

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

На правах рукописи

**Косимов Бахтиёр Исматуллоевич**

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕНТИЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ  
С КОГТЕОБРАЗНЫМИ ПОЛЮСАМИ ПРИВОДА ПИЛЬГЕРСТАНА ДЛЯ  
ИЗГОТОВЛЕНИЯ БЕСШОВНЫХ ТРУБ**

05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель –  
доктор технических наук,  
доцент  
Ганджа С.А.

Челябинск – 2020

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ОПРЕДЕЛЕНИЯ.....	5
ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ .....	9
ВВЕДЕНИЕ.....	10
1. ВЫБОР БАЗОВОГО ВАРИАНТА ДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ ПРИВОДА ПИЛЬГЕРСТАНА ИЗГОТОВЛЕНИЯ БЕСШОВНЫХ ТРУБ .....	25
1.1 Анализ технических проблем существующего электропривода пильгерстана предприятия ПАО «ЧТПЗ» .....	26
1.2. Предварительный качественный анализ возможных вариантов для замены существующего двигателя привода пильгерстана. ....	29
1.3. Выбор конструкции радиального, тихоходного, безредукторного, габаритного вентильного двигателя с постоянными магнитами.....	31
Выводы по главе .....	366
2. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С КОГТЕОБРАЗНЫМИ ПОЛЮСМИ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ЕГО ГЕОМЕТРИИ.....	37
2.1. Разработка методики и математической модели расчета магнитной системы с когтеобразными полюсами.....	38
2.2. Разработка математической модели электромагнитного расчета вентильного двигателя с когтеобразными полюсами. ....	43
2.2.1. Входные параметры математической модели .....	44
2.2.1.1. Константы.....	45
2.2.1.2. Ограничения .....	45
2.2.1.3. Независимые переменные.....	46
2.2.1.4. Выходные параметры математической модели.....	47
2.3. Алгоритм математической модели расчета ВДКП .....	47
2.4. Блок-схема алгоритма расчета ВДКП .....	54
Выводы по главе .....	58
3. РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ВДКП ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ПРОЕКТНЫХ СИТУАЦИЙ.....	59
3.1. Постановка задачи однокритериальной оптимизации ВДКП.....	59

3.2. Выбор метода оптимизации.....	60
3.3. Определение уровней оптимизации .....	61
3.3.1. Полная габаритная оптимизация.....	62
3.3.2. Габаритная оптимизация при фиксированном числе пар полюсов .....	64
3.3.3. Габаритная оптимизация при фиксированном наружном диаметре .....	64
3.3.4. Габаритная оптимизация при фиксированном внутреннем диаметре .....	65
3.3.5. Габаритная оптимизация при фиксированной наружной длине .....	65
3.3.6. Габаритная оптимизация при фиксированных наружном и внутреннем диаметрах.....	66
3.3.7. Оптимизация при фиксированном наружных, внутреннем диаметрах и наружной длине (в заданных габаритах).....	66
3.3.8. Поверочный расчет .....	67
Выводы.....	67
4. РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АНАЛИЗА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО СОСТОЯНИЯ ВДКП .....	69
4.1. Анализ электромагнитного состояния ВДКП в режиме RMxprt программной среды Ansys Electronics Desktop .....	70
4.2. Анализ электромагнитного состояния ВДКП в режиме Maxwell Design программной среды Ansys Electronics Desktop на основе аналога вентильного двигателя с тангенциальной системой возбуждения.....	73
4.3. Анализ электромагнитного состояния реального ВДКП в режиме трехмерного анализа Maxwell 3D Design программной среды Ansys Electronics Desktop .....	78
Выводы по главе .....	81
5. АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ ВДКП С УЧЕТОМ ДИНАМИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ .....	83
5.1. Разработка связанной электродинамической и термодинамической модели .....	84
5.2. Расчет теплового состояния ВДКП на основе метода эквивалентных тепловых схем замещения. ....	91
5.3. Оценка теплового состояния ВДКП с применением программного комплекса Ansys Icerak.....	98
5.4. Разработка конструкции ВДКП в программном комплексе Solidworks... ..	101
Выводы по главе .....	107
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	110

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	113
Приложение А. Параметры электродвигателя пыльгерстана фирмы Siemens ..	141
Приложение Б. Габаритные размеры существующего двигателя ЧТПЗ.....	142
Приложение В. Установочные размеры стоякового подшипника существующего двигателя ЧТПЗ.....	143
Приложение Г. Чертеж вала существующего двигателя ЧТПЗ.....	144
Приложение Д. Результаты внедрения научной работы на АО «Русские электродвигатели» .....	145
Приложение Е. Результаты внедрения научной работы в учебный процесс на кафедре «Теоретические основы электротехники» ЮУрГУ (НИУ) .....	146
Приложение Ё. Результаты внедрения научной работы в учебный процесс Институт энергетики Таджикистан .....	147

## ОПРЕДЕЛЕНИЯ

В диссертации применяются следующие термины с соответствующими определениями:

**Анализ электрической машины** – определение основных параметров и характеристик электрической машины без изменения ее геометрии, материалов и обмоточных данных.

**Алгоритм расчета** – конечный набор процедур, позволяющих чисто механически рассчитывать геометрию, параметры и характеристики электрической машины.

**Вентильная машина с когтеобразными полюсами** – бесконтактная электрическая машина со стандартным трехфазным якорем, имеющая индуктор, магнитная цепь которого состоит из двух боковых ступиц с когтеобразными полюсами, которые охватывают кольцевой постоянный магнит. Работает в режиме генератора или двигателя.

**Двухполупериодная коммутация** – коммутация, при которой ток в обмотке якоря меняет направление, т. е. обмотка используется в течение полного оборота ротора.

**Интерфейс** – графическая программная оболочка, при помощи которой пользователь управляет программным комплексом.

**Коммутация вентильного двигателя** – переключение обмоток якоря электронным коммутатором по сигналу от датчика положения ротора.

**Критерий оптимальности** – показатель, на основании которого производится сравнительная оценка вариантов расчета электрической машины и выбор лучшего варианта.

**Математическая модель** – совокупность аналитических зависимостей, однозначно определяющих геометрию электрической машины, ее параметры и характеристики.

**Многоуровневая оптимизация** – оптимизация, позволяющая в процессе перебора независимых переменных фиксировать одну или несколько из них.

**Метод оптимизации** – метод перебора независимых переменных при поиске экстремума целевой функции.

**Метод покоординатного спуска (Гаусса-Зейделя)** – метод многомерной оптимизации, при котором последовательно друг за другом перебираются все независимые переменные в заданных для них границах.

**Метод Фибоначчи** – один из методов генерации псевдослучайных чисел. Используется для одномерного перебора значений независимой переменной.

**Независимые переменные** – значения, которые в результате перебора в процессе оптимизации могут меняться независимо друг от друга в допустимых для них пределах.

**Однокритериальная оптимизация** – задача оптимизации, имеющая только один показатель качества.

**Пилигримовый стан (пильгерстан)** — двухвалковый трубопрокатный стан для периодической прокатки труб в валках с переменным калибром, вращающихся навстречу подаваемой заготовке (гильзе).

**Поверочный расчет** – расчет параметров и характеристик электрической машины при заданных геометрических размерах.

**Полная габаритная оптимизация** – оптимизация, при которой для выбора наилучшего варианта варьируются все независимые переменные.

**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.

**Программный комплекс** – набор программных средств, работающих совместно для выполнения одной или нескольких сходных задач.

**Трехмерная твердотельная модель** – компьютерная графическая модель объекта, содержащая информацию об его объеме и свойствах входящих в него материалов.

**Синтез** – разработка геометрии электрической машины с заданными параметрами и характеристиками.

**Термодинамическая задача** – определение теплового состояния электродвигателя, включая расчет средней температуры нагретых частей и расчет теплового поля в объеме электрической машины.

**Уровень оптимизации** – оптимизация, характерной особенностью которой является количество варьируемых и фиксированных независимых переменных. Количество варьируемых переменных определяет уровень оптимизации. При изменении всех независимых переменных говорят о самом высоком уровне оптимизации, при фиксации всех переменных – о самом низком уровне (поверочный расчет).

**Функциональная модель** – модель, показывающая принцип действия устройства.

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

**Электродинамическая задача** – электромагнитный расчет, при котором определяются параметры электрического поля, магнитного поля, а также все интегральные характеристики электрической машины.

**Электромагнитный момент** - момент, развиваемый электромагнитными силами на роторе электрической машины.

**Электромагнитная мощность** – мощность, развиваемая электромагнитным моментом на роторе электрической машины.

**Электропривод** – электрическая машина, работающая совместно с электронной системой управления.

**Ansys Icepak** – CAE система, позволяющая рассчитывать тепловое состояние сложных объектов на основе метода конечных элементов.

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

**Ansys Workbench** – программная оболочка, позволяющая объединять различные CAE системы и решать таким образом связанные задачи.

**Delphi** – язык программирования высокого уровня.

## ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

КПД – коэффициент полезного действия;

МКЭ – метод конечных элементов;

НИОКР – научно-исследовательская и опытно-конструкторская работа;

САПР – система автоматизированного проектирования;

ТЗ – техническое задание;

ЭДС – электродвижущая сила;

РФ – Российская Федерация;

СТП – стандарт предприятия;

ТЗ – техническое задание;

ТОЭ – кафедра теоретических основ электротехники;

ЮУрГУ – Южно-Уральский государственный университет;

CAD – система автоматизированного проектирования;

CAE – система автоматизированных инженерных расчетов.

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

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность предмета исследования.** Развитию нефтегазовой индустрии в России придается особое значение. Это связано с тем, что добыча углеводородов является бюджетобразующей отраслью для Российской Федерации. Высокая технологическая конкуренция заставляет вести собственные научно-исследовательские работы в этой сфере. Существующее положение осложняется так же вводом санкций США и ведущими Европейскими странами на поставку оборудования для нефтегазового комплекса. Следует признать, что достаточно длительное время эта отрасль развивалась за счет оборудования, которое морально и физически устарело и эксплуатировалось до состояния предельного физического износа. Одним из таких характерных примеров является привод пыльгерстана для изготовления бесшовных труб большого диаметра, который эксплуатируется на АО «Челябинский трубопрокатный завод» с 1928 г. Тихоходный коллекторный двигатель постоянного тока мощностью 2.7 МВт фирмы Siemens эксплуатируется в условиях больших динамических нагрузок в три смены. Проводимые ремонтные и регламентные работы не в состоянии обеспечивать высокую безопасность привода и его энергоэффективность. Данный привод требует замены на современное более надежное оборудование с высоким КПД. В России работают 4 предприятия, которые используют эту технологию изготовления бесшовных труб. Практически все предприятия испытывают перечисленные проблемы. При этом речь не идет об отказе от этой технологии. Бесшовные трубы имеют более высокую надежность, пыльгерстановый привод легко перестраивается под трубы различного диаметра.

С другой стороны, применение вентильных машин больших габаритов на мощности в несколько мегаватт имеет ряд проблем. Использование мощных высококоэрцитивных магнитов существенно повышает КПД за счет исключения потерь на возбуждение, но создает большие проблемы при сборке, эксплуатации и ремонте. Перед научным сообществом и инженерной практикой стоит задача

совершенствования конструкций этих двигателей, оптимизации их геометрии, изучения параметров и характеристик в статических и динамических режимах работы.

Таким образом, существующее противоречие между практической потребностью во внедрении мощных вентильных машин с постоянными магнитами в технологию изготовления бесшовных труб и недостаточно развитой теоретической базой по методике их оптимального проектирования является основным источником дальнейшего развития электрических машин этого класса, что определяет **актуальность научных исследований в этой области.**

**Степень научной разработанности исследуемой темы.** Оценим состояние теории по разработке мощных тихоходных электроприводов для металлургического производства к настоящему времени.

**Пилигримовый стан** (*пильгерстан*) представляет собой двухвалковый трубопрокатный стан для периодической прокатки бесшовных труб в валках с переменным калибром, вращающихся навстречу подаваемой заготовке [179]. Изобретение пилигримового стана и пильгер-технологии Максом и Рейнхардом Маннесманами в 1885 году оказалось первым способом массового производства бесшовных труб. Пилигримовый способ относится к наиболее экономичным и универсальным способам производства бесшовных труб, так как переход на другой размер труб на пильгерстане занимает значительно меньше времени чем, например, на непрерывном многоклетьевом стане. Несмотря на востребованность новых технологий проката, производство труб на пилигримовых агрегатах продолжает оставаться одним из самых распространенных в мире для получения горячекатаных бесшовных труб широкого сортамента по размерам и маркам сталей. В настоящее время в мире насчитывается 49 действующих пилигримовых агрегатов с 98 пильгерстанами.

Электродвигатели, входящие в состав электропривода пильгерстана, имеют ряд особенностей [28,29]:

- они должны иметь низкую частоту вращения (60-80 об/мин), при этом не допускается применение понижающего редуктора из-за больших ударных нагрузок;

- электродвигатели должны иметь большую инерционную массу вращающихся частей для обеспечения ударных нагрузок;

- частота вращения должна регулироваться для труб разного диаметра и разного сортамента стали;

- с учетом непрерывной трехсменной работы стана с короткими остановками на регламентные и ремонтные работы электродвигатель должен иметь максимально возможный КПД с целью энергосбережения и энергоэффективности.

Эти особенности не позволяют подобрать для привода пильгерстана серийные двигатели из существующего промышленного ряда. Для этой технологии необходимо проектировать единичный специальный электродвигатель под конкретный привод [29].

В области проектирования электрических машин различных типов средней и большой мощности существуют серьёзные научные исследования и большие научные заделы. Заслуживают внимания работы следующих организаций:

– Московский энергетический институт (государственный технический университет). Ученые А. В. Иванов-Смоленский, С. В. Иваницкий, Н. И. Пашков, В. Я. Беспалов, К. Я. Вильданов, В.А. Морозов, В.И. Нагайцев, С.А. Грузков развивают общую теорию расчета электрических машин с постоянными магнитами, математические модели динамических режимов работы, асинхронные двигатели интегрального исполнения. Ильинский Н.Ф., Кузнецов В.А., Красовский А.Б., Темирев О.П., Остриров В.Н., Козаченко В.Ф., Русаков А.М. разрабатывают мощные вентильно-индукторные электродвигатели [11-16,25,75-77,99-101,124, 151].

– Ивановский государственный энергетический университет. Ученые Ю. Б. Казаков, Е. Б. Герасимов, А. И. Тихонов, Н. Н. Новиков внесли

существенный вклад в развитие методов анализа магнитных и тепловых полей, разработку САПР электрических машин, методов оптимального проектирования [52,53,83-88,125-127,162-166];

– Московский авиационный институт (государственный технический университет). Особо следует отметить работы А. И. Бертинова, который развивает теорию электрических машин авиационной автоматики, включая двигатели с когтеобразными полюсами [5,8,9];

– Иркутский государственный технический университет. Ученые С. В. Леонов, А. В. Лялин, О. П. Муравлев, А. Л. Федянин занимались разработкой и исследованием вентильных торцевых электродвигателей [142,174-178];

– Новосибирский государственный технический университет. Ученые Ю. В. Петренко, А. Г. Приступ разрабатывают теорию и методы расчета торцевого двигателя [141];

– Томский политехнический университет. Усилиями ученых Е. В. Буряниной, С. В. Леонова, А. Л. Федянина разрабатываются математические модели и методы расчета торцевых синхронных двигателей [174-178];

– Уральский государственный технический университет – УПИ. Ученые А. Т. Пластун, Ф. Н. Сарапулов, С. Е. Миронов, Е. Н. Андреев разрабатывают конструкции многодисковых торцевых машин, занимаются развитием теории и методов расчета синхронных двигателей с кольцевыми обмотками [137,148-150];

– Самарский государственный технический университет. Ученые Макаричев Ю.А., Стариков А.В., Зубков Ю.В., Чеботков Э.Г., Ануфриев А.С. внесли вклад в разработку методики анализа и синтеза вентильных электрических машин [120--123];

– Южно-Уральский государственный университет. Ученые Усынин Ю.С., Григорьев М.А., Сычев Д.А. ведут разработки синхронного реактивного двигателя с независимым возбуждением для металлургического производства.

Ганджа С.А. разрабатывает теорию многоуровневой оптимизации вентильных электрических машин. [28-50,57-60, 169-171].

Существует большое количество публикаций зарубежных ученых в наукометрической базе Scopus и Web of Science, посвященных разработке вентильных электроприводов для металлургического производства [184-215].

Из анализа имеющихся публикаций можно сделать следующие основные выводы о состоянии теории анализа и синтеза мощных тихоходных вентильных электрических машин:

- существуют методики проектного расчета мощных асинхронных и синхронных двигателей;
- есть разработки мощных двигателей специального назначения, таких как синхронные реактивные, вентильно-индукторные, торцевые электродвигатели, которые можно использовать для металлургической технологии проката;
- есть серьезные научные работы по анализу электромагнитного и теплового состояния конкретных конструктивных исполнений, в том числе и с применением методов конечно-элементного анализа;
- есть научные работы, посвященные оптимальному проектированию отдельных узлов торцевых машин, например, постоянного магнита, якорной обмотки;
- существуют работы, посвященные методике разработки систем автоматизированного проектирования вентильных машин, которые включают в себя трехмерное конструкторское моделирование;
- хорошо исследованы системы управления и регулирования вентильными двигателями, включая дискретную коммутацию и векторное управление.

Тем не менее, следует отметить, что вентильные машины с постоянными магнитами больших диаметров от 5 до 10 м практически не представлены в отечественной и зарубежной литературе [4,5,8,10,12,57,61,68,80,98,105]. Вероятно, это связано со сложностью изготовления магнитоэлектрических машин большого диаметра с мощными высококоэрцитивными постоянными

магнитами из-за сильного магнитного тяжения при сборке статора и ротора. Приспособления для такой сборки могут на порядок превосходить стоимость самого вентильного двигателя. Если удастся преодолеть эти сложности, то применение мощных постоянных магнитов дает вентильным двигателям этого класса существенные преимущества перед другими типами электрических машин.

В данной работе предпринята попытка применить вентильный двигатель большого диаметра с когтеобразными полюсами с постоянным магнитом для решения вышеуказанных проблем. Несмотря на то, что вентильные двигатели этого класса на малые мощности хорошо изучены, мировая практика не знает применение этого класса машин для диаметров от 5 до 10 метров. Уникальность конструкции двигателя потребует, помимо решения технологических вопросов, дальнейшего развития методики их оптимального проектирования, анализа электромагнитного, теплового состояния, динамических режимов работы. Важность научного исследования, дополнительно, обусловлена тем фактором, что изготовление и тестирование такого крупногабаритного и мощного двигателя потребует значительных капитальных затрат и ошибки при принятии конструкторских решений могут стоить больших средств, поэтому необходимо по возможности снять технические риски, отработав все вопросы на цифровой модели, которую необходимо создать.

Таким образом, **объектом исследования** является крупногабаритный тихоходный вентильный электродвигатель с когтеобразной магнитной системой и мощными высококоэрцитивными постоянными магнитами, предназначенный для металлургического производства бесшовных труб по пильгер-технологии.

**Предметом исследования** являются методы оптимального проектирования этого электродвигателя, анализ его электромагнитного и теплового состояния при реальных нагрузках пильгерстана.

**Цель диссертационного исследования.** Целью диссертационного исследования является выбор оптимального типа вентильного двигателя для

пильгер-технологии производства бесшовных труб, разработка технологии сборки базового варианта с учетом габаритных размеров и применения мощных постоянных магнитов, разработка модели оптимизации с учетом габаритных ограничений, разработка цифровых моделей для электромагнитного анализа и анализа теплового состояния с учетом реальных динамических нагрузок.

Достижение этой цели и внедрение результатов этого научного исследования в промышленность позволит внести значительный вклад в развитие отечественного электромашиностроения и металлургического производства нефтегазовой сферы, играющих важную роль в экономике страны.

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

1. Выбрать тип тихоходного крупногабаритного вентильного электродвигателя с учетом требований, предъявляемых к приводам пильгерстана производства бесшовных труб.

2. Разработать метод сборки и разборки крупногабаритного двигателя с мощными постоянными магнитами при минимальных затратах на технологическую оснастку.

3. Разработать математическую модель оптимизации базового варианта электродвигателя с учетом ограничений на габариты и момент инерции вращающихся масс.

4. Разработать цифровую модель для анализа электромагнитного состояния.

5. Разработать цифровую модель для анализа теплового состояния с учетом реальных динамических нагрузок.

6. На базе проведенных исследований разработать программные средства для решения связанной задачи синтеза (оптимизация геометрии) и анализа (оценка электромагнитного и теплового состояния) для проектирования электродвигателя при различных проектных ситуациях.

Данные исследования дополняют и расширяют существующую теорию по проектированию вентильных электрических машин [5,8,12,28,56,62,64,75,105,160].

**Методология и методы исследования.** Для решения поставленной задачи использовались аналитические методы общей теории электромеханических преобразователей энергии. Для математического моделирования электромагнитных и тепловых процессов применялись аналитические и численные методы расчета физических полей на основе метода конечных элементов.

### **Научная новизна.**

Вентильные электрические машины с когтеобразными полюсами хорошо изучены для малых и средних мощностей. Наибольшее распространение они получили в качестве генераторов для автономного питания транспортных средств, но применение мощного крупногабаритного вентильного двигателя с когтеобразными полюсами и возбуждением от высококоэрцитивных магнитов является новым техническим решением в практике металлургического проката. В электромашиностроении известно, что применить теорию подобия и с помощью коэффициентов трансформировать методику проектирования для электрических машин малой и средней мощности на крупногабаритные машины большой мощности невозможно из-за резко нелинейных зависимостей между геометрией и мощностью, особенностью формирования основного магнитного потока и потоков рассеяния, генерацией магнитных и электрических потерь.

К новизне представленного научного исследования следует отнести выбор данного типа электродвигателя для пильгер-технологии металлургического проката бесшовных труб и методику его сборки. Научную новизну представляет методика его оптимального проектирования с учетом особенностей работы всего привода и методика анализа его электромагнитного и теплового состояния.

### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Последовательность сборки статора и ротора крупногабаритного вентильного двигателя с когтеобразными полюсами, **отличающуюся тем**, что данная сборка исключает негативное сильное односторонне магнитное тяжение, не позволяющее для крупных машин с постоянными магнитами вставить ротор в статор. Данный способ исключает дорогостоящую специальную оснастку для сборки двигателя.

2. Математическая модель однокритериальной оптимизации вентильного двигателя с когтеобразными полюсами, **которая отличается от известных расчетных моделей тем**, что она учитывает требуемое значение инерционной массы двигателя, необходимой для динамической нагрузки проката и позволяет сделать оптимизацию геометрии для различных ограничений по основным габаритным размерам.

3. Математическая модель анализа электромагнитного состояния крупногабаритного вентильного двигателя, **отличающуюся тем**, что для сокращения времени расчета на основе метода конечных элементов задача анализа разбивается на несколько последовательных шагов: на первом этапе реальный вентильный электродвигатель с когтеобразными полюсами, который не имеет плоской симметрии, заменяется электродвигателем аналогом с плоской симметрией и эквивалентным рабочим магнитным потоком, а затем, после настройки и отладки расчетной модели, анализ электромагнитного состояния электродвигателя возвращается к реальной трехмерной модели когтеобразной магнитной системы. Данный подход позволил на порядок сократить время анализа.

4. Математическая модель анализа теплового состояния крупногабаритного двигателя с когтеобразными полюсами, **отличающуюся тем**, что при расчете теплового поля решается связанная с расчетом магнитного состояния задача, учитывающая реальную динамическую нагрузку и реальное распределение магнитных и электрических потерь.

5. Методика расчета крупногабаритного вентильного двигателя с когтеобразными полюсами, **отличающуюся от известных методов тем**, что она связывает единую проектную систему задачу синтеза оптимальной геометрии и задачу анализа электромагнитного и теплового состояния.

**Соответствие паспорту специальности.** Диссертация соответствует специальности 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты. Полученные в работе научные результаты соответствуют п. 2 «Разработка научных основ создания и совершенствования электрических, электромеханических преобразователей и электрических аппаратов», п. 3 «Разработка методов анализа и синтеза преобразователей электрической и механической энергии», п. 5 «Разработка подходов, методов, алгоритмов и программ, обеспечивающих проектирование, надежность, контроль и диагностику функционирования электрических, электромеханических преобразователей и электрических аппаратов в процессе эксплуатации в составе рабочих комплексов» паспорта специальности.

**Теоретическая значимость.** В работе представлено дальнейшее развитие крупногабаритных вентильных машин с возбуждением от постоянных магнитов, в частности, методика многоуровневой оптимизации, позволяющая спроектировать машину при различных ограничениях, определяемых проектными ситуациями, метод решения связанной электродинамической и термодинамической задачи, приведение трехмерной когтеобразной системы к плоскому аналогу. Расчет когтеобразной магнитной системы отличается от традиционной методики поскольку строится по методу синтеза, а не анализа. Разработанные математические модели вносят дальнейший вклад в теорию оптимального проектирования вентильных машин.

**Практическая значимость.** Основным практическим результатом проведенных теоретических исследований является разработка программного комплекса по проектированию крупногабаритных вентильных двигателей с

когтеобразными полюсами. Он представляет собой эффективный инструмент проектирования, который позволяет:

- облегчить сложную инженерную работу по проектированию электрических машин этого класса;
- повысить качество проектных работ при сокращении сроков их выполнения;
- максимально снизить технические риски при производстве реального образца.

Дополнительно можно отметить следующее практическое значение проведенных исследований:

1) разработанный метод расчета магнитной системы с когтеобразными полюсами на основе схемы замещения доведен до практического инженерного применения. Он реализован в формате программ Mathcad и Delphi и может быть использован для расчета различных магнитных систем;

2) математическая модель оптимизации разработана отдельным блоком и может быть использована в инженерной практике для оценки основных параметров и характеристик вентильных электрических машин с когтеобразными полюсами другого назначения;

3) математическая модель анализа электромагнитного состояния параметризована и может быть использована в инженерной практике для расчета электромагнитных полей электрических машин с когтеобразными полюсами различных размеров.

**Внедрение результатов работы.** Результаты научного исследования представлены руководству ОА Челябинский трубопрокатный завод», которое инициировала эту работу, в виде научно-технического отчета для принятия решения по замене существующего двигателя и системы управления к нему.

Разработанные методы анализа магнитных и тепловых полей и методы трехмерного твердотельного моделирования внедрены в учебный процесс кафедры «Теоретические основы электротехники» ЮУрГУ и ИЭТ для студентов

старших курсов бакалавриата направления подготовки «Энергетика и электротехника» при преподавании дисциплины «Конструкции, методы расчета и проектирования электромагнитных устройств и электромеханических преобразователей энергии» и дисциплины «Проектирование специальных электрических машин.

**Степень достоверности результатов работы.** Достоверность полученных научных результатов подтверждается корректным использованием известных методов анализа и синтеза, применяемых в общей теории электрических машин, таких как метод эквивалентных схем замещения, метод конечных элементов, методы нелинейного программирования. Технологичность и собираемость разработанной конструкции проверена на масштабной модели, изготовленной по технологии 3D принтера.

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

- 12-я научная конференция аспирантов и докторантов Южно-Уральского государственного университета (Челябинск 2020);
- научный семинар аспирантов «IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry» (Магнитогорск 2019);
- Международная научная конференция по энергетическому, экологическому и строительному инжинирингу «ЕЕСЕ-2019» (Санкт-Петербург 2019);
- Международная научно-техническая конференция «International Conference on Industrial Engineering» (Москва 2018-2019);
- десятая научная конференция аспирантов и докторантов Южно-Уральский государственный университет. (Челябинск 2018);
- 70-я научная конференция профессорско-преподавательского состава, аспирантов и сотрудников Южно-Уральского государственного университета. (Челябинск 2018);

- II Всероссийская (национальная) научно-практическая конференция «Приоритетные направления развития энергетики в АПК» (Курган 2018);
- Международная научно-техническая конференция «2018 Global Smart Industry Conference» (Челябинск 2018);
- Международная научно-техническая конференция «International Ural Conference on Green Energy» (Челябинск 2018).

### **Публикации.**

По результатам диссертационной работы опубликовано **16** работ, из них **10** работ индексируются в базе данных Scopus, **6** статей в журналах, входящих в перечень ведущих рецензируемых изданий, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ. Одна статья опубликована в базе данных **Scopus TOP 25** рейтинга мировых научных журналов.

### **Личный вклад автора в диссертационное исследование.**

Данное научное исследование проводилось творческим коллективом профессорско-преподавательского состава кафедры «Теоретические основы электротехники» Южно-Уральского государственного университета. Лично автором разработаны основные положения диссертации: концепция применения вентильного двигателя с когтеобразными полюсами, методика его сборки, реализация метода расчета постоянного магнита, реализация математической модели оптимизации, идея поэтапного анализа электромагнитного состояния и реализация метода оценки теплового состояния.

Автор выражает искреннюю благодарность своему научному руководителю доктору технических наук, доценту Гандже Сергею Анатольевичу за конструктивную критику и содействие при работе над диссертацией.

### **Структура диссертации.**

Диссертация состоит из определений используемых научных терминов, основных обозначений и сокращений, введения, 5 глав, заключения, списка литературы из 225 наименований, 7 приложений. Работа изложена на 147 страницах, из них 113 страниц основного текста. Работа содержит 47 иллюстраций, 97 аналитических выражений, 3 таблицы.

Диссертация имеет следующую структуру и логику построения.

**Во введении** представлена актуальность темы, степень научной проработанности вопроса по крупногабаритным вентильным приводам, определены задачи и методы исследования, указана научная новизна, соответствие паспорту специальности, показана практическая значимость работы, дана информация о публикациях по теме диссертации, апробации работы на конференциях, определен личный вклад автора в представленной научной работе.

**Первая глава** дает описание функциональной схемы привода пыльгерстана. В главе представлен анализ технических проблем существующего электропривода предприятия ПАО «ЧТПЗ», сформулированы требования, которые заказчик выдвигает к модернизированному приводу.

Дан качественный анализ возможных вариантов для замены существующего двигателя привода пыльгерстана. Рассмотрены варианты синхронного реактивного двигателя, вентильно-индукторного двигателя, синхронного торцевого двигателя, синхронного двигателя с радиальными магнитами. Отмечено, что основной проблемой крупногабаритных двигателей с постоянными магнитами является невозможность их сборки из-за сильного одностороннего притяжения ротора к статору. В качестве базового варианта предложена конструкция тихоходного, безредукторного, габаритного вентильного двигателя с когтеобразными полюсами и кольцевым постоянным магнитом. Представлена технология его сборки.

**Во второй главе** рассмотрена математическая модель расчета магнитной системы и электродвигателя для системы оптимального проектирования. Представлен алгоритм расчета в виде последовательности расчетных шагов, показана блок-схема математической модели. Разработана методика расчета магнитной системы с когтеобразными полюсами.

**Третья глава** посвящена разработке системы многоуровневой однокритериальной оптимизации. Сформулирована задача однокритериальной оптимизации ВДКП, выбран метод оптимизации, дано понятие уровней оптимизации, определены 6 уровней применительно к проектированию ВДКП.

**В четвертой главе** представлена разработка системы анализа электромагнитного состояния ВДКП. Анализ разбит на несколько этапов. Первоначально проводится анализ электромагнитного состояния ВДКП в режиме RМхprt программной среды Ansys Electronics Desktop. На следующем этапе осуществляется анализ электромагнитного состояния ВДКП в режиме Maxwell Design программной среды Ansys Electronics Desktop на основе аналога вентильного двигателя с тангенциальной системой возбуждения. На заключительном этапе проводится анализ электромагнитного состояния реального ВДКП в режиме трехмерного анализа Maxwell 3D Design программной среды Ansys Electronics. Данный подход позволил с минимальными затратами компьютерных ресурсов провести анализ вентильного двигателя сложной конструкции.

**В пятой главе** проводится анализ теплового состояния электродвигателя. Термодинамическая задача разбивается три этапа. На первом этапе создается динамическая модель, которая решает связанную электромагнитную и тепловую задачу. На втором этапе оценивается перегрев обмотки, железа якоря и постоянных магнитов по методу эквивалентных тепловых схем замещения при уже установившихся потерях. На третьем этапе осуществляется уточненный анализ на основе метода конечных элементов, который учитывает точное значение потерь и реальное движение тепловых потоков к поверхностям схода тепла. Представлена разработка трехмерной твердотельной модели двигателя, которая является основой для дальнейшей разработки конструкторско-технологической документации.

**Заключение** содержит выводы, сделанные по результатам всей работы. Определены направления дальнейших исследований в области теории и инженерной практики.

В диссертации приведен список использованных источников из 225 наименований отечественных и зарубежных авторов.

В работе имеется 4 приложения, содержащие информацию о существующем двигателе привода пылегерстана, который требует замены и о внедрении результатов исследования.

# 1. ВЫБОР БАЗОВОГО ВАРИАНТА ДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ ПРИВОДА ПИЛЬГЕРСТАНА ИЗГОТОВЛЕНИЯ БЕСШОВНЫХ ТРУБ

## Вводные замечания

Производство бесшовных труб по пилигримовой технологии на Челябинском трубопрокатном заводе (ЧТПЗ) является одним из основных производств [29].

Функциональная трехмерная модель стана с основными элементами представлена на рис. 1.1.

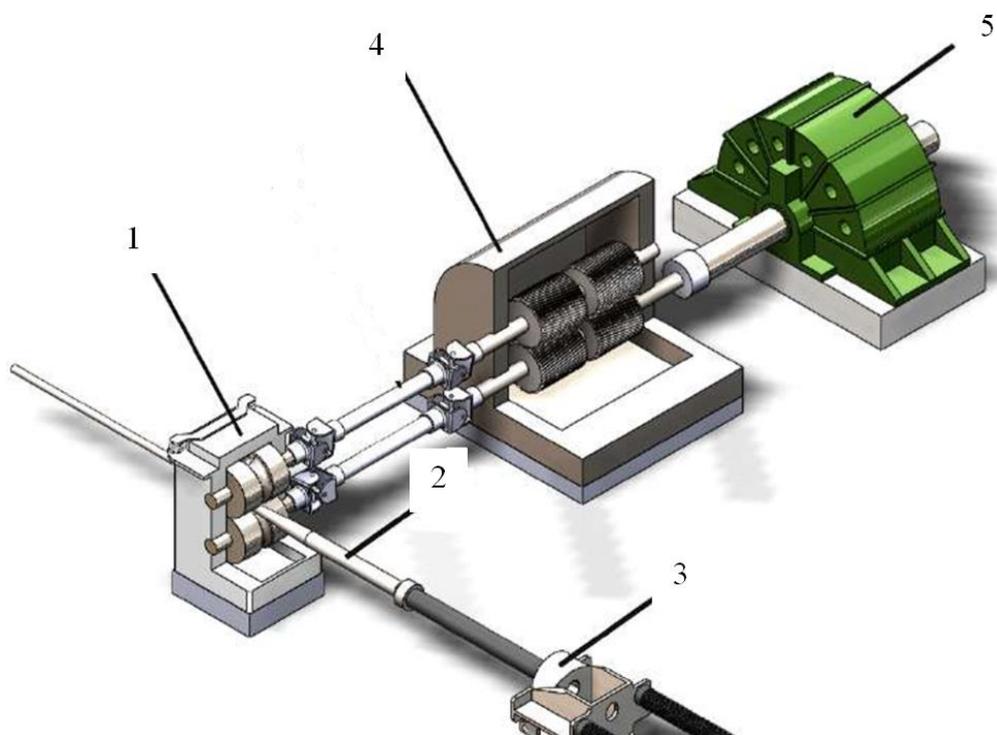


Рис.1.1. Функциональная модель пилигримового стана: 1- прокатная клеть, 2- заготовка для трубы, 3- механизм подачи, 4- двухвалковая шестеренчатая клеть, 5- приводной двигатель.

В модели не показан инерционный маховик большой массы, который сглаживает ударные нагрузки.

На пильгерстанах производится прокатка труб из углеродистых, низко и среднелегированных сталей. Пильгерстаны имеют в поперечном сечении валков

переменный катающий радиус. Прокатку ведут на конической оправке, при этом направление вращения валков противоположно направлению подачи заготовки в клеть (см. рис.1.2.).

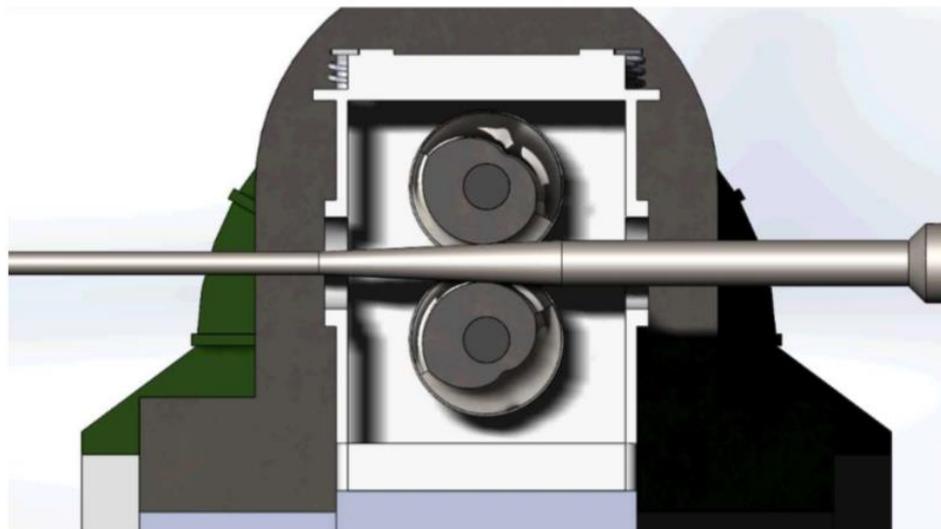


Рис. 1.2. Процесс прокатки трубы на пильгерстане

При пильгер-процессе раскатываемая валками толстостенная заготовка-гильза с каждым оборотом валков получает движение вперёд, а затем на меньшее расстояние назад, что и определило название техпроцесса. Цикл условно разделяют на два периода: рабочий ход (обжим трубы на оправке) и холостой ход (подача трубы в клеть). Заготовка трубы с каждым оборотом валков подвергается обжатию между калибрами и оправкой.

На предприятии производится обкатка труб толщиной от 8 до 45 мм, с наружными диаметрами от 48 до 680 мм, длиной от 14 до 15 м. Производительность двух пильгерстановых приводов, которые работают от одного двигателя на два цеха, составляет до 30 труб в час, в зависимости от толщины стенки трубы.

