

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Уральский федеральный университет имени
первого Президента России Б.Н. Ельцина»

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2020

Работа выполнена на кафедре «Теоретические основы электротехники» ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент,
Ганджа Сергей Анатольевич

Официальные оппоненты: **Казаков Юрий Борисович**,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный
энергетический университет имени В.И. Ленина»,
заведующий кафедрой «Электромеханика»;

Денисенко Виктор Иванович,
доктор технических наук, профессор,
ФГАОУ ВО «Уральский федеральный
университет имени первого Президента России
Б.Н. Ельцина», профессор кафедры
«Электротехника» Уральского энергетического
института;

Мошкин Владимир Иванович,
доктор технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Курганский государственный
университет», заведующий кафедрой «Энергетика
и технология металлов».

Защита состоится «11» ноября 2020 г. в 13:15 ч. на заседании диссертационного совета УрФУ 05.01.02 по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», <https://dissovet2.urfu.ru/mod/data/view.php?d=12&rid=1468>

Автореферат разослан «__» _____ 2020 г.

Ученый секретарь



диссертационного совета

Болотин Кирилл Евгеньевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность предмета исследования

Развитию нефтегазовой индустрии в России предается особое значение. Это связано с тем, что добыча углеводородов является бюджетообразующей 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 пильгерстана 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, пильгерстановый 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 проблемы.

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:

- 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.

В области проектирования электрических машин различных типов большой мощности существуют серьезные 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., Темиров О.П., Остриров В.Н., Козаченко В.Ф., Русаков А.М. разрабатывают мощные вентильно-индукторные электродвигатели;

- Ивановский государственный энергетический университет. Ученые Ю. Б. Казаков, Е. Б. Герасимов, А. И. Тихонов, Н. Н. Новиков внесли существенный вклад в методы анализа магнитных и тепловых полей, разработки САПР электрических машин, методы оптимального проектирования;

- 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;

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

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

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

– Уральский федеральный университет – УрФУ. 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;

– 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;

– 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.

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

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. 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. Не смотря 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-двойнике, которую необходимо создать.

Объект исследования

Крупногабаритный тихоходный вентильный электродвигатель с когтеобразной магнитной системой и мощными высококоэрцитивными постоянными магнитами, предназначенный для металлургического производства бесшовных труб по пильгер-технологии.

Предмет исследования

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 цифровой модели для электромагнитного анализа и связанной цифровой модели для оценки 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.

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

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, которая представлена в виде связанной задачи оптимизации геометрии по выбранным критериям, электромагнитного и теплового расчетов.

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 не 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 в 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 АО «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 работы

Основные положения и результаты диссертационной работы обсуждались и были одобрены на 9 научно-технических конференциях, включая конференции с международным участием:

1. Десятая научная конференция Аспирантов и докторантов ЮУрГУ. 2018
2. 2018 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM) 15-18 May 2018, Moscow, Russia.
3. 2018 International Ural Conference on Green Energy, UralCon 2018 Chelyabinsk, Russia.
4. 2018 Global Smart Industry Conference (GloSIC) 13-15 Nov. 2018. Chelyabinsk, Russia

5. 2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 25-29 March 2019. Sochi, Russia
6. International Ural Conference on Electrical Power Engineering (Ural Con) 2019. 1-3 Oct. 2019 Chelyabinsk, Russia.
7. IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry. 4-5 Oct. 2019 Magnitogorsk, Russia.
8. International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering (EECE – 2019). Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. 18 December 2019 St. Petersburg, Russia.
9. Двенадцатая научная конференция аспирантов и докторантов ЮУрГУ. 2020. Челябинск, Россия.

Публикации

По результатам диссертационной работы опубликовано **11** работ, из них **7** работ индексируются в базе данных **Scopus**, **4** 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.

Структура и объем 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 странице, из них 107 страниц основного текста. Работа содержит 47 иллюстраций, 97 аналитических выражений, 3 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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 (рис.1). В главе представлен анализ технических проблем существующего электропривода пыльгерстана предприятия АО «ЧТПЗ»,

сформулированы требования, которые заказчик выдвигает к модернизированному приводу.

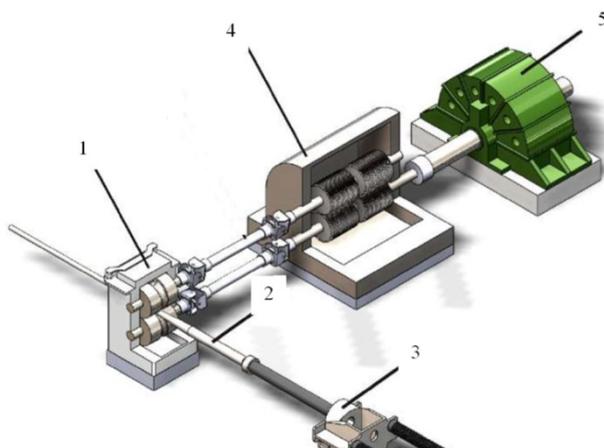


Рис.1. Функциональная модель пилигримового стана: 1- прокатная клет, 2- заготовка для трубы, 3- механизм подачи, 4- двухвалковая шестеренчатая клет, 5- приводной двигатель.

