

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



На правах рукописи

**Чуйдук Иван Александрович**

**СИНТЕЗ И АНАЛИЗ ВЕНТИЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ  
КОМБИНИРОВАННОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ ДЛЯ  
ЭЛЕКТРОТРАНСМИССИЙ НАЗЕМНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ**

2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Екатеринбург – 2023

Работа выполнена на кафедре «Электропривод, мехатроника и электромеханика» ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,  
**Ганджа Сергей Анатольевич**

Официальные оппоненты: **Казakov Юрий Борисович**,  
доктор технических наук, профессор,  
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Ивановский государственный энергетический  
университет имени В.И. Ленина», профессор  
кафедры «Электромеханика»;

**Зубков Юрий Валентинович**,  
доктор технических наук, доцент,  
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Самарский государственный технический  
университет», профессор кафедры  
«Электромеханика и автомобильное  
электрооборудование»;

**Мошкин Владимир Иванович**,  
доктор технических наук, доцент,  
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Курганский государственный университет»,  
заведующий кафедрой «Цифровая энергетика».

Защита состоится «20» сентября 2023 г. в 14:00 ч на заседании диссертационного совета УрФУ 2.4.09.23 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=4904>

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Хальясмаа Александра Ильмаровна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность предмета исследования.** В настоящее время во всем мире идет активный переход на гибридный и электротранспорт. Международное энергетическое агентство прогнозирует, что мировой парк электромобилей к 2030 году достигнет 230 млн. единиц машин, что составляет 12% от всех автомобилей в мире. Ежегодный рост парка электромобилей составляет около 15%. Во многих странах существуют государственные программы, направленные на развитие электротранспорта. Данный факт обусловлен рядом преимуществ, которыми обладает гибридный и электротранспорт:

- электромобили не выделяют вредные выхлопные газы при движении;
- электротранспорт значительно снижает уровень шума, особенно в больших мегаполисах;
- стоимость эксплуатации электромобиля гораздо ниже за счет сниженной потребности в смазывающих материалах и более дешевой зарядки;
- электродвигатель способен развивать максимальный крутящий момент за сотые доли секунды, что обеспечивает высокую динамику;
- электромобиль может использовать рекуперативное торможение для зарядки АКБ, что делает его еще более энергоэффективным.

Несмотря на значительную историю развития гибридного и электротранспорта, мировое научное сообщество не пришло к единому мнению относительно компоновки трансмиссии электромобиля и типа используемой электрической машины.

В настоящее время можно выделить 3 основные компоновки трансмиссии электромобилей: классическая компоновка, при которой электродвигатель находится в корпусе транспортного средства и передает крутящий момент на колеса с помощью полуосей, понижающего редуктора и/или механического дифференциала; трансмиссия с индивидуальным приводом колес, но электродвигатели также находятся в корпусе транспортного средства и соединены с колесами либо напрямую через полуоси, либо через полуоси и понижающий редуктор; трансмиссия на базе мотор-колес.

Наиболее перспективным вариантом на сегодняшний день является трансмиссия на основе мотор-колес. Данный вид трансмиссии имеет ряд преимуществ, таких как высокий КПД, повышенная динамика, отсутствие сложных передаточных механизмов, освобождение внутреннего пространства автомобиля.

Для электротрансмиссии на основе мотор-колес, как и для других видов трансмиссии необходимо решить вопрос выбора оптимального приводного электродвигателя. На данный момент наиболее популярными электродвигателями для электротрансмиссий являются асинхронные электродвигатели и вентильные электродвигатели с высококоэрцитивными постоянными магнитами классической конструкции. В то же время, если использовать вентильные электродвигатели комбинированного возбуждения, то можно добиться широкого диапазона регулирования при меньших габаритах, что очень важно для транспортных

средств, которым необходим высокий момент при пуске и высокие скорости во время движения.

На данный момент в мире существуют различные варианты конструкций электродвигателей комбинированного возбуждения, но все они имеют существенные недостатки, не позволяющие им выйти на широкий рынок: низкие массогабаритные характеристики, наличие паразитных зазоров.

