,9];
a[9,6]:=a[6,9];
a[9,8]:=a[8,9];
a[9,9]:=a24_9_9+a25_9_9+a26_9_9+a33_9_9+a34_9_9+a35_9_9;
a[9,10]:=a26_9_10+a35_9_10;
a[9,12]:=a33_9_12+a34_9_12;
a[9,13]:=a34_9_13+a35_9_13;
a[10,6]:=a[6,10];
a[10,7]:=a[7,10];
a[10,9]:=a[9,10];
a[10,10]:=a26_10_10+a27_10_10+a28_10_10+a35_10_10+a36_10_10+a37_10_10;
a[10,11]:=a28_10_11+a37_10_11;

```

```

a[10,13]:=a35_10_13+a36_10_13;
a[10,14]:=a36_10_14+a37_10_14;
a[11,7]:=a[7,11];
a[11,10]:=a[10,11];
a[11,11]:=a28_11_11+a29_11_11+a30_11_11+a37_11_11+a38_11_11+a39_11_11;
a[11,14]:=a37_11_14+a38_11_14;
a[11,15]:=a38_11_15+a39_11_15;
a[12,8]:=a[8,12];
a[12,9]:=a[9,12];
a[12,12]:=a32_12_12+a33_12_12+a34_12_12+a41_12_12+a42_12_12+a43_12_12;
a[12,13]:=a34_12_13+a43_12_13;
a[12,16]:=a42_12_16+a43_12_16;
a[13,9]:=a[9,13];
a[13,10]:=a[10,13];
a[13,12]:=a[12,13];
a[13,13]:=a34_13_13+a35_13_13+a36_13_13+a43_13_13+a44_13_13+a45_13_13;
a[13,14]:=a36_13_14+a45_13_14;
a[13,16]:=a43_13_16+a44_13_16;
a[13,17]:=a44_13_17+a45_13_17;
a[14,10]:=a[10,14];
a[14,11]:=a[11,14];
a[14,13]:=a[13,14];
a[14,14]:=a36_14_14+a37_14_14+a38_14_14+a45_14_14+a46_14_14+a47_14_14;
a[14,15]:=a38_14_15+a47_14_15;
a[14,17]:=a45_14_17+a46_14_17;
a[14,18]:=a46_14_18+a47_14_18;
a[15,11]:=a[11,15];
a[15,14]:=a[14,15];
a[15,15]:=a38_15_15+a39_15_15+a40_15_15+a47_15_15+a48_15_15+a49_15_15;
a[15,18]:=a47_15_18+a48_15_18;
a[15,19]:=a48_15_19+a49_15_19;
a[16,12]:=a[12,16];
a[16,13]:=a[13,16];
a[16,16]:=a42_16_16+a43_16_16+a44_16_16+a51_16_16+a52_16_16+a53_16_16;
a[16,17]:=a44_16_17+a53_16_17;
a[17,13]:=a[13,17];
a[17,14]:=a[14,17];
a[17,16]:=a[16,17];
a[17,17]:=a44_17_17+a45_17_17+a46_17_17+a53_17_17+a54_17_17+a55_17_17;
a[17,18]:=a46_17_18+a55_17_18;
a[18,14]:=a[14,18];
a[18,15]:=a[15,18];
a[18,17]:=a[17,18];
a[18,18]:=a46_18_18+a47_18_18+a48_18_18+a55_18_18+a56_18_18+a57_18_18;
a[18,19]:=a48_18_19+a57_18_19;
a[19,15]:=a[15,19];
a[19,18]:=a[18,19];
a[19,19]:=a48_19_19+a49_19_19+a50_19_19+a57_19_19+a58_19_19+a59_19_19;
////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////

```

//Формирование свободных членов глобальной матрицы//

```

b[1]:=Hc*hm/6;
b[2]:=b[1];
b[5]:=b[1];
b[6]:=b[1];
b[9]:=b[1];
b[10]:=b[1];
b[13]:=b[1];

// Решение системы линейных уравнений
Gauss;
//..... Индукция в воздушном зазоре .....
Bdel_real:= xx[17]/(0.5*bm);
//.....Рабочий магнитный поток.....