Дан качественный анализ возможных вариантов для замены существующего двигателя привода пильгерстана. 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 (ВДКП). Представлена технология его сборки.

Во второй главе рассмотрена математическая модель расчета магнитной системы с когтеобразными полюсами и математическая модель ВДКП для системы оптимального проектирования.

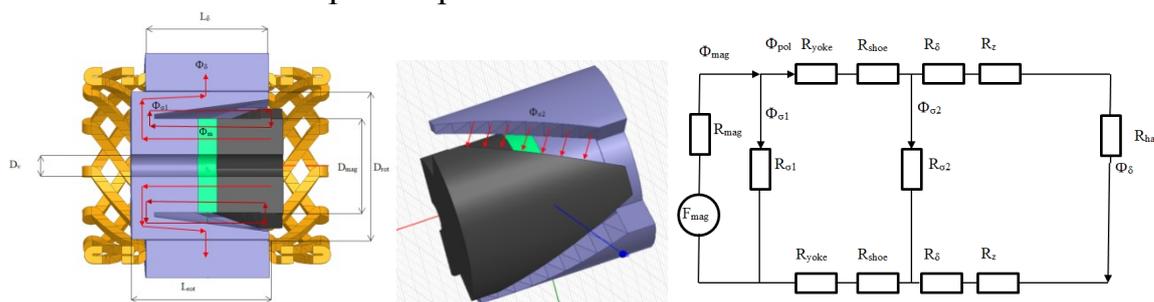


Рис.2. Эскиз магнитной системы и эквивалентная схема замещения магнитной цепи ВДКП.

Особенность математической модели магнитной цепи заключается в том, что она реализует задачу синтеза, в отличие от традиционных методик, то есть по заданной индукции в воздушном зазоре определяются размеры постоянного магнита, что важно для модели оптимизации. Математическая модель учитывает все возможные потоки рассеяния и специфику движения рабочего потока по когтеобразному магнитопроводу (рис.2).

Модель расчета индуктора вошла в общую математическую модель расчета ВДКП. В главе она представлена в виде последовательности алгоритмических шагов. Блок-схема модели ВДКП показана на рис.3.