В то же время в ЮУрГУ разработана запатентованная конструкция вентильного электродвигателя комбинированного возбуждения (далее - ВЭКВ), которая обладает всеми преимуществами электрических машин комбинированного возбуждения, но при этом исключает недостатки предыдущих конструкций, такие как наличие паразитного зазора, сложной магнитной цепи, дополнительного рассеяния магнитного потока. Эта конструкция может составить основу для проектирования ряда мотор-колес на различную мощность и частоту вращения, но на сегодняшний день для нее не существует отработанных методик анализа и синтеза, что осложняет серийное освоение этого изделия.

**В связи с этим разработка проектной системы, реализующей синтез конструкции на основе оптимизации геометрии и анализ полученных конструктивных решений, является актуальной научной и инженерной задачей.**

**Степень научной разработанности исследуемой темы.** Многие научные коллективы трудятся над разработкой узлов и принципов работы электротрансмиссии, в том числе и на базе ВЭКВ. Следует отметить работы следующих ученых: К.Л. Ковалев, Р.И. Ильясов, Ю.И. Кован, Д.С. Дежин (Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)); С.А. Ганджа, А.И. Согрин, С.Г. Воронин (Южно-Уральский государственный университет); Д.С. Аминов (Институт Энергетики Таджикистана); В.А. Калий, Д.А. Ситин, М.В. Панихин, Р.Ю. Мисютин (АО «Технодинамика» (г. Москва); Д.В. Левин, Э.Я. Лившиц, М.М. Юхнин из ООО «СИБНАНОТЕХ» (г. Новосибирск); Е.Н. Попков, А.О. Фешин (Высшая школа электроэнергетических систем Института энергетики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого).

В наукометрических базах Scopus и Web of Science имеется большое количество публикаций, связанных с электрическими машинами комбинированного возбуждения. В иностранных статьях имеются материалы об исследованиях, связанных с использованием электрических машин комбинированного возбуждения именно в качестве тяговых электродвигателей для транспортных средств. Также имеются материалы об электрогенераторах на базе машин комбинированного возбуждения. Рассмотрены различные варианты моделирования и расчета электрических машин комбинированного возбуждения, учитывающие нелинейные характеристики материалов и особенности взаимодействия магнитных потоков, создаваемых постоянными магнитами и обмоткой возбуждения.

Следует отметить следующих иностранных ученых и инженеров, внесших существенный вклад в развитие электротрансмиссий и, в частности, мотор-колес: Урс Штайнер (Urs Steiner), Шин Ямамото (Shin Yamamoto), Рюхо Морита (Ryuhō

Morita), Мицуру Ойке (Mitsuru Oike), Michael Gröninger, Felix Horch, Alexander Kock, Hermann Pleteit, Николь Швейцер (Nicole Schweizer), Андреас Гиссл (Andreas Giessl), Оливэр Шварцхаупт (Oliver Schwarzhaupt), Роланд Каспер (Roland Kasper), Мартин Шунеманн (Martin Schünemann), Schaeffler KG, der Schaeffler KG.

Федеральный институт промышленной собственности содержит обширную базу патентов на изобретения и полезные модели по разработке мотор-колес, в том числе и с двигателями комбинированного возбуждения.

Анализ данного вопроса показывает, что тема применения электрических машин комбинированного возбуждения является актуальной, о чем свидетельствует большое количество публикаций как в отечественных, так и в иностранных наукометрических базах. На сегодняшний день разработаны различные варианты трансмиссий, различные конструкции и компоновки мотор-колеса, рассмотрены различные типы электродвигателей и систем управления, применены новые активные и конструктивные материалы.

Но на данный момент все эти исследования носят разрозненный характер и привязаны к конкретной конструкции транспортного средства. Окончательно не решен вопрос о наиболее приемлемом электродвигателе для мотор-колеса, соответственно, не отработаны методики его расчета применительно к электротрансмиссии, не решены вопросы методов и критериев оптимизации основных размеров электродвигателя, вопросы его эффективного охлаждения, типа редуктора, общей компоновки статора и ротора, системы управления мотор-колесом и трансмиссией в целом. Из имеющейся информации невозможно построить конструкторскую систему по проектированию не одного, а ряда подобных мотор-колес, которая включала бы в себя синтез и анализ данной трансмиссии.