MFVZ_real:=xx[16]*2*Lm;
//.....Коэффициент рассеяния.....
kras_real:=xx[1]/xx[16];
end;
```

Приложение 4. Программный код расчета динамического режима ЭМП в программной среде Delphi

```

procedure Test_EMP(x:array of single;Nvar:integer;var Energy:single);
Var
mu0,alfa,tokr,tcu,rot,Din,hcu,La,halum,Vz1,Vz2,kzm,f,wh,wl,da,qa,W,Rsr,L,Ra,T:single;
tau,T05,U,Im,Bdelta,Mcu,gamacu,gamaal,Mal,M,V0,kdemp,deltime,SS,EE,LossEE:single;
time,Ia,V,Fdempf,Femp,a,delS,S,delIE,E,dellossE,lossE,DellosFe:array[0..1000] of single;
PE,PlossE,VV,KdempFe,Snorm:single;
i,N,j,k:integer;
label 10;
begin
mu0:=4*pi/10000000;
alfa:=0.004;
kdemp:=255;
KdempFe:=0.128;
tokr:=20;
tcu:=50;
gamacu:=8920;
gamaal:=2689.9;
rot:=(0.0177/1000000) *(1+alfa*(tcu-tokr));
//Din:=0.034;
Din:=X[1];
hcu:=0.000411*4;
//La:=0.02956 ;
La:=X[2];
halum:=0.0006;
Vz1:=0.0001;
Vz2:=0.0001;
kzm:=0.864;
f:=300;
wh:=4;
wl:=La*kzm/(hcu/wh);
W:=wh*wl;
da:= hcu*kzm/wh ;
qa:=pi*da*da/4;
Rsr:=(Din+2*Vz1+2*halum+hcu)/2;
L:=(10*pi*mu0*W*W*Rsr*Rsr)/(9*Rsr+18*La)/1.3*2;
Ra:= rot*2*pi*Rsr*W/qa;
T:=L/Ra;
tau:=1/f;
T05:=tau/4;
//Bdelta:=0.51;
//Bdelta:=0.7;
Bdelta:=Bdelta_var3(Din);
Mcu:=gamacu*pi*2*Rsr*hcu*La;
Mal:=gamaal*((0.25*pi*((Din+halum*2+2*Vz1)*(Din+halum*2+2*Vz1)-(Din+vz1*2)*(Din+Vz1*2)))*La+
0.25*pi*(Din+halum*2+Vz1*2)*(Din+halum*2+Vz1*2)*0.002);
M:=Mcu+Mal;
U:=1;
//deltime:=T05/5;
//Im:= U/Ra;
//VV:=0;
Snorm:=0.2;
// while SS>Snorm do
// begin
// for k:=0 to 100 do
// begin
10: U:=U+0.0010;

//i:=0;
N:=200;;
deltime:=T05/N;
VV:=0;
Im:= U/Ra;
for i:=0 to N do
begin
time[i]:=deltime*i ;
Ia[i]:=Im*(1-(exp(-(time[i]/T))));
//if i=0 then V[i]:=0;
Fdempf[i]:= kdemp*VV*1.3;

```

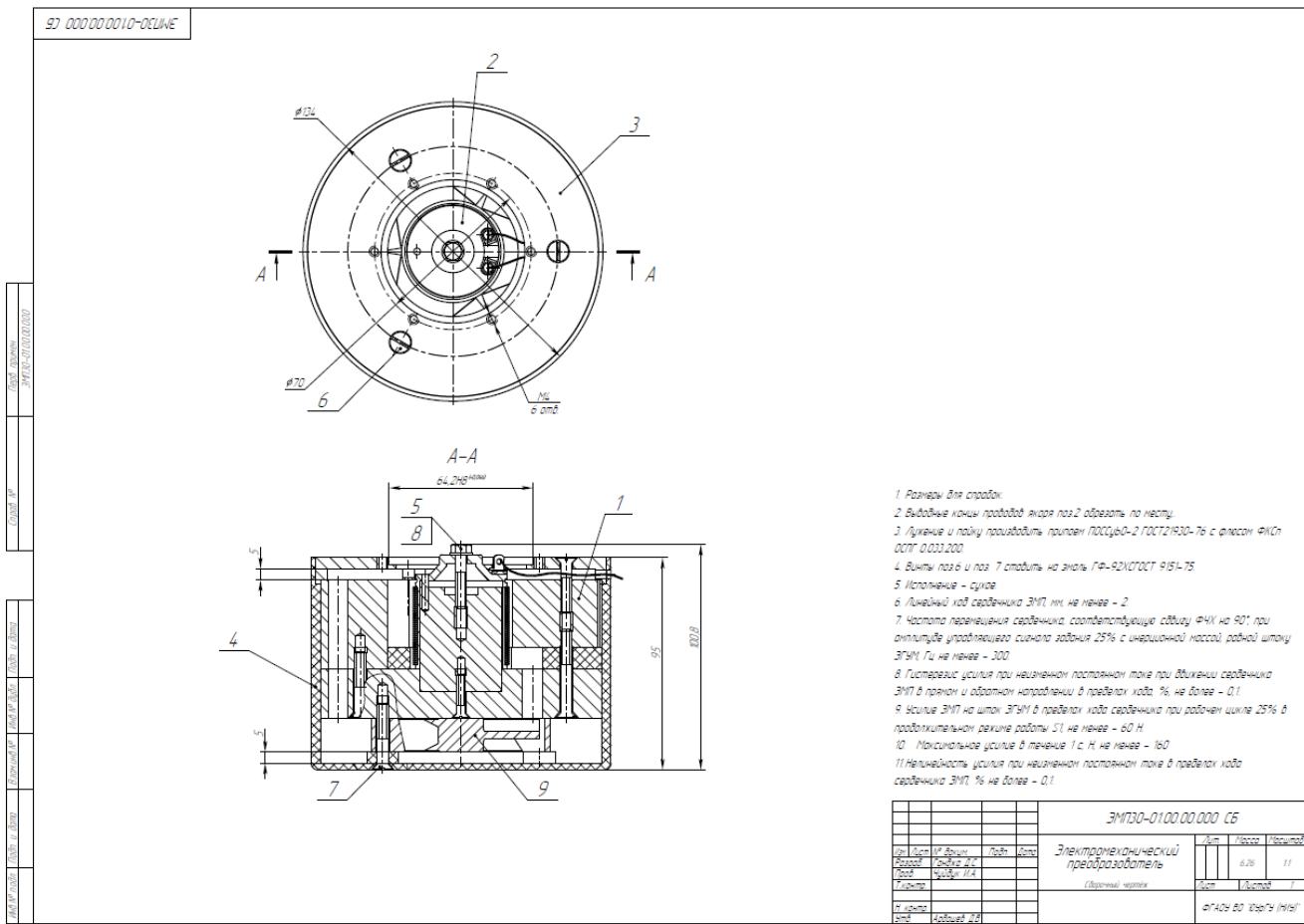
```

DelloFe[i]:=KdempFe*VV;
Femp[i]:= Bdelta*Ia[i]*pi*2*Rsr*W-Fdemph[i]*0.3;