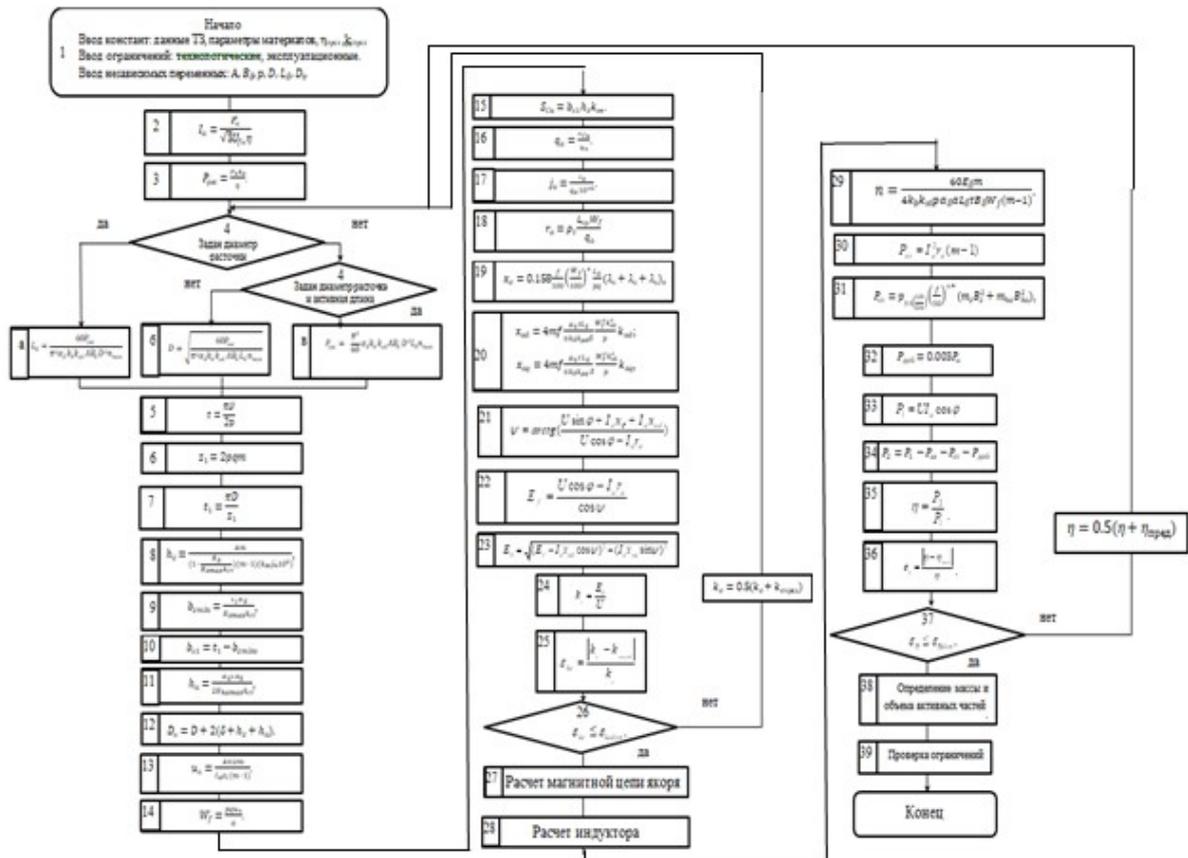


Рис.3. Блок-схема математической модели ВДКП

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

Третья глава посвящена разработке системы оптимального проектирования ВДКП для различных проектных ситуаций.

Под оптимизацией следует понимать процесс выбора наилучшего варианта из возможных вариантов. Показателями качества наилучшего варианта служат критерии оптимальности. Как правило, в расчетной модели присутствуют несколько критериев, и в самом общем случае возникает необходимость решения многокритериальной задачи. В данном исследовании задача оптимизации упрощена. Для каждой конкретной проектной ситуации решается однокритериальная задача, но по усмотрению разработчика критерии можно изменять.

Однокритериальная оптимизация ВДКП сформулирована в классической постановке: 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.

В качестве констант в программе фигурируют данные технического задания и, в зависимости от уровня оптимизации, фиксированные геометрические размеры.

Ограничениями в системе выступают параметры, определяющие точность расчета, требования технологии изготовления и требования по условиям эксплуатации.

В качестве критериев оптимальности применительно к ВДКП приняты следующие показатели качества, получившие наибольшее распространение на практике: минимальная масса активных материалов (стали, меди и постоянных магнитов), минимальный объем активных частей двигателя, минимальная масса постоянного магнита.

Для блока оптимизатора выбран метод покоординатного спуска Гаусса-Зайделя при движении к локальному минимуму в сочетании с методом Фибоначчи при выборе шага.

Для создания подсистемы синтеза были использованы научные заделы кафедры ТОЭ ЮУрГУ по разработке многоуровневой оптимизации. Основное назначение многоуровневой оптимизации – это разработка гибкой проектной системы, которая позволяла бы делать оптимальные расчеты для разных проектных ситуаций, которые возникают на практике. Она позволяет в зависимости от технического задания часть переменных фиксировать, а часть включать в оптимизационный цикл. Таким образом, проектная система разбивается на уровни оптимизации от самого сложного, где варьируются все переменные до самого простого, когда перебирается одна или две переменные.

В проектной системе ВДКП определены следующие уровни оптимизации:

- полная габаритная оптимизация;
- габаритная оптимизация при фиксированном числе пар полюсов;
- габаритная оптимизация при фиксированном наружном диаметре;
- габаритная оптимизация при фиксированном внутреннем диаметре;
- габаритная оптимизация при фиксированной наружной длине;
- габаритная оптимизация при фиксированном наружном и внутреннем диаметрах:
- оптимизация при фиксированном наружном, внутреннем диаметрах и наружной длине (в заданных габаритах).

Для каждого уровня определены константы, ограничения и критерии оптимизации.

Таким образом, система позволяет реализовать 7 проектных ситуаций, закрывая практически все потребности реального проектирования ВДКП.

В четвертой главе представлена разработка системы анализа электромагнитного состояния ВДКП.

Необходимость подробного анализа результатов оптимизации связана 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.

Для электромагнитного анализа выбрана готовая CAE система Ansys Electronics Desktop, которая специализируется на расчете электромагнитных полей в электромеханических устройствах.

Подсистемы анализа и синтеза связаны друг с другом. 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). На этом этапе анализа проверяется принципиальная возможность получения основных параметров двигателя (рис.4). При необходимости можно сделать коррекцию результатов оптимизации.