Этот факт делает разработку такой системы актуальной и востребованной, особенно в контексте интенсивного развития современного электротранспорта.

**Цель диссертационного исследования** - разработка усовершенствованных систем синтеза, анализа и управления вентильного электродвигателя комбинированного возбуждения для мотор-колеса электромеханической трансмиссии транспортных средств на основе физического, математического, имитационного и компьютерного моделирования, параметрической многоуровневой оптимизации.

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

- провести анализ существующих типов трансмиссий и тяговых электродвигателей;
- разработать методику и математическую модель анализа ВЭКВ на основе схем замещения;
- разработать систему синтеза ВЭКВ на основе параметрической многоуровневой оптимизации;
- разработать систему анализа электромагнитного состояния ВЭКВ с использованием имитационного моделирования;
- разработать систему анализа теплового состояния ВЭКВ на базе компьютерного моделирования;

- разработать алгоритм эффективного управления ВЭКВ применительно к транспортному средству;
- разработать проектную систему синтеза и анализа электромагнитных характеристик ВЭКВ на основе физического, математического, имитационного и компьютерного моделирования;
- исследовать работоспособность и качество функционирования макетного образца мотор-колеса в различных режимах.

**Объект исследования.** Объектом исследования является вентильная электрическая машина комбинированного возбуждения, встроенная в мотор-колеса в качестве тягового двигателя.

**Предмет исследования.** Предметом исследования являются физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование вентильной машины комбинированного возбуждения как элемента электротехнического комплекса электротрансмиссии транспортных средств, включая параметрическую оптимизацию на этапе синтеза и разработку алгоритмов эффективного управления на этапе анализа.

**Методология и методы исследования.** Поставленные научные задачи решены с применением общей теории электрических машин, методов проектирования на основе схем замещения, методов нелинейного программирования для решения задачи оптимизации, метода конечных элементов для решения задач электромагнитного и теплового анализа, методов физического моделирования, методов трехмерного твердотельного моделирования.

**Научная новизна.** Научную новизну составляет методика расчета ВЭКВ на основе физического, математического, имитационного и компьютерного моделирования, параметрической многоуровневой оптимизации. К научной новизне следует отнести эффективные алгоритмы управления тяговым электродвигателем транспортного средства.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Математическая модель вентильного электродвигателя комбинированного возбуждения, составленная на основе метода схем замещения и предназначенная для синтеза оптимальной геометрии активных частей, **отличающаяся** учетом особенностей конструкции магнитной системы.

2. Метод параметрической многоуровневой оптимизации вентильного двигателя комбинированного возбуждения, **отличающийся тем**, что позволяет создать гибкую проектную систему, реализующую множество проектных ситуаций.

3. Математическая модель анализа вентильного двигателя комбинированного возбуждения, которая **в отличие от существующих** моделей позволяет комплексно оценить электромагнитное и тепловое состояние на основе компьютерного моделирования.

4. Алгоритм эффективного управления вентильным электродвигателем комбинированного возбуждения, **которая учитывает особенности управления** одновременно по цепи якоря и цепи возбуждения и обеспечивает широкий диапазон изменения частот вращения и моментов.

5. Проектная система по разработке вентильного двигателя комбинированного возбуждения на основе физического, математического, имитационного и компьютерного моделирования, параметрической многоуровневой оптимизации, рассчитанная на проектирование ряда вентильных двигателей для мотор-колес, **которая разработана впервые** и позволяет проводить проектные расчеты для различных технических заданий за счет гибкости системы синтеза и комплексной системы анализа.

**Соответствие паспорту специальности.** Диссертация соответствует специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы. Полученные в работе научные результаты соответствуют пп. 1 «Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, анализ системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем, включая электромеханические, электромагнитные преобразователи энергии и электрические аппараты, системы электропривода, электроснабжения и электрооборудования», пп. 2. «Разработка научных основ проектирования, создания и эксплуатации электротехнических комплексов, систем и их компонентов», пп.3. «Разработка, структурный и параметрический синтез, оптимизация электротехнических комплексов, систем и их компонентов, разработка алгоритмов эффективного управления» паспорта специальности.