a[i]:=Femp[i]/M;
//V[i]:=V[i]+a[i]*deltim;
V[i]:=VV+a[i]*deltim;
VV:=V[i];
dels[i]:=(V[i]*deltim + a[i]*deltim*deltim/2)*1000;
//S[i]:=S[i] +dels[i];
delE[i]:=U*Ia[i]*deltim;
//E[i]:=E[i]+delE[i];
dellossE[i]:=Ia[i]*Ia[i]*Ra*deltim;
//lossE[i]:=lossE[i]+dellossE[i];
end;
SS:=0;
EE:=0;
LossEE:=0 ;
for j:=0 to N do
begin
SS:=SS +dels[j];
EE:=EE+delE[j];
LossEE:=LossEE+dellossE[j];
end;
//end;
if SS<Snorm then goto 10 ;
// end;
PE:=EE/T05;
PLossE:=LossEE/T05;
Energy:=PE;
end;

```

Приложение 5. Спецификация и сборочный чертеж конструкции ЭМП с радиально-тангенциальной системой и диамагнитным якорем

Формат	Лист	Обозначение	Наименование	Кол	Примечание
<u>Документация</u>					
A2		ЭМПЗ0-0100.00.000 СБ	Сборочный чертеж		
<u>Сборочные единицы</u>					
A2	1	ЭМПЗ0-010100.000	Индуктор	1	
A2	2	ЭМПЗ0-010200.000	Якорь намотанный	1	
<u>Детали</u>					
A3	3	ЭМПЗ0-0100.00.001	Плита переходная	1	
A4	4	ЭМПЗ0-0100.00.002	Корпус	1	
<u>Стандартные изделия</u>					
Лист и дата	5		Болт М5x25 ГОСТ 7805-70	1	
	6		Винт АМБх25 ГОСТ 17475-80	3	
	7		Винт АМБх30 ГОСТ 17475-80	4	
	8		Шайба А.5.0108кп.019	1	
			ГОСТ11371-78		
<u>Прочие изделия</u>					
Лист и дата	9		Вентилятор Arctic P8 PWM	1	
			PST Pack 80 мм		
ЭМПЗ0-0100.00.000					
Изм/Лист	№ докум.	Подп.	Дата		
№ п/з	Разраб. Ганджа Д.С.			Лист	Лист
	Проф. Чуйбек И.А.				Листов
					1
	Н. контр				
	Чтврт. Ардашев Д.Е				
Копировал:				ФГАОУ ВО "ЮУрГУ (НИУ)"	
Формат А4					



Приложение 6. Оценка динамических параметров ЭМП

Для оценки динамических параметров ЭМП были проведены численные эксперименты на модели устройства. Разбиение расчетной области на конечные элементы показано на рисунке П6.1 а, распределение магнитного поля в магнитной системе – на рисунке П6.1 б.