### **1.1. Анализ технических проблем существующего электропривода пильгерстана предприятия ПАО «ЧТПЗ»**

Существующий на предприятии пилигримовый стан эксплуатируется с 1928 г. В качестве приводного электродвигателя для стана используется

коллекторный электродвигатель постоянного тока GM 900/100 фирмы Siemens со следующими основными параметрами: номинальная мощность 2,75 МВт, номинальное напряжение питания 6 кВ постоянного тока, номинальная частота вращения 35 об/мин. Электродвигатель вращает маховик диаметром 9 м с большой инерционной массой 120 тонн. Фотография электродвигателя, стояковых подшипников и маховика приведена на рис.1.1.1.



Рис. 1.1.1. Электродвигатель, маховик и стояковый подшипник  
пильгерстана ЧТПЗ

План размещения привода представлен на рис.1.1.2.

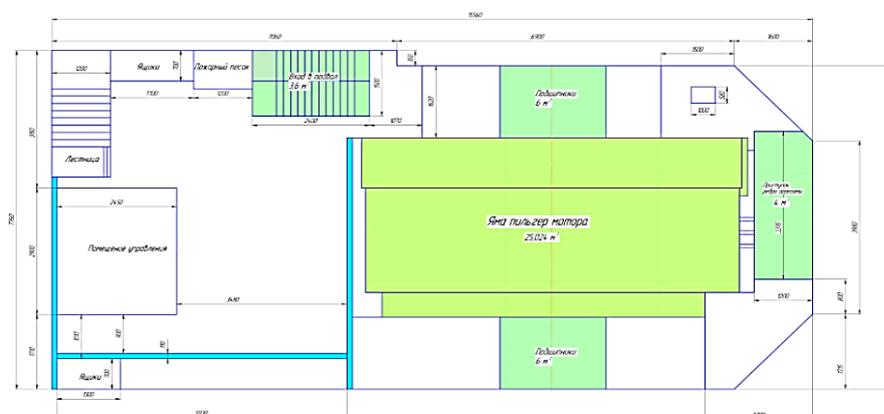


Рис. 1.1.2. План размещения существующего привода пильгерстана

Длительная эксплуатация привода привела к его физическому и моральному износу. На валу образовались микротрещины, которые могут при ударной нагрузке привести к его разрушению. Коллектор, обмотка возбуждения, обмотка якоря, подшипниковые узлы требуют периодического ремонта и постоянного дорогостоящего обслуживания.

На предприятии планируется замена существующего электродвигателя на более современный, надежный и экономичный вариант бесконтактного электродвигателя. При модернизации основные узлы и агрегаты привода по условию предприятия должны остаться без изменений (двухвалковая клеть с калибром переменного сечения и подающий механизм). Планируется замена только электродвигателя и, возможно, маховика.

К новому приводу были сформулированы следующим основные требования [28,29]:

- привод должен вписаться в габариты помещения, в котором находится существующий агрегат (рис.1.1.2.);
- для повышения надежности и снижения эксплуатационных затрат привод должен иметь бесконтактный токоподвод;
- привод должен иметь возможность регулировки частоты вращения в диапазоне 30-45 об/мин для прокатки труб разных диаметров из различных сталей, при этом заказчик требует обеспечить постоянство частоты вращения без ее динамического регулирования;
- необходимо проработать вариант разделения существующего привода, обслуживающего параллельно два цеха, на два независимых привода меньшей мощности. При этом упростятся регламентные работы по обслуживанию и ремонту;
- необходимо улучшить КПД привода для снижения эксплуатационных потерь;

- необходимо предусмотреть минимальные сроки демонтажа старого привода и замену его новым приводом. Прерывать на долгий срок действующую технологическую линию недопустимо;

- электродвигатель и система управления должны иметь минимально возможную стоимость.

Новый электродвигатель должен максимально удовлетворять предъявленным требованиям для модернизации производства на современном уровне.

## **1.2. Предварительный качественный анализ возможных вариантов для замены существующего двигателя привода пильгерстана**

Учитывая большие капитальные затраты на модернизацию привода, для выбора наиболее приемлемого, следует рассмотреть наибольшее количество типов электрических машин [28].

Предварительный анализ показал, что применение высокоскоростных электродвигателей с понижающим редуктором следует исключить из рассмотрения. Это обусловлено следующими двумя факторами:

- обширный поиск по производителям мощных понижающих редукторов не дал положительного результата. Не удалось найти промышленно выпускаемый редуктор с требуемыми параметрами для привода. Производители редукторов подтвердили, что под требования привода следует разрабатывать новый уникальный редуктор, что связано с большими временными, финансовыми затратами и техническими рисками;

- редукторный привод обладает на порядок меньшей надежностью из-за больших динамических нагрузок работы привода.

На предварительном этапе был исключен из рассмотрения реактивный синхронный двигатель [57-60]. Этот класс электрических машин не имеет источника для возбуждения, то есть обмотки возбуждения или постоянных магнитов. Реактивную энергию эти машины берут из сети через якорную обмотку статора. Это приводит к повышенным габаритам двигателя и

ухудшению энергетических показателей, включая КПД. Из теории известно, что эти двигатели имеют низкую перегрузочную способность, что недопустимо для приводов с динамической нагрузкой.

Класс вентильных индукторных электродвигателей [21,22] так же был исключен из рассмотрения на начальном этапе, так как эти электрические машины в одинаковых габаритах и при однотипных условиях эксплуатации проигрывают машинам с активным возбуждением по КПД и другим энергетическим показателям, что теоретически подтверждено и доказано в классическом курсе электрических машин [105,151]. Непрерывная работа привода в 3 смены приведет к неизбежным повышенным потерям на возбуждение этого класса электродвигателей.

Вполне реально заменить существующий коллекторный электродвигатель на варианты синхронного электродвигателя или асинхронного электродвигателя с частотным регулированием или векторным управлением. Но по габаритным размерам эти двигатели будут соизмеримы с существующим двигателем. Заказчик настаивает на разделении существующего привода, который работает одновременно на два цеха, на два независимых привода. При этом потребуется в существующем месте под привод размещать два двигателя, два мощных инерционных маховика и 4 стояковых подшипника. Предварительные расчеты показали, что это в существующих габаритах имеющегося помещения невозможно, а делать перепланировку здания недопустимо.

Привлекательным для решения поставленной задачи является вариант торцевого исполнения вентильного двигателя [39,40,43-48], но известно, что торцевые двигатели имеют сильное одностороннее магнитное тяжение. Для его компенсации необходимо располагать два статора с различных сторон ротора. Это во многом осложняет конструкцию. Кроме того, было измерено торцевое биение маховика. Оно составило до 10 мм. Вероятно, что торцевое исполнение вентильного двигателя будет иметь такие же параметры изменения зазора между статором и ротором. Это приведет к повышенной вибрации и габаритам

магнитной системы индуктора. По этой причине торцевое исполнение вентильного двигателя в варианте асинхронного и синхронного двигателя тоже были исключены из рассмотрения для базового варианта. Предварительные расчеты подтвердили правильность этого решения.

Таким образом, для более подробного анализа остается рассмотреть варианты радиального тихоходного безредукторного двигателя прямого привода с инерционной массой, позволяющей исключить инерционный маховик. Это могут быть:

- радиальный тихоходный асинхронный двигатель с эквивалентной инерционной массой редуктора;
- радиальный тихоходный синхронный двигатель с эквивалентной инерционной массой редуктора.

Из общей теории электрических машин следует, что в одних и тех же габаритах с одинаковыми электромагнитными нагрузками синхронный двигатель, имеющий встроенный источник для возбуждения (постоянные магниты) будет превосходить асинхронный двигатель по удельным энергетическим параметрам, таким, как КПД и удельная масса или удельный объем. Выполненные предварительные расчеты [29] подтверждают этот вывод.

Таким образом, на основе предварительного качественного анализа и выполненных расчетов по упрощенным методикам, в качестве основного базового варианта, удовлетворяющего требованиям надёжности и энергоэффективности следует выбрать вариант радиального, тихоходного, безредукторного, габаритного вентильного двигателя с постоянными магнитами.

### **1.3. Выбор конструкции радиального, тихоходного, безредукторного, габаритного вентильного двигателя с постоянными магнитами**

Анализ тенденций развития современного электромашиностроения позволяет в качестве наиболее перспективного выбрать вентильный электропривод [57-60,169-171]. Это связано с тем, что неуклонно повышается мощность, надёжность работы вентильных машин, в том числе и в агрессивных

средах. При этом цена таких приводов снижается и становится доступной для средних предприятий. Этому способствует развитие производства мощных высококоэрцитивных постоянных магнитов и силовой электроникой на большие токи и напряжения. Сейчас разработка управляемых преобразователей частоты на мощности десятки и сотни мегаватт не представляет практических проблем. Хорошо отработано векторное управление, которое является эффективным с точки зрения массоэнергетических показателей. Появились различные конструкции с эффективными магнитными системами для индуктора. Эти положительные тенденции позволяют проектировать и производить вентильные двигатели и генераторы на десятки и сотни мегаватт.

Вентильные электродвигатели обладают высоким КПД, высокой перегрузочной способностью, высокими массогабаритными показателями, высоким коэффициентом мощности ( $\cos(\varphi) > 0,95$ ) [35]. Так же, эти электродвигатели обладают жесткими механическими характеристиками.

Но практика показывает, что мощные и крупногабаритные вентильные машины производят с электромагнитным возбуждением без постоянных магнитов. Это связано с технологией изготовления машин с постоянными магнитами, которые имеют большой диаметр. Возникают большие технологические сложности сборки статора и ротора из-за наличия мощных высококоэрцитивных постоянных магнитов. Одностороннее магнитное тяжение при операции, когда ротор с магнитами вставляется в статор, для крупногабаритных машин может составлять несколько тонн, что делает сборку технологически невозможной. Аналогичные проблемы возникают при разборке двигателя для ремонта и регламентных работ. Теоретически можно спроектировать и изготовить специальную оснастку, которая обеспечит равномерный зазор при этой операции, однако стоимость такой оснастки может в несколько раз превышать стоимость самого двигателя, при этом для каждого типоразмера двигателя необходимо изготавливать специальную оснастку. Вероятно, это обстоятельство является одной из основных причин, из-за которых

вентильные машины с постоянными магнитами с диаметрами расточки более 5 м не изготавливают для промышленного применения.

Исследования для решения этой технологической проблемы привели к анализу вентильной машины с когтеобразными полюсами. Конструкция индуктора с когтеобразными полюсами с постоянным магнитом представлена на рис.1.3.1.

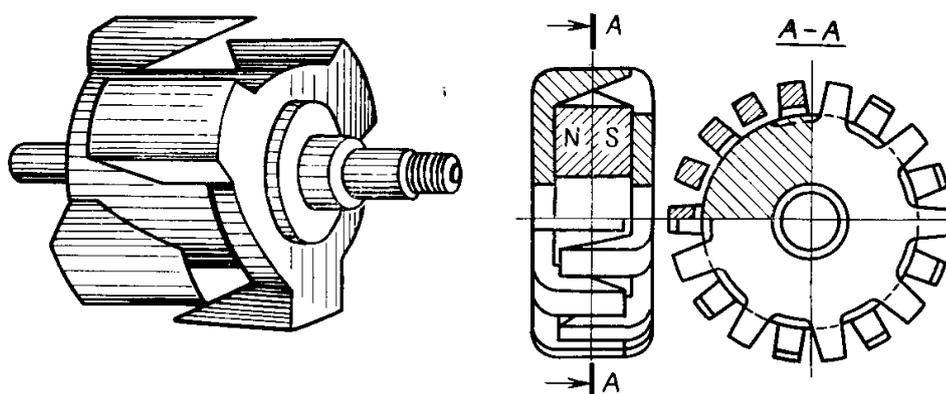


Рис. 1.3.1. Конструкция ротора с когтеобразными полюсами и постоянным магнитом

Она представляет собой два магнитопровода когтеобразной формы, между которыми располагается кольцевой постоянный магнит. Такая конструкция имеет большое преимущество по сравнению с другими магнитными системами для роторов большого диаметра. Индуктор можно собрать непосредственно в самой электрической машине по частям по следующей технологии:

1. Сначала в якорь вставляется вал с нижней обоймой когтеобразных полюсов. Эта часть магнитной системы на данном этапе сборки не содержит постоянных магнитов и не будет притягиваться к стенкам якоря.

2. На втором этапе сборки в индуктор монтируется постоянный магнит. В зависимости от габаритов он может склеиваться по отдельным частям, а может монтироваться целиком.

3. На третьем этапе в индуктор вставляется верхняя обойма с когтеобразными полюсами. Под действием электромагнитных сил постоянного магнита она должна втянуться в индуктор.

4. На последнем заключительном этапе монтаж подшипникового щита завершает сборку.

Технология сборки показана на рис.1.3.2

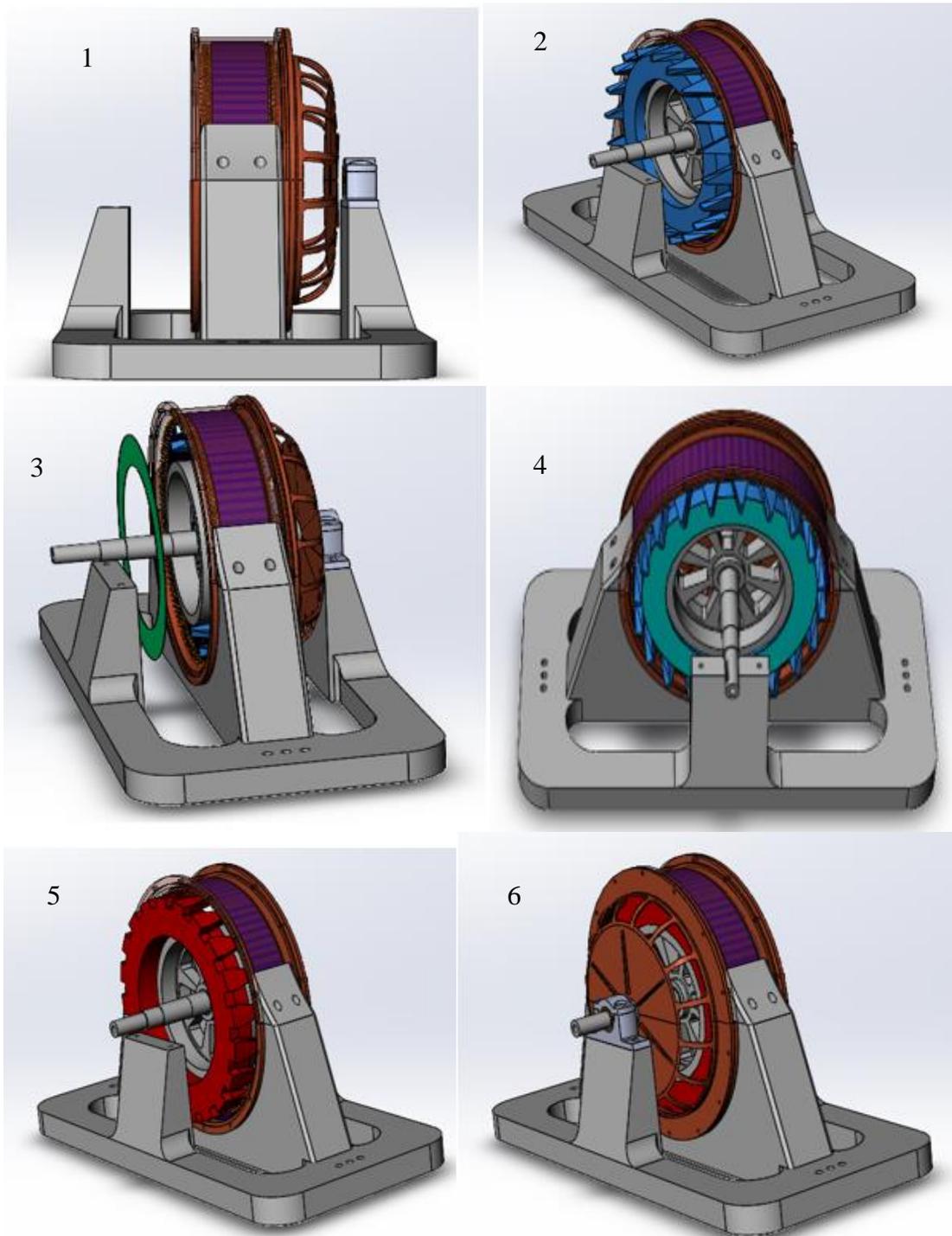


Рис.1.3.2. Технология сборки двигателя (1 – установка статора в сборе, 2.– установка первой половины когтеобразного ротора, 3,4 – монтаж постоянного магнита, 5 – установка второй половины когтеобразного ротора, 6 – окончательная сборка двигателя).

Такая технология сборки вентильной машины с когтеобразными полюсами не требует дорогостоящей оснастки и специальных приспособлений и предлагается впервые в отечественной и мировой практике.

Отметим основные достоинства предлагаемого варианта вентильного электродвигателя:

- конструкция позволяет разместить постоянные магниты без изготовления дополнительной оснастки;

- электродвигатель имеет минимальные потери и наибольший КПД из-за исключения потерь на возбуждение. Это очень важно при непрерывной работе электродвигателя в три смены;

- коэффициент мощности электродвигателя 1.0, не требуется компенсация реактивной мощности;

- габариты электродвигателя и инерционная масса ротора позволяют разместить второй независимый привод на имеющихся заводских площадях (рис.1.1.2);

- электродвигатель имеет закрытое исполнение, что уменьшает шум, повышает безопасность и надежность;

- в Челябинске построено и запущено в действие предприятие по производству мощных крупногабаритных асинхронных и синхронных электродвигателей АО «Русские электродвигатели». Предприятие оснащено современным высокотехнологичным оборудованием. Руководство предприятия на уровне главного инженера подтвердило возможность изготовления вентильного электродвигателя с указанными параметрами.

К недостаткам предлагаемого варианта можно отнести следующие обстоятельства:

- электродвигатель содержит дорогостоящие мощные постоянные магниты. Потребуется единовременные капитальные затраты на их изготовление;

- электродвигатель имеет реактивный момент. Необходимо принять дополнительные меры для его уменьшения;

- магнитная система имеет большое рассеяние между когтями полюсов. Необходима оптимизация геометрии для уменьшения этого фактора.

Тем не менее, по совокупности положительных и негативных факторов вариант крупногабаритного безредукторного вентильного электродвигателя с когтеобразными полюсами и инерционным ротором может быть выбран в качестве базового варианта для привода пильгерстана изготовления бесшовных труб.

### **Выводы по главе**

1. Для обеспечения требуемой надежности для привода пильгерстана технологии изготовления бесшовных труб следует выбирать только безредукторные (тихоходные), крупногабаритные, бесконтактные вентильные электродвигатели специального применения.

2. Асинхронные электродвигатели, вентильно-индукторные электродвигатели, вентильные электродвигатели торцевого исполнения не могут конкурировать с вентильными двигателями с постоянными магнитами по параметрам энергоэффективности (КПД и коэффициент мощности) применительно к требованиям привода пильгерстана. Для повышения энергоэффективности непрерывной работы мощного привода в три смены необходимо применение вентильного двигателя с постоянными магнитами, имеющего максимальный КПД и коэффициент мощности.

3. В качестве базового электродвигателя для привода пильгерстана предложена конструкция вентильного двигателя с когтеобразными полюсами, удовлетворяющая требованиям надежности и энергоэффективности. Разработана новая в отечественной и мировой практике технология сборки статора и ротора электродвигателя без дополнительной оснастки.

## **2. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С КОГТЕОБРАЗНЫМИ ПОЛЮСМИ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ЕГО ГЕОМЕТРИИ**

### **Вводные замечания**

Магнитные системы с когтеобразными полюсами достаточно хорошо изучены [8]. Но это касается электрических приводов малой и средней мощности. Разработка вентильных машин на несколько мегаватт с диаметром расточки в несколько метров является уникальной для инженерной практики. Применить в данном случае теорию подобия, когда оптимально спроектированный двигатель небольшой мощности пропорционально увеличивается в размерах до заданной мощности невозможно. В электромашиностроении такой прием не применяется. Это связано с резко нелинейными зависимостями между линейными размерами двигателя, электромагнитными нагрузками и его электромагнитной мощностью.

Проектирование двигателей большой мощности и габаритов связано с большими капитальными затратами. Невозможно проект вести по традиционному пути: создание и исследование макетного образца, опытного образца, серийного изделия. Современное развитие вычислительной техники и программного обеспечения позволяет пройти эти стадии на цифровом двойнике, прежде чем изготовить реальный двигатель. Для этого необходимо создать проектную систему синтеза оптимальной геометрии и анализа полученного электронного прототипа.

Для синтеза необходимо выбрать наиболее подходящий для данной математической модели метод нелинейного программирования.

Для анализа можно использовать хорошо отработанные и проверенные CAE системы на основе метода конечных элементов, например, Ansys Electronics Desktop.

Разделение проектной системы на две части: синтез и анализ объясняется следующими причинами. Оптимизация геометрии предполагает большое количество итераций при изменении независимых переменных. Количество циклов расчета математической модели в зависимости от выбранного метода может составлять до нескольких тысяч. Понятно, что при этом методы оптимального проектирования могут работать только с очень упрощенной моделью с большим числом ограничений [139-140]. Оставлять эту модель в качестве конечной, даже после процедуры оптимизации, нельзя из-за больших рисков по капитальным затратам на разработку конструкторско-технологической документации и изготовлении образца. Необходим тщательный анализ полученных результатов на основе более точных методик цифровых двойников. Эту задачу выполняет система анализа.

Далее приводятся последовательные шаги по разработке проектной системы.

## **2.1. Разработка методики и математической модели расчета магнитной системы с когтеобразными полюсами**

Особенностью магнитной системы с когтеобразными полюсами является значительный поток рассеяния. Это обстоятельство необходимо учесть при разработке математической модели расчета этой магнитной системы. Анализ литературы по этому вопросу показывает, что в полной мере эта задача не решена. Достаточно подробно проработаны магнитные системы с обмотками возбуждения [8], а также, магнитные системы с паразитным воздушным зазором [5]. В основном, расчетные методики нацелены на анализ уже спроектированных магнитных систем. Поэтому в данной работе возникла необходимость спроектировать магнитную систему на требуемые параметры. В этом заключается особенность данной математической модели.

Будем полагать, что нам известны число полюсов, диаметр индуктора, величина воздушного зазора, геометрия зубцовой зоны и спинки якоря, внутренний диаметр индуктора. Задача заключается в определении остальных

размеров индуктора и постоянного магнита, которые обеспечили бы требуемое значение индукции в воздушном зазоре.

На рис.2.1.1. изображен эскиз магнитной системы двигателя с когтеобразными полюсами, показаны основные потоки и геометрические размеры

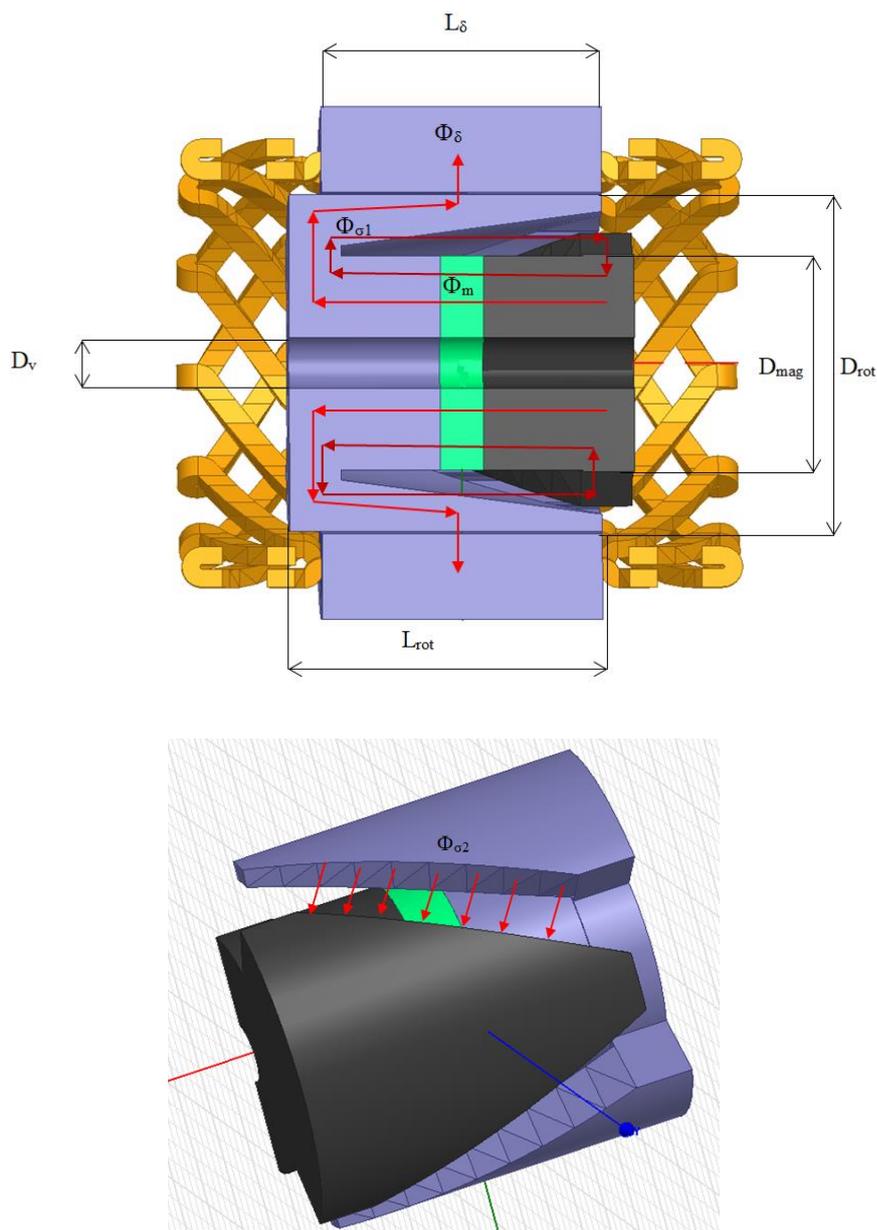


Рис.2.1.1. Эскиз магнитной системы двигателя с когтеобразными  
ПОЛЮСАМИ

Для данной магнитной системы можно представить схему замещения, изображенную на рис. 2.1.2.

На схеме не учтено магнитное сопротивление когтя полюса. Это обусловлено тем, что когти полюсов не насыщены. Индукция в них подбирается примерно равной индукции в воздушном зазоре.

Можно пренебречь потоком рассеяния с торцов когтей по причине их маленькой площади.

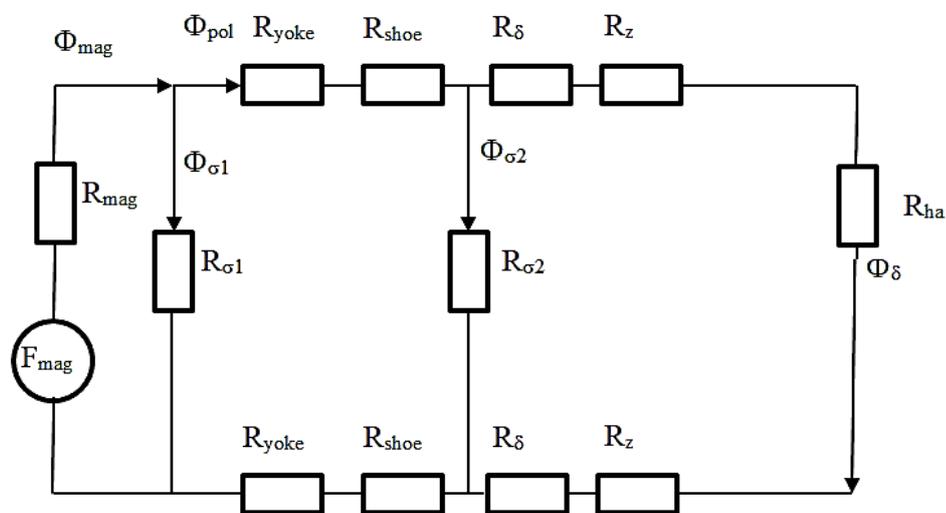


Рис.2.1.2. Схема замещения магнитной цепи двигателя с когтеобразными полюсами

По условиям моделирования будем полагать, что нам известна индукция в воздушном зазоре.

Магнитное сопротивление двух воздушных зазоров (А/Вб):

$$R_{\delta} = \frac{2 \cdot \delta}{\mu_0 \cdot S_{\delta}}, \quad (2.1)$$

где  $\delta$  – воздушный зазор (м);  $\mu_0$  – магнитная проницаемость воздуха (Гн/м);  $S_{\delta}$  – площадь мод когтем (м<sup>2</sup>).

Магнитное сопротивление двух зубцовых зон (А/Вб):

$$R_z = \frac{2 \cdot h_z}{\mu_z \cdot S_z}, \quad (2.2)$$

где  $h_z$  – высота зубцовой зоны (м);  $\mu_z$  – магнитная проницаемость зубца с учетом насыщения (Гн/м);  $S_z$  – площадь зубцовой зоны под полюсом (м<sup>2</sup>).

Магнитное сопротивление спинки якоря (А/Вб):

$$R_{ha} = \frac{L_a}{\mu_a \cdot S_a}, \quad (2.3)$$

где  $L_a$  – длина спинки якоря (м);  $\mu_a$  – магнитная проницаемость спинки якоря с учетом насыщения (Гн/м);  $S_a$  – площадь поперечного сечения спинки якоря (м<sup>2</sup>).

Магнитное сопротивление рассеяния между боковыми поверхностями когтей полюса (А/Вб):

$$R_{\sigma 2} = \frac{\delta_{\sigma 2}}{\mu_0 \cdot 2 \cdot p \cdot S_{\sigma 2}}, \quad (2.4)$$

где  $\delta_{\sigma 2}$  – воздушный зазор между боковыми поверхностями когтей полюсов (м);  $\mu_0$  – магнитная проницаемость воздуха (Гн/м);  $S_{\sigma 2}$  – площадь боковых поверхностей когтей полюса (м<sup>2</sup>);  $p$  – число пар полюсов магнитной системы.

Рабочий магнитный поток двигателя (Вб):

$$\Phi_{\delta} = B_{\delta} \cdot S_{\delta} \cdot p. \quad (2.5)$$

Намагничивающая сила, которая приложена к магнитной цепи якоря (два зазора, две зубцовых зоны и спинка якоря (А):

$$F_{\delta za} = \Phi_{\delta} (R_{\delta} + R_z + R_{ha}). \quad (2.6)$$

Поток рассеяния между боковыми поверхностями когтей полюса (Вб):

$$\Phi_{\sigma 2} = \frac{F_{\delta za}}{R_{\sigma 2}}. \quad (2.7)$$

Магнитный поток полюса (Вб):

$$\Phi_{pol} = \Phi_{\delta} + \Phi_{\sigma 2} . \quad (2.8)$$

Магнитное сопротивление торцевой части магнитопровода индуктора (shoe) (А/Вб):

$$R_{shoe} = \frac{0.5(D_{rot} - D_{mag})}{\mu_{shoe} \cdot S_{shoe}} ; \quad (2.9)$$

где  $\mu_{shoe}$  – магнитная проницаемость торцевой части магнитопровода индуктора с учетом насыщения (Гн/м);  $S_{shoe}$  – площадь поперечного сечения торцевой части магнитопровода индуктора, определяется на уровне наружного диаметра магнита ( $m^2$ ). Эта площадь подбирается таким образом, чтобы не было насыщения в этой части магнитопровода, то есть индукция не превышала 1.0 Тл.

Магнитное сопротивление части магнитопровода прилегающей к торцевой поверхности постоянного магнита (yoke) (А/Вб):

$$R_{yoke} = \frac{L_{rot}}{\mu_{yoke} \cdot 0.25 \cdot \pi(D_{mag}^2 - D_v^2)} , \quad (2.10)$$

где  $\mu_{yoke}$  – магнитная проницаемость части магнитопровода прилегающей к торцевой поверхности постоянного магнита с учетом насыщения (Гн/м);

Намагничивающая сила, приложенная к внутренней части торцевых поверхностей индуктора (А):

$$F_{pol} = \Phi_{pol} (R_{shoe} + R_{yoke}) . \quad (2.11)$$

Магнитное сопротивление потоку рассеяния между внутренними частями торцевых поверхностей индуктора (А/Вб):

$$R_{\sigma 1} = \frac{L_{\delta}}{\mu_0 \cdot 0.25 \cdot \pi(D_{rot}^2 - D_{mag}^2)} . \quad (2.12)$$

Поток рассеяния между внутренними частями торцевых поверхностей индуктора (А):

$$\Phi_{\sigma 1} = \frac{F_{pol}}{R_{\sigma 1}} . \quad (2.13)$$

Полный поток постоянного магнита (Вб):

$$\Phi_{mag} = \Phi_{pol} + \Phi_{\sigma 1} \quad . \quad (2.14)$$

Полученной из расчета информации вполне достаточно, чтобы определить толщину магнита, который обеспечит требуемый магнитный поток и индукцию в воздушном зазоре:

$$h_{mag} = \frac{F_{pol}}{\frac{\Phi_{mag}}{\frac{H_c}{B_r} \cdot S_{mag}} + H_c} \quad , \quad (2.15)$$

где  $h_{mag}$  – толщина магнита;  $H_c$  – коэрцитивная сила постоянного магнита;  $B_r$  – остаточная индукция постоянного магнита.

Данная математическая модель положена в основу общей математической модели расчета двигателя для оптимизационных расчетов. Отличие ее от существующих методик заключается в том, что это модель не анализа, а синтеза.

## **2.2. Разработка математической модели электромагнитного расчета вентильного двигателя с когтеобразными полюсами**

Под математической моделью расчета будем понимать совокупность уравнений и неравенств, описывающих основные электромагнитные процессы ВДКП. Уравнения связывают геометрические размеры и параметры применяемых материалов с показателями качества ВДКП. Математическая модель должна иметь входные параметры, которые задаются для расчетных уравнений, и выходные параметры, которые получаются по результатам расчета. Математическая модель должна разрабатываться с учетом ее последующего включения в большое число циклов оптимизации геометрических размеров, поэтому она должна быть максимально упрощена. Для построения математической модели используем хорошо апробированный метод схем замещения [105].

Следует отметить, что точность математической модели во многом зависит от погрешности расчета параметров магнитного поля (индукции в воздушном зазоре, магнитного потока, коэффициента насыщения, коэффициента рассеяния). Разработанная методика расчета постоянного магнита позволяет решить эту задачу с высокой точностью. Математическая модель расчета магнитной системы по этой методике была заложена в модель электромагнитного расчета электродвигателя.

Входные параметры разделим на три независимые группы:

1. Константы. Это параметры, которые не меняются для данной проектной ситуации. Как правило, это исходные данные технического задания на проектирование (номинальная мощность, номинальное напряжение, номинальная частота вращения и т. д.).

2. Ограничения. Это параметры, которые нельзя нарушать. Ограничения на модель могут наложить технологические службы (минимальная и максимальная высота магнита, минимальная ширина зубца, минимальная высота спинки, минимальный воздушный зазор), условия эксплуатации (максимально допустимый нагрев обмотки по выбранному классу изоляции, максимально допустимый нагрев постоянного магнита по условиям размагничивания) или заданная точность расчета параметров.

3. Независимые переменные. Это параметры, которые могут варьироваться независимо друг от друга в допустимых пределах. Как правило, это геометрические размеры якоря и индуктора.

Выходными параметрами математической модели являются показатели, полученные по результатам расчета, которые определяют качество спроектированной машины. Как правило, это массогабаритные или энергетические характеристики. Их выбор определяется конкретной проектной ситуацией.

### **2.2.1. Входные параметры математической модели**

В качестве входных параметров выделим следующие величины:

### 2.2.1.1. Константы

- номинальная выходная мощность  $P_{2n}$  (Вт);
- номинальная частота вращения  $n_n$  (об/мин);
- номинальное фазное напряжение  $U_n$  (В);
- число фаз  $m$ ;
- воздушный зазор  $\delta$  (м);
- число пазов на полюс и фазу  $q$ ;
- коэффициент заполнения обмотки якоря медью  $k_{змп}$ ;
- коэффициент формы поля  $k_B$ ;
- характеристики материала постоянного магнита:
  - а) остаточная индукция  $B_r$  (Тл),
  - б) коэрцитивная сила  $H_c$  (А/м).

Часть констант задается техническим заданием заказчика, остальные параметры определяются практикой проектирования электрических машин этого типа.

### 2.2.1.2. Ограничения

Ограничения можно разделить на два типа: ограничения, определяемые точностью расчета параметров математической модели и ограничения, обусловленные технологией изготовления и режимом работы:

- допустимая погрешность расчета коэффициента насыщения магнитной цепи  $\mathcal{E}_{k_{дон}}$ ;
- допустимая погрешность расчета коэффициента ЭДС в якоре  $\mathcal{E}_{kedon}$ ;
- допустимая погрешность расчета КПД  $\mathcal{E}_{\eta_{дон}}$ ;
- минимальная высота постоянного магнита;
- максимальная допустимая температура обмотки якоря;
- максимальная плотность тока в обмотке якоря;
- максимальная индукция в зубце якоря;

- максимальная индукция в спинке якоря;
- максимальная индукция в спинке когтеобразного полюса;
- минимальная инерционная масса ротора. Этот параметр очень важен для модели, поскольку инерционные вращающиеся массы очень важны для динамических нагрузок, и ранее было принято решение исключить существующий маховик для размещения в цехе двух независимых приводов.

В зависимости от применяемых материалов и технологических возможностей предприятия эти ограничения могут меняться.

### 2.2.1.3. Независимые переменные

Габаритные размеры и энергетические параметры электрической машины во многом зависят от выбора электромагнитных нагрузок: линейной нагрузки якоря и индукции в воздушном зазоре. Традиционно эти параметры выбираются из практики проектирования серийных электрических машин в зависимости от расчетной мощности [12,105,151]. В условиях, когда проектируется уникальный электродвигатель и информация об этих параметрах отсутствует, имеет смысл включить эти величины в независимые переменные для оптимизационного цикла. Оптимальные значения этих параметров определяют ограничения, которые представлены выше.

Кроме этого, в качестве независимых переменных выступают размеры, которые однозначно определяют геометрию электродвигателя. Они тоже будут включены в процедуру оптимального перебора.

Таким образом, в качестве независимых переменных для математической модели следует включить следующие параметры:

- линейная нагрузка  $A_{lin}$  (А/м);
- индукция в воздушном зазоре  $B_{\delta}$  (Тл);
- число пар полюсов  $p$ ;
- диаметр расточки якоря  $D_a$  (м);
- внутренний диаметр двигателя  $D_v$  (м).

Остальные размеры и параметры являются зависимыми друг от друга или от ограничений и определяются в процессе последовательного расчета в математической модели.