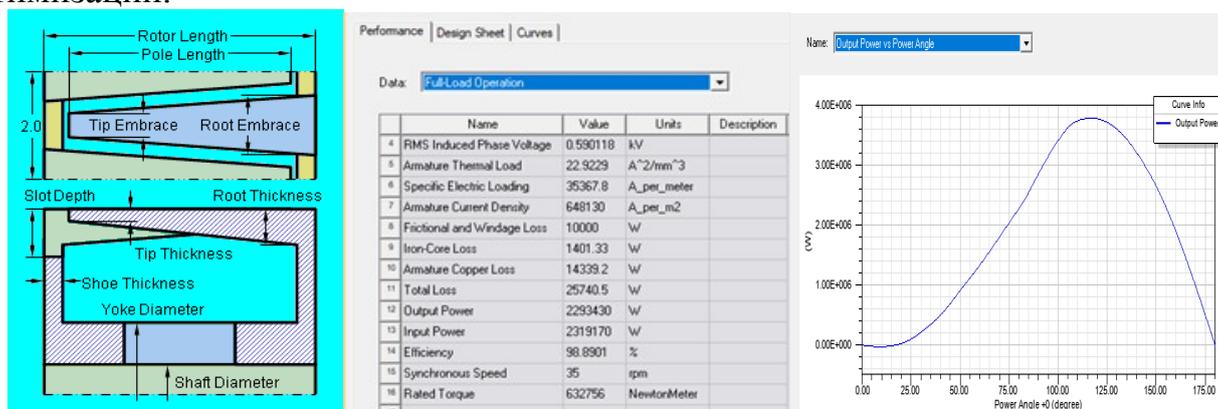


Рис.4. Этап анализа ВДКП в режиме RMXprt

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. В этих условиях проводить качественный анализ невозможно.

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 ВКПД 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. 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. Фрагменты этого анализа представлены на рис.5.

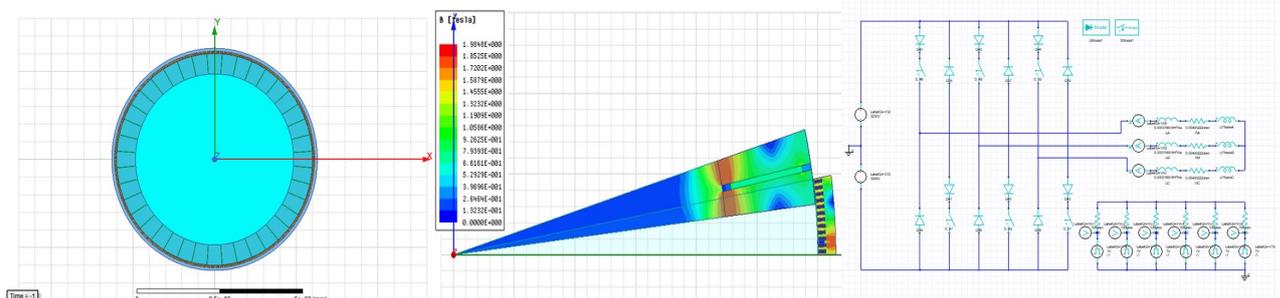


Рис.5. Этап анализа вентильного двигателя с тангенциальными магнитами в режиме Maxwell 2D Design (аналог ВДКП)

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.6.

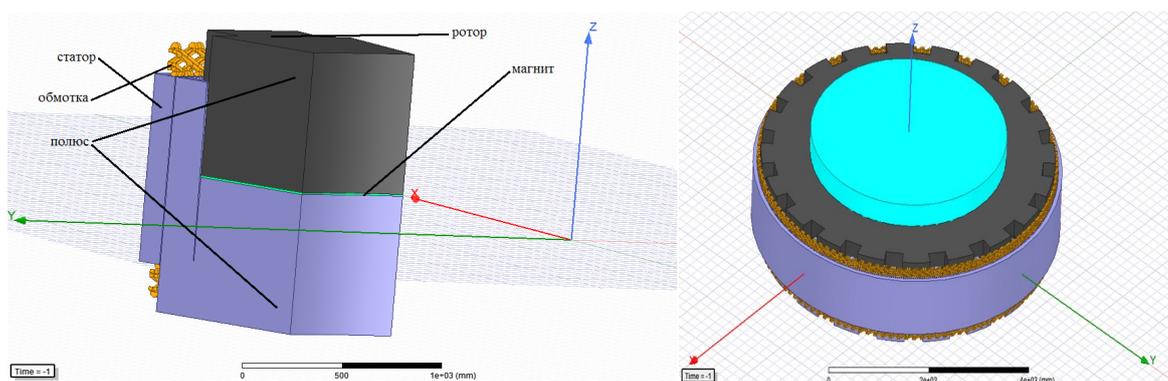


Рис.6. Заключительный этап анализа ВДКП в режиме Maxwell 3D Design

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 RMxprt → проверка результатов расчета BLDC в режиме Maxwell RMxprt → проверка результатов расчета BLDC в режиме Maxwell 2D Design → проверка результатов расчета ВДКП в режиме Maxwell 3D Design.

Функциональная схема алгоритма представлена на рис.7.