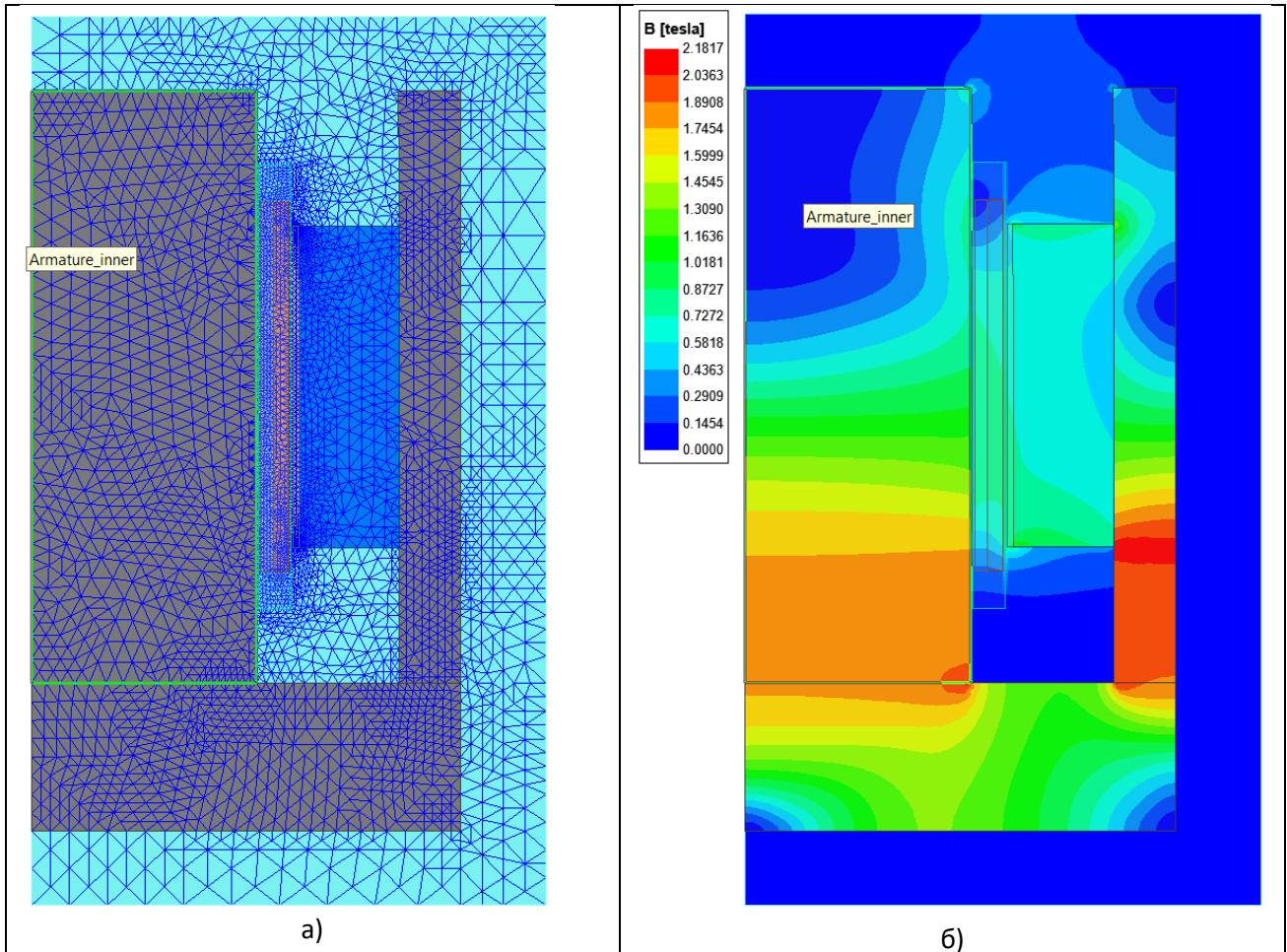


Рис. П6.1. Результаты решения

а- разбиение расчетной области на конечные элементы

б – картина магнитного поля ЭМП

Расчет динамики ЭМП проводился в решателе Transient.