**Теоретическая значимость.** Данное научное исследование является продолжением развития теории вентильных машин комбинированного возбуждения в части расчета магнитной системы, методов параметрической многоуровневой оптимизации, методов анализа электромагнитного и теплового состояния на основе физического, математического, имитационного и компьютерного моделирования.

**Практическая значимость.** К практическим результатам данного исследования следует отнести создание проектной системы на основе физического, математического, имитационного и компьютерного моделирования, параметрической многоуровневой оптимизации. Разработанная проектная система предназначена для внедрения в инженерную практику с целью разработки ряда ВЭКВ, которые имеют оптимальные геометрические размеры и наилучшие массоэнергетические параметры. В перспективе данная проектная система может составить основу проектирования электротрансмиссий этого класса. Практическую значимость имеет программа анализа транспортного средства при тестировании ее на конкретных трассах и маршрутах с учетом уклонов рельефа, динамики разгона и торможения. Макетный образец является основой серийных мотор-колес для транспортных средств различного назначения.

Проект поддержан грантом «Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» (Фонд содействия инновациям). Договор №16559ГУ/2021 о предоставлении гранта на выполнение научно-исследовательских работ и оценку перспектив коммерческого использования результатов в рамках реализации инновационного проекта от 01.06.2021.

**Внедрение результатов работы.** Методика расчета ВЭКВ на основе схем замещения, методика многоуровневого оптимального проектирования и методики

оценки электромагнитного и теплового состояния внедрены в учебный процесс при подготовке магистров по направлению 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника в курсе «Проектирование электрических машин общего и специального назначения».

**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. Корректность работы проектной системы и расчетные характеристики ВЭКВ были проверены на макетном образце в ходе натуральных испытаний.

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

– 4-я научная выставка-конференция научно-технических и творческих работ студентов (Челябинск 2017);

– Международная научно-практическая конференция Института агроинженерии (Челябинск 2019);

– Научный семинар аспирантов «IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry» (Магнитогорск 2020);

– Международная научно-техническая конференция «Пром-Инжиниринг 2021»;

– Научный семинар аспирантов «IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry» (Магнитогорск 2021);

**Публикации по теме диссертации.** По результатам диссертационной работы опубликовано **11** работ, из них **6** статей в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ, в том числе **5** работ индексированы в базе данных Scopus; **2** свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

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

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

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы из 182 наименований, 2 приложений. Работа изложена на 145 страницах, из них 107 страниц основного текста. Работа содержит 48 иллюстраций, 142 аналитических выражений, 2 таблицы.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

**В первой главе** проведен сравнительный анализ различных вариантов электротрансмиссий и тяговых электродвигателей для них. Выбран базовый вариант электротрансмиссии и тягового электродвигателя. На сегодняшний день в общемировой практике известны различные компоновочные схемы электротрансмиссии. Наиболее перспективным с научной точки зрения является вариант компоновки трансмиссии, который включает в себя два или четыре мотор-колеса. Применение мотор-колес дает ряд существенных преимуществ: снижение общего веса электромобиля, повышенная динамика и маневренность, высокий КПД, простота реализации любых алгоритмов активной безопасности (ABS, ESP, Traction Control), освобождение внутреннего пространства электромобиля. На основе вышеизложенного была поставлена задача разработать мотор-колесо для электротрансмиссии наземных транспортных средств.

Важнейшей частью мотор-колеса, определяющей его эксплуатационные характеристики, является тяговый электродвигатель. В современной практике в качестве тяговых электродвигателей для электротрансмиссий, в основном, используются асинхронные электродвигатели, вентильные электродвигатели с постоянными магнитами, вентильно-индукторные электродвигатели. Анализ вариантов показывает, что указанные электродвигатели имеют один существенный недостаток - ограниченный диапазон регулирования при низких массогабаритных характеристиках. Предлагается использовать вентильный электродвигатель комбинированного возбуждения обращенной конструкции в качестве приводного электродвигателя для мотор-колеса, так как он наиболее полно удовлетворяет требованиям, предъявляемым к мотор-колесу.

Двигатель комбинированного возбуждения имеет два источника магнитного поля: высококоэрцитивные постоянные магниты и обмотку возбуждения. За счет применения постоянных магнитов сокращается масса и объем двигателя, а за счет применения обмотки возбуждения обеспечивается широкий диапазон регулирования.