#### **2.2.1.4. Выходные параметры математической модели**

Выходные параметры математической модели должны представлять собой критерии, по которым осуществляется выбор оптимального варианта. В дальнейшем будет рассмотрена однокритериальная оптимизация, то есть в качестве критерия качества будет выбираться только один параметр. Этот параметр каждый раз будет меняться в зависимости от конкретной проектной ситуации. Для обеспечения гибкости проектной системы математическая модель должна включать в себя по возможности наибольшее количество таких критериев оптимальности.

В разрабатываемую математическую модель включены следующие показатели качества, которые являются ее выходными параметрами:

- КПД;
- масса активных частей (масса меди + масса постоянных магнитов + масса железа магнитопровода) (кг);
- масса постоянных магнитов (кг);
- объем электрической машины, определенный по активным частям (куб.м).

Данные показатели качества подтвердили свою актуальность в конкретных коммерческих проектах.

### **2.3. Алгоритм математической модели расчета ВДКП**

Математическую модель расчета ВДКП представим в виде последовательных алгоритмических шагов.

#### **1. Ввод исходных данных.**

В качестве исходных данных являются перечисленные выше константы, ограничения и независимые переменные.

Задаемся предварительными значениями КПД ( $\eta_{пред}$ ) и коэффициента ЭДС ( $k_{пред}$ )

2. Определение номинальной величины фазного тока для обмотки, соединенной в звезду (А):

$$I_a = \frac{P_n}{\sqrt{3} \cdot U_{фн} \cdot \eta}, \quad (2.3.1)$$

где  $P_n$  – номинальная мощность;  $U_{фн}$  – номинальное фазное напряжение;  $\eta$  – предварительное значение КПД.

3. Расчетная (электромагнитная) мощность (Вт):

$$P_{рас} = \frac{P_n \cdot k_e}{\eta}. \quad (2.3.2)$$

4. На этом шаге в зависимости от проектной ситуации:

- если задан диаметр расточки якоря, то рассчитывается активная длина пакета якоря (м):

$$L_\delta = \frac{60 \cdot P_{рас}}{\pi^2 \cdot \alpha_\delta \cdot k_b \cdot k_{об} \cdot A \cdot B_\delta \cdot D^2 \cdot n_{ном}}, \quad (2.3.3)$$

где  $\alpha_\delta$  – коэффициент полюсной дуги;  $k_b$  – коэффициент формы поля;  $k_{об}$  – обмоточный коэффициент;  $A$  – линейная нагрузка (А/м) ( задается как независимая переменная);  $B_\delta$  – индукция в воздушном зазоре (Тл) ( задается как независимая переменная);  $D$  – диаметр расточки якоря (м) ( задается как независимая переменная);  $n_{ном}$  – номинальная частота вращения (об/мин);

- если задана активная длина пакета якоря, то рассчитывается диаметр расточки якоря (м):

$$D = \sqrt{\frac{60 \cdot P_{рас}}{\pi^2 \cdot \alpha_\delta \cdot k_b \cdot k_{об} \cdot A \cdot B_\delta \cdot L_\delta \cdot n_{ном}}}; \quad (2.3.4)$$

- если заданы диаметр расточки и длина пакета якоря, то рассчитывается электромагнитная мощность в этих габаритах (Вт):

$$P_{pac} = \frac{\pi^2}{60} \alpha_{\delta} \cdot k_b \cdot k_{об} \cdot A \cdot B_{\delta} \cdot D^2 \cdot L_{\delta} \cdot n_{ном} . \quad (2.3.5)$$

5. Полусное деление (м):

$$\tau = \frac{\pi D}{2p} , \quad (2.3.6)$$

где  $p$  - где число пар полюсов задается как независимая переменная.

6. Число зубцов:

$$z_1 = 2pqt . \quad (2.3.7)$$

7. Зубцовое деление (м):

$$t_1 = \frac{\pi D}{z_1} . \quad (2.3.8)$$

8. Высота пазово-зубцовой зоны (м) (формула учитывает 120-градусную двухполупериодную коммутацию):

$$h_z = \frac{A_m}{\left(1 - \frac{B_{\delta}}{B_{zmax} k_{CT}}\right)(m-1)(k_{3m} j_m 10^6)} , \quad (2.3.9)$$

где  $B_{zmax}$  – максимально допустимая индукция в зубце (Тл);  $k_{CT}$ - коэффициент заполнения пакета сталью;  $k_{3m}$ - коэффициент заполнения паза медью;  $j_m$ - плотность тока в обмотке якоря (А/мм<sup>2</sup>).

9. Ширина трапецеидального зубца в минимальном сечении (м):

$$b_{zmin} = \frac{t_1 B_{\delta}}{B_{zmax} k_{CT}} . \quad (2.3.10)$$

10. Ширина прямоугольного паза (м):

$$b_{n1} = t_1 - b_{zmin} . \quad (2.3.11)$$

11. Высота спинки якоря (м):

$$h_a = \frac{a_{\delta} \tau B_{\delta}}{2B_{ha max} k_{CT}} , \quad (2.3.12)$$

где  $B_{ha max}$  – максимально допустимая индукция в зубце (Тл).

12. Наружный диаметр статора (м):

$$D_n = D + 2(\delta + h_z + h_a). \quad (2.3.13)$$

13. Число эффективных проводников в пазу:

$$u_n = \frac{A\pi Dm}{I_a z_1 (m-1)}. \quad (2.3.14)$$

14. Число витков в фазе обмотки якоря:

$$W_f = \frac{p \cdot q \cdot u_n}{a}. \quad (2.3.15)$$

15. Площадь голы меди в пазу якоря (м<sup>2</sup>):

$$S_{Cu} = b_{n1} \cdot h_z \cdot k_{zm}. \quad (2.3.16)$$

16. Сечение эффективного проводника обмотки якоря (м<sup>2</sup>):

$$q_a = \frac{S_{Cu}}{u_n}. \quad (2.3.17)$$

17. Плотность тока в обмотке якоря (А/мм<sup>2</sup>)

$$j_a = \frac{I_a}{q_a \cdot 10^{-6}}. \quad (2.3.18)$$

18.. Активное сопротивление фазы (Ом)

$$r_a = \rho_t \frac{L_{cp} \cdot W_f}{q_a} \quad (2.3.19)$$

где  $L_{cp}$  – средняя длина обмотки якоря;  $\rho_t$ – удельное сопротивление меди при рабочей температуре.

19.. Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки якоря, рассчитанное по методике [105] (Ом)

$$x_\sigma = 0.158 \cdot \frac{f}{100} \cdot \left(\frac{W_f}{100}\right)^2 \cdot \frac{L_\delta}{p \cdot q} (\lambda_n + \lambda_n + \lambda_n), \quad (2.3.20)$$

где  $\lambda_{\text{п}}, \lambda_{\text{д}}, \lambda_{\text{л}}$ - удельные проводимости пазового, дифференциального и лобового рассеяния.

20. Сопротивление реакции якоря по продольной и поперечной осям с учетом насыщения, рассчитанные по методике [105] (ом)

$$x_{ad} = 4mf \frac{\mu_0 \tau L_{\delta}}{\pi k_{\delta} k_{\mu d}} \cdot \frac{W_f^2 k_{об}^2}{p} \cdot k_{ad} ; \quad (2.3.21)$$

$$x_{aq} = 4mf \frac{\mu_0 \tau L_{\delta}}{\pi k_{\delta} k_{\mu q}} \cdot \frac{W_f^2 k_{об}^2}{p} \cdot k_{aq} , \quad (2.3.22)$$

где  $k_{\mu d}, k_{\mu q}$ - коэффициенты насыщения магнитной цепи якоря по продольной и поперечной осям;  $k_{ad}, k_{aq}$  – коэффициенты приведения по продольной и поперечной осям.

21. Угол сдвига фаз между вектором ЭДС возбуждения и током якоря:

$$\psi = \arctg\left(\frac{U \sin \varphi + I_a x_{\sigma} + I_a x_{ad}}{U \cos \varphi - I_a r_a}\right) \quad (2.3.23)$$

22. ЭДС от постоянного магнита (В):

$$E_f = \frac{U \cos \varphi - I_a r_a}{\cos \psi} \quad (2.3.24)$$

23. Результирующая ЭДС в обмотке якоря при номинальной нагрузке (В):

$$E_{\delta} = \sqrt{(E_f - I_a x_{ad} \cos \psi)^2 + (I_a x_{aq} \sin \psi)^2} \quad (2.3.25)$$

24. Коэффициент ЭДС якоря:

$$k_e = \frac{E_{\delta}}{U} \quad (2.3.26)$$

25. Определение погрешности расчета коэффициента ЭДС якоря:

$$\varepsilon_{ke} = \frac{|k_e - k_{\text{перед}}|}{k_e} . \quad (2.3.27)$$

26. Сравнение погрешности расчета коэффициента ЭДС якоря с допустимой величиной:

$$\varepsilon_{ke} \leq \varepsilon_{\text{кедон}} . \quad (2.3.28)$$

Если условие выполняется, расчет переходит к пункту 26. В противном случае расчет повторяется с пункта 12 с новым предварительным коэффициентом ЭДС якоря:

$$k_e = k_{\text{перед}} . \quad (2.3.29)$$

27. Расчет магнитной цепи якоря по традиционной методике, определение насыщения цепи якоря [105].

28. Расчет индуктора обеспечивающего требуемую индукцию в воздушном зазоре по методике параграфа 2.2 главы.2.

29. Определение частоты вращения ротора при 120-градусной коммутации (об/мин):

$$n = \frac{60E_{\delta}m}{4k_b k_{\text{об}} p a_{\delta} a L_{\delta} \tau B_{\delta} W_f (m-1)} . \quad (2.3.30)$$

30. Электрические потери в обмотке якоря для 120- градусной коммутации (Вт):

$$P_{\text{ел}} = I_a^2 r_a (m-1) . \quad (2.3.31)$$

31. Магнитные потери в стали зубцов и спинки статора определяются по традиционной методике [105] (Вт):

$$P_{CT} = p_{уд(\frac{1.0}{50})} \left(\frac{f}{50}\right)^{1.4} (m_z B_z^2 + m_{ha} B_{ha}^2), \quad (2.3.32)$$

где  $p_{уд(\frac{1.0}{50})}$  - удельные потери в стали;  $f$  – частота перемагничивания в стали;  $m_z, m_{ha}$  - масса зубца и спинки якоря;  $B_z, B_{ha}$  - средняя индукция в зубцах и спинки статора.

32. Добавочные потери (для упрощенной оптимизационной модели включают в себя потери от высших гармоник, поверхностные магнитные потери в полюсных наконечниках, вентиляционные потери, механические потери в подшипниках) (Вт):

$$P_{доб} = 0.003 \cdot P_n . \quad (2.3.33)$$

33. Потребляемая активная мощность (Вт):

$$P_1 = UI_a \cos \varphi . \quad (2.3.34)$$

3. Полезная мощность на валу (Вт):

$$P_2 = P_1 - P_{эл} - P_{CT} - P_{доб} . \quad (2.3.35)$$

35. Коэффициент полезного действия:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} . \quad (2.3.36)$$

36. Определение погрешности расчета КПД:

$$\varepsilon_\eta = \frac{|\eta - \eta_{пред}|}{\eta} . \quad (2.3.37)$$

37. Сравнение погрешности расчета КПД с допустимой:

$$\varepsilon_\eta \leq \varepsilon_{ndon} . \quad (2.3.38)$$

Если условие выполняется, расчет переходит к пункту 32. В противном случае расчет повторяется с пункта 11 с новым предварительным КПД:

$$\eta_{пред} = \eta . \quad (2.3.39)$$

38. Определение массы и объема активных частей (меди, железа, постоянного магнита) (кг).

39. Проверка ограничений. При нарушении ограничений к целевой функции прибавляется штрафная функция. Размер штрафа определяется величиной нарушения ограничения.

#### **2.4. Блок-схема алгоритма расчета ВДКП**

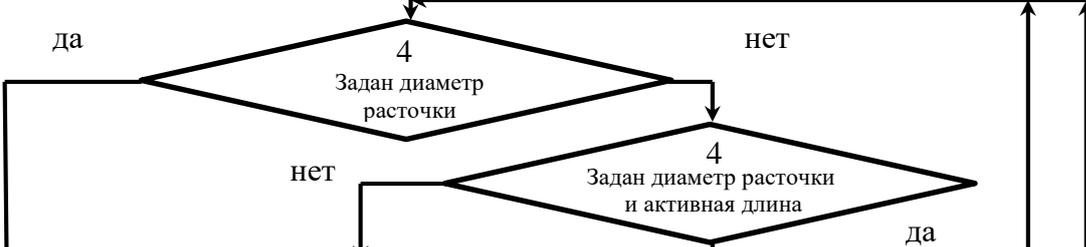
Блок-схема данного алгоритма, дающая более наглядное представление математической модели расчета, показана на рис. 2.4.1.

Математическая модель по приведенному алгоритму реализована в программной среде Delphi и включена в программный комплекс многоуровневой оптимизации ВДКП, описанный в главе 5.

Начало  
 1 Ввод констант: данные ТЗ, параметры материалов,  $\eta_{пред}$ ,  $k_{спред}$   
 Ввод ограничений: технологические, эксплуатационные.  
 Ввод независимых переменных:  $A, B_\delta, p, D, L_\delta, D_v$

2  $I_a = \frac{P_H}{\sqrt{3}U_{фн}\eta}$

3  $P_{рас} = \frac{P_H k_e}{\eta}$



а  $L_\delta = \frac{60P_{рас}}{\pi^2 \alpha_\delta k_b k_{об} A B_\delta D^2 n_{ном}}$

б  $D = \sqrt{\frac{60P_{рас}}{\pi^2 \alpha_\delta k_b k_{об} A B_\delta L_\delta n_{ном}}}$

в  $P_{рас} = \frac{\pi^2}{60} \alpha_\delta k_b k_{об} A B_\delta D^2 L_\delta n_{ном}$

5  $\tau = \frac{\pi D}{2p}$

6  $z_1 = 2pqt$

7  $t_1 = \frac{\pi D}{z_1}$

8  $h_z = \frac{Am}{(1 - \frac{B_\delta}{B_{zmax} k_{ср}})(m-1)(k_{эм} j_M 10^6)}$

9  $b_{zmin} = \frac{t_1 B_\delta}{B_{zmax} k_{ср}}$

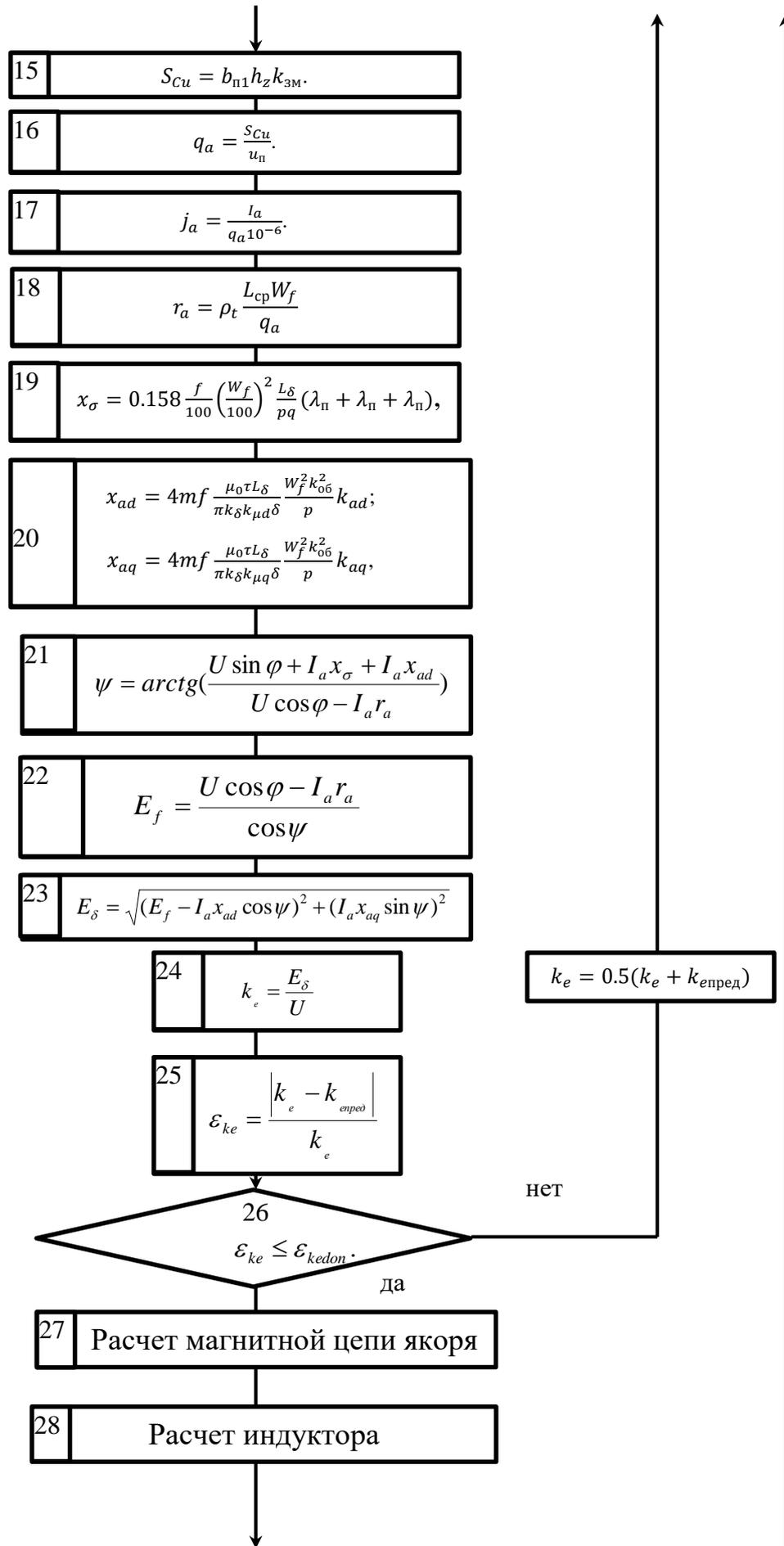
10  $b_{п1} = t_1 - b_{zmin}$

11  $h_a = \frac{\alpha_\delta \tau B_\delta}{2B_{пmax} k_{ср}}$

12  $D_H = D + 2(\delta + h_z + h_a)$

13  $u_{п} = \frac{A \pi D m}{I_a z_1 (m-1)}$

14  $W_f = \frac{p q u_{п}}{a}$



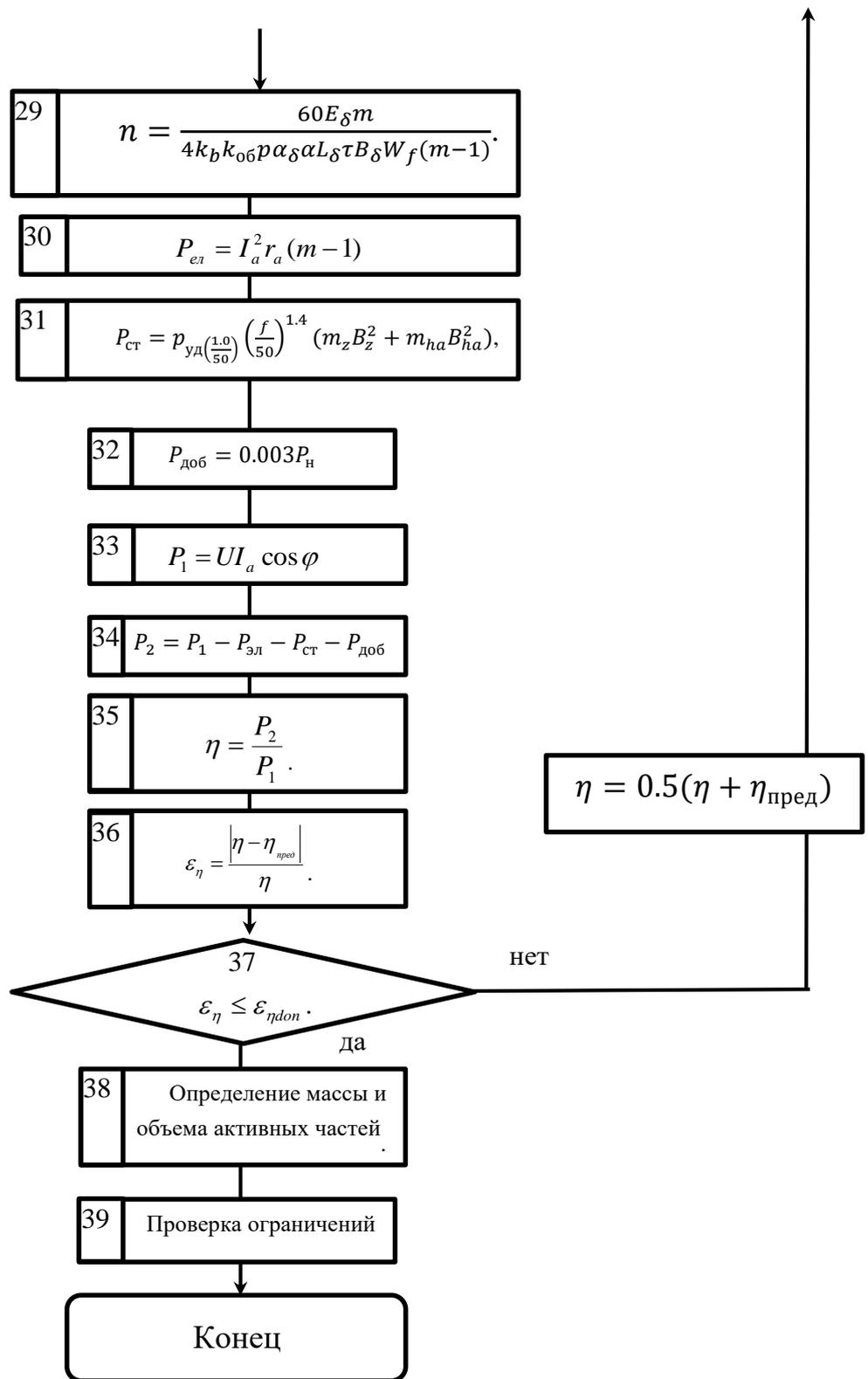


Рис.2.4.1. Блок-схема алгоритма электромагнитного расчета ВДКП

Приведенные аналитические зависимости содержат все основные взаимосвязи между геометрией и характеристиками.

## **Выводы по главе**

1. Разработана математическая модель расчета магнитной системы с когтеобразными полюсами на основе схемы замещения. Модель учитывает основные потоки рассеяния, рассчитывает рабочий поток и общий поток постоянного магнита. Особенностью методики является решение задачи синтеза. По заданной индукции в воздушном зазоре и основным геометрическим размерам электродвигателя определяется толщина магнита, которая обеспечивает эту индукцию. Расчетная модель проста и может быть включена в оптимизационные циклы.

2. Разработана математическая модель электромагнитного расчета ВДКП на основе схем замещения, представленная в виде алгоритма и блок-схемы. В математической модели определены основные аналитические зависимости между электромагнитными величинами, константы, технологические и эксплуатационные ограничения, независимые переменные. Формализованы показатели качества.

3. Математическая модель реализована в программной среде Delphi и является основой для разработки системы оптимального проектирования ВДКП.

### **3. РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ВДКП ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ПРОЕКТНЫХ СИТУАЦИЙ**

#### **Вводные замечания**

Под оптимизациями следует понимать процесс выбора наилучшего варианта из возможных вариантов. Показателями качества наилучшего варианта служат критерии оптимальности. Как правило, в расчетной модели присутствует несколько критериев и в самом общем случае возникает необходимость решения многокритериальной задачи. Следует отметить, что решение многокритериальной задачи достаточно сложно. Это обусловлено тем, что критерии оптимальности находятся между собой в противоречивой зависимости. Улучшение одного критерия приводит к ухудшению других. Так увеличение КПД приводит к росту массы и объема изделия, уменьшение пульсаций момента - к усложнению электроники, снижению себестоимости, к понижению надежности. Опыт оптимального проектирования в электромашиностроении показывает, что задача многокритериальной оптимизации возникает при широком внедрении изделия в серийное производство. При решении данной задачи проектирования единичного изделия с большим количеством ограничений усложнение задачи до реализации многокритериальной оптимизации представляется нецелесообразным. Более практичным будет разработка системы однокритериальной оптимизации, но с возможностью менять критерии в зависимости от проектной ситуации.

#### **3.1. Постановка задачи однокритериальной оптимизации ВДКП**

Сформулируем задачу однокритериальной оптимизации ВДКП в классической постановке [139,140]: для заданных параметров (конкретного исполнения, материалов, исходных данных технического задания), при заданных ограничениях необходимо, делая перебор независимых переменных по определенному алгоритму, определить геометрию, которая обеспечивала бы экстремальное значение выбранного критерия. Выбор

критерия оптимальности определяется конкретной проектной ситуацией. В качестве констант в программе фигурируют данные технического задания и, в зависимости от уровня оптимизации, фиксированные геометрические размеры.

В качестве ограничений выступают параметры, определяющие точность расчета, требования технологии изготовления и требования по условиям эксплуатации.

В качестве критериев оптимальности применительно к ВДКП целесообразно принять показатели качества, получившие наибольшее распространение на практике.

Данная постановка задачи оптимального проектирования легла в основу построения системы оптимизации.

### **3.2. Выбор метода оптимизации**

Существует много алгоритмов оптимального проектирования, которые составляют раздел математики – нелинейное программирование. Достаточно подробно эти методы применительно к электромашиностроению описаны в литературе [140].

Большое количество методов оптимизации говорит о том, что не существует одного наиболее эффективного метода, и для каждой математической модели необходимо делать свой выбор, учитывая ее специфику.

Функцией цели является выбранный показатель качества. В зависимости от проектной ситуации он может быть функцией одной или нескольких переменных. Выбор метода перебора независимых переменных зависит от вида функции цели. Как правило, целевая функция имеет монотонный характер [40]. Но при этом следует отметить, что особенностью математической модели ВДКП является наличие дискретно изменяющегося параметра в независимых переменных. Это число пар полюсов. При этом экстремум целевой функции, как правило, находится на границе. Как известно [40], градиентные методы при нахождении экстремума на границе не работают. Это исключило применение

градиентных методов, основанных на вычислении производных для определения шага при движении к экстремуму.

Анализ целевых функций показал, что для ВДКП задачу оптимизации можно ограничить поиском локального экстремума, который является единственным, не усложняя задачу поиском глобального экстремума из нескольких локальных. Это позволило исключить стохастические методы перебора независимых переменных, ориентируясь на детерминированные методы.

На кафедре теоретических основ электротехники ЮУрГУ в течение ряда лет достаточно успешно применяется метод, сочетающий в себе детерминированный метод покоординатного спуска (Гаусса-Зейделя) при движении к экстремуму с методом однопараметрической оптимизации Фибоначчи, при выборе длины шага поиска [40]. Этот метод можно использовать при переборе непрерывных и дискретных параметров, что очень удобно для оптимизации электрических машин. Этот метод был принят для реализации блока-оптимизатора в оптимальной модели, но при этом следует отметить, что поиски по выбору наиболее приемлемого метода по количеству оптимизационных циклов следует продолжать. Эти научные работы представляют собой отдельное исследование.

### **3.3. Определение уровней оптимизации**

Проектная система должна обладать достаточной гибкостью, чтобы иметь возможность реализовывать различные проектные ситуации в зависимости от требований заказчика. Одним из возможных подходов, реализующих эту гибкость, является многоуровневая оптимизация.

Разделение процесса оптимизации на уровни не является новым подходом в электромашиностроении. Достаточно подробно этот метод был рассмотрен и детально проработан для вентильных машин с аксиальным магнитным потоком [37]. Но для ВДКП формирование системы оптимизации с учетом разделения ее на уровни является новым подходом, который требует особым образом

формирование подсистемы синтеза ВДКП. Суть его заключается в следующем. Если изделие разрабатывается для новой системы, то, как правило, оно не имеет габаритных ограничений. То есть можно изменять все размеры, включая наружный диаметр, внутренний диаметр, наружную длину, для определения оптимального варианта. В этом случае речь идет о полной габаритной оптимизации.

Габаритные оптимизации более низкого уровня возникают, как правило, при модернизации изделия в процессе производства. Следует учитывать тот факт, что при освоении производства в изделие уже вложены значительные средства при изготовлении технологической оснастки, штампов, литейных форм, тестового оборудования. Модернизация изделия может привести к изменению этих приспособлений и, в конечном счете, значительному увеличению себестоимости и цены самой электрической машины. Поэтому часть размеров можно оставить без изменения в зависимости от требований ТЗ, а выбор остальных размеров включить в оптимизационный цикл.

Таким образом, уровень оптимизации определяется конкретной проектной ситуацией. Рассмотрим возможные уровни габаритной оптимизации, определенные практикой проектирования ВДКП.

### **3.3.1. Полная габаритная оптимизация**

На этом уровне оптимизации варьируются все независимые переменные.

В качестве констант в этом случае выступают следующие параметры:

- данные технического задания (номинальная мощность, номинальное напряжение, номинальная частота вращения);
- число фаз;
- рабочая температура обмотки;
- параметры постоянного магнита (остаточная индукция, коэрцитивная сила);
- параметры обмоточного провода (удельное электрическое сопротивление при температуре 20 °С);

- форма обмоточного провода (круглая, прямоугольная);
- технологическая величина воздушного зазора.

В качестве ограничений следует принять следующие величины:

- ограничения, заложенные собственно в математическую модель (допустимая погрешность расчета коэффициента насыщения магнитной цепи  $\varepsilon_{k_{\text{ндоп}}}$ , допустимая погрешность расчета коэффициента ЭДС в якоре  $\varepsilon_{k_{\text{едон}}}$ , допустимая погрешность расчета КПД  $\varepsilon_{\eta_{\text{доп}}}$ );

- технологические ограничения (минимальные и максимальные размеры магнита, минимальная ширина зубца, минимальная толщина спинки якоря, минимальные и максимальные размеры обмоточного провода);

- эксплуатационные ограничения (максимально допустимая плотность тока, требуемое значение КПД).

В качестве независимых переменных для этого уровня следует принять все 5 переменных, указанных при описании математических моделей в гл.3:

- линейная нагрузка  $A_{lin}$  (А/м);
- индукция в воздушном зазоре  $B_{\delta}$  (Тл);
- число пар полюсов  $p$ ;
- диаметр расточки якоря  $D_a$  (м);
- внутренний диаметр двигателя  $D_a$  (м).

Уровень полной габаритной оптимизации имеет свои критерии оптимальности. Наиболее типичными критериями в этом случае могут быть следующие показатели качества:

- минимальная масса активных материалов (масса магнитов, обмоточного провода, магнитопровода);
- минимальный объем активной части ВДКП;
- минимальная масса постоянных магнитов.

При выборе разных критериев получаются варианты с разной геометрией и характеристиками. Выбор наилучшего варианта остается за разработчиком. Но при этом разработчик получает большой объем информации от системы по всем

вариантам полной габаритной оптимизации, что во многом облегчает выбор, делает его более обоснованным и объективным.

### **3.3.2. Габаритная оптимизация при фиксированном числе пар полюсов**

Габаритная оптимизация при фиксированном числе пар полюсов необходима в ситуации, когда необходимо ограничить частоту перемагничивания в стали. Ограничения для этого уровня аналогичны полной габаритной оптимизации.

В качестве независимых переменных для этого уровня следует принять только 4 переменных:

- линейная нагрузка  $A_{lin}$  (А/м);
- индукция в воздушном зазоре  $B_{\delta}$  (Тл);
- число пар полюсов  $p$ ;
- диаметр расточки якоря  $D_a$  (м);
- внутренний диаметр двигателя  $D_{in}$  (м).

Число пар полюсов  $p$  для этого уровня является фиксированным параметром.

Критериями оптимальности для этой проектной ситуации служат показатели качества полной габаритной оптимизации, а именно: минимальная масса активных материалов, минимальный объем активной части, минимальная масса магнитов.

### **3.3.3. Габаритная оптимизация при фиксированном наружном диаметре**

Габаритная оптимизация при фиксированном наружном диаметре достаточно часто встречается на этапе НИР. Эта проектная ситуация возникает для вновь разрабатываемых изделий при ограничении внешнего габарита, определяемого разработчиком привода. В этих условиях основной задачей разработчика является получение мощности при минимальной активной длине, обеспечивающей заданную мощность. При этом следует иметь в виду, что ротор

должен быть спроектирован таким образом, чтобы он имел требуемую инерционную массу.

### **3.3.4. Габаритная оптимизация при фиксированном внутреннем диаметре**

Ограничения для этого уровня аналогичны полной габаритной оптимизации.

В качестве независимых переменных для этого уровня следует принять только 4 переменных:

- линейная нагрузка  $A_{lin}$  (А/м);
- индукция в воздушном зазоре  $B_{\delta}$  (Тл);
- число пар полюсов  $p$ ;
- диаметр расточки якоря  $D_a$  (м).

Критериями оптимальности для этой проектной ситуации служат показатели качества полной габаритной оптимизации при условии получения заданной мощности, а именно: минимальная масса активных материалов, минимальный объем активной части, минимальная масса магнитов.

Этот уровень оптимизации имеет свою специфику. В предыдущей главе было доказано, что между наружным и внутренним диаметрами существует оптимальное соотношение. В процессе оптимизации для получения требуемой мощности это соотношение может быть нарушено, то есть полученный наружный диаметр может быть больше или меньше оптимального. При этом в каждом конкретном случае требуется дополнительный анализ, который должен провести разработчик для оценки эффективности расчета, полученного автоматизированным способом.

### **3.3.5. Габаритная оптимизация при фиксированной наружной длине**

Проектная ситуация проектирования приводов при фиксированной наружной длине возникает при ограничении осевого габарита.

Критериями оптимальности для этой проектной ситуации служат показатели качества полной габаритной оптимизации при условии получения

заданной мощности, а именно: минимальная масса активных материалов, минимальный объем активной части, минимальная масса магнитов.

### **3.3.6. Габаритная оптимизация при фиксированном наружном и внутреннем диаметрах**

Данный уровень оптимизации возникает в проектных ситуациях с более жестким ограничением габаритов, по сравнению с ситуациями, рассмотренными выше. В систему ограничений добавляется наружный и внутренний диаметры.

В качестве независимых переменных выбираются следующие параметры:

- линейная нагрузка  $A_{lin}$  (А/м);
- индукция в воздушном зазоре  $B_{\delta}$  (Тл);
- число пар полюсов  $p$ .

В качестве критерия оптимальности выбирается:

- минимальная масса активных материалов (масса магнитов, обмоточного провода, магнитопровода);
- минимальный объем активной части ВДКП;
- минимальная масса постоянных магнитов.

### **3.3.7. Оптимизация при фиксированном наружном, внутреннем диаметрах и наружной длине (в заданных габаритах)**

Оптимизация в заданных габаритах – наиболее часто встречающаяся проектная ситуация на этапе НИОКР. Она возникает при замене старых, морально устаревших устройств новыми, более совершенными, содержащими материалы с улучшенными свойствами и сделанными по современным технологиям.

По аналогии с предыдущим уровнем в качестве независимых переменных выбираются параметры:

- высота постоянного магнита  $h_m$  (м);
- высота активного слоя (слоя меди)  $h_a$  (м);
- число пар полюсов  $p$ .

Но критерий оптимальности для данного уровня меняется. Основным показателем качества становится максимальная мощность, которую возможно получить в заданных габаритах в длительном режиме при допустимом уровне нагрева якорной обмотки.

### **3.3.8. Поверочный расчет**

Поверочный расчет гармонично вписывается в систему оптимизации, как уровень, на котором отсутствуют независимые переменные. На этом уровне все размеры, однозначно определяющие конструкцию, заданы. Проектная система не синтезирует конструктивные исполнения, а только проводит анализ конкретной заданной конструкции, рассчитывая основные параметры и характеристики.

Кроме подробного анализа, этот уровень имеет еще одно положительное свойство. Он позволяет опытному разработчику самостоятельно варьировать переменные для нахождения оптимального варианта, когда реальная проектная ситуация несколько отличается от тех, которые предусмотрены системой оптимизации. При этом проектная система становится еще более гибкой.

Как было отмечено выше, существующие проектные системы реализуют один уровень оптимизации для одной конкретной конструкции.

Практика эксплуатации проектной системы показала, что поле проектных ситуаций покрывает любое техническое задание реального производства. Кроме этого, она позволяет проводить сравнительный анализ проекта, выполненного по конкретному техническому заданию с ограничениями, с проектом, рассчитанным по полной габаритной оптимизации без ограничений. Это важно для принятия правильного с технической и экономической точки зрения решения.

### **Выводы**

1. Проведен анализ требований к методам оптимального проектирования электромеханических систем. На основе анализа принято решение о реализации

однокритериальной оптимизации. Отмечено, что критерии оптимальности могут меняться в зависимости от проектной ситуации.

2. Выбран метод оптимизации ВДКП, сочетающий в себе метод покоординатного спуска (Гаусса-Зейделя) при движении к оптимуму с методом Фибоначчи при определении шага.

3. Определено понятие уровней оптимизации. Формализованы 7 уровней оптимизации геометрии ВДКП. Для каждого уровня определена система констант, ограничений, независимых переменных и критериев оптимальности.

4. На основе проведенного анализа разработана система оптимизации ВДКП, реализующая многоуровневую однокритериальную оптимизацию для различных конструктивных исполнений. Система позволяет реализовать до 7 проектных ситуаций, закрывая практически все потребности реального проектирования ВДКП.

## 4. РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АНАЛИЗА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО СОСТОЯНИЯ ВДКП

### Вводные замечания

После синтеза оптимальной геометрии ВДКП необходимо провести подробный анализ его характеристик с учетом его электромагнитного и теплового состояния. Это связано с тем, что расчетные модели, которые включены в оптимизационный цикл, максимально упрощены из-за экономии времени работы компьютера. Они рассчитывают минимальное количество параметров, не содержат процедур детального расчета электромагнитного поля и поля температур.

В настоящее время существует большое количество программных средств для анализа электромагнитного и теплового состояния электромеханических систем.

Наиболее распространены вычислительные системы, основанные на методе конечных элементов, которые позволяют рассчитать электромагнитные, тепловые поля и выполнить расчет систем охлаждения.

Данные проектные системы выполнены как самостоятельные программы анализа. Их можно использовать обособленно друг от друга и от предложенной системы оптимизации. Но разрозненное их использование затрудняет подготовку исходных данных и во многом снижает их эффективность. Кроме того, отсутствует обратная связь между результатами анализа и синтеза. Большинство перечисленных выше систем имеют встроенные языки программирования, которые позволяют включить их в виде готовых законченных модулей в систему автоматизированного проектирования ВДКП, как структуру, предназначенную для анализа всех физических процессов. Результаты анализа можно использовать для корректировки постановки задачи синтеза (например, уточнить оптимальное значение полюсной дуги, коэффициента рассеяния).