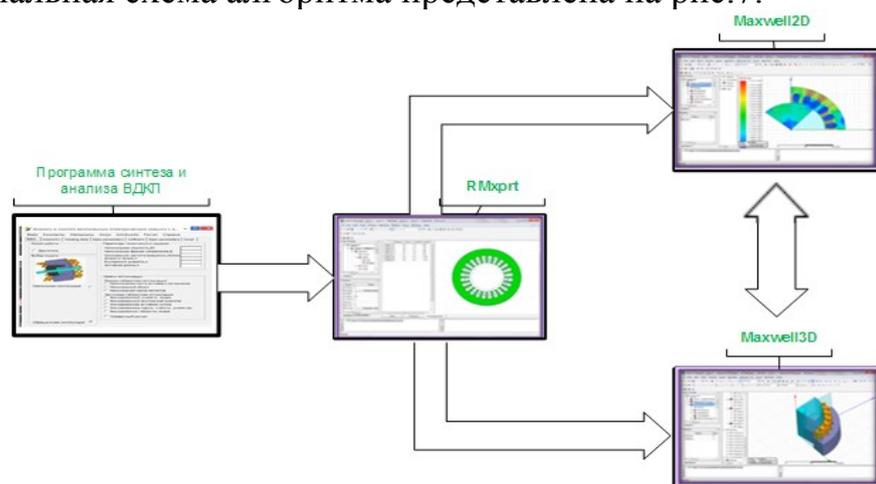


Рис.7. Функциональная схема алгоритма электромагнитного анализа ВДКП.

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 %.

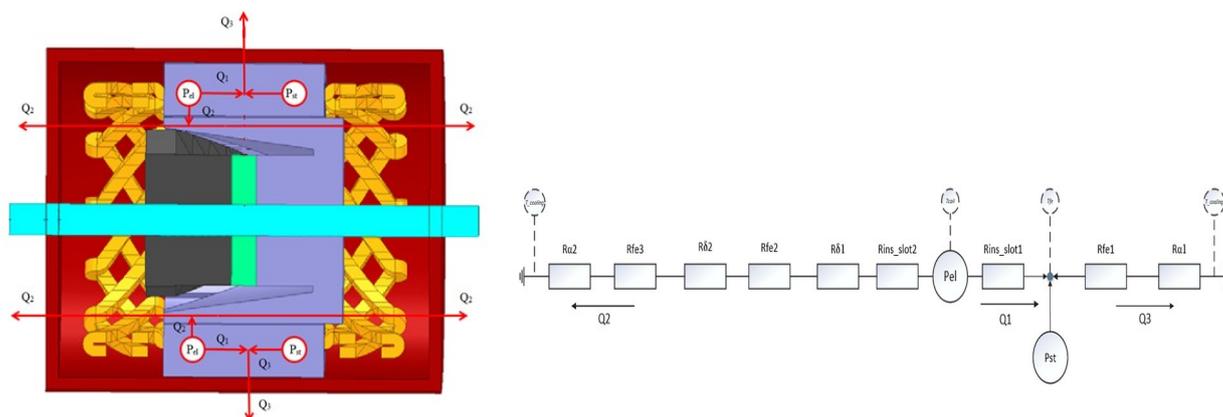
Пятая глава посвящена анализу теплового состояния с учетом динамической нагрузки и разработки конструкции ВДКП.

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 пылеуловителя. 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 была разработана динамическая модель, которая решает связанную задачу электродинамики и термодинамики. С точки зрения нагрева двигатель в модели рассматривается как однородное для нагревания тело. Динамическую модель можно описать следующей системой уравнений:

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

Для определения локальных перегревов можно воспользоваться методом эквивалентных тепловых схем замещения (рис.8)



$$\left\{ \begin{array}{l} P_{st} + Q_1 = Q_3 \\ P_{el} = Q_1 + Q_2 \\ t_{fe} - t_{cooling} = Q_3(R_{fe1} + R_{\alpha 1}) \\ t_{coil} - t_{fe} = Q_1 R_{ins_slot1} \\ t_{coil} - t_{cooling} = Q_2(R_{ins_slot2} + R_{\delta 1} + R_{fe2} + R_{\delta 2} + R_{fe3} + R_{\alpha 2}) \end{array} \right.$$

Рис.8. Схема движения тепловых потоков, тепловая схема, система уравнений для метода эквивалентных тепловых схем замещения.

Объединим две системы уравнений в единую модель оценки теплового состояния с учетом динамической нагрузки. Для этого воспользуемся возможностями программного комплекса MATLAB/Simulink (рис.9).