Для оценки возможности работы ЭМП на частоте 300 Гц была построена полевая модель устройства. В качестве нагрузки ЭМП задавалось статическое усилие, величина которого рассчитывалась по определенной в ходе гидравлического расчета зависимости гидростатического давления от положения золотника:

$$P_{\text{гд}} = 19,565 \cdot x_{\text{зол}}^2 + 17,336 \cdot x_{\text{зол}}.$$

Для упрощения расчетов принималось, что усилие постоянно на каждом полупериоде движения якоря и равно максимальному значению, определяемому для крайних точек с координатами $\pm 0,25$ мм. Величина нагрузки составила $\pm 5,56$ Н.

Масса якоря с нагрузкой, определяющая инерционность ЭМП, была задана равной 120 г. Коэффициент вязкого трения был принят равным 0,001 Н·с/м.

Напряжение питание задавалось в виде прямоугольных импульсов, длительность которых подбиралась таким образом, чтобы к моменту достижения крайних положений якоря его скорость приближалась к 0.

Материалы компонентов модели принимались такими же, как в расчете силовых возможностей ЭМП. Однако, в качестве материала магнитопровода задавалась сталь 3, поскольку данная конструкционная сталь, скорее всего, будет заложена в качестве базовой в конструкцию макета. Для магнитов был принят материал МС-4 производства ООО «Магнетар». Параметры магнитотвердого материала % Br=1,22 Тл, Hc=907 кА/м.

В качестве граничных условий принималось значение векторного магнитного потенциала на границе расчетной области ($A=0$).