Правильный выбор САЕ систем – надёжное условие эффективного проектирования. Основными критериями выбора при этом являются: распространённость САЕ, цена САЕ, её сопровождения и модификации, широта охвата задач проектирования, удобство работы САЕ и её «дружественность», наличие широкой библиотечной поддержки стандартных решений, возможность и простота стыковки с другими САЕ, возможность коллективной работы. Большое количество предлагаемых программ с одной стороны затрудняет этот выбор, с другой стороны говорит о том, что он не принципиален, так как практически любая программа из предложенных списков может справиться с задачей анализа ВДКП.

Из сложившейся практики по разработке конкретных проектов для разработки системы анализа были выбраны следующие готовые САЕ системы:

- Ansys Electronics Desktop для расчета электромагнитных полей;
- Ansys Icerak для расчета тепловых полей.

Немаловажным фактором при выборе программных средств послужило наличие на них лицензий, которые имеет Южно-Уральский государственный университет. Это позволило проводить научные исследования в юридически правовом поле.

#### **4.1. Анализ электромагнитного состояния ВДКП в режиме RMXprt программной среды Ansys Electronics Desktop**

Ansys Electronics Desktop – это комплекс программ ориентированный на расчеты электрических машин различных типов. Класс электрических машин с когтеобразными полюсами входит в перечень анализируемых конструкций (модель Claw Pole Synchronous Machine автоматически (CPSM)). Программа построена по принципу от простого к сложному. На первоначальном этапе можно сделать поверочный расчет на основе метода схем замещения (режим Maxwell RMXprt). На этом этапе рассчитываются все параметры и характеристики на основе упрощенной методики расчета, но в этом режиме нет возможности учесть работу электронного коммутатора и рассчитать переходные

процессы. Далее, если электрическая машина имеет плоскую симметрию, программа переводится в автоматический режим анализа двухмерной задачи с использованием метода конечных элементов (режим Maxwell 2D Design). В этом режиме вычисляются все параметры и строятся характеристики с учетом работы имитатора электронного коммутатора. Рассчитываются динамические характеристики с учетом переходных процессов в обмотках и электронных компонентах. Если есть возможность использовать мощные компьютерные ресурсы, то далее результаты расчета можно трансформировать в трехмерную задачу также с подключением имитатора электронного коммутатора (режим Maxwell 3D Design). По сути, в этом случае будет создан цифровой двойник реального электродвигателя для анализа электромагнитного состояния. Следует отметить, что построение цифрового аналога через модули Maxwell RMXprt и Maxwell 2D Design или режим Maxwell 3D Design очень хорошо отработаны и не содержат ошибок. Это во многом облегчает для разработчика анализ электрической машины. Достаточно корректно заполнить информацию о геометрии, обмоточных данных и применяемых материалах в таблицы режима Maxwell RMXprt и программа автоматически выстроит цифровой двойник практически без ошибок. Далее можно проводить тестирование электрической машины на полученном цифровом аналоге. Это во многом снимает технические риски при изготовлении и испытании реального опытного образца.

Для реализации этих шагов, необходимо связать результаты расчета программы оптимизации с модулем Maxwell RMXprt программы анализа Ansys Electronics Desktop. По сути необходимо объединить программу оптимизации, написанную на алгоритмическом языке Delphi с программой Ansys Electronics Desktop.

Такая возможность имеется через использование встроенных в программу Ansys Electronics Desktop команд Script. В программе оптимизации был сформирован блок передачи данных в Ansys Electronics Desktop и ее вызов.

Разработка двигателя начинается с оптимизации геометрии в специальной программе (рис.4.1.1). При этом в соответствии с техническим заданием заказчика и выбранными материалами выбираются уровень оптимизации и критерий качества.

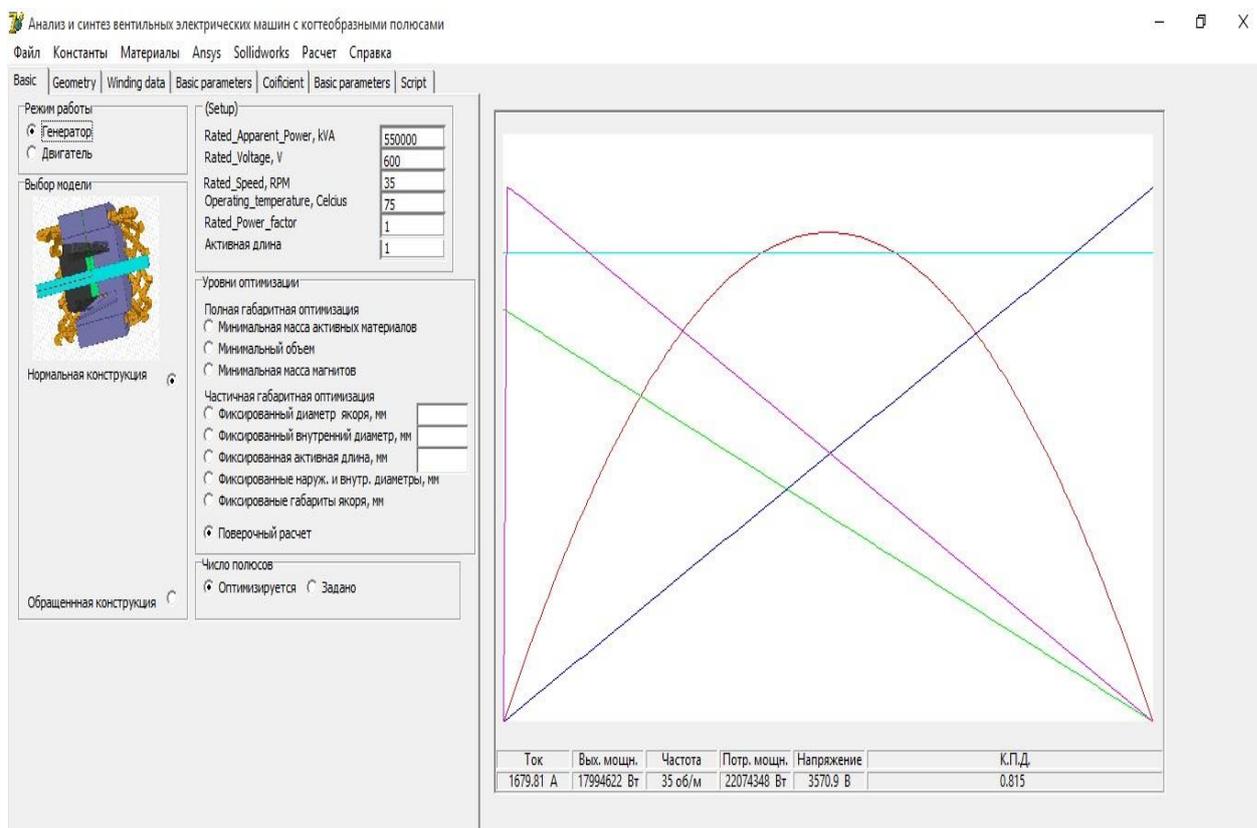


Рис. 4.1.1. Программы оптимизации вентильной машины с когтеобразными полюсами.

Далее результаты расчета оптимальной геометрии и обмоточных данных передаются в программу Ansys Electronics Desktop при помощи предварительно разработанного скрипта. В этой программе в режиме RMXprt проводится проверка рассчитанных параметров. Программа Ansys имеет отработанную методику анализа этого типа машин (Claw-Pole Synchronous Machine). Результаты работы на этом этапе представлены на рис.4.1.2.

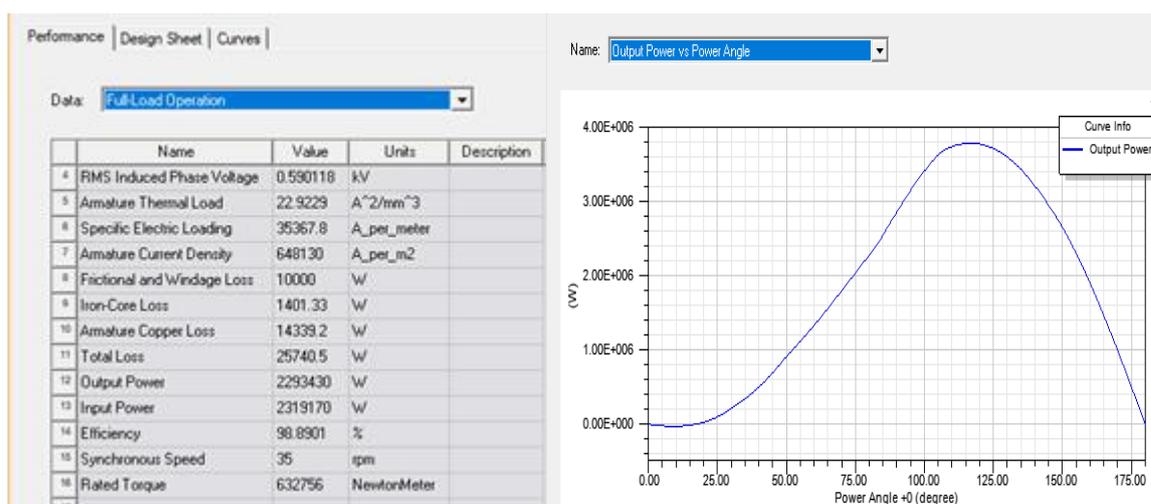
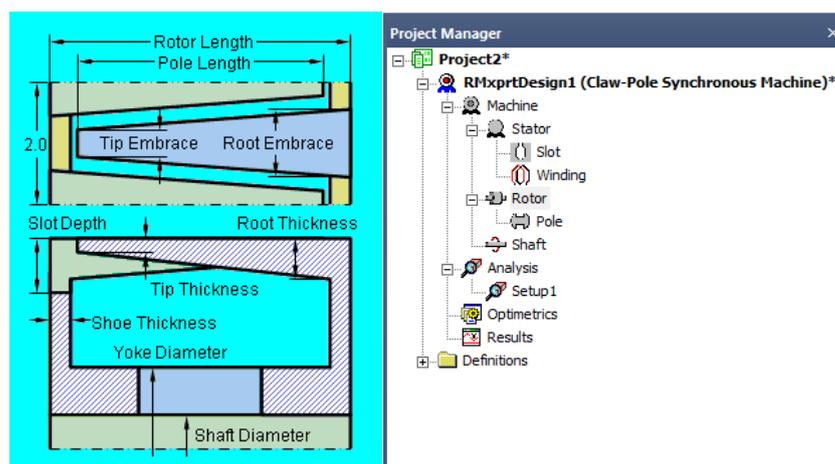


Рис. 4.1.2. Результаты расчета вентильной машины с когтеобразными полюсами в RMxpprt

На этом этапе анализа проверяется принципиальная возможность получения основных параметров двигателя. При необходимости можно сделать коррекцию результатов оптимизации.

#### 4.2. Анализ электромагнитного состояния ВДКП в режиме Maxwell Design программной среды Ansys Electronics Desktop на основе аналога вентильного двигателя с тангенциальной системой возбуждения

Процесс анализа не представляет собой процедуру последовательного выполнения расчетных процедур. Математическая модель анализа требует настройки и корректировки, поэтому анализ ведется циклами с

последовательным уточнением материалов, нагрузок, настройки самой программы, например, работы сеточного генератора.

На этом этапе расчета возникла следующая проблема. Электродвигатель имеет большие габариты и не имеет плоской симметрии. Необходимо решать трехмерную задачу. Автоматическое построение сетки начинается от воздушного зазора. Это приводит к тому, что, даже при использовании осевой симметрии и условий периодичности, при которой рассчитывается только часть машины в пределах полюсного деления, время расчета составляло более 12 часов. Следует иметь в виду, что расчеты велись на суперкомпьютере ЮУрГУ в режиме распараллеливания процесса расчета. В этих условиях проводить качественный анализ невозможно. Проводить разбиение геометрии самостоятельно очень трудоемко. После нескольких пробных расчетов работы были практически остановлены.

В то же время практика показывает, что решение аналогичной двумерной задачи при тех же условиях занимает порядка 15-25 минут, что вполне приемлемо для настройки и отладки программы.

Следует отметить, что плоской симметрии не имеет только когтеобразный индуктор. Якорь имеет плоскую симметрию и может быть рассчитан с применением режима Ansys 2D Maxwell Design. В то же время все основные электромагнитные процессы происходят в якоре. Если когтеобразный индуктор заменить индуктором другого типа с эквивалентным магнитным потоком, то все электромагнитные процессы в ВДКП и двигателе аналоге будут идентичны.

Наиболее приемлемым индуктором, имеющим плоскую симметрию и которым можно заменить когтеобразный индуктор, является магнитная система с тангенциальным возбуждением. Внутренний диаметр этой системы можно подобрать таким образом, чтобы магнитные потоки обеих систем были одинаковыми.

Таким образом, на этом этапе в режиме Maxwell RMxprt рассчитывается эквивалентный вентильный электродвигатель с тангенциальной системой

возбуждения и эквивалентным ВДКП рабочим магнитным потоком (Brushless Permanent-Magnet DC Motor BPMDM). При этом все размеры статора и его обмоточные данные принимаются аналогичными предыдущему варианту. Магнитный поток с помощью внутреннего диаметра подбирается одинаковым с магнитным потоком когтеобразного индуктора. Все рабочие характеристики электродвигателя должны совпадать с рабочими характеристиками ВДКП. Результаты анализа этого этапа представлены на рис. 4.2.1.

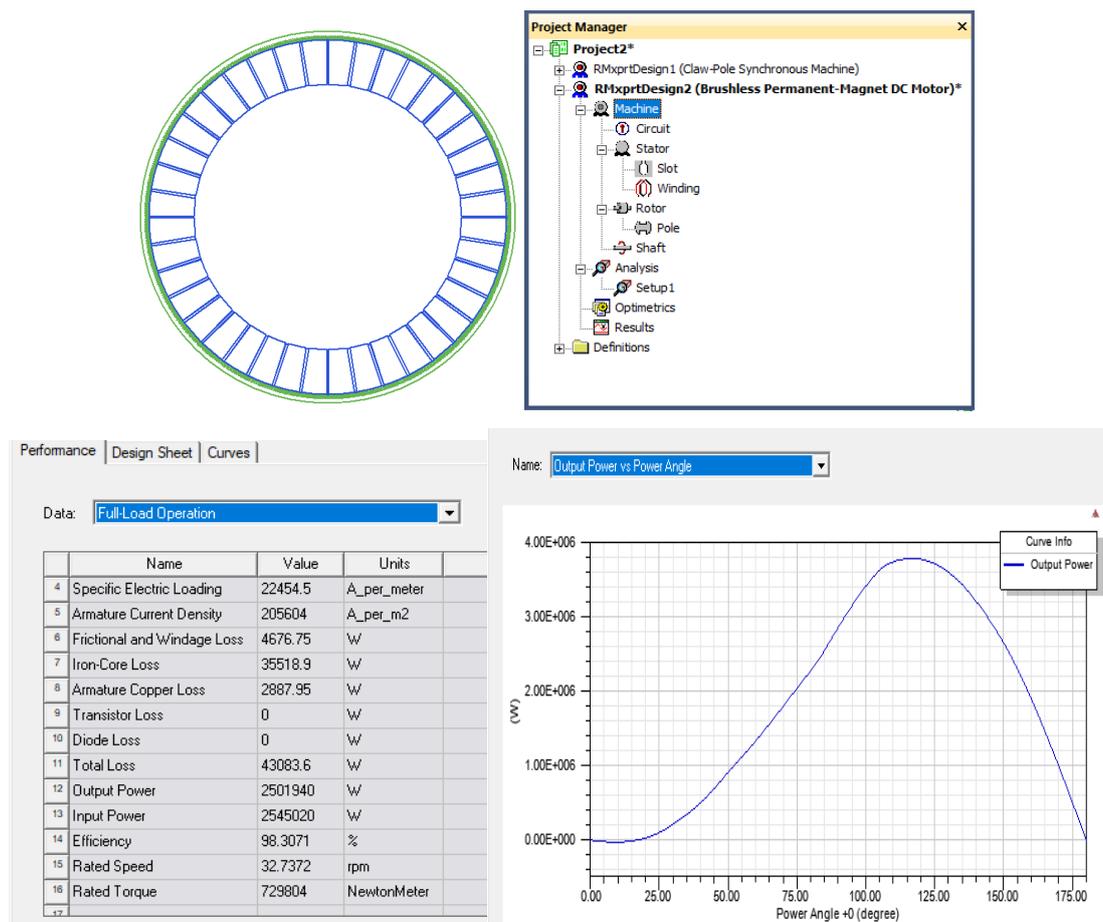


Рис.4.2.1. Результаты расчета вентильного двигателя с тангенциальными магнитами в RMxprt

Далее, используя возможности Ansys Electronics Desktop, можно в автоматическом режиме развернуть конструкцию Brushless Permanent – Magnet DC Motor в плоскую двухмерную модель для анализа магнитного поля по методу конечных элементов. Данная модель является точной копией модели Claw-Pole Synchronous Machine, поскольку имеет одинаковый якорь и магнитные

поток. Анализ характеристик проводится с имитатором автоматически созданного электронного коммутатора.

На этом этапе можно сделать предварительный анализ вентильного двигателя, при необходимости сделать корректировку размеров и материалов, настройку коммутатора. Результаты анализа этого этапа представлены на рис.4.2.2.

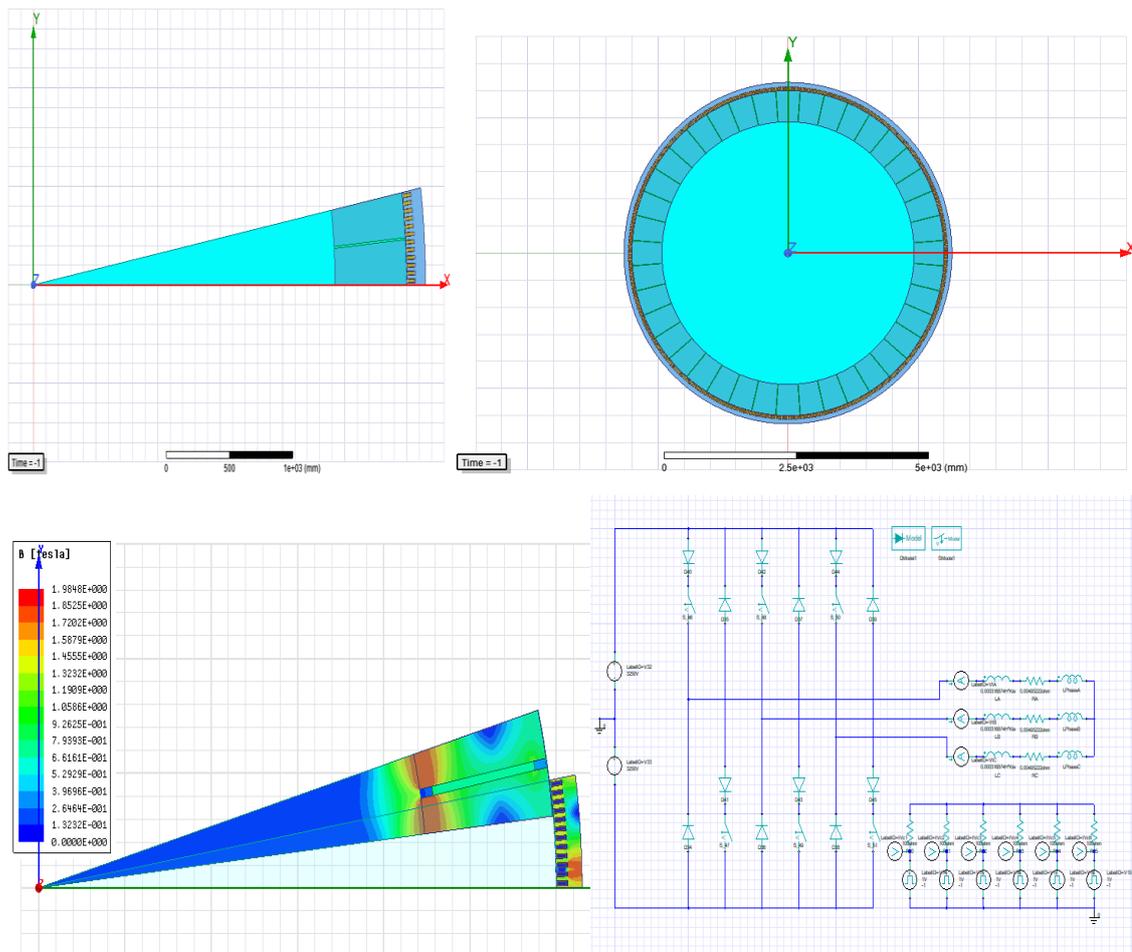


Рис. 4.2.2. Моделирование вентильного двигателя с тангенциальными магнитами в Maxwell 2D Design

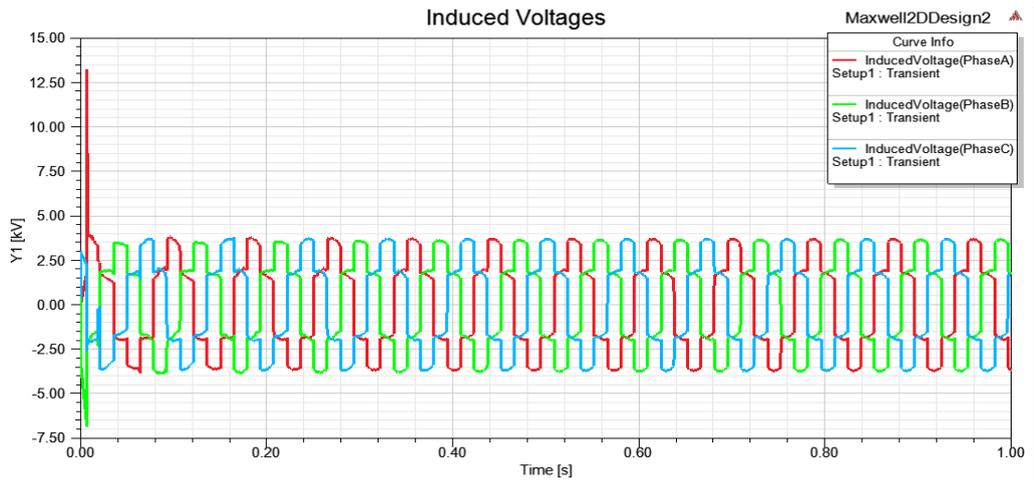


Рис.4.2.3. Расчет ЭДС в фазах

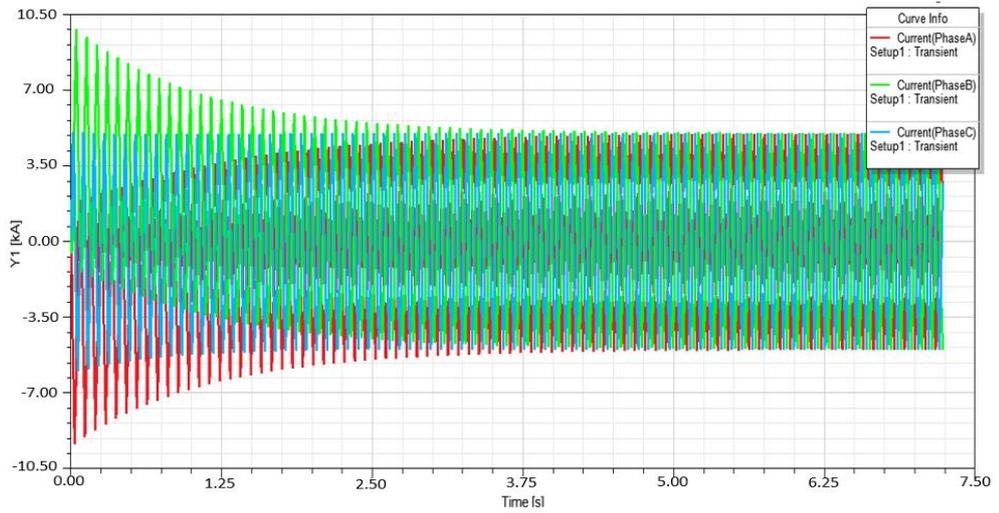


Рис. 4.2.4. Расчет токов в фазах

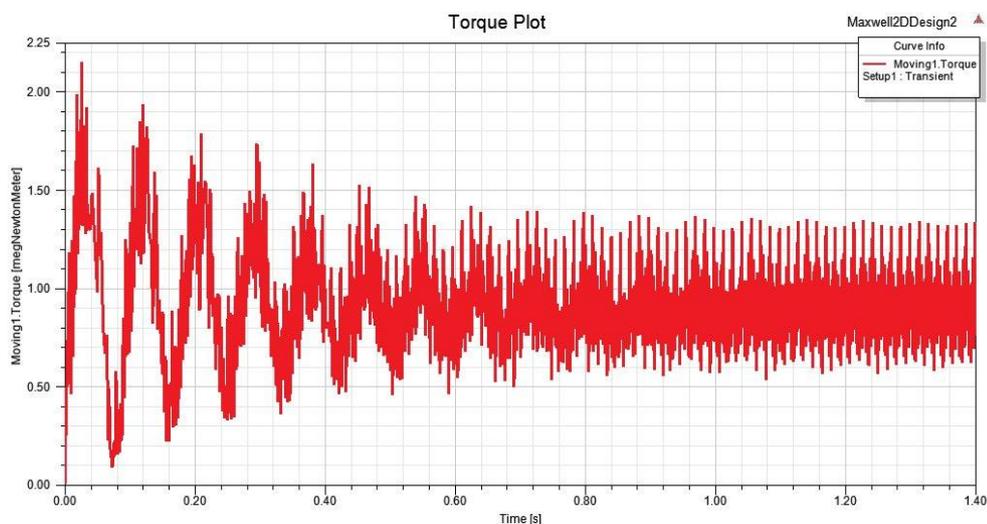


Рис. 4.2.5. Расчет электромагнитного момента

На рис. 4.2.3-4.2.5 представлены расчетные кривые ЭДС фаз, токов в фазах, электромагнитного момента.

Расчетная практика показывает, что полученные характеристики достаточно близки к проектируемому электродвигателю.

### 4.3. Анализ электромагнитного состояния реального ВДКП в режиме трехмерного анализа Maxwell 3D Design программной среды Ansys Electronics Desktop

На предыдущем этапе была выполнена отладка расчетной модели и корректировка всех необходимых параметров, включая обмоточные данные. При этом отладка не потребовала больших компьютерных и временных ресурсов. Далее приступаем к анализу реального цифрового двойника.

На следующем этапе из режима RMxprt модель Claw Pole Synchronous Machine, после корректировки, автоматически с использованием возможностей программы Ansys Electronics Desktop разворачивается в трехмерную модель для анализа магнитного состояния и окончательного определения основных параметров и характеристик. Для расчета реальной модели требуется около 12 часов расчетного компьютерного времени, но для одноразового расчета это вполне приемлемо.

Результаты анализа представлены на рис.4.3.1- 4.3.2.

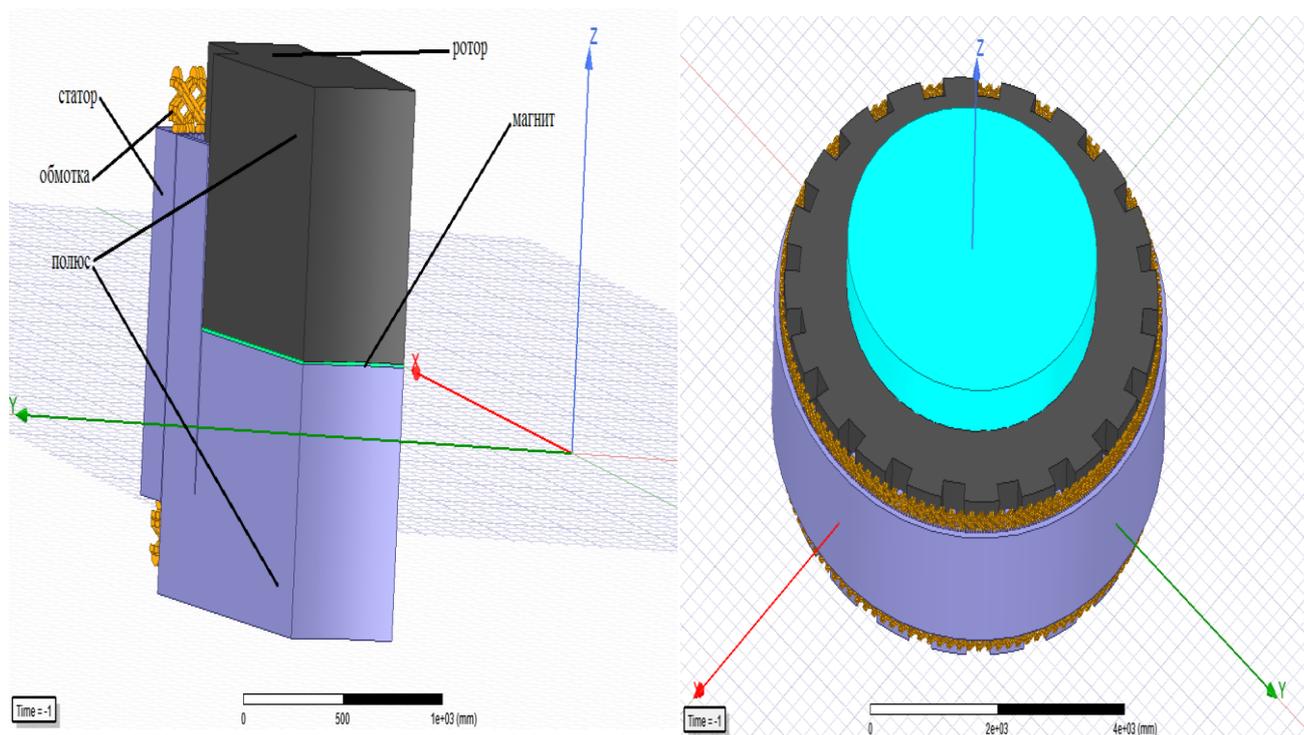


Рис. 4.3.1. Моделирование вентильного двигателя с когтеобразными полюсами в Maxwell 3D Design

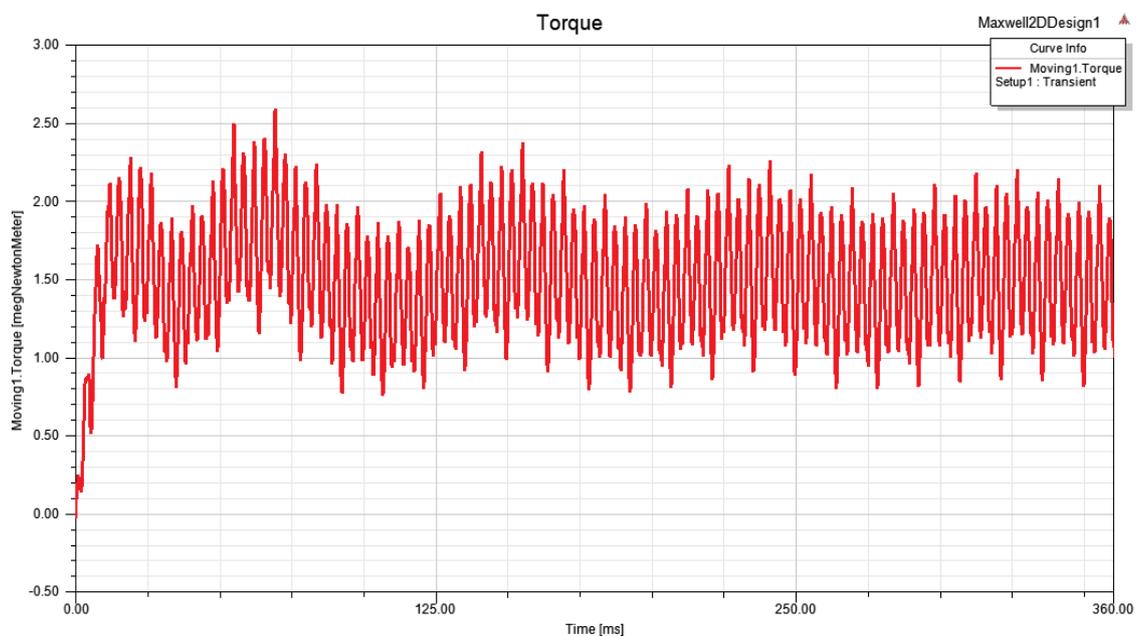


Рис. 4.3.2. Расчетная кривая электромагнитного момента двигателя с когтеобразными полюсами.

Расчетная практика показывает, что характеристики анализируемого двигателя и двигателя аналога близки и находятся в пределах погрешности расчета.

Таким образом, осуществляется синтез и многоступенчатый анализ электрических машин с когтеобразными полюсами по следующей алгоритмической схеме: определение технического задания для ВДКП → определение оптимальной геометрии ВДКП по выбранному критерию в программе оптимизации → проверка результатов оптимизации ВДКП в режиме Maxwell RМхprt → проверка результатов расчета BLDC в режиме Maxwell RМхprt → проверка результатов расчета BLDC в режиме Maxwell 2D Design → проверка результатов расчета ВДКП в режиме Maxwell 3D Design.

Функциональная схема алгоритма представлена на рис.4.3.3.

Практика показывает, что не всегда есть необходимость усложнения расчетной модели. Очень часто с достаточной точностью можно проводить анализ плоских задач, вместо трехмерных.

Структурная схема такой проектной системы представлена на рис.4.3.3.

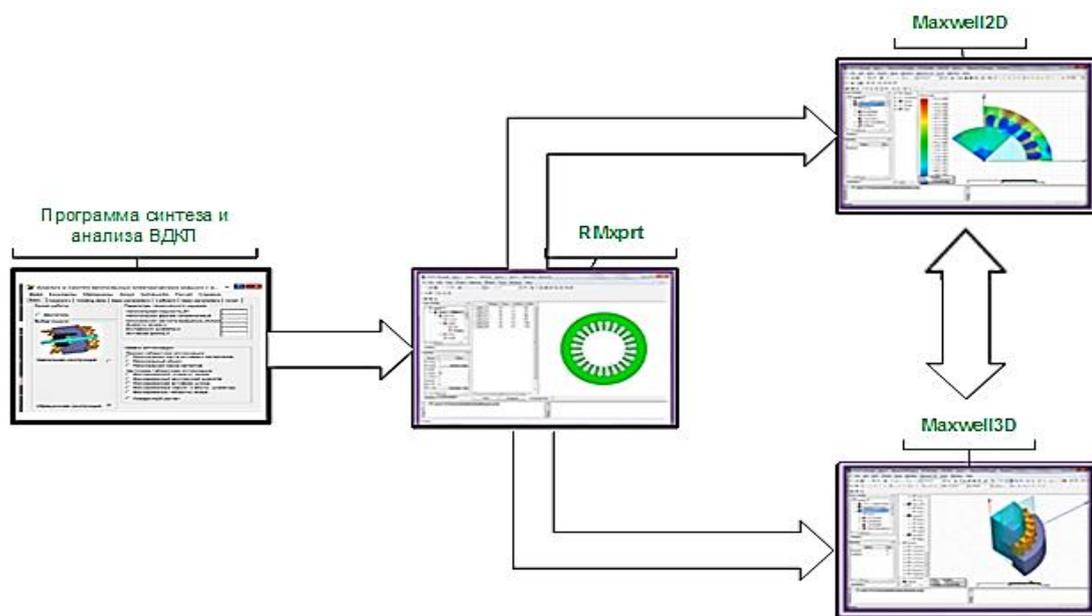


Рис.4.3.3. Структурная схема алгоритма анализа электромагнитного состояния ВДКП

Представленная проектная система разработана как раз в этой логической схеме. После этапа синтеза, где оптимизация осуществлялась на упрощенной модели по схемам замещения, задача переходит к этапу анализа в программной среде Ansys. Далее поэтапно решается сначала плоская задача расчета магнитного поля, а затем трехмерная задача расчета магнитного поля. Максимальные расхождения по основным параметрам (КПД, момент, частота вращения, магнитные потоки, индуцируемые ЭДС) представлены ниже:

- между результатами Delphi и RMxprt для Claw Pole Synchronous Machine 5-9 %;
- между результатами RMxprt для Claw Pole Synchronous Machine и результатами RMxprt для Brushless Permanent –Magnet DC Motor 3-5 %;
- между результатами Maxwell 2D Design для Brushless Permanent –Magnet DC Motor и результатами Maxwell 3D Design для Claw Pole Synchronous Machine 5-7 %;
- между результатами Delphi для Claw Pole Synchronous Machine и результатами Maxwell 3D Design для Claw Pole Synchronous Machine 9-12 %.

Эту точность расчета для такой сложной магнитной системы, какой является машина с когтеобразными полюсами, следует признать хорошей.

### **Выводы по главе**

1. В проектную процедуру введена система подробного анализа ВДКП. Это обусловлено тем, что предыдущая оптимизационная расчетная модель построена на методике схем замещения, которая не обладает достаточной точностью для снятия технических рисков при проектировании электродвигателя, требующего больших капитальных затрат. Более точная система анализа построена на хорошо апробированной проектной САЕ системе Ansys Electronics Desktop, адаптированной для расчета электромеханических систем различных типов.

2. Расчет крупных электрических машин со сложной геометрией, которой является магнитная система ВДКП, при применении метода конечных элементов связан со следующими проблемами: необходимы большие вычислительные мощности, длительное время расчета при решении трехмерных задач. Это обусловлено большим количеством мелких конечных элементов, которые строятся от воздушного зазора. Для решения этой проблемы в проектной системе первоначально анализируется электродвигатель-аналог с плоской магнитной системой и решением двумерной электромагнитной задачи. В качестве такого аналога принят вентиляционный электродвигатель с тангенциальной магнитной системой. На этом аналоге происходят все настройки для решения трехмерной задачи.

3. Окончательный анализ модели цифрового двойника происходит на реальной настроенной на предварительных этапах трехмерной модели с подключенным электронным коммутатором. Окончательный расчет происходит более 12 часов, что вполне приемлемо для одноразового анализа. Такой подробный анализ во многом сокращает технические риски перед изготовлением и испытанием реального крупногабаритного мощного образца.

## 5. АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО И ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ ВДКП С УЧЕТОМ ДИНАМИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ

### Вводные замечания

Анализ теплового состояния для мощных вентильных электродвигателей представляет собой достаточно ответственную и сложную задачу. Проектируемый двигатель имеет высокий КПД и пониженные потери за счет применения постоянных магнитов и исключения потерь из системы возбуждения. Но электродвигатель имеет многополюсную систему, что обуславливает потери в стали из-за высокой частоты перемагничивания, воздушное охлаждение при низкой частоте вращения. В двигателе планируется применение постоянного магнита из материала неодим-железо-бор, который имеет рабочую температуру порядка 150 градусов Цельсия. При приемлемой средней температуре электродвигатель может иметь локальные перегревы. При превышении рабочей температуры постоянный магнит может потерять свои магнитные свойства. Изоляция в условиях динамических ударных нагрузок может преждевременно устареть. Это неприемлемо для электродвигателя повышенной надежности. Перечисленные причины требуют применение точных методов расчета магнитного состояния ВДКП. При этом следует учесть динамическую нагрузку привода пылегерстана. Большие инерционные массы привода затрудняют пуск агрегата, при этом потери пускового режима, зависящие от квадрата тока, могут быть весьма существенными и привести к локальным перегревам изоляции и постоянных магнитов. Эти риски требуют проверки, так как производство и эксплуатация агрегата требует больших финансовых затрат. Для оценки электромагнитного и теплового состояния привода следует разработать динамическую модель, которая бы решила связанную задачу электродинамики и термодинамики.