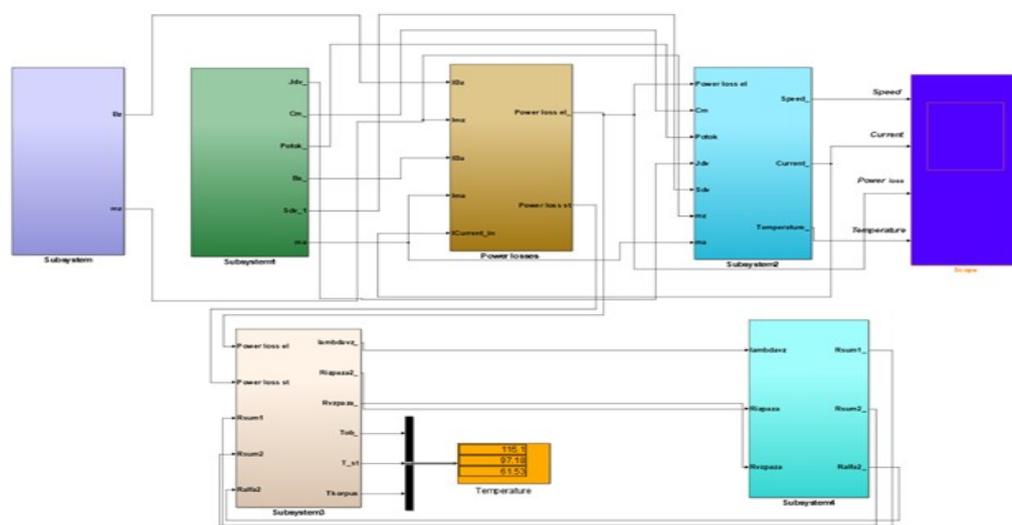


Рис.9. Объединенная динамическая и статическая модель оценки теплового состояния ВДКП при нагрузке.

Результаты расчета с использованием данной модели за 7 секунд пускового режима и 24 часа работы с номинальной нагрузкой представлены на рис.10. Из диаграмм видно, что не смотря на значительные потери при прямом пуске электродвигатель нагревается незначительно. Полный прогрев электродвигателя происходит примерно за 24 часа работы при номинальной нагрузке.

Учитывая большую ответственность разрабатываемого привода для реального производства и большие капитальные затраты для его внедрения, дополнительно была проведена оценка теплового состояния на основе более точного метода с применением программного комплекса Ansys Icerpak. Расчет

теплового состояния на основе метода конечных элементов является трудоемким, но более точным методом.

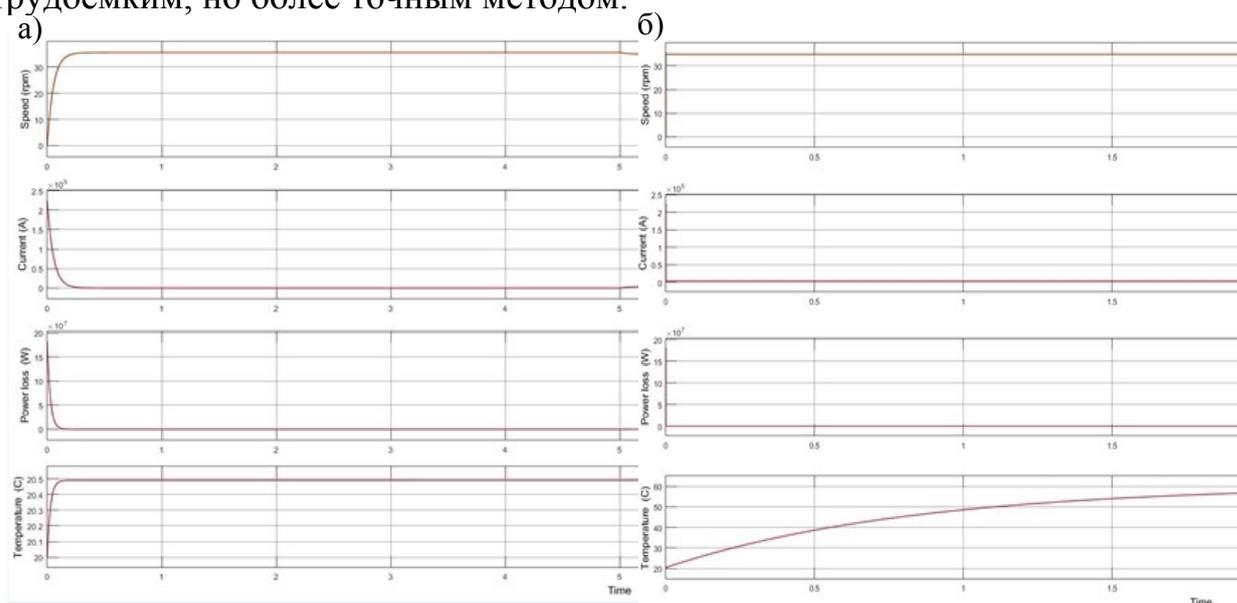


Рис.10. Диаграммы работы ВДКП: а) пусковой режим (7 сек); б) стационарный режим (24 часа)

Следует отметить следующую положительную тенденцию при создании современных CAE систем. Появляется возможность соединения различных программ в единую модель для решения связанной задачи через программную оболочку Ansys Workbench. Создадим расчетную тепловую модель по этой 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 Icespak.