При расчете учитывались следующие явления: нелинейность магнитных свойств ферромагнетиков и их магнитное насыщение, потери на вихревые токи в массивных проводящих электрический ток деталях, механические переходные процессы, связанные с инерционностью якоря и связанного с ним золотника.

На рисунке П.6.2 показаны осциллограммы положения золотника, его скорости и нагрузочного усилия при описанном выше управлении. Управляющее напряжение и потребляемый ЭМП ток показаны на рисунке П6.3.

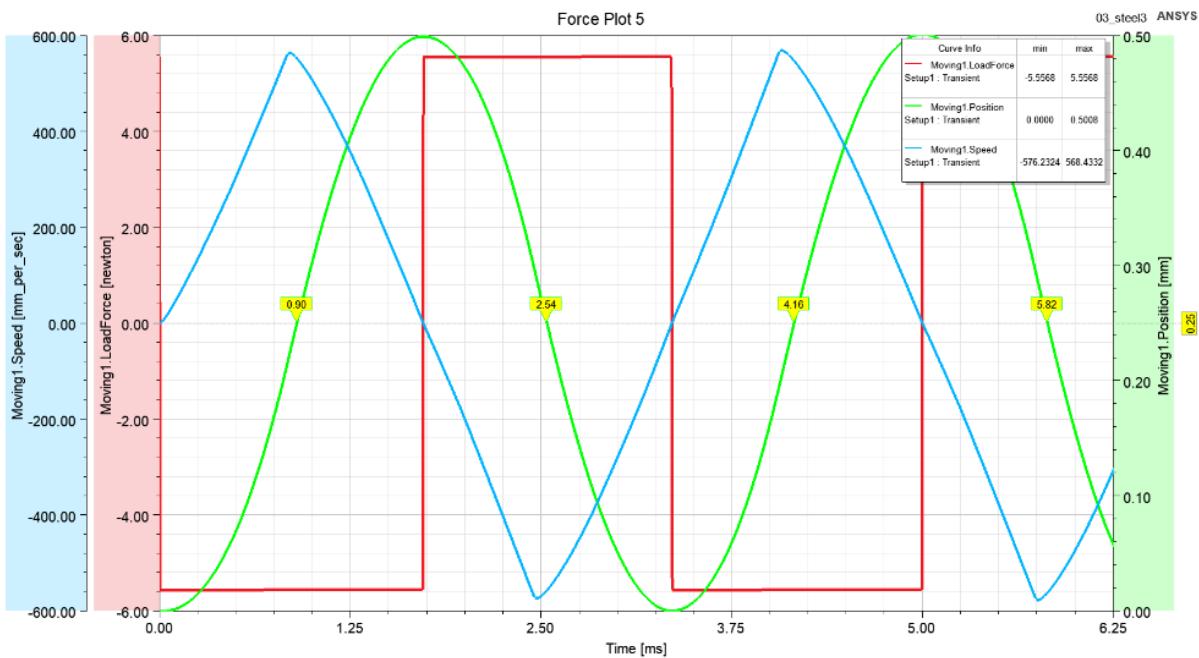


Рис. П6.2. Осциллограммы механических координат ЭМП

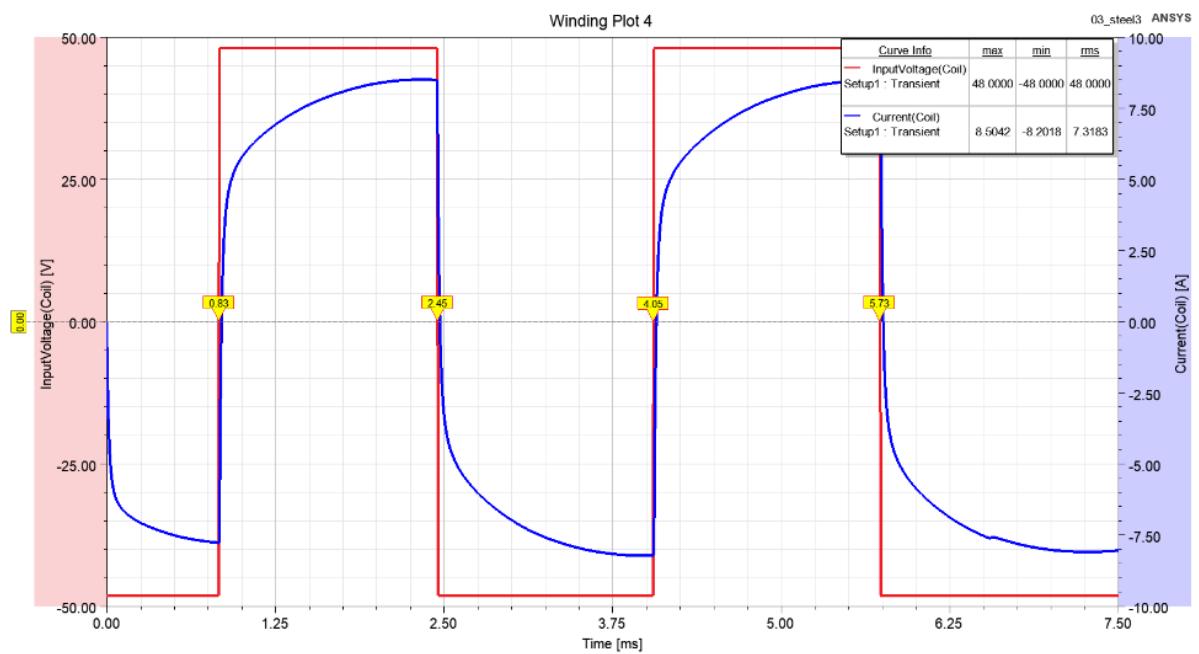


Рис. П6.3. Осциллограммы напряжения и тока ЭМП

Параметры представленных на осциллограммах электромагнитных и электромеханических процессов сведены в таблицу П6.1.

Таблица П6.1

Наименование параметра	Величина параметра
Амплитуда колебаний якоря, мм	0,25
Частота колебаний якоря, Гц	304,88
Питающее напряжение, В	48,00
Противодействующее усилие, Н	5,56
Масса якоря и золотника, кг	0,12
Среднеквадратичное значение тока якоря, А	7,32
Максимальное значение тока якоря, А	8,50
Электрические потери в обмотке якоря, Вт	225,00
Потери в гильзе магнитов, Вт	73,50
Потери в магнитах, Вт	14,47
Потери в центре, Вт	12,14
Потери в крышке, Вт	1,58
Потери в корпусе, Вт	23,01

Как следует из полученных данных, по частотным характеристикам ЭМП удовлетворяет требованиям ТЗ. Следует отметить, что при этом практически нет запаса по максимальной частоте рабочего режима.