## 5.1. Разработка связанной электродинамической и термодинамической модели

Момент, развиваемый ВДКП, согласно уравнению равновесия моментов, должен преодолеть динамический момент вращения инерционной массы ротора, момент трения в опорах и окружающей среды и момент сопротивления привода пильгерстана:

$$M_{motor} = J_{rotor} \frac{d\omega}{dt} + M_{tr} + M_n, \quad (5.1.1)$$

где  $M_{motor}$ - электромагнитный момент двигателя (Нм);  $J_{rotor}$ - момент инерции вращающихся частей ( $\text{кгм}^2$ )  $\omega$ - угловая частота вращения ротора (рад/с);  $M_{tr}$ - момент трения (Нм);  $M_n$ - момент нагрузки на валу двигателя (Нм).

Будем полагать, что момент инерции, момент трения и момент нагрузки являются известными величинами из расчета или эксперимента. В данной модели будем учитывать их усредненное значение, но динамическая модель позволяет учесть их точную зависимость от времени, если из результатов эксперимента будут известны эти зависимости.

Электромагнитный момент, развиваемый двигателем, будет пропорционален току якоря и магнитному потоку и может быть определен по известным уравнениям [105]:

$$M_{motor} = \frac{pW_f m}{\pi} I_a \Phi_\delta, \quad (5.1.2)$$

где  $p$ - число пар полюсов;  $W_f$ - число витков в фазе;  $m$ - число фаз;  $I_a$ - фазный ток;  $\Phi_\delta$ - поток полюсного деления.

Фазный ток якоря электродвигателя будет определяться величиной противо ЭДС вращения [105], и зависеть от частоты вращения ротора

$$I_a = \frac{U_n - 4.44k_0 p W_f \Phi_\delta \frac{n}{60}}{r_a}, \quad (5.1.3)$$

где  $U_n$ - номинальное фазное напряжение (В);  $k_0$ - обмоточный коэффициент;  $n$ - частота вращения двигателя (об/мин);  $r_a$ - активное сопротивление фазы (Ом).

Приведенные уравнения описывают зависимости от скорости вращения двигателя.

Перейдем к анализу связанной электромеханической и тепловой задачи.

Ток якоря, как видно из уравнения (5.1.3), зависит от скорости разгона двигателя. Электрические потери в обмотке, при этом, зависят от квадрата тока.

$$P_{el} = I_a^2 r_a (m - 1). \quad (5.1.4)$$

Магнитные потери зависят от частоты перемагничивания потока в стали зубцов и спинки якоря, их массы и значения индукции в этих частях:

$$P_{st} = p_{st} \left( \frac{pn}{3000} \right)^{1.4} (m_z B_z^2 + m_a B_a^2), \quad (5.1.5)$$

где  $p_{st}$ - удельные потери в стали;  $m_z$ - масса зубцов (кг);  $B_z$  - индукция в зубце (Тл);  $m_a$ - масса спинки якоря (кг)  $B_a$  - индукция в спинке якоря (Тл);

С достаточной степенью приближенности можно считать массивный электродвигатель как однородное тело, в котором выделяются магнитные и электрические потери, зависящие от разгона:

$$Q = P_{el} + P_{st}. \quad (5.1.6)$$

Для однородного тела с заданной массой  $m_{motor}$ , теплоемкостью  $c_{motor}$ , площадью поверхности  $S_{motor}$ , коэффициенте теплоотдачи  $a_s$  и известных потерях можно написать следующее динамическое уравнение теплового баланса [105]:

$$Qdt = c_{motor} m_{motor} d(\Delta T) + a_s S_{motor} \Delta T dt, \quad (5.1.7)$$

где  $\Delta T$ - градиент температуры (град).

Первая часть уравнения характеризует увеличение внутренней тепловой энергии двигателя, вторая часть уравнения описывает тепловые процессы схода тепла с поверхности двигателя.

Таким образом, для решения связанной задачи электромеханики и термодинамики необходимо решить следующую систему уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 n = \int_0^{t_{\max}} \frac{pW_f m}{\pi} \frac{I_a \Phi_\delta - M_{tr} + M_n}{J_{rotor}} dt \\
 I_a = \frac{U_n - 4.44k_0 p W_f \Phi_\delta \frac{n}{60}}{r_a} \\
 P_{el} = I_a^2 r_a (m-1) \\
 P_{st} = p_{st} \left( \frac{pn}{3000} \right)^{1.4} (m_z B_z^2 + m_a + B_a^2) \\
 Q = P_{el} + P_{st} \\
 T = \int_0^{t_{\max}} \frac{Q - a_s S_{motor} T}{c_{motor} m_{motor}} dt + t_{oxl}
 \end{array} \right. \quad (5.1.8)$$

Здесь  $t_{max}$ - интервал времени, за который определяются расчетные зависимости;  $t_{oxl}$ - температура охлаждающей среды, в которую сходит тепловой поток с поверхности охлаждаемого двигателя.

Решая данную систему уравнений относительно времени, мы получим динамические зависимости частоты вращения, потерь и температуры двигателя при его разгоне от времени.

Для решения данной системы уравнений воспользуемся возможностями программного комплекса Matlab Simulink.

Ниже на рис.5.1.1 - 5.1.5 представлены функциональные блоки термомеханической динамической модели двигателя, реализующие решение представленной системы.

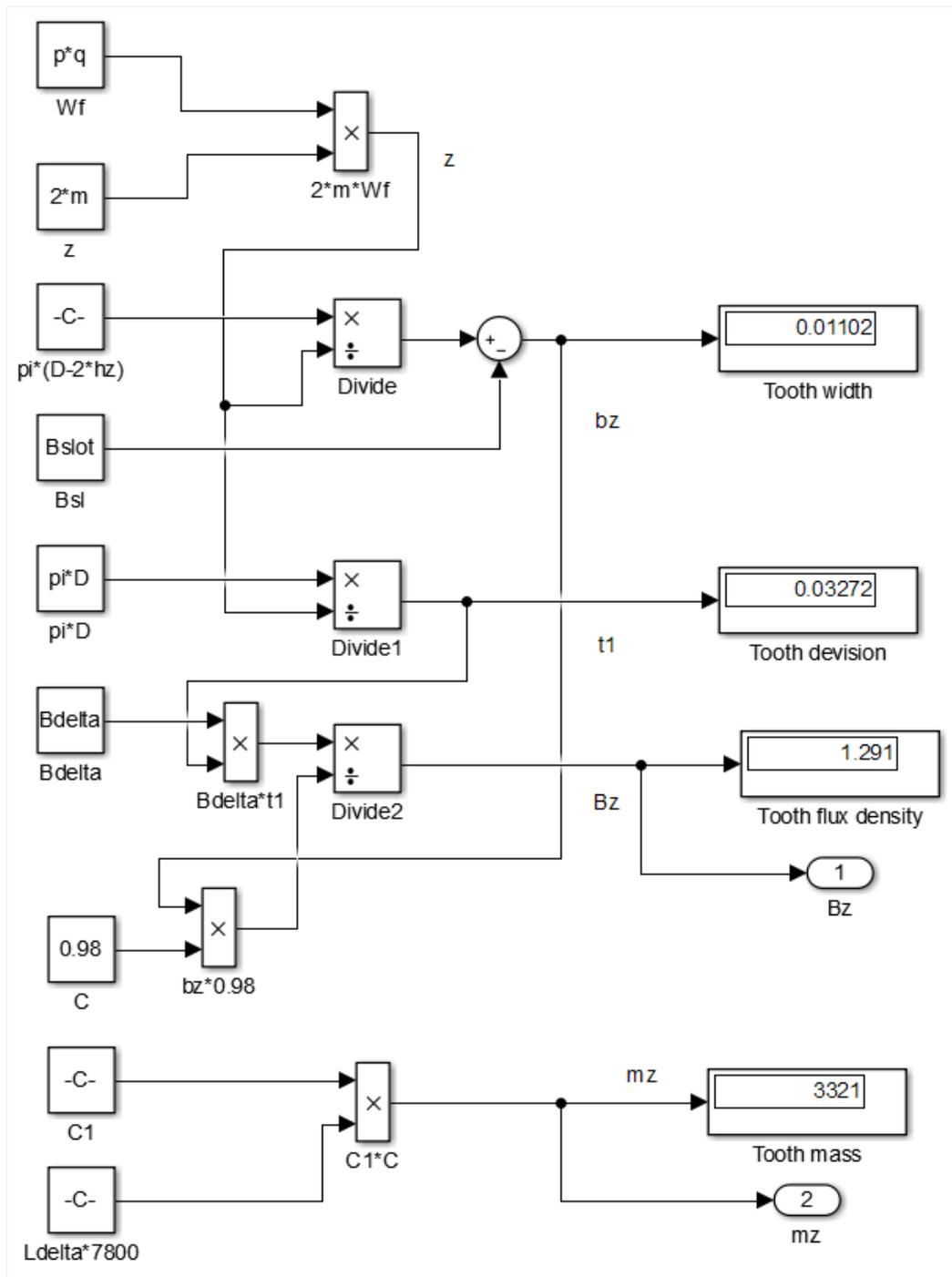


Рис.5.1.1. Функциональный блок, определяющий геометрические параметры двигателя (Geometry)

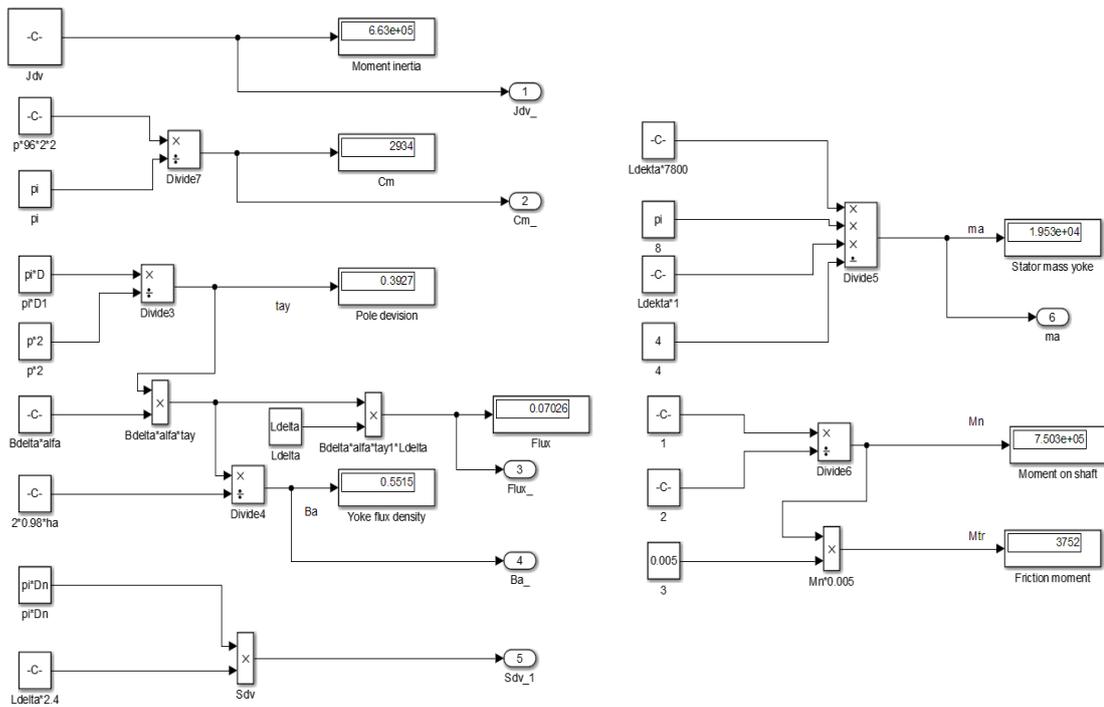


Рис.5.1.2. Функциональный блок, рассчитывающий электромагнитные характеристики двигателя (Motors's parameters)

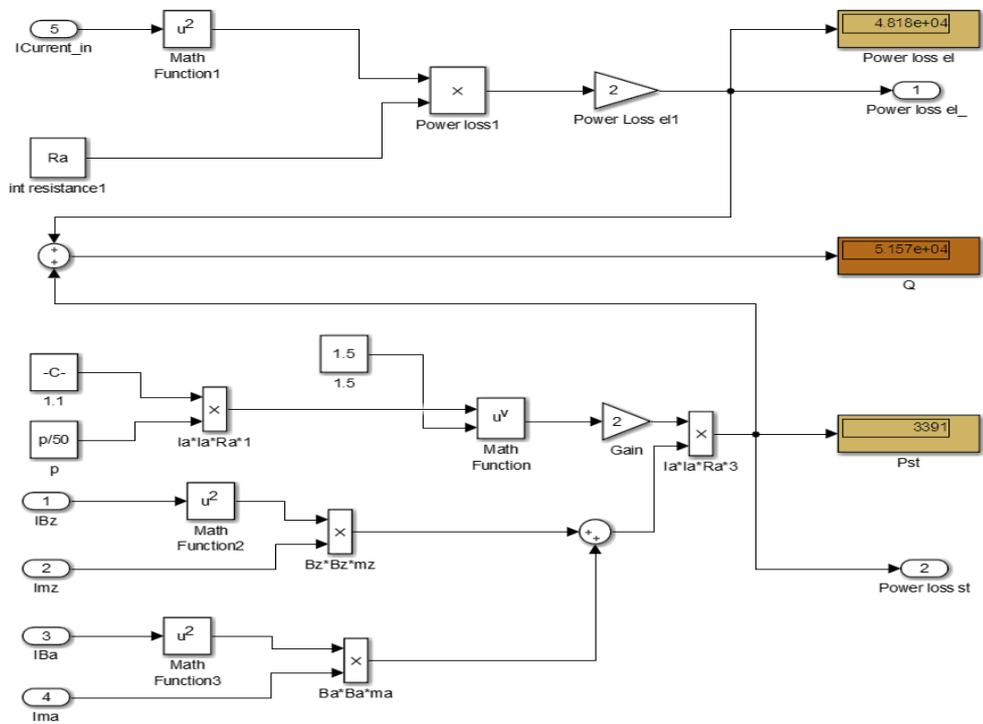


Рис.5.1.3. Функциональный блок, рассчитывающий мгновенные значения электрических и магнетонах потерь двигателя (Power losses)

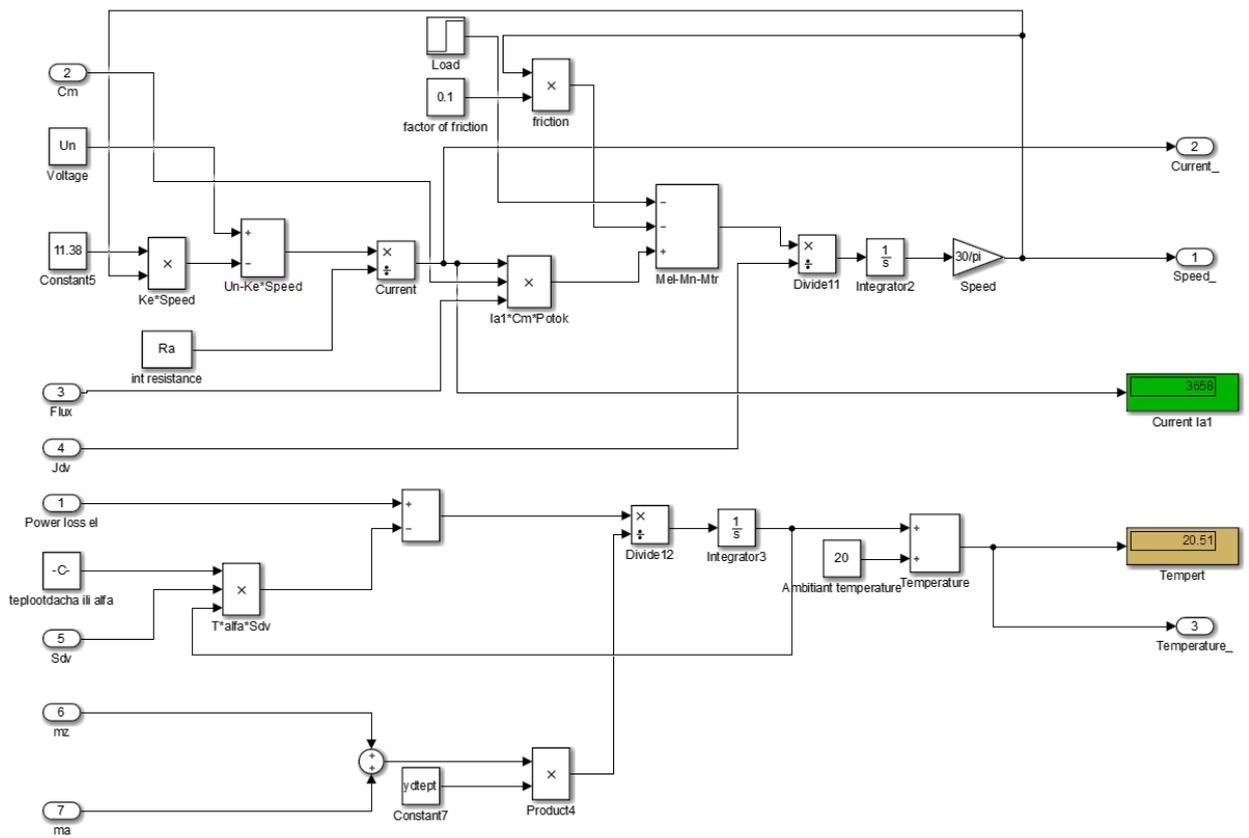


Рис.5.1.4. Функциональный блок, решающий систему уравнений и определяющий значение скорости и температуры, в зависимости от уставки времени (Mechanical and Thermal equations)

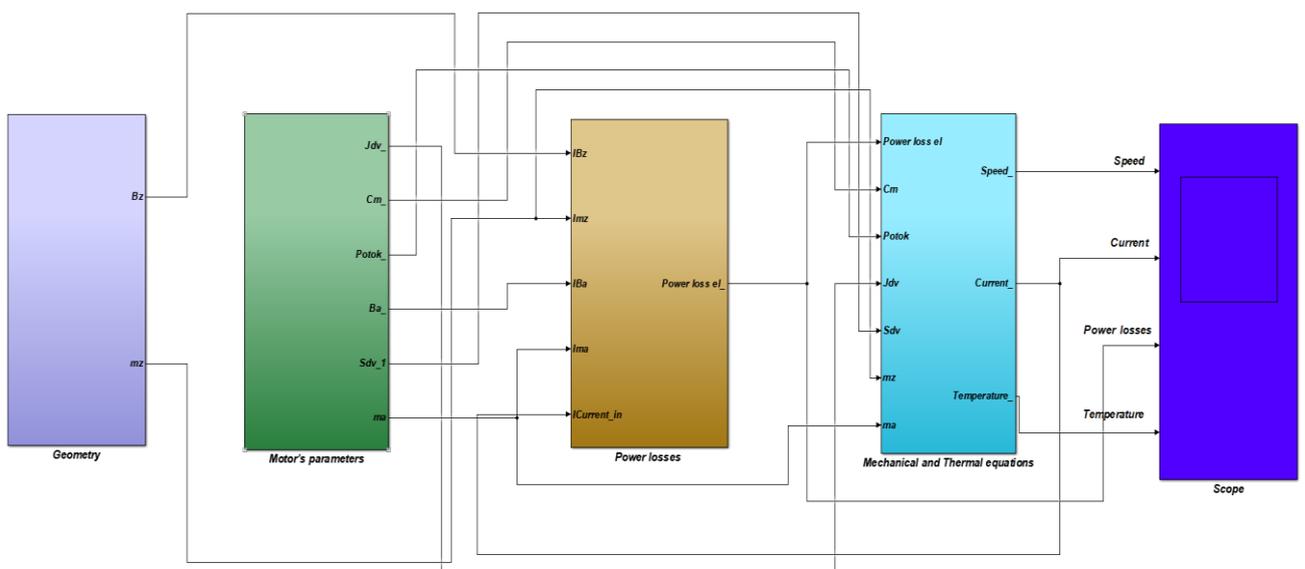


Рис.5.1.5. Полная функциональная схема динамической модели

На рис.5.1.6-5.1.7 представлены результаты работы модели.

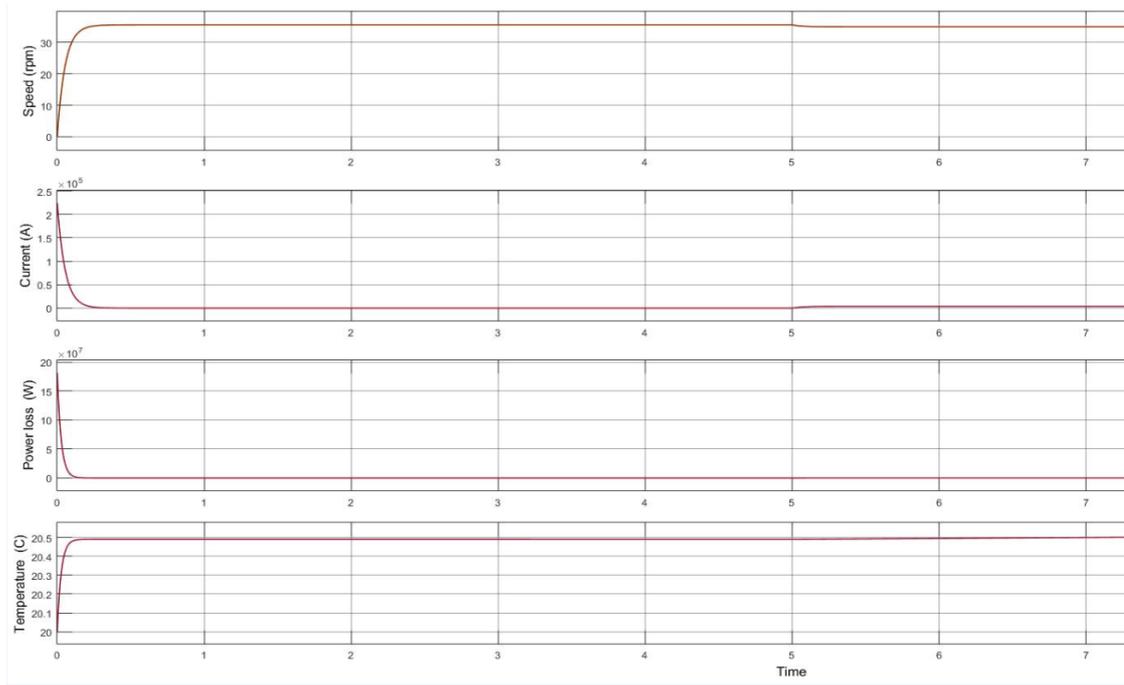


Рис.5.1.6. Зависимость скорости, тока, потерь и температуры двигателя после 7 секунд разгона.

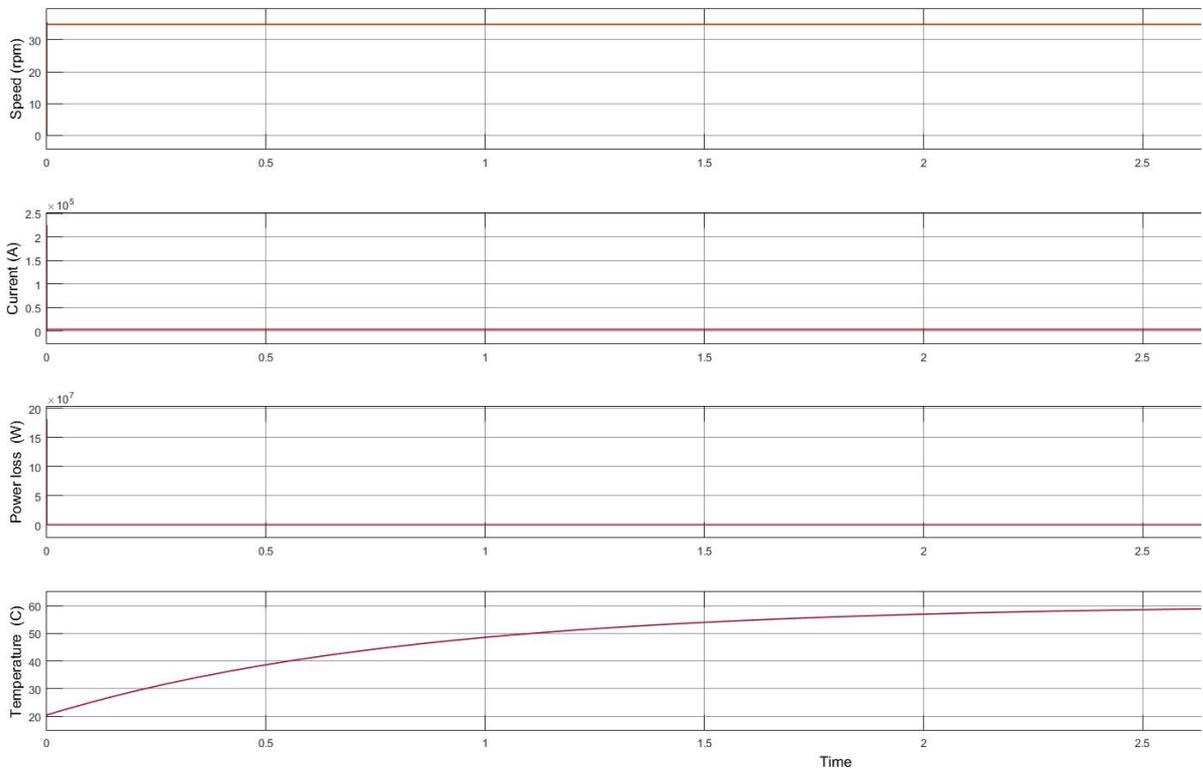


Рис.5.1.6. Зависимость скорости, тока, потерь и температуры двигателя после 24 часов работы двигателя под нагрузкой

Анализ полученных кривых подтвердил ожидаемые результаты. Электромеханическая постоянная времени на два порядка меньше тепловой постоянной времени. Двигатель без режима токоограничения разгоняется за несколько секунд до установившейся номинальной скорости. За это время, не смотря на пиковые значения потерь, двигатель не успевает прогреться и режим пуска не приводит к локальным перегревам за счет большой теплоемкости массы двигателя. Прогрев двигателя под нагрузкой происходит в течение суток непрерывной работы.

Это обстоятельство позволяет рассчитать локальные перегревы установившегося режима. Первоначально воспользуемся для этого традиционным методом с использованием эквивалентных тепловых схем замещения [105].

## **5.2. Расчет теплового состояния ВДКП на основе метода эквивалентных тепловых схем замещения**

Определим основное направление тепловых потоков двигателя.

Будем считать потери на поверхности полюсов ротора от зубцовых пульсаций потока не значимыми в балансе общих потерь. При этом допущении будем учитывать только электрические и магнитные потери статора. Направления движения тепловых потоков от этих потерь представлены на рис.5.2.1.

Тепловой поток от электрических потерь разделим на две составляющих. Одна часть потока пойдет в железо якоря и соединившись с тепловым потоком магнитных потерь рассеется с радиальной поверхности двигателя. Вторая часть теплового потока электрических потерь, пройдя через воздушный зазор в ротор, рассеется с торцевой поверхности двигателя. Пренебрегать этой частью теплового потока нельзя, поскольку торцевые поверхности имеют большую площадь теплоотдачи.

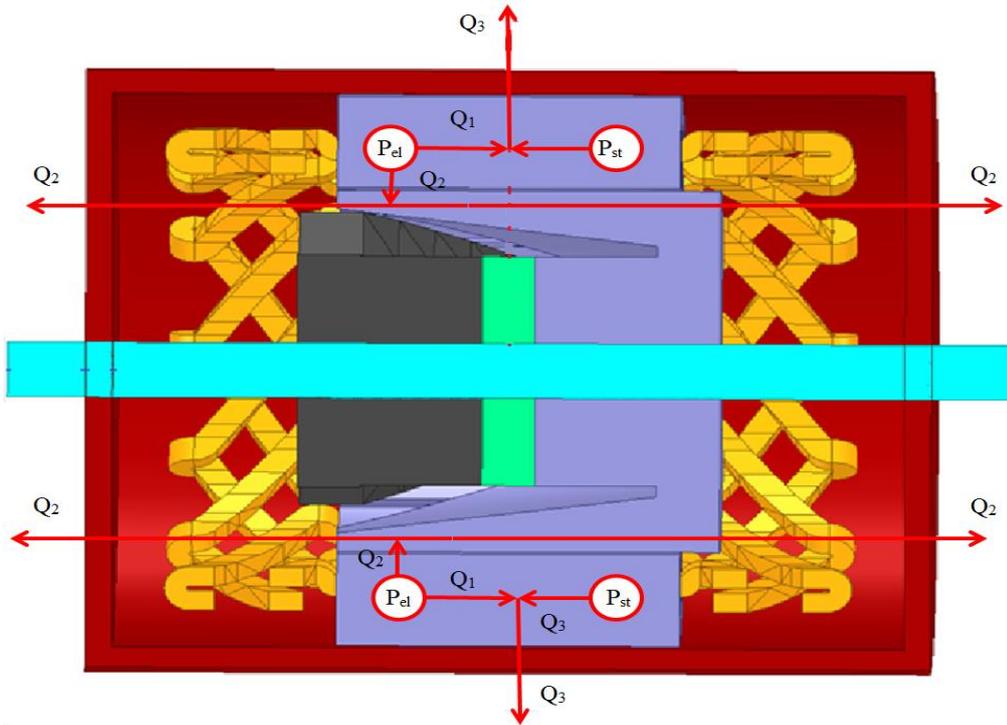


Рис.5.2.1. Направление движения тепловых потоков от электрических и магнитных потерь статора.

Данной схеме движения тепловых потоков можно сопоставить эквивалентную тепловую схему замещения, представленную на рис.5.2.2.

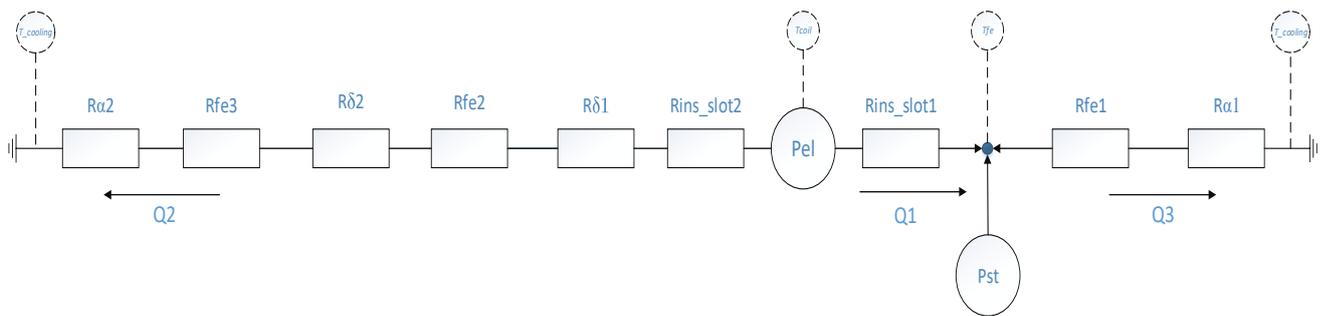


Рис.5.2.2. Эквивалентная тепловая схема замещения ВДКП

Определим тепловые сопротивления схемы замещения.

Тепловое сопротивление движению потока в стали ротора:

$$R_{fe1} = \frac{h_a}{\lambda_{Fe} S_{Feancor}}, \quad (5.2.1)$$

где  $h_a$ - толщина спинки статора;  $S_{Feancor}$ - площадь сечения для теплового потока при его движении в железе статора;  $\lambda_{Fe}$ - теплопроводность стали.

Тепловое сопротивление схода тепла с радиальной поверхности двигателя:

$$R_{a1} = \frac{1}{\alpha S_{rad}}, \quad (5.2.2)$$

где  $\alpha$ - коэффициент схода тепла с внешней поверхности генератора;  $S_{rad}$ - площадь радиальной поверхности двигателя.

Тепловое сопротивления потока, идущего через стенки пазов якоря в зубцовую зону и спинку статора:

$$R_{ins\_slot1} = \frac{\Delta_{izpaz}}{\lambda_{iz} S_{izpaz}}, \quad (5.2.3)$$

где  $\Delta_{izpaz}$ - толщина изоляции паза;  $S_{izpaz}$ - площадь изоляции всех пазов;  $\lambda_{iz}$ - теплопроводность изоляции.

Тепловое сопротивления потока, идущего через изоляцию паза в ротор:

$$R_{ins\_slot2} = \frac{\Delta_{izpaz}}{\lambda_{iz} S_{izpaz}}, \quad (5.2.4)$$

где  $\Delta_{izpaz}$ - толщина изоляции паза;  $S_{izpaz}$ - площадь изоляции всех пазов со стороны ротора;  $\lambda_{iz}$ - теплопроводность изоляции.

Тепловое сопротивление воздушного зазора между наружной радиальной поверхностью ротора и внутренней радиальной поверхностью статора:

$$R_{\delta1} = \frac{\delta1}{\lambda_{\delta} S_{\delta}}, \quad (5.2.5)$$

где  $\delta1$ - величина воздушного зазора между наружной радиальной поверхностью ротора и внутренней радиальной поверхностью статора;  $S_{\delta}$ - площадь торцевой поверхности ротора;  $\lambda_{\delta}$ - теплопроводность воздуха.

Тепловое сопротивление движению потока в стали ротора:

$$R_{fe2} = \frac{L_{rot}}{\lambda_{Fe} S_{Feancor}}, \quad (5.2.6)$$

где  $L_{rot}$ - длина ротора по полюсам;  $S_{Feancor}$ - площадь сечения для теплового потока при его движении в железе ротора;  $\lambda_{Fe}$ - теплопроводность стали.

Тепловое сопротивление воздушного зазора между торцом поверхности ротора и внутренней торцевой поверхности подшипникового щита:

$$R_{\delta 2} = \frac{\delta^2}{\lambda_{\delta} S_{\delta}}, \quad (5.2.7)$$

где  $\delta^2$ - величина воздушного зазора между торцом поверхности ротора и внутренней торцевой поверхности подшипникового щита;  $S_{\delta}$ - площадь торцевой поверхности ротора;  $\lambda_{\delta}$ - теплопроводность воздуха.

Тепловое сопротивление движению потока в стали ротора:

$$R_{fe3} = \frac{b_{tor}}{\lambda_{Fe} S_{Feancor}}, \quad (5.2.8)$$

где  $b_{tor}$ - толщина торца подшипникового щита;  $S_{Feancor}$ - площадь сечения для теплового потока при его движении в подшипниковом щите;  $\lambda_{Fe}$ - теплопроводность стали.

Тепловое сопротивление схода тепла с торцевой поверхности двигателя:

$$R_{\alpha 2} = \frac{1}{\alpha S_{tor}}, \quad (5.2.9)$$

где  $\alpha$ - коэффициент схода тепла с внешней поверхности генератора;  $S_{tor}$ - площадь торцевой поверхности двигателя с двух сторон.

Температуру охлаждающей среды для схода тепловых потоков с нагретых поверхностей обозначим  $t_{cooling}$ , тогда для тепловой схемы замещения можно составить следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} P_{st} + Q_1 = Q_3 \\ P_{el} = Q_1 + Q_2 \\ t_{fe} - t_{cooling} = Q_1 (R_{fe1} + R_{\alpha 1}) \\ t_{coil} - t_{fe} = Q_1 R_{ins\_slot1} \\ t_{coil} - t_{cooling} = Q_2 (R_{ins\_slot2} + R_{\delta 1} + R_{fe2} + R_{\delta 2} + R_{fe3} + R_{\alpha 2}) \end{cases} \quad (5.2.10)$$

Данная система уравнений составляет математическую модель расчета теплового состояния ВДКП с учетом распределения общих потерь между электрическими и магнитными.

По аналогии с предыдущей моделью, решим систему уравнений, используя возможности программного комплекса Matlab Simulink. На рис.5.2.3. представлена блок-схема модели оценки теплового состояния по методу эквивалентных схем замещения.