Таким образом, мы решаем связанную магнитодинамическую и термодинамическую задачи (рис.11).

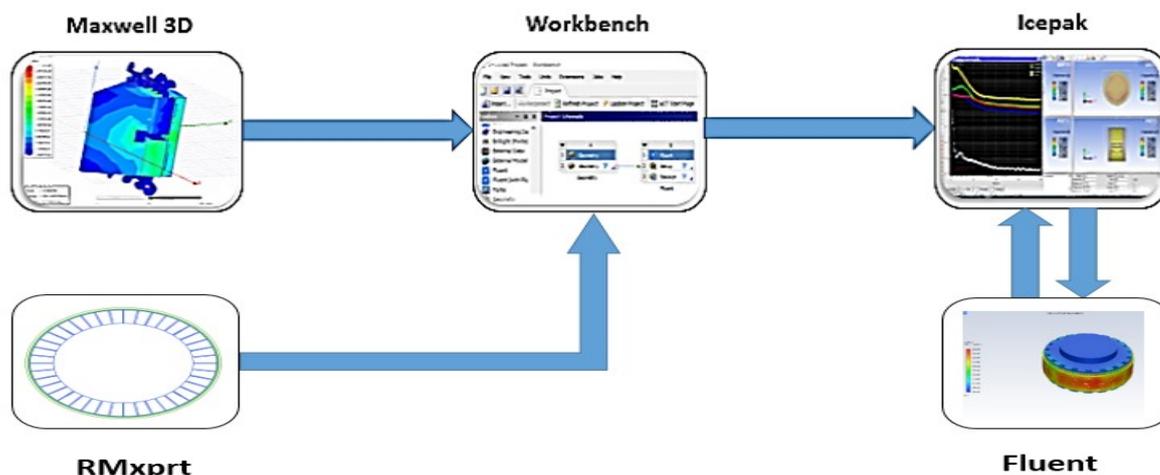


Рис.11. Объединение электродинамической и термодинамической задач через программную оболочку Workbench

В программе Iserack 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.

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. 12.

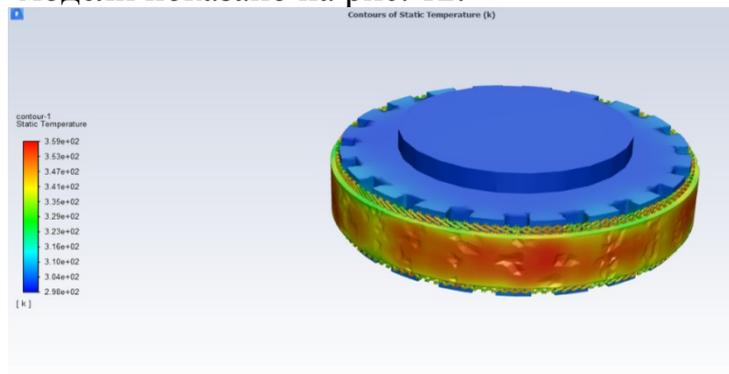


Рис.12. Распределение температуры для 3D модели ВДКП

Максимальная температура ВДКП по этому методу конечных элементов составила 86°C . При расчете с применением метода эквивалентных схем замещения температура обмотки якоря составила 115°C .

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 результаты 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.

Результаты разработки трехмерной твердотельной модели показаны на рис. 13 а. Данная модель является основой для разработки конструкторской документации и изготовления опытного образца.

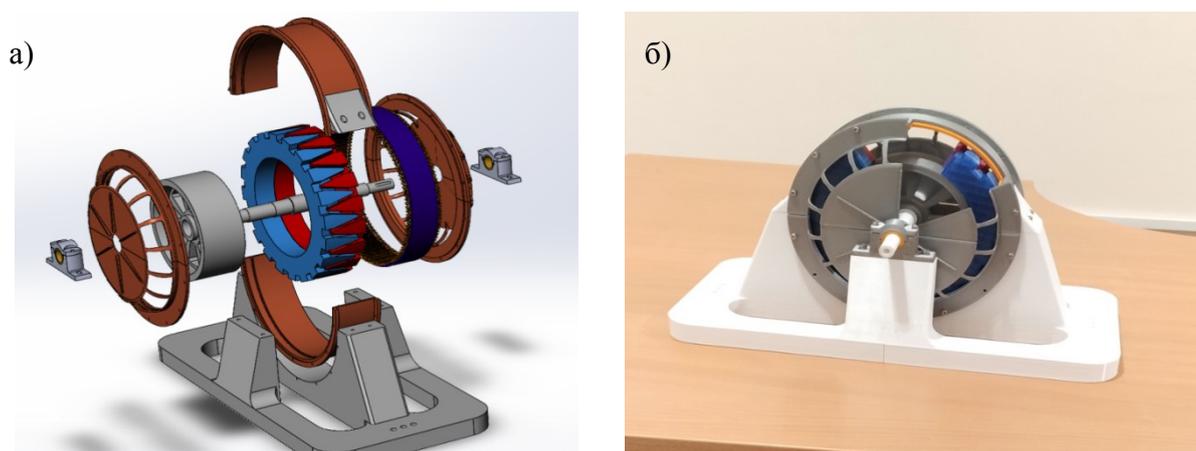


Рис.13. Трехмерная твердотельная модель и масштабный макет ВДКП

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.13б.