На рис. П6.4 показаны фотографии натурных испытаний ЭМП на оборудовании ВИСОМ

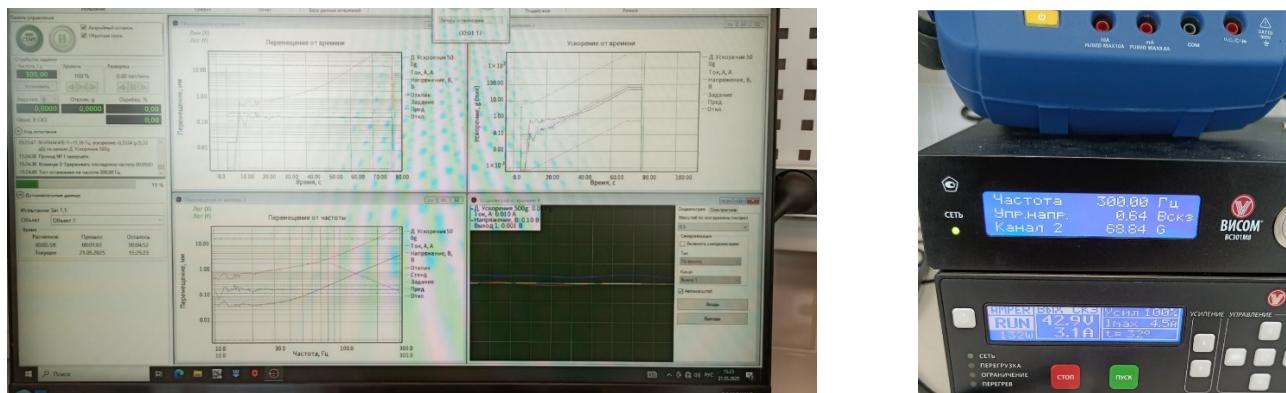


Рис. П6.4. Фотографии натурных испытаний ЭМП на оборудовании ВИСОМ

Приложение 7. Акт использования результатов диссертационной работы



CHELTEC

УРАЛЬСКИЙ ИНЖИНИРИНГОВЫЙ ЦЕНТР

ООО «УРИЦ»

ЮРИДИЧЕСКИЙ АДРЕС: Россия, 454010, г. Челябинск, ул. Енисейская, 48Б

ФАКТИЧЕСКИЙ АДРЕС: Россия, 454007, г. Челябинск, ул. Рождественского, д.6,

ДЛЯ ПИСЕМ: Россия, 454007, г. Челябинск, а/я 897

ТЕЛ./ФАКС: +7 (351) 7 753 753, 7 750 900 E-MAIL: TEC@CHELTEC.RU WWW.CHELTEC.RU

ИНН: 7449100282 КПП 744901001 ОКПО: 68640395 ОГРН: 1107449006268

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор
ООО «Уральский инжиниринговый центр»

Р.М. Багаутдинов

2025 г.

м.п.

Акт

использования результатов диссертационной работы

Ганджи Дмитрия Сергеевича на тему

«Теоретические исследования и разработка принципиальных решений
для электромеханического привода
электрогидравлического усилителя мощности»

Комиссия в составе: Багаутдина Алексея Рамилевича – исполнительного директора, Батурина Алексея Александровича – начальника отдела АСУТП, Суворова Кирилла Владимировича – инженера-конструктора составила настоящий акт в том, что при освоении производства электрогидравлических усилителей мощности на предприятии ООО «Уральский инжиниринговый центр» были использованы следующие результаты научной работы соискателя:

- методика расчета вихревых токов в электромеханическом приводе (ЭМП);
- технические решения по магнитной системе индуктора ЭМП;
- методика определения оптимальных размеров якоря ЭМП;
- комплекс программ по проектирования ЭМП;
- имитационные модели ЭМП для оценки электромагнитного и теплового состояния с применением программного комплекса Ansys.

Перечисленные результаты НИР позволили повысить качество инженерных работ и ускорить подготовку промышленного производства электрогидравлического усилителя мощности следящего гидропривода производства ООО «Уральский инжиниринговый центр».

А.Р. Багаутдинов

А.А. Батурин

К.В. Суворов