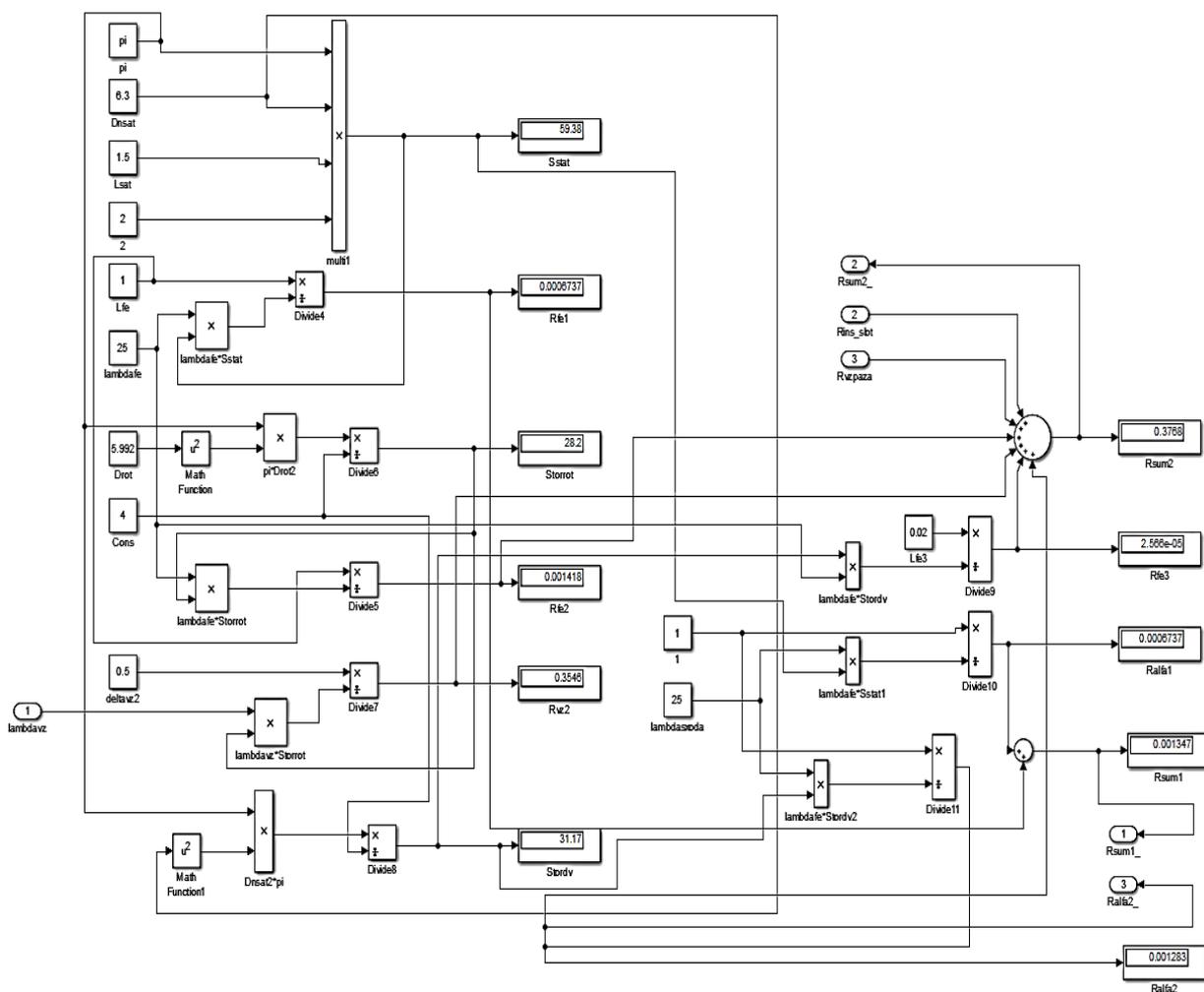


Рис.5.2.3. Блок-схема модели оценки теплового состояния по методу эквивалентных схем замещения (Motor`s data)

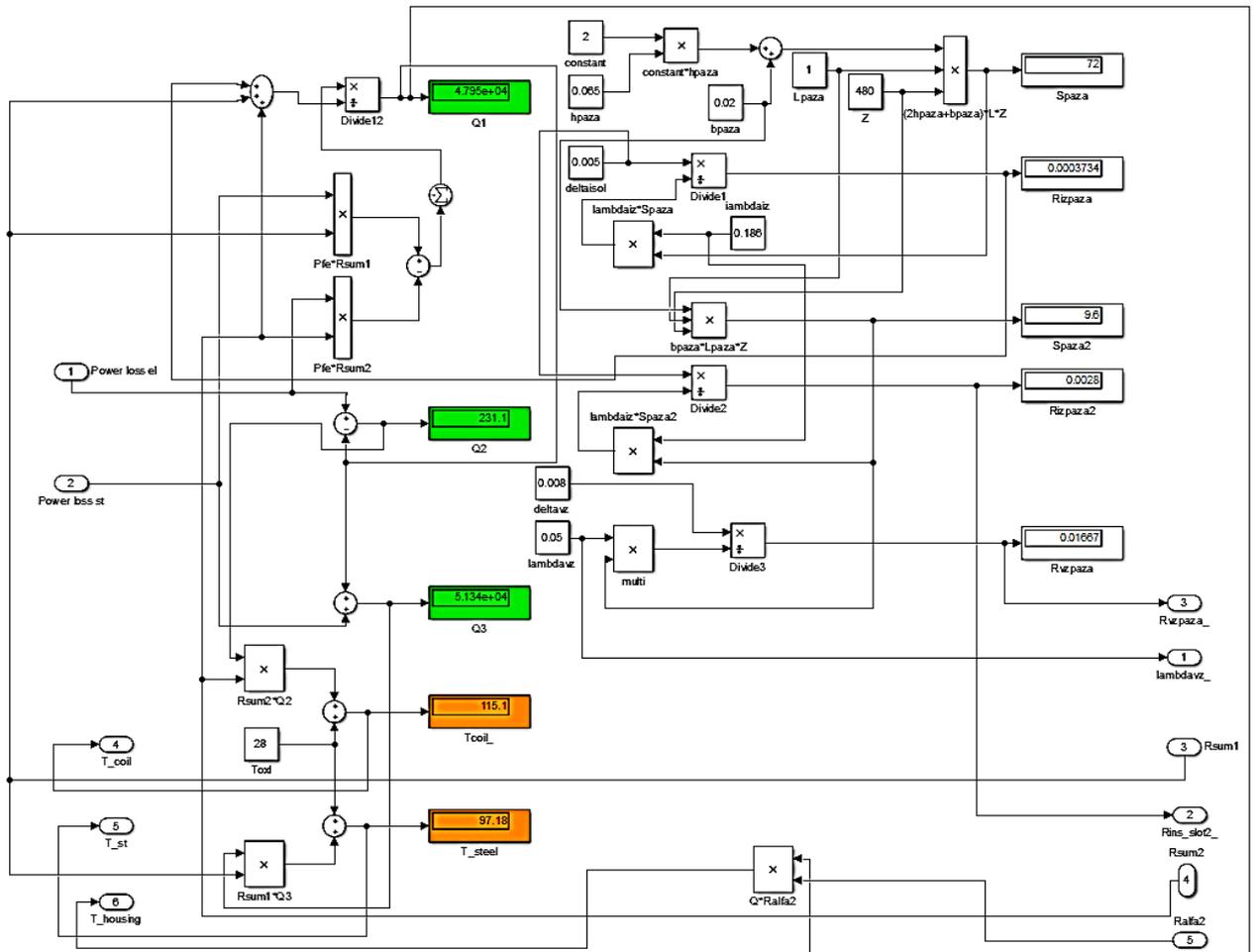


Рис.5.2.4. Блок-схема модели оценки теплового состояния по методу эквивалентных схем замещения (Thermal equivalent circuit)

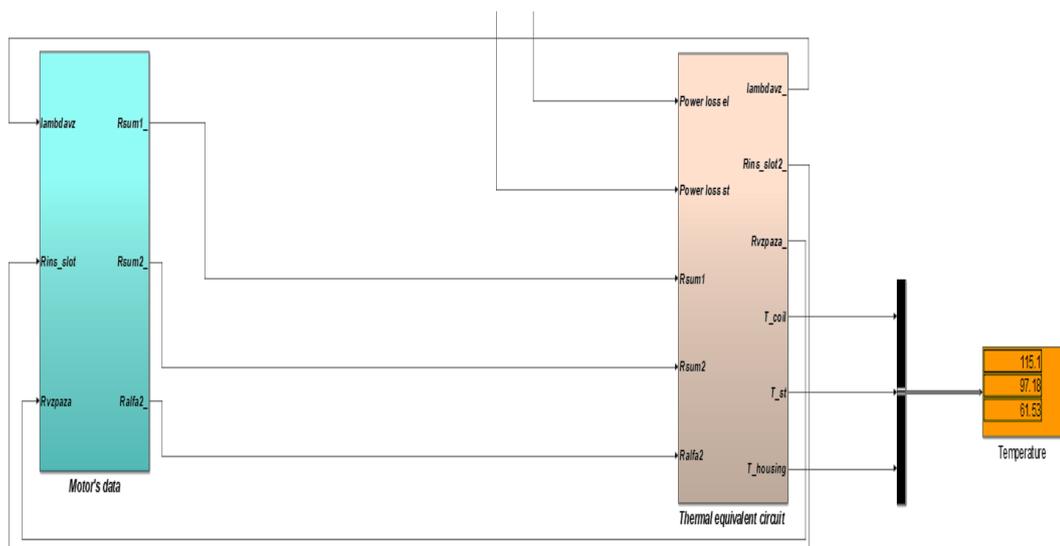


Рис.5.2.5. Блок-схема модели оценки теплового состояния по методу эквивалентных схем замещения

Для удобства оценки теплового состояния в динамике и статике целесообразно объединить эти модели в одну единую модель для оценки теплового нагрева.

При этом расчетные значения потерь из динамической модели будут передаваться в статическую модель. Оценку динамики разгона можно делать по динамической модели, а оценку нагрева в установившемся режиме можно осуществлять в статической модели.

Единая блок-схема модели оценки теплового состояния приведена на рис. 5.2.6.

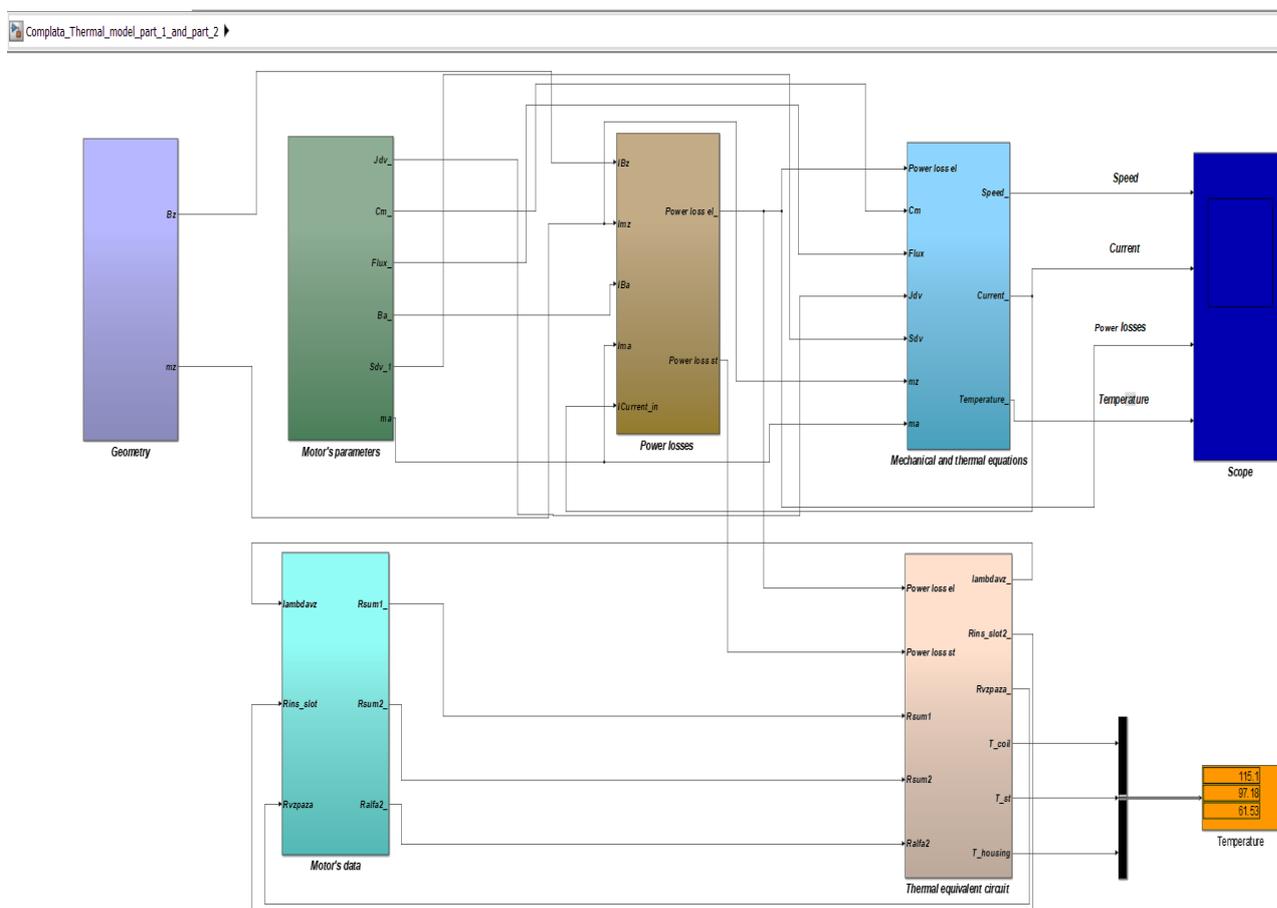


Рис.5.2.6. Объединенная динамическая и статическая модель оценки теплового состояния ВДКП при нагрузке

Следует отметить, что данная модель позволяет учесть реальную динамическую нагрузку двигателя, если в модель ввести не среднее значения момента, а осциллограмму реальной зависимости момента на одном обороте двигателя при производстве бесшовных труб.

Работоспособность разработанной модели была опробована на параметрах рассчитанного двигателя, при этом были получены следующие значения расчетных температур установившегося режима при температуре окружающей среды 20 градусов Цельсия:

- температура обмотки якоря 115 градусов Цельсия;
- температура железа статора 97 градусов Цельсия.

Расчетные температуры вполне соответствуют выбранному классу изоляции F.

Разработанные модели очень удобны для инженерной практики. Но следует иметь в виду, что они разработаны на основе системы допущений (представление двигателя как однородного тела для нагрева, субъективное представление движения тепловых потоков). Эти допущения представляют собой технические риски. Учитывая большую ответственность разрабатываемого привода для реального производства и большие капитальные затраты для его внедрения, дополнительно проведем оценку теплового состояния на основе более точного метода с применением программного комплекса Ansys Icerak.

### **5.3. Оценка теплового состояния ВДКП с применением программного комплекса Ansys Icerak**

Расчет теплового состояния на основе метода конечных элементов является трудоемким, но более точным методом [91]. Следует отметить следующую положительную тенденцию при создании современных САЕ систем. Появляется возможность соединения различных программ в единую модель для решения связанной задачи через программную оболочку Ansys Workbench. Воспользуемся этой возможностью и создадим расчетную тепловую модель по следующей расчетной схеме. Первоначально выполним расчет электромагнитного состояния ВДКП в программе Ansys Electronics Desktop. По

результатам этого расчета более точно определим потери в стали и в меди обмотки якоря. Далее передадим данные в программную оболочку Workbench. Она является связующим звеном с программой теплового расчета. На следующем этапе передадим данные непосредственно в программу расчета теплового поля Iсераск.

Таким образом, мы решаем связанную магнитодинамическую и термодинамическую задачи.

Данная расчетная схема представлена на рис.5.3.1.

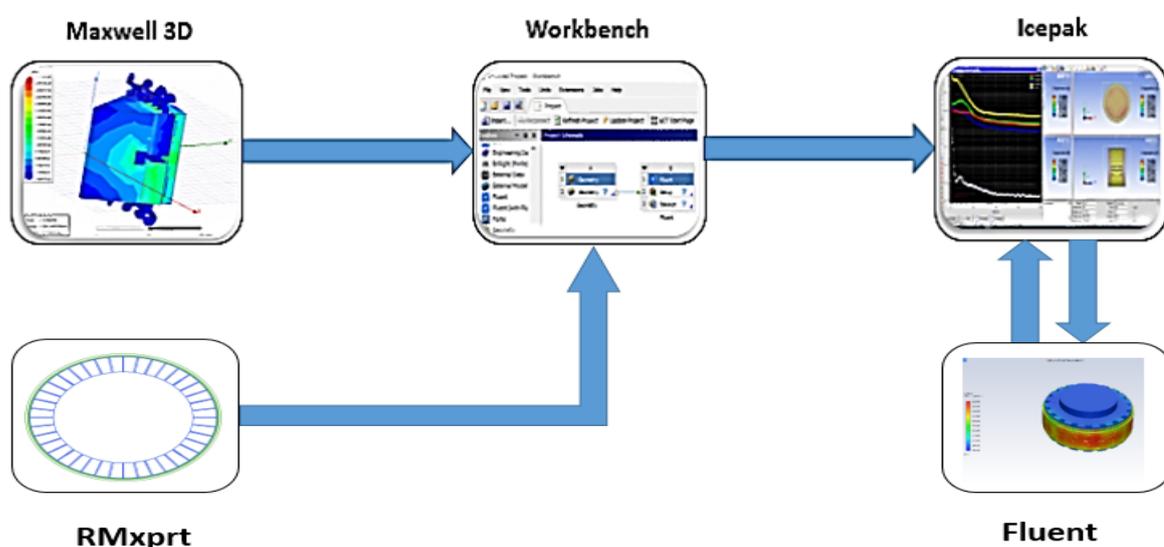


Рис.5.3.1. Схема теплового расчета

В программе Iсераск производится окончательная настройка тепловой задачи:

- уточняются материалы с учетом их термодинамических свойств;
- задаются размеры области, в которой осуществляется теплообмен;
- задается скорость охлаждающего агента и характер его движения (ламинарное, турбулентное);
- настраивается расчетная сетка.

Тепловой расчет осуществляется итерационным способом, в процессе которого уточняется сетка разбиения на конечные элементы и определяется сходимость вычислительного процесса.

В результате расчета определяется температура в каждом элементе, на которые разбита модель двигателя. Таким образом, мы можем рассчитать поле температур в отличие от интегральной температуры, которая определяется методом эквивалентных тепловых схем замещения. Распределение температуры для 3D модели показано на рис. 5.3.2.

На рисунке показана максимальная расчетная температуры 358 в градусах Кельвина. При пересчете на градусы Цельсия эта величина составит 86 °С. При расчете с применением метода эквивалентных схем замещения температура обмотки якоря составила 115 °С.

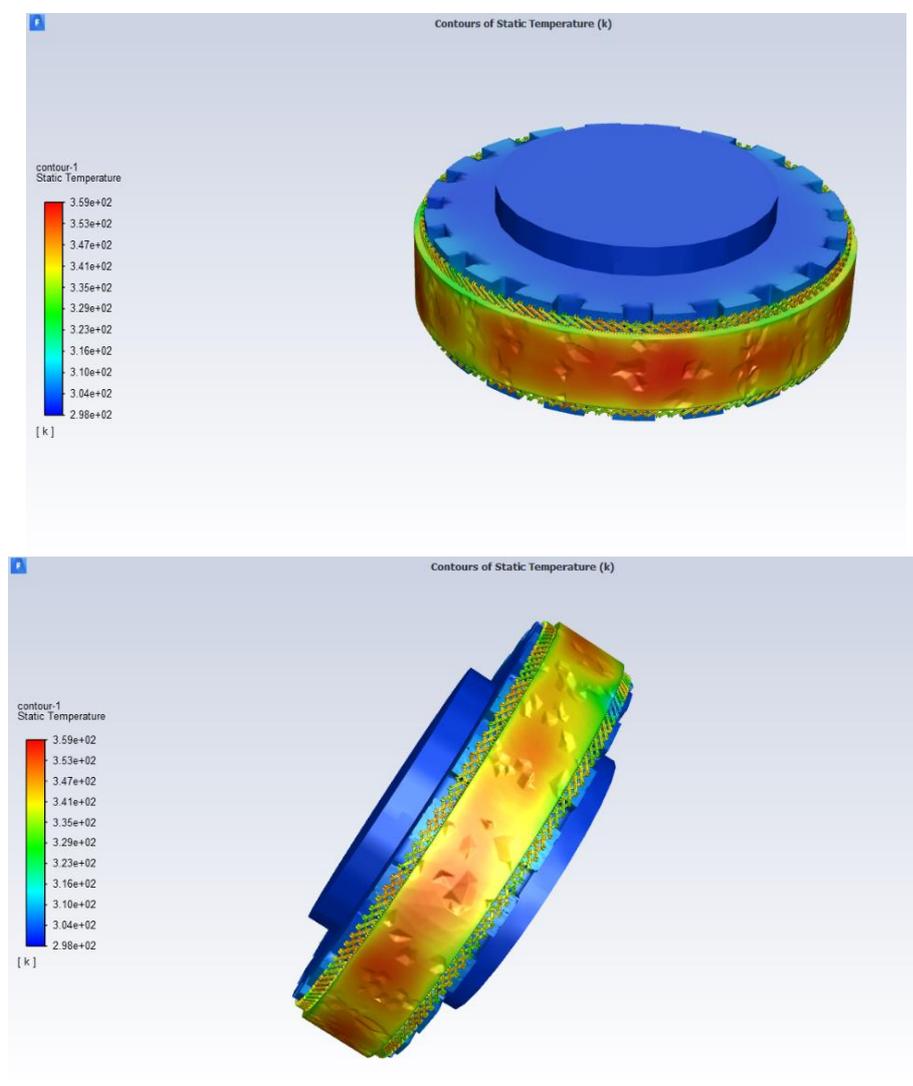


Рис.5.3.2. Поле температур ВДКП, рассчитанное в программном комплексе Ansys Iсерак

Таким образом, расчет методом конечных элементов дает более точную и более оптимистичную картину по нагреву ВДКП. Это связано с тем, что метод эквивалентных схем замещения не учитывает часть путей рассеивания тепла, которые учитывает программа Ansys Iserack.

В целом, разработанные модели оценки теплового состояния дают вполне приемлемые расчеты для инженерной практики.

Положительные результаты моделирования окончательно снимают технические риски по результатам разработки ВДКП, что позволяет перейти к окончательному этапу – созданию трехмерной твердотельной модели и разработке конструкторской документации для создания опытного образца.

#### **5.4. Разработка конструкции ВДКП в программном комплексе Solidworks**

При разработке конструкции вентильных двигателей традиционно пытаются уменьшить объем и массу применяемых активных и конструктивных материалов для получения высоких массоэнергетических показателей и уменьшении затрат при производстве изделия. Но данный электропривод имеет особенность. Большие инерционные вращающиеся массы необходимы для накопления кинетической энергии в период одного оборота вращения, чтобы затем превратить ее в ударную нагрузку при формировании бесшовной трубы. Исходя из этого требования, примем экономию только активных материалов (электротехнического железа якоря и меди якорной обмотки). Конструктивные материалы выполним массивными для обеспечения требуемой инерционной массы.

Как было отмечено ранее, особенностью сборки вентильных двигателей с постоянными магнитами является сильное магнитное тяжение при сборке статора и ротора, когда ротор помещается в статор. Для мощных вентильных двигателей с большими диаметрами и мощными высококоэрцитивными постоянными магнитами это тяжение составит несколько тонн, что не позволит

произвести сборку. Тем не менее применение постоянных магнитов в конструкции оправдано, так как это приводит к исключению потерь на возбуждение и существенной экономии электроэнергии при непрерывной трехфазной работе привода в течение 240 дней в году (с перерывами на регламентные работы).

Для решения этой технической задачи в конструкции двигателя предполагается следующая технология его сборки:

1. Осуществляется сборка статора с якорной обмоткой и установка статора на станину.

2. На вал крепится одна из обоев когтеобразных полюсов. Вторая обойма когтеобразных полюсов крепится с другой стороны вала на расстоянии, превышающем осевую длину статора.

3. Вал с обоймами когтеобразных полюсов устанавливается в статор. Так как на данной технологической операции отсутствуют постоянные магниты при существующем зазоре 10 мм эта операция не вызовет затруднений.

4. Устанавливаются стояковые подшипники с двух сторон. Обойма ротора при этом занимает рабочее положение по оси вращения.

5. Вклеиваются постоянные магниты в одну из обоев когтеобразных полюсов.

6. Осуществляется окончательная сборка ротора с постоянными магнитами. Под действием магнитных сил постоянного магнита вторая обойма когтеобразных полюсов втянется в ротор и займет рабочее положение. Вторым стояковым подшипником устанавливается в свое рабочее положение.

Таким образом, осуществляется сборка двигателя без дополнительной дорогостоящей оснастки. Предлагаемая технология сборки представляет собой инновационное решение в электромашиностроении.

Для разработки трехмерной твердотельной модели воспользуемся результатами предыдущего моделирования. Программа Ansys Electronics Desktop для магнитодинамического анализа создает точную трехмерную модель

активных элементов статора и ротора (железа статора с якорной обмоткой, обойм когтеобразных полюсов с постоянным магнитом). Эти точные модели трансформируем в конструкторскую CAD систему Solidworks и в этой системе построим реальную трёхмерную твердотельную конструкцию.

Фрагменты конструирования представлены на рис.5.4.1-5.4.7

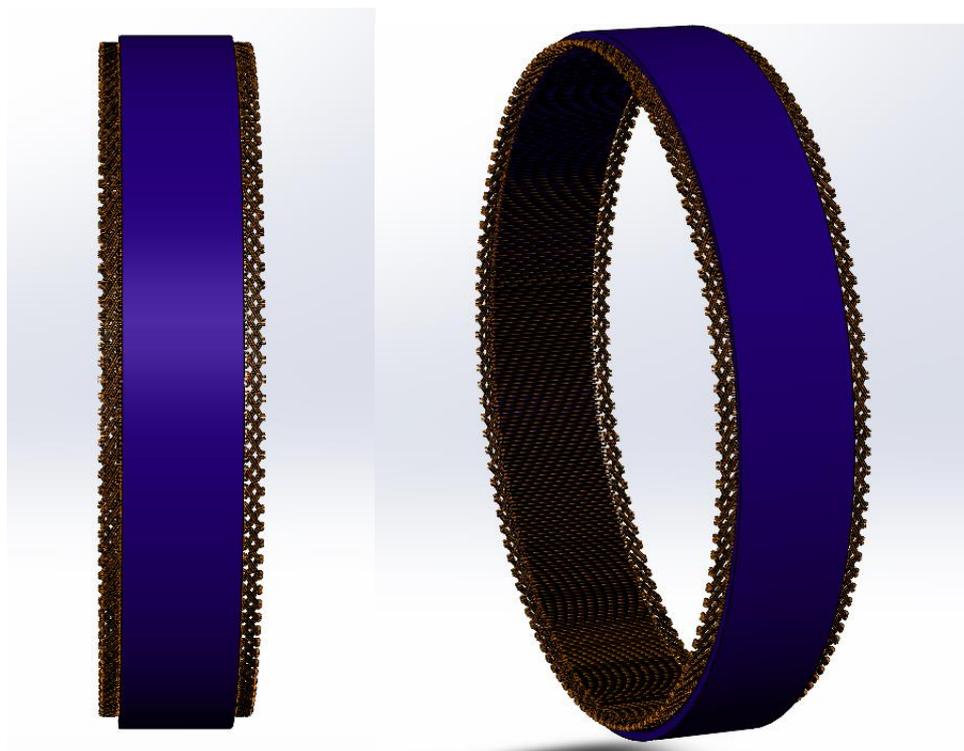


Рис. 5.4.1. Статор в сборе

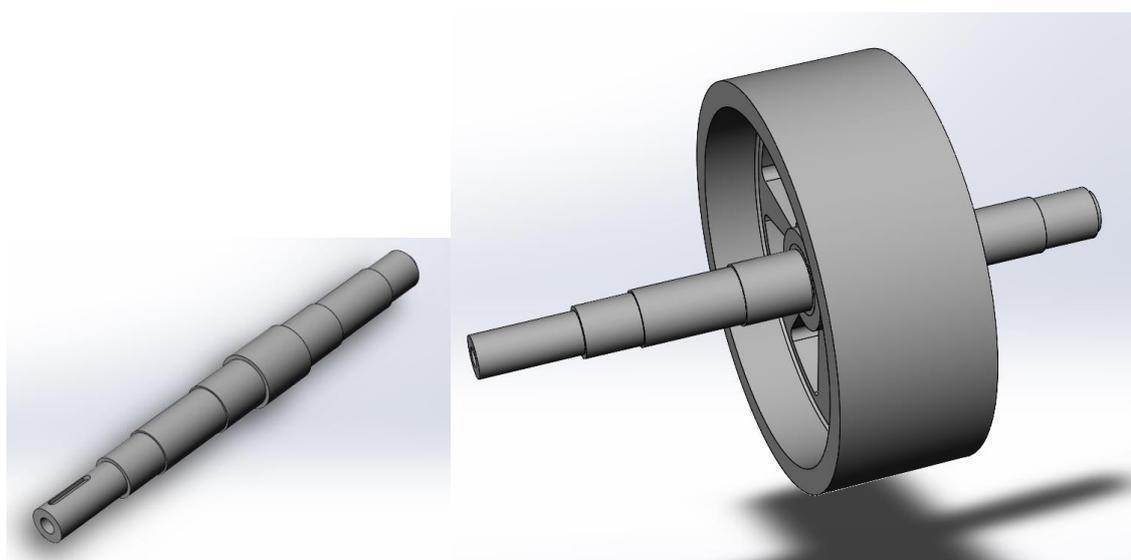


Рис. 5.4.2. Вал и обойма ротора

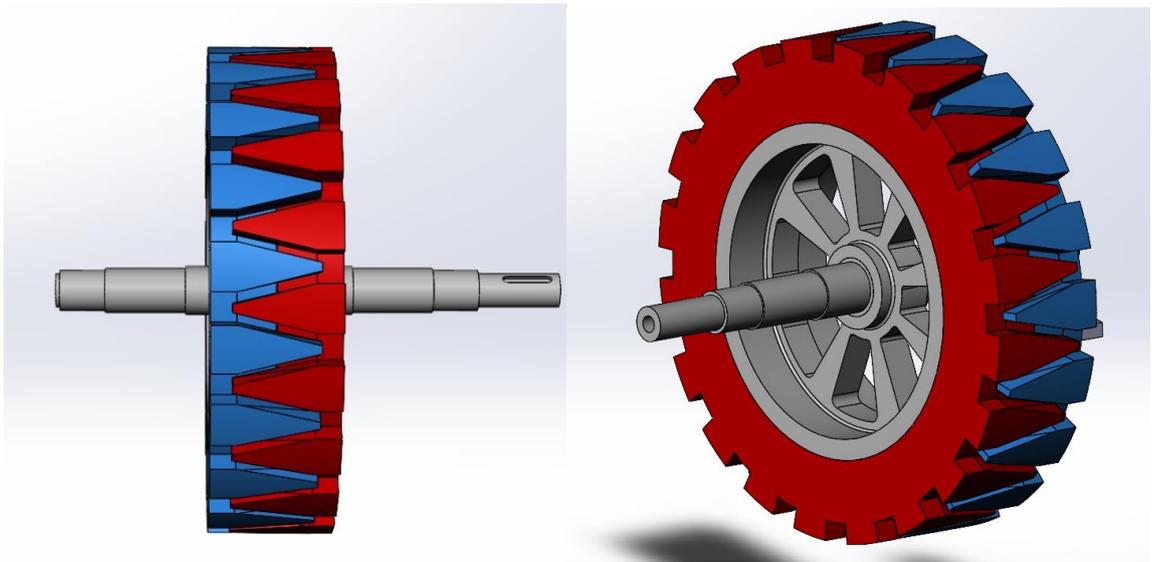


Рис. 5.4.3. Ротор в сборе

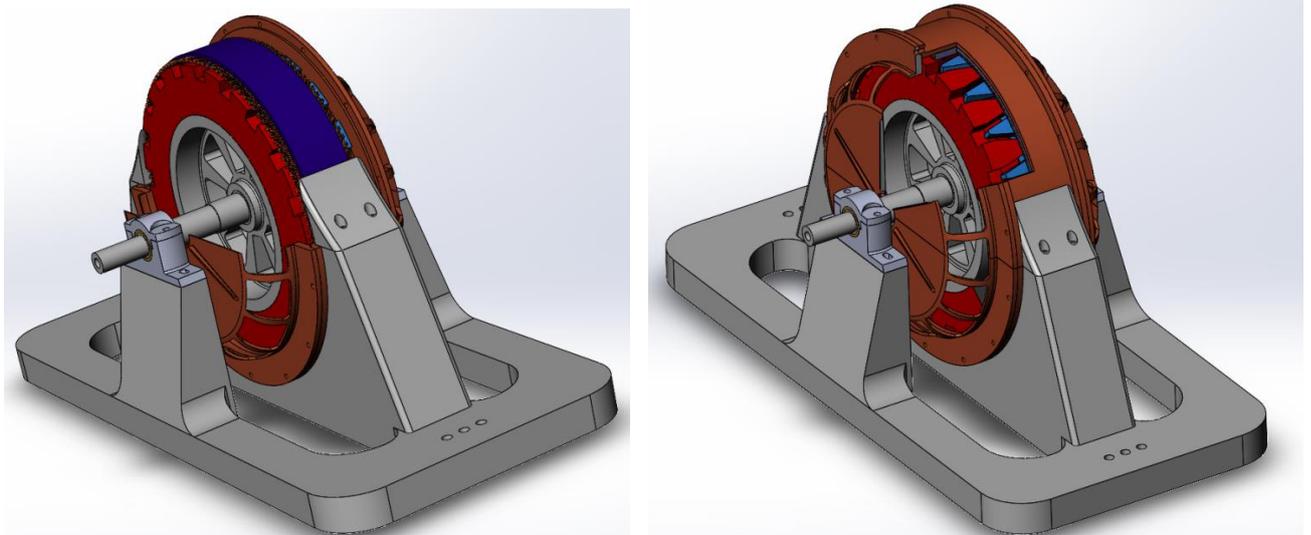


Рис. 5.4.4. Фрагменты сборки двигателя

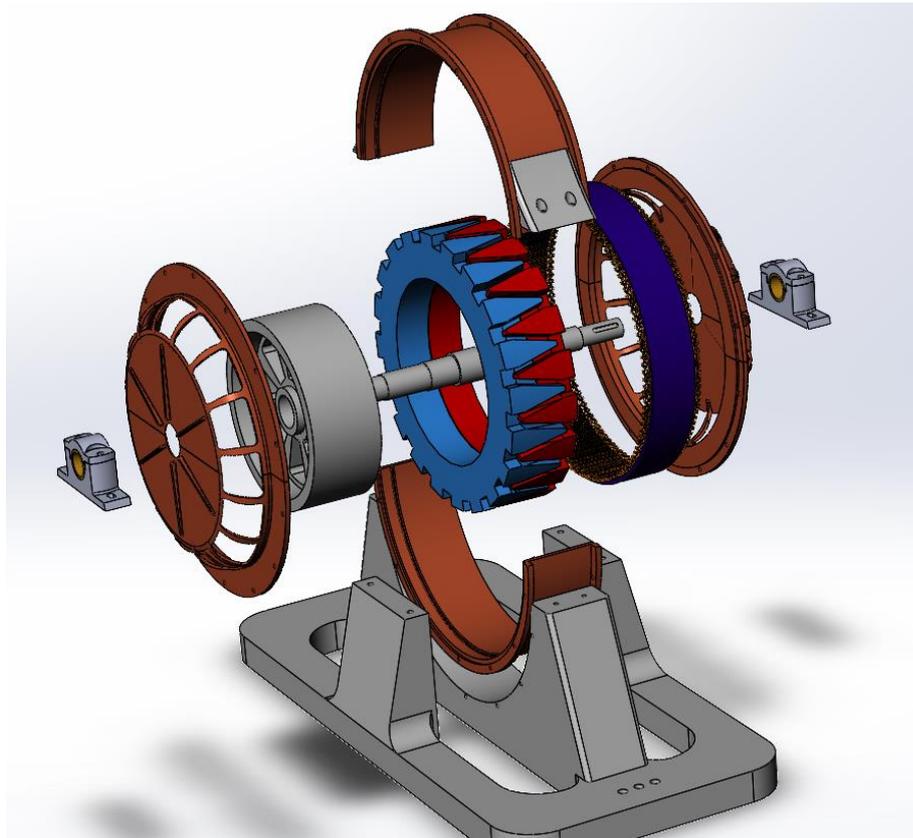


Рис. 5.4.5. Разорванная сборка двигателя

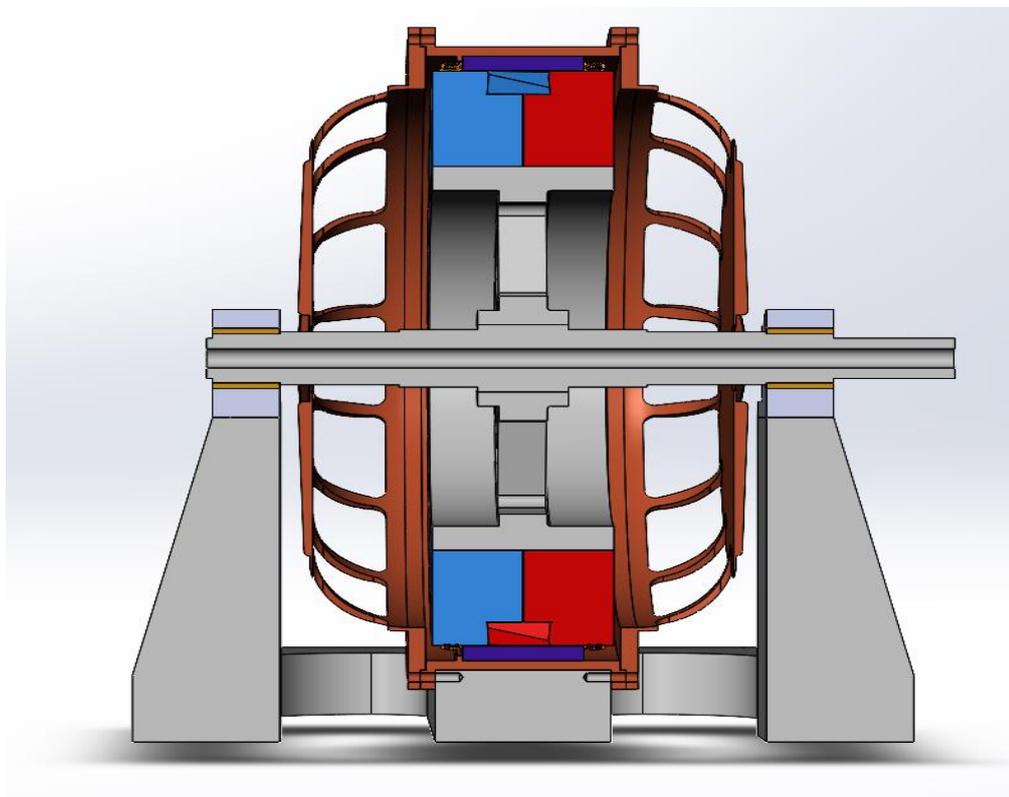


Рис. 5.4.6. Разрез двигателя по оси вращения

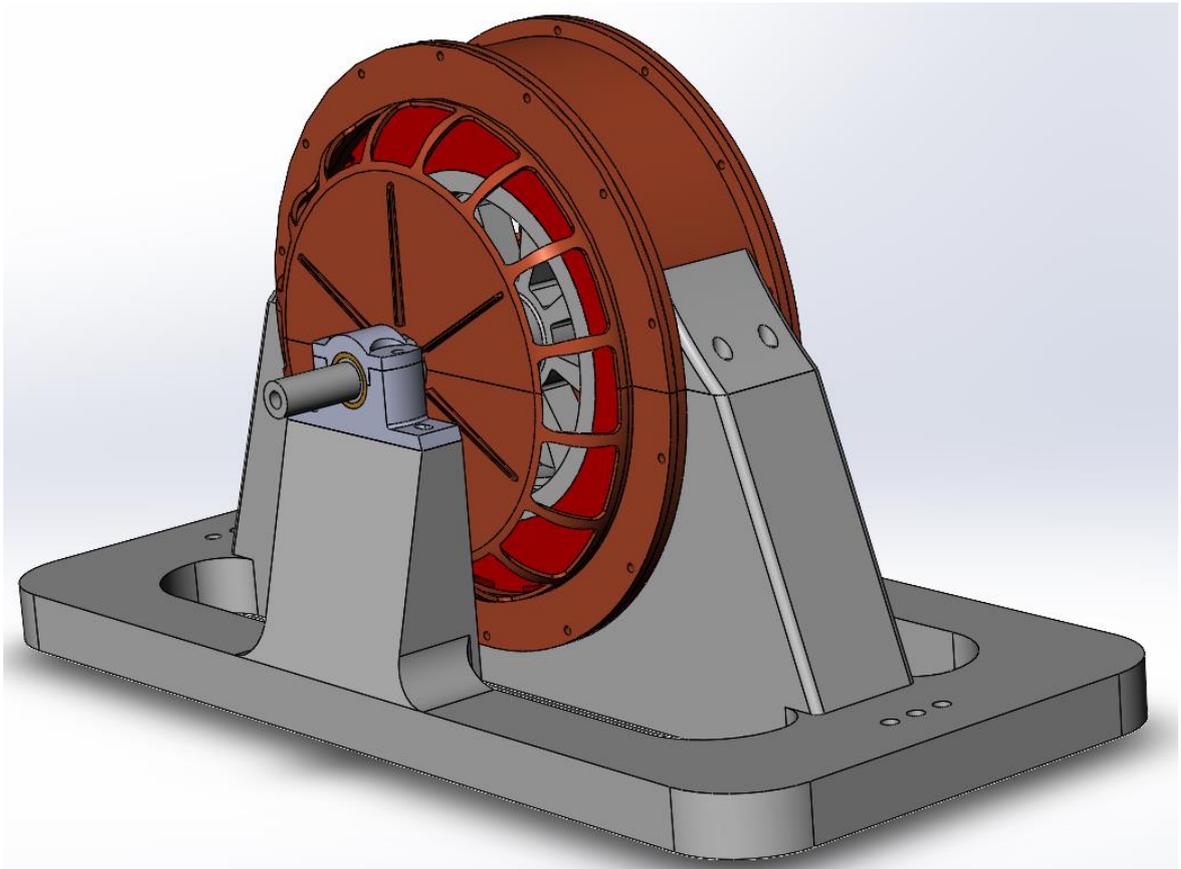


Рис. 5.4.7. Двигатель в сборе

Перед изготовлением реального образца, которое связано с большими финансовыми затратами, для снятия технических рисков, которые могут возникнуть в процессе изготовления деталей и сборке двигателя, было принято решение сделать масштабную модель с использованием технологии 3D принтера. Такая модель была изготовлена. Она представляет собой точную масштабную копию реального двигателя. Фотографии масштабной копии 1:13 представлены на рис.5.4.8.