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

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 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 CAE 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. Дальнейшее направление данного исследования следует развивать для электрических двигателей других типов и других конструктивных исполнений. Так же следует уделить особое внимание разработке конструкторских систем для сквозных безбумажных технологий, которые являются перспективой электромашиностроения.

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.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК и аттестационным советом УрФУ:

1. **Косимов, Б.И.** Выбор оптимальной конструкции электродвигателя привода пильгерстана для технологии изготовления бесшовных труб / С.А. Ганджа, Б.И. Косимов, Д.С. Аминов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия "Энергетика". – 2019. – Т. 19, № 1. – С. 5–17; 0.81 п.л./ 0.27 п.л.

2. **Косимов, Б.И.** 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 Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2019. – № 29. – С. 58 – 74; 1.0 п.л./ 0.25 п.л.

3. **Косимов, Б.И.** Сравнительный анализ электродвигателей привода пильгерстана для технологии изготовления бесшовных труб. Выбор оптимальной конструкции / С.А. Ганджа, Б.И. Косимов, Д.С. Аминов, Р.Р. Ниматов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета «Электротехника, информационные технологии, системы управления». –2019. № 30, – С. 79–101; 1.37 п.л./0.34 п.л.

4. **Косимов, Б.И.** Разработка методики анализа вентильного двигателя постоянного тока с когтеобразными полюсами большой мощности, предназначенного для привода пильгерстана по производству бесшовных труб / С.А. Ганджа, Б.И. Косимов, Д.С. Аминов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2019. № 31, – С. 38–57; 1.18 п.л./0.39 п.л.

5. **Kosimov, B.** Application of the Ansys Electronics Desktop Software Package for Analysis of Claw-Pole Synchronous Motor / S. Gandzha, B. Kosimov, D. Aminov // Machines, – 2019, 7040065,7(4), 65, (Web of Science, Scopus) 0.69 п.л./0.23 п.л.

6. **Kosimov, B.** Development of Analysis Methods for Claw-Pole Synchronous Motor of the Pilger Mill for Seamless Pipes Manufacturing / S. Gandzha, B. Kosimov, D. Aminov // IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI), 4-5 Oct 2019. Magnitogorsk, Russia, pp. 18-23, 8915343; (Web of Science, Scopus) 0.37 п.л./0.12 п.л.

7. **Kosimov, B.** Selecting optimal design of electric motor of pilgrim mill drive for manufacturing techniques seamless pipe / S. Gandzha, B. Kosimov, D. Aminov // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Sochi, Russia, 2019, pp. 1-7, 8742941; (Scopus) 0.43 п.л./0.14 п.л.

8. **Kosimov, B.** Development of engineering method for calculation of magnetic systems for brushless motors based on finite element method / S. Gandzha, D. Aminov, B. Kosimov // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Sochi, Russia, 2019, pp. 1-5, 8742976; (Scopus) 0.31 п.л./0.10 п.л.

9. **Kosimov, B.** Development directions of power supply for rural areas of Tajikistan / S. Voronin, A. Davlatov, B. Kosimov // В сборнике: Proceedings - 2019 International Ural Conference on Green Energy, – UralCon 2019, – 2019. – С.157–161, 8877688; (Scopus) 0.31 п.л./0.1 п.л.

10. **Kosimov, B.** Application of Digital Twins Technology for Analysis of Brushless Electric Machines with Axial Magnetic Flux / S. Gandzha, D. Aminov, I. Kiessh, B. Kosimov // Global Smart Industry Conference (GloSIC), Chelyabinsk, 2018, pp. 1-6, 8570132; (Web of Science, Scopus) 0.37 п.л./0.1 п.л.

11. **Kosimov, B.** Comparative evaluation of connection schemes of synchronous generator windings as part of Dc sources / S. Voronin, A. Davlatov, B. Kosimov // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Sochi, Russia, 2020, 9112072 (Scopus) 0.31 п.л./0.10 п.л.

Издательский центр Южно-Уральского государственного университета

Подписано в печать 06.10.2020. Формат 60x84 1/16. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 1,16. Уч.-изд. л. 1. Тираж 80 экз. Заказ 292.

Отпечатано в типографии Издательского центра ЮУрГУ.
454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 76.