Рис.5.4.8. Фотографии масштабной модели двигателя, изготовленной по технологии 3D принтера

Масштабная модель подтвердила технологичность конструкции, а также реальность предложенной инновационной технологии сборки.

#### **Выводы по главе**

1. В данном разделе представлена динамическая модель ВДКП, которая решает связанную задачу электродинамики и термодинамики. Постановка данной задачи была связана с опасениями перегревов двигателя при пусковых режимах, когда за счет больших токов без режима токоограничения в обмотке

якоря кратковременно выделяются большие тепловые потери. Модель построена на упрощении двигателя как однородного нагреваемого тела. Модель реализована в программном комплексе Matlab Simulink. Результаты расчета показали большие запасы по перегреву за счет большой теплоемкости массивных частей статора и ротора. При установившихся после кратковременного пуска тепловых потерях полный прогрев двигателя осуществляется в течение суток.

2. Для оценки установившихся перегревов наиболее критичных элементов, к которым относится обмотка якоря и постоянные магниты, была разработана модель оценки температурного состояния на основе эквивалентных тепловых схем замещения. Модель построена в программном комплексе Matlab Simulink. Результаты расчета сняли технические риски по перегреву якорной обмотки по применяемому классу изоляции F и постоянных магнитов по критичной температуре размагничивания. Для удобства пользования динамическая модель и статическая модель объединены в единую модель, которая позволяет анализировать пусковые режимы и стационарные перегревы.

3. Учитывая большие технические риски, связанные с изготовлением мощного двигателя для реального производства, была разработана уточненная модель оценки теплового состояния электродвигателя на основе метода конечных элементов с применением программного комплекса Ansys Icerak. Разработанная модель связана с результатами предшествующего моделирования электромагнитного состояния в программном комплексе Ansys Electronics Desktop, из которого для теплового расчета передаются уточненные значения потерь. Данная модель показала более оптимистические результаты по перегреву наиболее критичных частей двигателя, поскольку точнее определяет потери и пути движения тепловых потоков.

4. На заключительном этапе анализа была построена трехмерная твердотельная модель ВДКП в конструкторской CAD системе Solidworks. Данная модель является основой для разработки конструкторско-

технологической документации для изготовления реального образца двигателя. Для проверки собираемости и технологичности электродвигателя на основе трехмерной твердотельной модели была изготовлена масштабная 1:13 модель двигателя с применением технологии 3D принтера. Модель подтвердила реальность инновационного предложения по сборке крупных электродвигателей с постоянными магнитами.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе содержатся научно доказанные теоретические положения оптимального проектирования и подробного анализа вентильного двигателя с когтеобразными полюсами, который имеет уникальное применение для привода пильгерстана изготовления бесшовных труб. В результате расширена существующая теоретическая база по проектированию электрических машин этого класса. Решенная техническая задача позволяет внести значительный вклад в развитие отечественного электромашиностроения, играющего важную роль в экономике страны.

На основании выполненных теоретических и экспериментальных исследований автором получены следующие основные результаты:

1. В качестве электродвигателя для привода пильгерстана предложена конструкция вентильного двигателя с когтеобразными полюсами, удовлетворяющая требованиям надежности и энергоэффективности. Разработана новая в отечественной и мировой практике технология сборки статора и ротора электродвигателя без дополнительной оснастки.

2. Разработана математическая модель расчета магнитной системы с когтеобразными полюсами на основе схемы замещения. Модель учитывает основные потоки рассеяния, рассчитывает рабочий поток и общий поток постоянного магнита. Особенностью методики является решение задачи синтеза. По заданной индукции в воздушном зазоре и основным геометрическим размерам электродвигателя определяется толщина магнита, которая обеспечивает эту индукцию. Расчетная модель проста и может быть включена в оптимизационные циклы.

3. Разработана математическая модель расчета ВДКП. В математической модели определены основные аналитические зависимости между электромагнитными величинами, константы, технологические и

эксплуатационные ограничения, независимые переменные. Формализованы показатели качества.

4. На основе проведенного анализа разработана система оптимизации ВДКП, реализующая многоуровневую однокритериальную оптимизацию для различных конструктивных исполнений. Система позволяет реализовать до 7 проектных ситуаций, закрывая практически все потребности реального проектирования ВДКП.

5. Разработана система анализа электромагнитного состояния ВДКП, в которой первоначально анализируется электродвигатель-аналог с плоской магнитной системой и решением двухмерной электромагнитной задачи. В качестве такого аналога принят вентильный электродвигатель с тангенциальной магнитной системой. На этом аналоге происходят все настройки для решения трехмерной задачи. Окончательный анализ модели цифрового двойника происходит на реальной, настроенной на предварительных этапах трехмерной модели с подключенным электронным коммутатором.

6. Разработана система анализа теплового состояния ВДКП, которая разбивает термодинамическую задачу на этапы. На первом этапе создается динамическая модель, которая решает связанную электромагнитную и тепловую задачу. На втором этапе оценивается перегрев обмотки, железа якоря и постоянных магнитов по методу эквивалентных тепловых схем замещения при уже установившихся потерях. На третьем этапе осуществляется уточненный анализ на основе метода конечных элементов, который учитывает точное значение потерь и реальное движение тепловых потоков к поверхностям схода тепла.

7. Разработана трехмерная твердотельная модель ВДКП, которая является основой для комплекта конструкторско-технологической документации по производству реального образца. Для проверки собираемости и технологичности конструкции изготовлена масштабная модель по технологии 3D принтера, которая подтвердила принятые конструкторские и технологические решения.

8. На основе проведенных исследований создана система проектирования мощных крупногабаритных ВДКП. Система позволяет, начиная от технического задания, определить оптимальную геометрию по заданным критериям и провести подробный анализ электромагнитного и теплового состояния на основе современных САЕ систем.

В диссертационном исследовании поднята проблема разработки мощных габаритных электродвигателей с высококоэрцитивными постоянными магнитами. В работе решен ряд проблем для вентильного двигателя с когтеобразными полюсами.

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

Дальнейшее направление данного исследования следует развивать для электрических двигателей других типов и других конструктивных исполнений, в частности для крупногабаритных двигателей других конструкций можно применить разработанный в диссертации метод многоуровневой оптимизации. Возможно развитие подхода решения связанной электромагнитной и термодинамической задачи для других конструктивных модификаций.

Так же следует уделить особое внимание разработке конструкторских систем для сквозных безбумажных технологий, которые являются перспективой электромашиностроения.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Альтшуллер, Г. С. Введение в теорию решения изобретательских задач/ Г. С. Альтшуллер. - Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1986. - 235 с.
2. Альтшуллер, И. Б. Расчет электромагнитных полей в электрических машинах/ И. Б. Альтшуллер. - М.: Энергия, 1980. - 230 с.
3. Андреева, Е. Г. Исследование переменного магнитного поля провода с током с помощью программы ANSYS / Е. Г. Андреева, Д. В. Колмогоров, С. П. Шамец // Сборник трудов Пятой конференции пользователей программного обеспечения CAD\_FEM GmbH, 21-22 апреля 2005 г. - М., 2005. - С. 358-362.
4. Апсит, В. В. Классификация бесконтактных синхронных машин. Доклад на научно-технической конференции по бесконтактным электрическим машинам/ В. В. Апсит. - Рига: Изд-во АН ЛатвССР, 1961. – 27 с.
5. Балагуров, В. А. Электрические машины с постоянными магнитами / В. А. Балагуров, Ф. Ф. Галтеев, А. Н. Ларионов. - М.: Энергия, 1964. – 480 с.
6. Басов, К. А. ANSYS: справочник пользователя/К. А. Басов. – М.: ДМК Пресс, 2005.-640 с.: ил.
7. Басов, К. А. Графический интерфейс комплекса ANSYS / К. А. Басов. – М.: ДМК Пресс, 2006. – 248 с.: ил.
8. Бертинов, А. И. Авиационные электрические генераторы / А. И. Бертинов. - М.: Оборонгиз, 1959. – 594 с.
9. Бертинов, А. И. Электрические машины авиационной автоматики / А. И. Бертинов. - М.: Оборонгиз, 1961. – 428 с.
10. Беседин, И. М. Основные направления совершенствования моментного электродвигателя на базе магнитоэлектрической машины постоянного тока/ И. М. Беседин, С. А. Грузков, А. В. Михеев // Труды / Моск. энерг. ин-т(МЭИ). – М.,1981. – Вып.523.Электромеханические системы с постоянными магнитами.

11. Беспалов, В. Я. Асинхронные машины для динамических режимов работы: (вопросы теории, математического моделирования и разработки) : дис. док. тех. наук. 05.09.01 / В. Я. Беспалов. - М., 1992. – 317 с.
12. Беспалов, В. Я. Электрические машины / В. Я. Беспалов, Н. Ф. Котеленец. - М.: Академия, 2006. - 320 с.
13. Беспалов, В.Я. Основные направления совершенствования конструкций и технологии производства асинхронных двигателей / В.Я. Беспалов, Л.Н. Макаров // Сборник материалов V Международной (16 Всесоюзной) конференции по автоматизированному электроприводу: 18-21 сентября 2007 г. Санкт-Петербург. -2007.-С. 32-36.
14. Беспалов, В.Я. Перспективы создания отечественных электродвигателей нового поколения для частотно-регулируемого электропривода / В.Я. Беспалов // Автоматизированный электропривод в XXI веке: пути развития: тр. IV Международной (XV Всероссийской) конф. по автоматизированному электроприводу (АЭП-2004, Магнитогорск, 14-17 сент. 2004 г.). - Магнитогорск, 2004. - Ч. 1. -С. 24-31.
15. Беспалов, В.Я. Электрические двигатели в XXI веке / В.Я. Беспалов // Тр. III Международной (XIV Всероссийской) науч.-техн. конф. по автоматизированному электроприводу "ЭАП-2001" / под. ред. С.В. Хватова. - Н. Новгород: Вектор-ТиС, 2001. - С. 17- 19.
16. Беспалов, В.Я. Электрические машины. Учебное пособие для студентов высших учебных заведений / В.Я. Беспалов, Н.Ф. Котеленец. - М.: Издательский центр "Академия", 2006. - 320 с.
17. Бордецкий, А. Б. Пакет программ РОМАХ поиска глобального экстремума функции в условиях большой размерности / А. Б. Бордецкий, Л. С. Казаринов, Г. А. Поллак // Алгоритмы и программы : сб. науч. тр.- М.: ВНИИЦ, 1980. - № 4(36). - С. 33.
18. Бородулин, Ю. Б. Системный анализ как метод оптимального проектирования сложных объектов/ Ю. Б. Бородулин, В. А. Гусев, Е. П. Тюрин //

Автоматизация проектирования в электротехнике и энергетике: межвуз. сб. науч. тр./ Иван. энерг. ин-т. - Иваново, 1978.- С.45-48.

19. Брахман Т. Р. Многокритериальность и выбор альтернативы в технике. — М.: Радио и связь, 1984. - 287 с.

20. Бродовский, В.Н. Приводы с частотно-токовым управлением / В.Н. Бродовский, Е.С. Иванов. - М.: Энергия, 1974. - 168 с.

21. Бычков, М.Г. Анализ вентильно-индукторного электропривода с учётом локального насыщения магнитной системы // Электричество. - 1998. - №6. - С. 50-53.

22. Бычков, М.Г. Основы теории, управление и проектирование вентильно-индукторного электропривода: дис. - докт. техн. наук / М.Г. Бычков. - М., 1999. -372 с.

23. Буль, О.Б. Точность расчета осесимметричной и трехмерной магнитных систем с помощью ANSYS // Сб. трудов Шестой конференции пользователей программного обеспечения CAD\_FEM GmbH (20-21 апреля 2006 г.) - М., 2006. - С. 364-377.

24. Ваганов, М. А. Оптимальное соотношение параметров в малых двигателях постоянного тока: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.09.01/ М. А. Ваганов. - Л., 1972. - 14 с.

25. Вильданов К.Я. Торцевые асинхронные электродвигатели интегрального исполнения: дис. докт. техн. наук. 05.09.01 / К.Я. Вильданов. – М., 2000.-453 с.

26. Вольдек, А. И. Исследование магнитного поля в воздушном зазоре явнополюсных синхронных машин методом гармонических проводимостей // Электричество. – 1966. - № 7. - С. 46—52.

27. Гамидов, Р. Г. О принятии решения в задачах многокритериальной оптимизации / Р. Г. Гамидов, М. Ш. Фабер // Изв. АН Азерб. ССР. Сер.: Физ. и мат. науки. – 1978. - № 3.

28. Ганджа, С.А. Выбор оптимальной конструкции электродвигателя привода пыльгерстана для технологии изготовления бесшовных труб / С.А. Ганджа, Б.И. Косимов, Д.С. Аминов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2019. – Т. 19, № 1. – С. 5–17. DOI: 10.14529/power190101

29. Ганджа, С.А. Сравнительный анализ электродвигателей привода пыльгерстана для технологии изготовления бесшовных труб. Выбор оптимальной конструкции / С.А. Ганджа, Б.И. Косимов, Д.С. Аминов, Р.Р. Ниматов // Вестник ПНИПУ «Электротехника, информационные технологии, системы управления». –2019. № 30, – С. 79–101

30. Ганджа, С.А. Разработка инженерной методики расчета магнитных систем с постоянными магнитами на основе метода конечных элементов / С.А. Ганджа, Д.С. Аминов, Б.И. Косимов, Р.Р. Ниматов // Вестник ПНИПУ «Электротехника, информационные технологии, системы управления». –2019. № 29, – С. 58–74

31. Ганджа, С.А. Разработка методики анализа вентильного двигателя постоянного тока с когтеобразными полюсами большой мощности, предназначенного для привода пыльгерстана по производству бесшовных труб / С.А. Ганджа, Б.И. Косимов, Д.С. Аминов // Вестник ПНИПУ «Электротехника, информационные технологии, системы управления». –2019. № 31, – С. 38–57

32. Ганджа, С.А. Применение водопогружного гидрогенератора комбинированного возбуждения в качестве альтернативного источника энергии для малых и средних рек / С.А. Ганджа, Д.С. Аминов, Б.И. Косимов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2019. – Т. 19, № 4. – С. 102–111. DOI: 10.14529 / power190412

33. Ганджа, С. А. Анализ магнитного поля стартер-генератора комбинированного возбуждения // Электромеханические и электромагнитные преобразователи энергии и управляемые электромеханические системы: тр. III Междунар. науч.-техн. конф., Екатеринбург, 27-29 сентября 2007 г. / Урал. гос. техн. ун-т-УПИ. - Екатеринбург, 2007. - С.73-76.

34. Ганджа, С. А. Генератор для автономных источников питания// Вестн. Юж.-Урал. гос. ун-та. Сер. «Энергетика». - 2005. - Вып.6, № 9.- С.100-102.
35. Ганджа, С. А. Дизель-стартер-генераторная установка с высокими массоэнергетическими показателями ДСГУ8-П/28.5-2-М1 // Инновационный потенциал. Челябинская область : кат./ М-во экон. развития Челяб. обл.- 2008. – С.30.
36. Ганджа, С. А. Математическая модель вентильного многосекционного моментного двигателя на основе агрегированных переменных // Исследование автоматизированных электроприводов, электрических машин и вентильных преобразователей: темат. сб. науч. тр. / Челяб. политехн. ин-т. - Челябинск, 1984.-С. 8-13.
37. Ганджа, С. А. Многоуровневая оптимизация вентильных электрических машин постоянного тока с аксиальным воздушным зазором (ВМАЗ) // XXV Российская школа по проблемам науки и технологий, посвященная 60-летию Победы (г. Миасс, 21-23 июня 2005 г.) : тез. докл./ Межрегион. совет по науке и технол. - Миасс, 2005. - С. 57.
38. Ганджа, С. А. Моделирование вентильного электродвигателя постоянного тока с электромагнитной редукцией // Сб. трудов Шестой конференции пользователей программного обеспечения CAD\_FEM GmbH (20-21 апреля 2006 г.) - М., 2006. - С. 358-360.
39. Ганджа, С. А. Некоторые проблемы разработки САПР вентильных машин с аксиальным зазором // XXV Российская школа «Итоги диссертационных исследований»: сб. науч. тр./ Рос. акад. наук. - М., 2005. - С. 386-393.
40. Ганджа, С. А. Оптимальное проектирование электроприводов на базе вентильных электрических машин с аксиальным зазором // Вестник Южно-Урал. гос. ун-та. Серия «Энергетика». –2009.- Вып.12, №34. - С.68-72.

41. Ганджа, С. А. Оптимизация параметров вентильного моментного двигателя постоянного тока: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.09.01/С. А. Ганджа.- Свердловск, 1985.- 22 с.

42. Ганджа, С. А. Оптимизация параметров вентильных электрических машин постоянного тока с аксиальным воздушным зазором // Состояние и перспективы развития электротехнологии (XII Бенардосовские чтения): тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф., 1-3 июня 2005 г./ Иван. гос. энерг. ун-т. - Иваново, 2005. – Т.2. - С. 82.

43. Ганджа, С. А. Особенности построения системы автоматизированного проектирования вентильных машин с аксиальным зазором // Вестн. Юж.-Урал. гос. ун-та. Сер. «Энергетика». - 2007. - Вып.8, № 20. - С.19-23.

44. Ганджа, С. А. Подсистема оптимизации вентильного многосекционного моментного двигателя // Исследование автоматизированных электроприводов, электрических машин и вентильных преобразователей: темат. сб. науч. тр. / Челяб. политехн. ин-т. - Челябинск, 1984.-С. 13-21.

45. Ганджа, С. А. Применение программного комплекса Ansys для анализа вентильных электрических машин постоянного тока с аксиальным зазором/ С. А. Ганджа, М. С. Свиридов, А. А. Бедкер // Сб. трудов Шестой конференции пользователей программного обеспечения CAD\_FEM GmbH (20-21 апреля 2006 г.) - М., 2006. - С. 361-363.

46. Ганджа, С. А. Разработка программного комплекса многоуровневой оптимизации вентильных машин с аксиальным зазором// ЭЛМАШ-2009 : Электроэнергетика и электротехника. Проблемы и перспективы: тр. симпозиума: в 2 т. / VII Междунар. науч.-техн. конф., Москва, 22-25 сентября 2009 г. - М., 2009. - Т.1. - С. 164-167.

47. Ганджа, С. А. Разработка системы автоматизированного проектирования вентильных машин с аксиальным зазором // XXV Российская

школа «Итоги диссертационных исследований»: сб. науч. тр./ Рос. акад. наук. - М., 2005. - С. 378-385.

48. Ганджа, С. А. Расчет магнитного поля в вентильных электрических машинах постоянного тока с аксиальным зазором // Электромеханические и электромагнитные преобразователи энергии и управляемые электромеханические системы: тр. III Междунар. науч.-техн. конф., Екатеринбург, 27-29 сентября 2007 г. / Урал. гос. техн. ун-т-УПИ. - Екатеринбург, 2007. - С.89-91.

49. Ганджа, С. А. Расчет магнитного поля постоянных магнитов стартер-генератора для автономных источников электроснабжения / С. А. Ганджа, А. В. Ерлышева // ЭЛМАШ-2006: Перспективы и тенденции развития электротехнического оборудования: тр. симпозиума: в 2 т. / Шестой междунар. симпозиум, Москва, 2-6 октября 2006 г. - М., 2006. – Т.2. - С. 111-115.

50. Ганджа, С. А. Стартер-генератор для автономных источников электроснабжения / С. А., Ганджа, А. В. Ерлышева // ЭЛМАШ-2006: Перспективы и тенденции развития электротехнического оборудования : тр. симпозиума: в 2 т./ Шестой междунар. симпозиум, Москва, 2-6 октября 2006 г. - М., 2006. - Т.1.- С. 76-80.

51. Геминтерн, В. И. Методы оптимального проектирования/ В. И. Геминтерн, Б. М. Каган. - М.: Энергия, 1980.

52. Герасимов Е. Б. Интерактивная система конечно-элементного моделирования двумерных магнитных и тепловых полей : информ. л. № 141-93 / Е. Б. Герасимов, Ю. Б. Казаков, А. И. Тихонов. - Иваново, ЦНТИ. 1993.- 4 с.

53. Герасимов, Е. Б. Сопряженное моделирование стационарных физических полей методом конечных элементов/ Е. Б. Герасимов, Ю. Б. Казаков, А.И.Тихонов // Электротехника. - 1995. - № 2. - С. 35-37.

54. Геча, В. Я. Расчет характеристик магнитоэлектрических машин методом конечных суперэлементов/ В. Я. Геча, А. Б. Захаренко // ЭЛМАШ-2009 : Электроэнергетика и электротехника. Проблемы и перспективы: тр.

симпозиума: в 2 т. / VII Междунар. науч.-техн. конф., Москва, 22-25 сентября 2009 г. - М., 2009. - Т.1. - С.119-123.

55. Гороховик, В. В. К проблеме векторной оптимизации // Изв. АН СССР. Сер.: Кибернетика. - 1972. - № 6.

56. Гращенко, В.Т. Некоторые вопросы оптимального проектирования управляемых бесконтактных двигателей постоянного тока // Вторая всесоюзная научно-техническая конференция по бесконтактным машинам постоянного тока: тез. докл. - М.,1975.

57. Григорьев, М.А. Вентильный электропривод с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения: монография / М.А. Григорьев; под ред. Ю.С. Усынина. - Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2010. - 159 с.

58. Григорьев, М.А. Предельные возможности электроприводов с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения / М.А. Григорьев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия "Энергетика". - 2009. - Вып. 12.-№34(167).-С. 51-55.

59. Григорьев, М.А. Удельные массогабаритные показатели электроприводов / М.А. Григорьев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия "Энергетика". - 2013. - Том 13. - №1. - С. 111 - 117.

60. Григорьев, М.А. Электропривод с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения/М.А. Григорьев //Изв. вузов. Электромеханика. - 2013. - № 4. - С. 32-36.

61. Гридин, В. М. Вопросы проектирования магнитоэлектрических двигателей постоянного тока / В. М. Гридин, В. К. Лозенко // Труды/Моск. энерг. ин-т (МЭИ). - М., 1972. - Вып. 139 : Постоянные магниты.

62. Гурин, Я. С. Проектирование машин постоянного тока/ Я. С. Гурин, М. Н. Курочкин. - М.—Л., Госэнергоиздат, 1961. - 351 с.

63. Динамо-машина в ее историческом развитии : документы и материалы/ под ред. акад. Миткевича В.Ф. - Л.: Изд-во АН СССР, 1934. – 560 с.

64. Дубенский, А. А. Проектирование оптимальных бесконтактных двигателей постоянного тока с повышенной равномерностью вращения / А. А. Дубенский, Т. В. Куликова, Н. И. Куликов // Вторая всесоюзная конференция по бесконтактным машинам постоянного тока : тез. докл. - М., 1975.

65. Дубенский, А. А. Проектирование бесконтактных двигателей постоянного тока с оптимальными динамическими характеристиками/ А.А.Дубенский, Т. В. Куликова // Вторая всесоюзная конференция по бесконтактным машинам постоянного тока : тез. докл.-М., 1975.

66. Дудкин, М.М. Динамические спектральные характеристики развертывающих преобразователей с широтно-импульсной модуляцией / М.М. Дудкин, Л.И. Цытович, О.Г. Брылина // Практическая силовая электроника. - 2012. - № 4 (48). -С. 49-55.

67. Дудкин, М.М. Однофазные обратимые преобразователи напряжения для улучшения качества электрической энергии в сетях ограниченной мощности / М.М. Дудкин // Практическая силовая электроника. - 2012. - № 2 (46). - С. 19 - 27.

68. Дьяков А.Ф. Пути развития Российской электроэнергетики и энергомашиностроения в современных условиях // ЭЛМАШ-2009 : Электроэнергетика и электротехника. Проблемы и перспективы: тр. симпозиума: в 2 т. / VII Междунар. науч.-техн. конф., Москва, 22-25 сентября 2009 г. - М., 2009. - Т.1. - С.1-3.

69. Евгеньев, Г.Б. Case-технология создания многоагентных САПР изделий машиностроения/ Евгеньев Г.Б. [и др.] // Труды Международных научно-технических конференций «Интеллектуальные системы» и «Интеллектуальные САПР». - Т. 2. -М.: Физматлит, 2003. - С. 41-46.

70. Ермолин, Н. Г. Электрические машины малой мощности/ Н. Г. Ермолин. - М.: Высш. шк., 1967. - 503 с.

71. Загрядцкий, В. И. Синхронный генератор торцевого исполнения / В. И. Загрядцкий, С. Ю.Свидченко // Электромеханические и электромагнитные

преобразователи энергии и управляемые электромеханические системы: труды III Междунар. науч.-техн. конф., Екатеринбург, 27-29 сентября 2007 г. /Урал. гос. техн. ун-т-УПИ. - Екатеринбург, 2007. - С. 92-95.

72. Захаренко, А. Б. Анализ магнитного поля и электродвижущей силы мотор-колеса / А. Б. Захаренко, А. Ф. Авдонин // Электротехника. - 2004. - №2. - С. 27-32.

73. Зильберман С.З. Организация блока оптимизатора по алгоритму Кифера в задачах оптимального проектирования электрических машин //Исследование автоматизированных электроприводов, электрических машин и вентильных преобразователей : сб. науч. трудов /Челяб. политехн. ин-т. - Челябинск, 1976. - №108.

74. Зильберман С.З. Разработка и исследование бесконтактных моментных двигателей постоянного тока : автореф. дис... канд. техн. наук : 05.09.01 / С.З. Зильберман. - Свердловск, 1978. – 14 с.

75. Иванов-Смоленский А. В. Электрические машины: в 2 т. Т. 2. / А. В. Иванов-Смоленский. — 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Изд-во МЭИ, 2005. - 528 с.

76. Иванов-Смоленский, А. В. Метод расчета магнитных полей с учетом трехмерной неоднородности сердечников электрических машин / А. В. Иванов-Смоленский, В. А. Кузнецов // Электричество. - 2005. - № 11. - С. 2—7.

77. Иванов-Смоленский, А.В. Электромагнитные силы и преобразование энергии в электромеханических машинах. В двух томах / А.В. Иванов-Смоленский. - 3-е изд., перераб. и доп. - М.: Изд-во МЭИ, 2006. - 652 с.

78. Иоффе А. Б. Тяговые электрические машины/ А. Б. Иоффе. - М.—Л.: Энергия, 1965. - 232 с.

79. Исследование герметичной синхронной машины дискового типа/ Муравлев О. П. [и др.] // Изв. вузов. Электромеханика. - 2006 - №3. - С. 23-25.

80. Исследование характеристик герметичного электродвигателя дискового типа / А. Л. Федянин, С. В. Леонов, О. П. Муравлев, А. В. Лялин // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях

Сибири : материалы Междунар. науч.-техн. конф. / Иркут. гос. техн. ун-т. - Иркутск, 2005. - С. 182-186.

81. Кавун, Ю. Ю. Новые типы синхронных электрических машин с постоянными магнитами/ Ю. Ю. Кавун, Л. К. Ковалев // Проектирование и изготовление аэрокосмических аппаратов / под ред. проф. Ю. Ю. Комарова. – М.: Изд-во МАИ, 2006.

82. Каган, В.Г. Электроприводы с предельным быстродействием для систем воспроизведения движений / В.Г. Каган. - М. : Энергия, 1975. - 241 с.

83. Казаков, Ю. Б. Комплексная автоматизированная система исследования двигателей постоянного тока / Ю. Б. Казаков, А. И. Тихонов // Электротехника. - 1995. - № 4.- С. 21-24.

84. Казаков, Ю. Б. Автоматизированное распределение обмоток статора неявнополюсных машин постоянного тока / Ю. Б. Казаков, А. И. Тихонов // Электротехника. - 1995. - № 8. – С. 8-11.

85. Казаков, Ю. Б. САПР машин постоянного тока на основе декларативных знаний с динамически формируемым алгоритмом расчета / Ю.Б. Казаков, А. И. Тихонов // Электротехника. - 1997. - № 4. - С. 30-32.

86. Казаков, Ю. Б. Конечно-элементное исследование магнитных систем машин постоянного тока с неявновыраженными полюсами / Ю. Б. Казаков, В. С. Мостейкис, А. И. Тихонов // Автоматизированный анализ физических процессов и проектирование в электромеханике: межвуз. сб. науч. трудов / Иван. гос. энерг. ун-т. -Иваново, 1990. - С. 33-37.

87. Казаков, Ю. Б. Численное моделирование и разработка конструкций электрических машин с учетом взаимного влияния физических полей: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.09.01/ Ю. Б. Казаков. - М., 2000. - 39с.

88. Казаков, Ю.Б. Оптимизационный конечно-элементный поиск эффективных конструкций машин постоянного тока / Ю. Б. Казаков, А. И. Тихонов // Моделирование и исследование устройств электромеханики: межвуз. сб. науч. трудов / Иван. гос. энерг. ун-т. - Иваново, 2001. – С. 43-47.

89. Казанский, В. М. Основы технологии торцевых электрических машин с распределенной обмоткой/ В. М. Казанский, Н. И. Пашков // Проблемы электротехники: тр. науч. конф. с междунар. участием/Новосиб. гос. техн. ун-т.– Новосибирск, 1993.- С. 63-68.

90. Калаев, В. Е. Актуальность и вопросы использования герметичных электрических машин/ В. Е. Калаев, С. В. Леонов // XI Международная конференция «Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты», Крым, Алушта, 18-23 сентября/Моск. ин-т электротехн. (МЭИ) – М., 2006. – Ч. 1. - С. 196.

91. Каплун, А. Б. ANSYS в руках инженера: Практическое руководство / А.Б. Каплун, Е.М. Морозов, М.А. Олферова. - М.: Едиториал УРСС, 2003. - 273 с.

92. Кобелев, А. С. Новые функции интеллектуальной САПР асинхронных электродвигателей версии «AED\_AIS 2.0» // ЭЛМАШ-2006 : Перспективы и тенденции развития электротехнического оборудования: тр. симпозиума: в 2 т. /Шестой междунар. симпозиум, Москва, 2-6 октября 2006 г. - М., 2006. – Т.2. - С. 43-49.

93. Кобелев, А. С. Агентно-ориентированное программирование как реализация фреймового представления знаний об электрической машине в интеллектуальных САПР // Электротехника. - 2005. - №5. - С. 8-14.

94. Кобелев, А. С. Организация расчетной подсистемы САПР АД на базе системы экспертного программирования SprutExpro // Изв. вузов. Электромеханика. - 2002. - №5. - С.16-21.

95. Кобелев, А. С. Автоматизированное проектирование низковольтных асинхронных двигателей с использованием интегрированных моделей электрических машин // Электричество. - 2004. - №2. - С. 31-38.

96. Кобелев, А. С. Развитие расчетной подсистемы интеллектуальной САПР АД // XI Международная конференция «Электромеханика,

электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты», Крым, Алушта, 18-23 сентября/Моск. ин-т электротехн. (МЭИ). – М., 2006.

97. Кобелев, А. С. Новые возможности прикладной электромашино-строительной САПР/ А. С. Кобелев, И. В. Родионова, С. В. Игнатов // «Информационные системы и технологии. Теория и практика»: сб. научн. тр. – Шахты: Изд. ЮРГУЭС, 2008. - С. 93-100.

98. Ковалев, Л. К. Синхронные электродвигатели с радиально-тангенциальными магнитами/ Л. К. Ковалев, Ю. Ю. Кавун, Д. С. Дежин. // Электричество. - 2007.- №11. – С. 16-23.

99. Козаченко, В.Ф. Перспективная микропроцессорная элементная база и опыт разработки современных систем управления электроприводами и силовыми преобразователями энергии / В.Ф. Козаченко // Известия ТулГУ. Технические науки. - 2010. - Вып. 3. - 4.2. - С. 14 - 28.

100. Козаченко, В.Ф. Перспективные типы тяговых электроприводов/ В.Ф. Козаченко, В.Н. Остриров, А.М. Русаков // Труды VII Международной (XVIII Всероссийской) научно-технической конференции по автоматизированному электроприводу: ФГБОУ ВПО ИГЭУ. - Иваново, 2012. - С. 16 - 21.

101. Козаченко, В.Ф. Создание высокопроизводительных встраиваемых микроконтроллерных систем управления для современного комплектного электропривода: дис. - докт. техн. наук / В.Ф. Козаченко. - М, 2007. - 326 с.

102. Коротаев, Э. И. Оптимизация проектирования и исследование индукторных генераторов с использованием АВМ: автореф. дис... канд. техн. наук : 05.09.01. - Свердловск, 1978. - 14 с.

103. Кондратьев, В. А. Статические и динамические силы электромагнитных механизмов/ В. А. Кондратьев, В. Л. Малинин // Транспорт: наука, техника, управление. - 2008. - №6. - С.24-26.

104. Копылов, И. П. Некоторые проблемы создания автоматизированных систем проектирования электрических машин // Всесоюзная конференция «Современные проблемы энергетики и электротехники»: тез. докл. - М., 1977.
105. Копылов И.П. Электрические машины / И. П. Копылов. — 5-е изд. - М.: Высш. шк., 2006. - 607 с.
106. Копылов, И. П. Космическая электромеханика/ И.П. Копылов.— 3-е изд. - М.: Высш. шк., 2005. -127 с.
107. Красненкер, А. С. Условия оптимальности по Парето // Сб. науч. трудов Воронеж. ун-та по прикл. вопросам.- Воронеж, 1972. -Вып.3.
108. Куприянов, А. Д. Автоматизированное проектирование электромеханических преобразователей с возбуждением от редкоземельных постоянных магнитов: автореф. дис... канд. техн. наук : 05.09.01/ А. Д. Куприянов. - М., 2004. - 17 с.
109. Курочка, А. Л. Критерии оптимальности якоря постоянного и пульсирующего тока /А. Л. Курочка, Б. Н. Данник // Электротехническая промышленность. Серия: Тяговое и подъемно-транспортное оборудование. - 1975. - Вып.5.
110. Курочка, А. Л. Синтез оптимальных машин постоянного и пульсирующего тока на основе агрегированных переменных // Изв. высш. учеб. заведений. Электротехника. – 1976. - № 6.
111. Курочка А. Л. Новые стратегии синтеза – основа автоматизации проектирования электрических машин // Автоматизация проектирования в электротехнике и энергетике: сб. науч. трудов. - Иваново, 1978.
112. Кучеров, С. Ю. Поисковое проектирование электромеханических устройств / С. Ю. Кучеров, А. И. Тихонов // Вестник науч.-пром. общества.-М. : «Алев-В», 2005. –Вып.9. –С.102-108.
113. Левитин, Е. С. Методы минимизации при наличии ограничений/ Е.С. Левитин, Б. Т. Поляк // Журнал вычислит. математики и мат. физики. -1966. – Вып. 8, №5. - С. 787-823.

114. Ледовский, А. Н. Алгоритм расчета одноименнополюсных индукторных генераторов / А. Н. Ледовский, А. М. Сугробов // Труды МЭИ . - 1975. - Вып. 258. – С. 71—79.

115. Лемешко, Б.Ю. Методы оптимизации: Конспект лекций / Б.Ю. Лемешко. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. - 126 с.

116. Лозенко, В. К. Исследование и расчет бесколлекторных магнитоэлектрических двигателей постоянного тока с трехфазными однополупериодными коммутаторами : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.09.01 / В. К. Лозенко. – М., 1968.

117. Любимов, Э. В. Оптимальное проектирование микродвигателей постоянного тока для салона автомобиля / Э. В. Любимов, Н. В. Шулаков, С. П. Гладышев // Электромеханические и электромагнитные преобразователи энергии и управляемые электромеханические системы: труды III Междунар. науч.-техн. конф., Екатеринбург, 27-29 сентября 2007 г. /Урал. гос. техн. ун-т УПИ. - Екатеринбург, 2007. - С. 67-72.

118. Любимов, Э. В. Системы автоматизированного проектирования электрических машин : учеб. пособие/ Э. В. Любимов / Перм. гос. тех. ун-т. - Пермь, 2001. - 186 с.

119. Любимов, Э. В. Компьютерные технологии для проектирования электрических машин малой мощности // V Международная конференция «Электромеханика, электротехнологии и электроматериаловедение», МКЭЭЭ-2003 (ICEEE-2003) : труды / Ин-т электротехники МЭИ (ТУ). – М., 2003. – Ч.1. - С. 490 -493.

120. Макаричев, Ю.А. Математическая модель синхронного генератора ветроэнергетической установки малой мощности / Макаричев Ю.А., Ануфриев А.С., Зубков Ю.В., Певчев В.П. Вестник Самарского государственного технического университета Серия «Технические науки» –№ 3(55) – 2017. С.66-74.

121. Макаричев, Ю.А. Оптимизация энергетических параметров синхронного генератора малой мощности./ Макаричев Ю.А., Овсянников В. Н., Зубков Ю. В., Ануфриев А.С. Вестник транспорта Поволжья. №3(69) -2018. С.13-19.

122. Макаричев, Ю.А. Критериальный анализ параметров генераторов малой мощности. /Макаричев Ю.А., Ануфриев А.С. Известия высших учебных заведений. Электромеханика. №2 (62), 2018. с.42-47.

123. Макаричев, Ю.А. Анализ систем запуска газотурбинного двигателя магистрального газоперекачивающего агрегата. ./ Ю.А. Макаричев, М.Н. Алимбеков А.С. Ануфриев. Ашировские чтения: Сб. трудов Международной научно-практической конференции. / Отв. редактор В.В. Живаева. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2017 – С. 682-686.

124. Морозов, В.А. Электрооборудование летательных аппаратов. Учебник для вузов. В 2-х томах. Том 2: Элементы и системы электропитания-приемники электрической энергии/ В.А. Морозов, В.И. Нагайцев, С.А. Грузков/ Моск. энерг. ин-т (МЭИ). - М., 2008. – 552с.

125. Новиков, А. М. Докторская диссертация?: пособие для докторантов и соискателей ученой степени доктора наук / А. М. Новиков,– 3-е изд. – М.: Изд-во «Эгвес», 2003. – 120 с.

126. Новиков, Н. Н. О постановке задачи оптимального проектирования явно полюсных синхронных двигателей / Н. Н. Новиков, В. Ф. Шутько // Автоматизация исследований и проектирования электрических машин и трансформаторов: межвуз. сб. науч. трудов. - Иваново, 1987. – С. 81-86.

127. Новиков, Н. Н. Математическая модель для анализа динамических режимов машинно-вентильных систем / Н. Н. Новиков, В. Ф. Шутько // Электротехника. - 1998. - № 8. – С. 35-38.

128. Ногин, В.Д. Критерии существования решений в конечномерной задаче многоцелевой оптимизации // Вестник ЛГУ. Сер.: Математика, механика, астрономия. – 1980. - №7. - С.27-32.

129. Опыт создания и перспективы применения многодисковых синхронных двигателей с аксиальным магнитным потоком / Е. Н. Андреев [и др.] // Электромеханические и электромагнитные преобразователи энергии и управляемые электромеханические системы: тр. III Междунар. науч.-техн. конф., Екатеринбург, 27-29 сентября 2007 г. / Урал. гос. техн. ун-т-УПИ. - Екатеринбург, 2007. - С. 21-26.

130. Особенности моделирования магнитных цепей индукторных машин/ Д.В. Исаков [и др.] // Электромеханические и электромагнитные преобразователи энергии и управляемые электромеханические системы: труды III Междунар. науч.-техн. конф., Екатеринбург, 27-29 сентября 2007 г. /Урал. гос. техн. ун-т-УПИ. - Екатеринбург, 2007. - С. 271-273.

131. Пат. 2030059 Российская Федерация, Н 02 К 5/04. Электродвигатель/ Ганджа С. А.; заявитель и патентообладатель С. А Ганджа. - № 5030007/07; заявл. 28.02.92; опубл. 27.02.95.

132. Пат. 2015606 Российская Федерация, МПК Н 02 К 5/22. Электродвигатель / Ганджа С.А.; заявитель и патентообладатель С. А. Ганджа. - № 5039128/07; заявл. 21.04.92; опубл. 30.06.94.

133. Пат. на полезную модель 56524 Российская Федерация, МПК F 16 Н1/00. Мотор-редуктор / Ганджа С. А., Федоров В. Б., Кулешов В. В., Смирнов В. А. - № 2006115854/22; заявл. 11.05.06; опубл.10.09.06.

134. Пашков, Н. И. Исследование и разработка новых конструкций и технологии изготовления торцевых асинхронных электродвигателей малой мощности применительно к массовому производству: дис. ... д-ра техн. наук: 05.09.01/ Н. И.Пашков - М., 2007. - 349 с.: ил. РГБ ОД, 71 08-5/94.

135. Перминов, Э. М. Опыт и перспективы развития возобновляемой энергетики в России // ЭЛМАШ-2009: Электроэнергетика и электротехника. Проблемы и перспективы: тр. симпозиума: в 2 т. / VII Междунар. науч.-техн. конф., Москва, 22-25 сентября 2009 г. - М., 2009. - Т.1. - С.17-27.

136. Пикунов, В. М. Расчет компонентов электронных микроволновых устройств с помощью программного комплекса ANSYS / В. М. Пикунов, К. А. Куров // Сборник трудов Пятой конференции пользователей программного обеспечения CAD\_FEM GmbH, 21-22 апреля 2005 г. - М., 2005. - С. 363-371.

137. Пластун, А. Т. Статор асинхронного двигателя малой мощности с кольцевыми обмотками / Пластун, А. Т. [и др.] // «Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты: XI-я Международная конференция, Украина, Крым, г. Алушта, 18-23 сентября 2006 г. – М., 2006. - Ч. 2. – С. 324-325.

138. Подиновский, В. В. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач / В. В. Подиновский, В. Д. Ногин. - М.: Наука, 1982.

139. Поляк, Б.Т. Введение в оптимизацию. - М.: Наука, 1983. - 384 с.

140. Полак, Э. Численные методы оптимизации / Э. Полак.– М.: Мир, 1974.– 376с.

141. Приступ, А. Г. Частотно-регулируемый торцевой асинхронный электродвигатель : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.09.01/А. Г. Приступ. - Новосибирск, 1990. - 16 с.

142. Программный комплекс моделирования электромагнитных процессов / А. Л. Федянин, С. В. Леонов, А. Г. Каранкевич, О. П. Муравлев // Оптимизация режимов работы электромеханических систем : межвуз. сб. науч. трудов / Красноярск : ИПЦ КГТУ, 2004. - С.127-132.

143. Проектирование электрических машин / И.П. Копылов, Б.К. Клоков, В. П. Морозкин, Б. Ф. Токарев. - 4-е изд. / под ред. И.П. Копылова. - М.: Высш. шк., 2005. – 767 с.

144. Пупырев, П. В. Упрощенная математическая модель машины переменного тока с кольцевыми обмотками / П. В. Пупырев, А. Г. Цимбулов, А. Т. Пластун // Электромеханические и электромагнитные преобразователи энергии и управляемые электромеханические системы: труды III Междунар.

науч.-техн. конф., Екатеринбург, 27-29 сентября 2007 г. /Урал. гос. техн. ун-т-УПИ. - Екатеринбург, 2007. - С.300-308.

145. Результаты разработки и исследования комплекса ВТСП электроэнергетического оборудования/ Е. Н. Андреев [и др.] // Симпозиум «Электротехника 2030», 29-31 мая 2007 г.: сб. тезисов.- М., 2007. – С. 70-72.

146. Рубцов, Д. В. Разработка конструкции торцевого ветрогенератора с использованием конечно-элементной модели магнитного поля / Д. В. Рубцов, А. И. Тихонов, В. П. Шишкин // Состояние и перспективы развития электротехнологии : тез. докл. / Междунар. науч.-техн. конф.- Иваново, 2005. - 88с.

147. Сандалов, В. М. Резервированные электроприводы на базе вентильных двигателей: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.09.03/В. М. Сандалов.- Челябинск, 2001.- 22 с.

148. Сарапулов, С. Ф. Физическая модель электромагнитного вращателя металлического расплава/ С. Ф. Сарапулов, А. А. Идиятулин, С. М. Фаткулин // Электромеханические и электромагнитные преобразователи энергии и управляемые электромеханические системы: труды III Междунар. науч.-техн. конф., Екатеринбург, 27-29 сентября 2007 г. /Урал. гос. техн. ун-т-УПИ. - Екатеринбург, 2007. - С.278-281.

149. Сарапулов, Ф.Н. Развитие математических моделей тепловых процессов в линейных асинхронных двигателях / Ф.Н. Сарапулов, В.В. Гоман // Электротехника. - 2009. - № 8. - С. 11 - 17.

150. Сарапулов, Ф.Н. Особенности моделирования линейных асинхронных двигателей с различными обмотками индуктора на основе детализированных схем замещения / Ф.Н. Сарапулов, С.В. Иваницкий, В.В. Гоман // Изв. вузов "Электромеханика". - 2009. - № 5. - С. 18

151. Сергеев, П. С. Проектирование электрических машин / П. С. Сергеев, Н. В. Виноградов, Ф. А Горяинов.- М. : Энергия, 1969. - 632 с.

152. Сидоров, О. Ю. Конечно-разностное моделирование осесимметричного индукторного устройства / О. Ю. Сидоров, В. А. Семенов, С.Ф. Сарапулов // Известия вузов. Электромеханика. - 2001 - №1. - С. 32-35.

153. Сидоров, О. Ю. Применение метода конечных элементов для исследования линейного асинхронного двигателя/ О. Ю. Сидоров, С. Ф. Сарапулов // Электромеханические и электромагнитные преобразователи энергии и управляемые электромеханические системы : сб. трудов / Третья междунар. науч.-техн. конф. - Екатеринбург, 2007 - С.274-276.

154. Совместный магнитно-тепловой конечно-элементный расчет неявнополюсного двигателя постоянного тока / Е.Б. Герасимов, Ю.Б. Казаков, А.И. Тихонов, Ю.Я. Щелыкалов // Электротехника. -1996.-№10. –С.39-42.

155. Статников, Р. Б. Решение многокритериальных задач проектирования машин на основе исследования пространства параметров // Многокритериальные задачи принятия решений. - М.: Машиностроение, 1978. - С. 148-155.

156. Столов, Л. И. Моментные двигатели с постоянными магнитами / Л. И. Столов, Б. Н. Зыков. – М.: Энергия, 1977 г. – 112 с.

157. Столов, Л. И. К теории бесконтактных моментных двигателей постоянного тока с неограниченным углом поворота ротора / Л. И. Столов, Ш. С. Галеев // Вторая всесоюзная научно-техническая конференция по бесконтактным машинам постоянного тока: тез. докл. - М.,1975.

158. Терзян, А. А. О методах поиска оптимальных размеров электрических машин с помощью ЭВМ / А. А. Терзян, А. О. Мамикоян // Электротехника. – 1969. - № 8. – С. 5-8.

159. Терзян, А. А. Поиск оптимальных размеров электрических машин вдоль поверхности ограничений / А. А. Терзян, А. О. Мамикоян // Электротехника. – 1973. - № 12. – С. 10-14.

160. Терзян, А. А. Автоматизированное проектирование электрических машин/ А. А. Терзян. - М: Энергоатомиздат, 1983. – 256 с.

161.

162. Технология численного исследования электрических машин с использованием библиотеки конечно-элементного моделирования магнитного поля / А. И. Тихонов, С. Ю. Кучеров, И. М. Лашманов, Д. В. Рубцов // Вестник Иван. гос. энерг. у-та. – 2006. – Вып. 3. - С. 5-8.

163. Тихонов, А. И. Разработка моделей и методов анализа и синтеза решений в автоматизированном проектировании электромеханических устройств : дис. ... д-ра техн. наук : 05.13.12 / Тихонов Андрей Ильич.- Иваново, 2007.- 280 с.: ил. РГБ ОД, 71 08-5/113.

164. Тихонов, А. И. Методы анализа и синтеза электромеханических устройств на основе компонентной интеграции моделей / Иван. гос. энерг. ун-т. - Иваново, 2006.-100с.

165. Тихонов, А. И. Метод декларативного проектирования электрических машин / А. И. Тихонов, С. Ю. Кучеров // Моделирование и исследование устройств электромеханики : межвуз. сб. науч. трудов / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2001. - С. 57-60.

166. Тихонов, А. И. Имитация работы машины постоянного тока в среде MatLab с использованием конечно-элементной модели магнитного поля / А. И. Тихонов, Е. Ю. Комков, И. М. Лашманов // Электротехника и прикладная математика : сб. трудов, посвященный 200-летию открытия электрической дуги В. В. Петровым и 160-летия со дня рождения Н. Н. Бенардоса / Иван. гос. энерг. ун-т. - Иваново, 2003.- С. 81-84.

167. Тихонов, А. И. Интегрированная исследовательская среда математического моделирования электромеханических устройств // Вестник науч.-пром. общества. - М.: «Алев-В», 2005. – Вып.9. – С.55-59.

168. Тищенко, О.А. Совместные технологии производства электрических вращающихся машин. // ЭЛМАШ-2009 : Электроэнергетика и электротехника. Проблемы и перспективы: тр. симпозиума: в 2 т. / VII Междунар. науч.-техн. конф., Москва, 22-25 сентября 2009 г. - М., 2009. - Т.1. - С.42-44.

169. Тубис, Я. Б. База знаний «Тепловентиляционный расчет асинхронных двигателей» как составная часть расчетной подсистемы интеллектуальной САПР АЭД / Я. Б. Тубис, А. Э. Кравчик, А. С. Кобелев // Электротехника. - 2004. - №7. - С. 2-8.

170. Усынин, Ю.С. Силовые цепи вентильных электроприводов с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, К.М. Виноградов. Электротехнические системы и комплексы: Межвуз. сб. науч. тр. - Магнитогорск: МГТУ, 2004. - вып. 8. С. 13-17.

171. Усынин, Ю.С. Частотные характеристики канала регулирования момента в синхронных электроприводах / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, А.Н. Шишков// Электричество. - 2012. - № 4. - С. 54 - 59.

172. Усынин, Ю.С. Электроприводы и генераторы с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, К.М. Виноградов // Электричество. - 2007. - №3. - С.21 - 26.

173. Уайлд, Д. Д. Методы поиска экстремума : [пер с англ.]. - М.: Наука, 1967. – 268 с.

174. Федоров, А. Г. Вентильно-индукторные электродвигатели общепромышленного применения – оптимальное проектирование : свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2003611806 от 29.07.2003 г.

175. Федянин, А. Л. Анализ применения дисковой машины с магнитной связью двух роторов в составе оборудования ядерно-химической отрасли / А. Л. Федянин, С. В. Леонов, О. П. Муравлев // Современные техника и технологии : материалы XIII Междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных Томск, 26-30 марта 2007 г. / Томский политехн. ун-т. - Томск, 2007. - С. 346-347.

176. Федянин, А. Л. Герметичный синхронный двигатель для химического производства : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.09.01/ А. Л. Федянин. - Томск, 2007. – 20 с.

177. Федянин, А. Л. Информационные технологии в моделировании электромеханических систем / А. Л. Федянин, С. В. Леонов // Наука. Технологии. Инновации : материалы всерос. науч. конф. молодых ученых, Новосибирск, 8-11 декабря 2005 г. / Новосиб. гос. техн. ун-т. - Новосибирск, 2006. – Т. 1. -С. 258-259.

178. Федянин, А. Л. Исследование синхронного двигателя дискового типа со смещением полюсов / А. Л. Федянин, А. В. Лялин, С. В. Леонов // Современные техника и технологии: материалы XII Междунар. науч.-практ. конф. студентов и молодых ученых, Томск, 27-31 марта 2006 г. / Том. политехн. ун-т. - Томск, 2006. - С. 297-300.

179. Федянин, А. Л. Программный комплекс моделирования электромеханических устройств / А. Л. Федянин, С. В. Леонов, О. П. Муравлев // Электромеханические преобразователи энергии: материалы междунар. науч.-техн. конф. / Том. политехн. ун-т. – Томск, 2005. - С.163-165.

180. Холодная прокатка труб / З.А. Кофф, П.М. Соловейчик, В.А. Алешин, М.А. Гриншпун. - Свердловск, 1962. - 432 с.

181. Щелыкалов, Ю. Я. О применении численных методов для расчета физических полей // Теория и расчеты электрических машин и аппаратов : межвуз. сб. науч. трудов / Иван. гос. ун-т Иван. энерг. ин-т . - Иваново, 1978.

182. Электромагнитные силы, расчет и моделирование магнитных полей : отчет о НИР / Новосиб. гос. техн. ун-т ; рук. Нейман В.Ю.; исполн.: Евреинов Д. М. [и др.]. - Новосибирск, 2009. - 81 с. - № ГР 0120.0 853891.

183. Якорь машины переменного тока с кольцевой обмоткой /А. Т. Пластун, П. В. Пупырев, А. В. Мельчанов, Д. Г.Киселев// ЭЛМАШ-2006 : Перспективы и тенденции развития электротехнического оборудования: тр. симпозиума: в 2 т. /Шестой междунар. симпозиум, Москва, 2-6 октября 2006 г. - М., 2006. – Т.2. - С.158-163.

184. Якунин, А. Н. Проблемы адаптации конечно-элементных сеток в ANSYS и практические приложения адаптивных сеток / А. Н. Якунин, А. Н. Цой

// Сб. трудов Шестой конференции пользователей программного обеспечения CAD\_FEM GmbH (20-21 апреля 2006 г.) - М., 2006. - С. 351-357.

185. ANSYS Manual. Revision 6.0. ANSYS Inc/2002.-2567 p.

186. Arnold E. Ober die unipolare Induktion und Wechselstrommaschinen mit ruhenden Wicklungen (Vortrag). — Elektrotechn. Ztschr., 1895, Bd 10, S. 136—140.

187. Bin Wu. High-Power Converters and AC Drives/ Bin Wu// IEEE Press - 2006.-317 p.

188. Corbett,A, and Mohamad,MT: "The disc armature dc motor and its applications", IEE Conf. Pub. No.136, Small Electrical Machines, 1976. pp.59-62.

189. Cingoski V., Murakawa R., Kaneda K. and Yamashita H. Automatic mesh generation in finite element analysis using dynamic bubble system. // Journal of Applied Physics, 1997, Vol.81, No.8, Part 2, pp.4085-4087.

190. Eastham J. F., Balchin M. J., Betzer T., Lai H. C., and S. Gair, “Disc Motor with Reduced Unsprung Mass for Direct EV Wheel Drive,” pp. 569–573 in Proceedings of the Conference ISIE’95, Athens, Greece, 1995.

191. Gandzha, S. **Kosimov, B.** Aminov, D. Application of the Ansys Electronics Desktop Software Package for Analysis of Claw-Pole Synchronous Motor. Machines 2019, 7, 65.

192. Gandzha, S. Aminov, D. Kiessh I., **Kosimov, B.** Application of Digital Twins Technology for Analysis of Brushless Electric Machines with Axial Magnetic Flux // В сборнике: Proceedings - 2018 Global Smart Industry Conference, GloSIC – 2018, – 2018. – С. 8570132.

193. Gandzha, S. Aminov, D. **Kosimov, B.** Design of Brushless Electric Machine with Axial Magnetic Flux Based on the Use of Nomograms // В сборнике: Proceedings - 2018 International Ural Conference on Green Energy, – UralCon 2018, – 2018. – С.282-287.

194. Gandzha, S. Aminov, D. **Kosimov, B.** Development of engineering method for calculation of magnetic systems for brushless motors based on finite

element method // В сборнике: International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM – 2019. – 2019, – С. 8742976.

195. Gandzha, S. **Kosimov, B.** Aminov, D. Selecting optimal design of electric motor of pilgrim mill drive for manufacturing techniques seamless pipe // В сборнике: 44 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2019 - Proceedings – 2019. – С. 8742941.

196. Gandzha, S. **Kosimov, B.** Aminov, D. Development of System of Multi-level Optimization for Brushless Direct Current Electric Machines // В сборнике: Proceedings - 2019 International Ural Conference on Green Energy, – UralCon 2019, – 2019. – С. 8877650.

197. Gandzha, S. **Kosimov, B.** Aminov, D. Development of Analysis Methods for Claw-Pole Synchronous Motor of the Pilger Mill for Seamless Pipes Manufacturing // В сборнике: 2019 IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research &Practice (PEAMI)

198. Gandzha, S. Aminov, D. **Kosimov, B.** Application of the Combined Excitation Submersible Hydrogenerator as an Alternative Energy Source for Small and Medium Rivers // В сборнике: 2019 IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research &Practice (PEAMI)

199. Gandzha, S. Aminov, D. **Kosimov, B.** Nimatov, R. Davlatov, A. Mahmudov, A. Development of a concept of an energy-efficient house for an environmentally friendly settlement in the South Ural // В сборнике: International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering (EECE-2019)

200. George P.L. Meshing: Construction, Optimization and Adaptation. // Proceeding of 8 th International Roundtable. South Lake Tahoe. CA, USA, 1999, pp. 133-144.

201. Chalmers, BJ, Spooner, E, Honorati, O, Crescimbin, F, and Caricchi, F: "Compact permanent-magnet machines", Electric Machines and Power Systems, 25,6,1997, pp.635-648.

202. Y. Chen, and P. Pillay, "Axial-flux PM wind generator with a soft magnetic composite core", Proc. of IEEE-IAS'05, Hong-Kong, Vol. 1, pp. 231-237, Oct. 2005.
203. Law, D. Design and Performance of Field Regulated Reluctance Machine /D Law, A. Chertok, T. Lipo // IEEE Transactions on Industry Applications - 1998. - Vol. 30.-№5.-P. 1185- 1192.
204. Law, J. Magnetic Circuit Modeling of the Field Regulated Reluctance Machine, Part I: Model Development / J. Law, T. Busch, T. Lipo // IEEE Transaction on Energy Conversion. - 2000. - №1. - Vol. 11. - P. 49 - 56.
205. Law, J. Magnetic Circuit Modeling of the Field Regulated Reluctance Machine, Part II: Saturation Modeling and Results / J. Law, T. Busch, T. Lipo // IEEE Transaction on Energy Conversion - 2000. - №1. - Vol. 11. - P. 56 - 62.
206. Lipo, T. Advanced Motor Technologies: Converter Fed Machines / T. Lipo // Transactions on energy conversion - 1998. - P. 204 - 222.
207. Madani S.M., Lipo T.A., Nino C.E., and Lugo D., "A New Trapezoidal Shaped-Pole Permanent Magnet Machine", Proc. of IEEE-IEMDC'05,pp. 1715-1719, San Antonio (USA), May 2005.
208. Marcuin D.L. and Gaither A. Unstructured Surface Grid Generation Using Global Mapping and Physical Space Approximation. // Proceeding of 8 th International Roundtable. South Lake Tahoe. CA, USA, 1999, pp. 37-46.
209. Kilbride E. NAFEMS. The Standard NAFEMS Benchmarks. Rev. No.TSNB. National engineering Laboratory. Glasgow, UK. August, 1989.
210. Profumo F., Zhang Z., and Tenconi A., "Axial Flux Machines Drivers: A New Viable Solution for Electric Cars," pp. 39–45 in IEEE Transactions on Industrial Electronics, 44, No. 1, February 1997.
211. Satoh H., Akutsu S., Miyamura T., and Shinoki H., "Development of Traction Motor for Fuel Cell Vehicle," SAE Technical Paper Series (Paper No. 2004-01-0567), reprinted from Advanced Hybrid Vehicle Powertrains 2004 (SP-1833).

212. Satoh H., Akutsu S., Miyamura T., and Shinoki H., "Development of Traction Motor for Fuel Cell Vehicle," SAE Technical Paper Series (Paper No. 2004-01-0567), reprinted from Advanced Hybrid Vehicle Powertrains 2004 (SP-1833).
213. Sitapati K. and Krishnan R., "Performance Comparisons of Radial and Axial Field, Permanent Magnet, Brushless Machines," IEEE Transactions on Industry Applications, 37, No. 5, September/October 2001.
214. Toliat H. Sensorless Operation of Permanent Magnet AC (PMA) motors with Modified Stator Windings/ Toliat H., Rahman K., Shet D. // IEEE Transaction on Energy Conversion.- Dec. 1999. - Vol. 14. - P. 1004 - 1010.
215. Toliat, H. Sensorless Operation of Permanent Magnet AC (PMA) motors with Modified Stator Windings / H. Toliat, K. Rahman, D. Shet // IEEE Transaction on Energy Conversion.- Dec. 1999. - Vol. 14. - P. 1004 - 1010.
216. Toliyat H. A Five-Phase Reluctance Motor with High Specific Torque / Toliyat H., Xu L., Lipo T.A. // IEEE Transactions on Industry Applications. - 1992. - Vol. 28. - №3. - P. 559-667.
217. Toliyat H. Analysis and Simulation of Five-Phase Variable-Speed Induction Motor Drives Under Asymmetrical Connections // IEEE Transactions on Power Electronics. - 1998. - Vol. 13. - №4.- P. 748 - 756.
218. Toliyat, H. A DSP-Based Vector Control of Five-Phase Synchronous Reluctance Motor/ H.Toliyat, R. Shi, H. Xu // 0-7803-6404-X/00/\$10.00 (C) 2000. P. 1- 7.
219. Toliyat, H. Analysis and Simulation of Five-Phase Synchronous Reluctance Machines Including Third Harmonic of Airgap MMF / H. Toliyat // IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, VOL. 34, NO. 2, MARCH/APRIL 1998. P. 332-339.
220. Toliyat, H. Simulation and Detection of Dynamic Air-Gap Eccentricity in Salient-Pole Synchronous Machines / H. Toliat, N. Al-Nuaim // IEEE Transactions on Industry Applications. - 1999. - Vol. 35. - №1. - P. 86-93.

221. Vagati A., Franceschini G., Marongiu I., Troglia G.P. Design Criteria of Performance Synchronous Reluctance Motors.// IEEE-IAS Annual Meeting Houston (USA), October 1992.

222. Vagati, A. Advanced Motor Technologies: Synchronous Motors and Drives / A. Vagati // IEEE Transactions on Energy Conversion - 1998. - P. 223 - 227.

223. Weh, H. On the Development of Inverter Fed Reluctance Machines for High Power Densities and High Output / H. Weh // ETZ Archiv, Bd. 6, 1984. - P. 135 - 144.

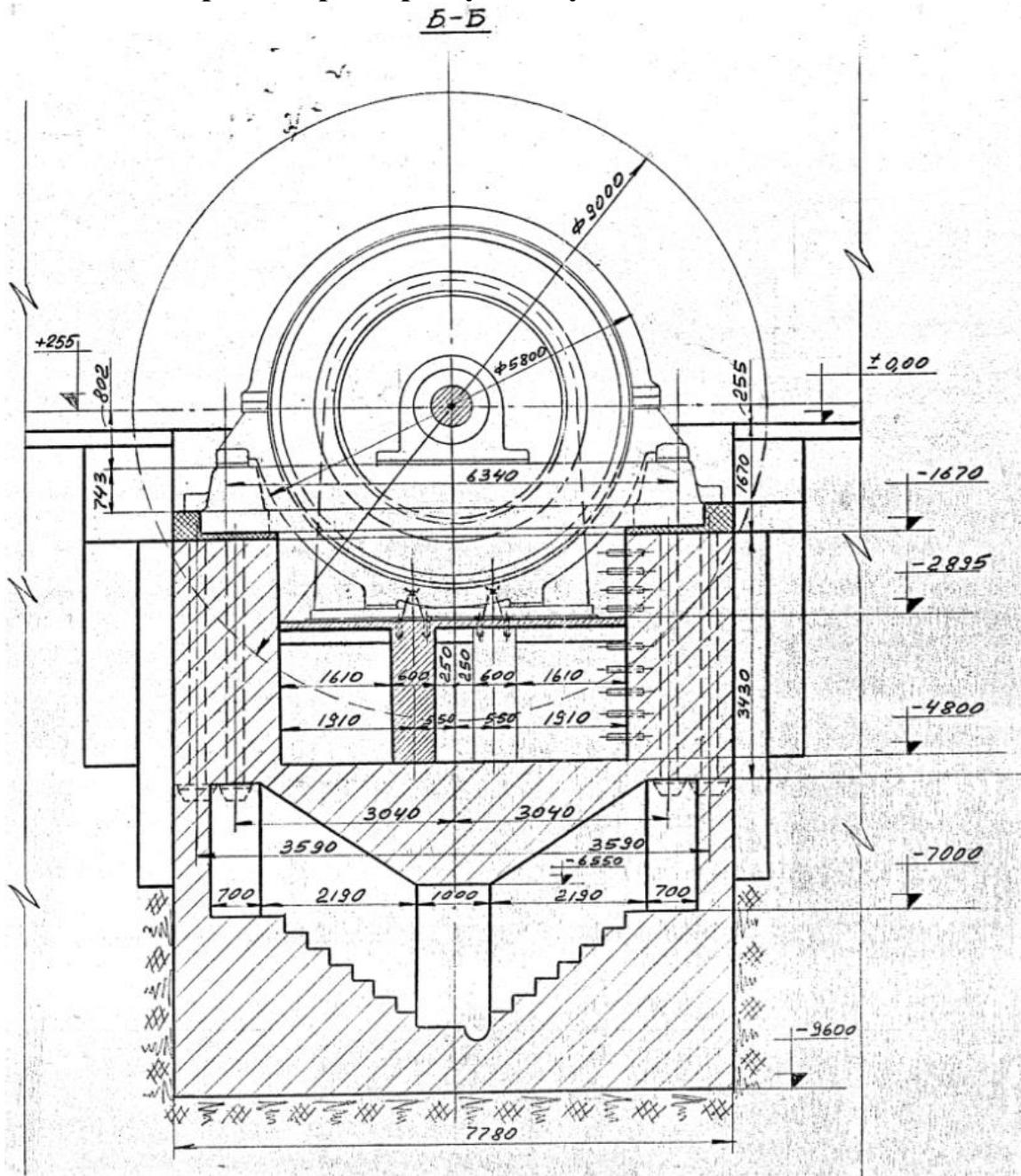
224. Weight and Dimensional Parameters of a Power Drive for Electrical Vehicle / U.S. Usinin, M.A. Grigoriev, K.M. Vinogradov// Powertrains, Fuels and Lubricants Meeting, Florence, ITALY. 09SFL-0251, Powertrains, Fuels and Lubricants Meeting, SFL 2009; Florence; Italy; 15 June 2009 through 15 June 2009; Code 90682.

225. Woolmer, T, and M. McCulloch, "Axial flux Permanent Magnet Machines: A new topology for high performance applications", Hybrid Conference, Warwick, UK December 2006.

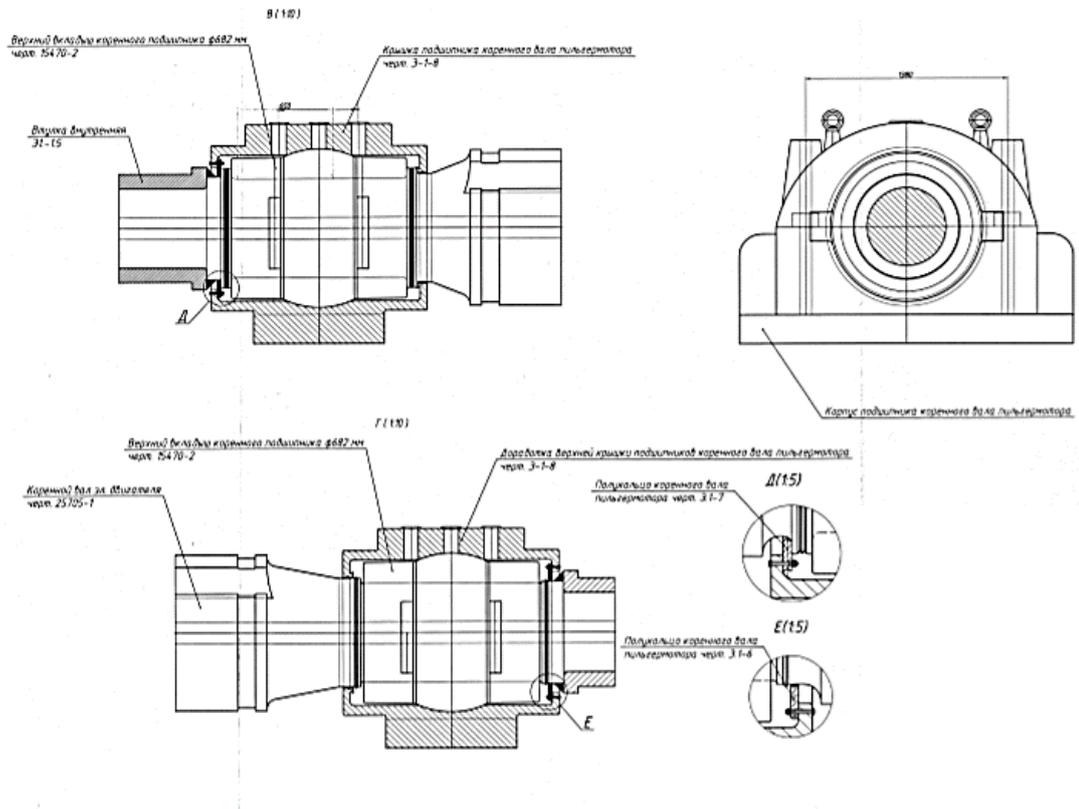
## Приложение А. Параметры электродвигателя пыльгерстана фирмы Siemens

№ п/п	Наименование параметра	Значение параметра	Примечание
1	2	3	4
	Производитель	Siemens-Schuckert	
2	Год выпуска	1928	
3	Заводской номер	2002069	
4	Мощность, кВт	2 750	
5	Напряжение якоря, В	700	
6	Ток якоря, А	4 000	
7	Частота вращения, об/мин	35-75	
8	Напряжение возбуждения, В	500	
9	Ток возбуждения, А	90	
10	Класс изоляции обмоток	F	
11	Наружный диаметр сердечника якоря, мм	4 100	
12	Диаметр коллектора по рабочей части, мм	2 992±2	
13	Длина вала якоря, мм	8 470	
14	Длина сердечника якоря, мм	1 100	
15	Вылет лобовых частей обмотки якоря со стороны коллектора и со стороны маховика, мм	332,5±2	
16	Количество пазов якоря, штук	396	
17	Количество коллекторных пластин, штук	1 584	
18	Количество секций обмотки якоря, штук	396	
19	Количество уравнивателей, штук	22	
20	Количество коллекторных пластин, штук	1 584	
21	Масса якоря (без маховика), кг	120 000	
22	Масса коллектора, кг	4 900	
23	Масса меди коллекторной, кг	1 610	Пластины с петушками и изоляция пластин
24	Масса конуса нажимного, кг	520	
25	Масса цилиндра корпуса коллектора, кг	920	

Приложение Б. Габаритные размеры существующего двигателя ЧТПЗ



# Приложение В. Установочные размеры стоякового подшипника существующего двигателя ЧТПЗ





Приложение Д. Результаты внедрения научной работы на АО «Русские электродвигатели»



АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «РУССКИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДВИГАТЕЛИ»

Енисейская ул., д. 8-я, г. Челябинск, Россия, 454010; тел. (351) 204-44-44, тел. (351) 204-44-11; факс-сервер (351) 216-89-09;  
e-mail: red@red.transneft.ru; ИНН 7449126763; КПП 744901001; ОКПО 56410997; ОГРН 1157449004833

19.03.2020 № УДМ-204-118-13/2649

На №

от

Заведующему кафедрой ТОЭ  
ФГАОУ ВО «ЮУрГУ»  
Научному руководителю, д. т. н.  
С.А. Гандже

О результатах диссертационного исследования

Уважаемый Сергей Анатольевич!

Настоящим сообщая, что спроектированный в рамках диссертационной работы «Разработка и исследование вентильного двигателя с когтеобразными полюсами привода пыльгерстана для изготовления бесшовных труб» тихоходный вентильный двигатель мощность 2.75 МВт представляет интерес для предприятия в плане его производства, поскольку выпуск крупногабаритных мощных электродвигателей различных типов является профилем предприятия. Предприятие заинтересовано в результатах диссертационного исследования в плане анализа и синтеза крупногабаритных электрических машин.

В настоящее время на предприятии внедрена методика теплового расчета электрических машин, примененная в диссертации на основе метода конечных элементов и методика расчета теплового состояния с учетом динамической нагрузки.

  
Технический директор

 Д.В. Соколов

И.А. Чуйдук  
20419, (351) 204-40-60



№ УДМ-204-118-13/2649 от  
19.03.2020

Приложение Е. Результаты внедрения научной работы в учебный процесс на кафедре «Теоретические основы электротехники» ЮУрГУ (НИУ)



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ



УТВЕРЖДАЮ

Директор по научной работе

ФГБОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)»

д.т.н., доцент

А.В. Коржов

2020 г.

Акт

об использовании материалов диссертационной работы

Косимова Бахтиёра Исматуллоевича на тему:

«Разработка и исследование вентильного двигателя с когтеобразными полюсами привода пыльгерстана для изготовления бесшовных труб» в учебном процессе

Результаты диссертационной работы Косимова Бахтиёра Исматуллоевича «Разработка и исследование вентильного двигателя с когтеобразными полюсами привода пыльгерстана для изготовления бесшовных труб» внедрены в учебный процесс на кафедре «Теоретические основы электротехники» Южно-Уральский государственный университет (НИУ), при подготовке студентов по направлению 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника в курсе «Проектирование специальных электрических машин».

В учебный процесс внедрены методы решения связанной электродинамической и термодинамической задачи для анализа электрических машин большой мощности.

И.О. декана Энергетического факультета

А.Е. Бычков

Заведующий кафедрой  
«Теоретические основы электротехники»

С.А. Ганджа

Приложение Ё. Результаты внедрения научной работы в учебный процесс  
Институт энергетики Таджикистан

МИНИСТЕРСТВО ЭНЕРГЕТИКИ И ВОДНЫХ РЕСУРСОВ РЕСПУБЛИКИ  
ТАДЖИКИСТАНА  
ИНСТИТУТ ЭНЕРГЕТИКИ ТАДЖИКИСТАНА

УТВЕРЖДАЮ

Ректор  
Института энергетики Таджикистана  
кандидат технических наук, доцент  
Назарзода Х.Х.  
03 04 2020 г.



СПРАВКА

об использовании материалов диссертационной работы  
Косимова Бахтиёра Исмагуллоевича  
«Разработка и исследование вентильного двигателя с  
когтеобразными полюсами привода пыльгерстана для изготовления  
бесшовных труб» в учебном процессе

Настоящей справкой подтверждаю, что результаты диссертационной работы Косимова Бахтиёра Исмагуллоевича «Разработка и исследование вентильного двигателя с когтеобразными полюсами привода пыльгерстана для изготовления бесшовных труб» используются в учебном процессе Института энергетики Таджикистана студентами энергетического факультета специальности 1-530105 «Автоматизированные электроприводы». В учебный процесс внедрены методы многоуровневой оптимизации крупных электрических машин, методы построения динамических моделей для электромагнитного и теплового анализа.

Заведующий кафедрой  
«Автоматизированные электроприводы»,  
к.т.н.

Кахоров Р.А.