При всем многообразии конструкций ВЭКВ для мотор-колеса лучше всего подходит обращенная конструкция, в которой ротор расположен снаружи, а статор - внутри (рисунок 1).

После выбора базового варианта трансмиссии и типа тягового двигателя требуется разработать математическую модель, предназначенную для оптимизации геометрии. Основная особенность ВЭКВ заключается в геометрии магнитной цепи (рисунок 2).

Математическая модель расчета представляет собой совокупность уравнений, которые связывают геометрические размеры, свойства материалов с выходными характеристиками и параметрами.

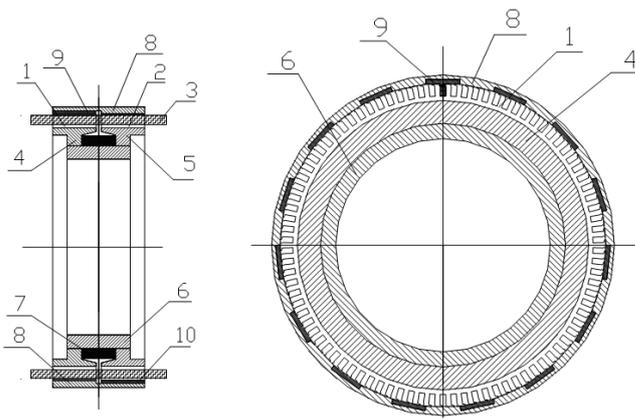


Рисунок 1 - Конструкция

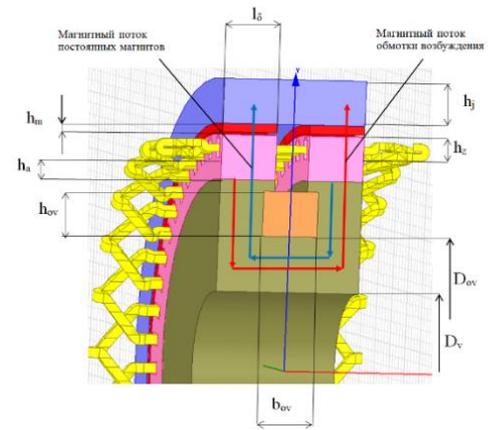


Рисунок 2 - Эскиз магнитной цепи

Параметры, входящие в математическую модель, обычно подразделяют на входные и выходные. Входные параметры можно разделить на следующие три группы.

1. Константы. В эту группу прежде всего необходимо включить параметры технического задания.
2. Ограничения. В эту группу входят параметры, которые нельзя нарушать в процессе оптимального перебора. Они могут быть обусловлены технологией изготовления и эксплуатационными условиями.
3. Независимые переменные. Это переменные, которые можно изменять независимо друг от друга. Как правило, это геометрические размеры, которые можно менять при поиске оптимального варианта.

Выходными параметрами математической модели, как правило, являются показатели качества проектируемого изделия. Они определяются конкретной проектной ситуацией. Это могут быть удельные энергетические параметры, масса, объем, стоимостные показатели.

Как было отмечено выше, математическая модель должна быть достаточно простой. Это обусловлено тем, что расчетные формулы должны быть включены в большое количество оптимизационных циклов. Единственно приемлемой методикой в этом случае является метод эквивалентных схем замещения. Математическую модель представим в виде последовательности алгоритмических шагов (рисунок 3).

По данному алгоритму был составлен программный код с применением языка программирования Delphi, который был включен в подсистему синтеза проектной системы ВЭКВ. Данные уравнения содержат все взаимосвязи между геометрией и характеристиками двигателя. Достоверность и точность математической модели расчета ВЭКВ была проверена на проекте мотор-колеса с параметрами (30 кВт, 72 В, 16000 об/мин). Расчетные характеристики представлены на рисунках 4, 5. Интерес представляет зависимость момента от изменения тока якоря и тока возбуждения, представляющая собой поверхность (рисунок 6).

**Вторая глава** посвящена проектной системе, которая реализует систему синтеза ВЭКВ на основе многоуровневой однокритериальной оптимизации.

Сформулируем основные требования к создаваемой проектной системе с учетом ориентации на сквозные технологии.

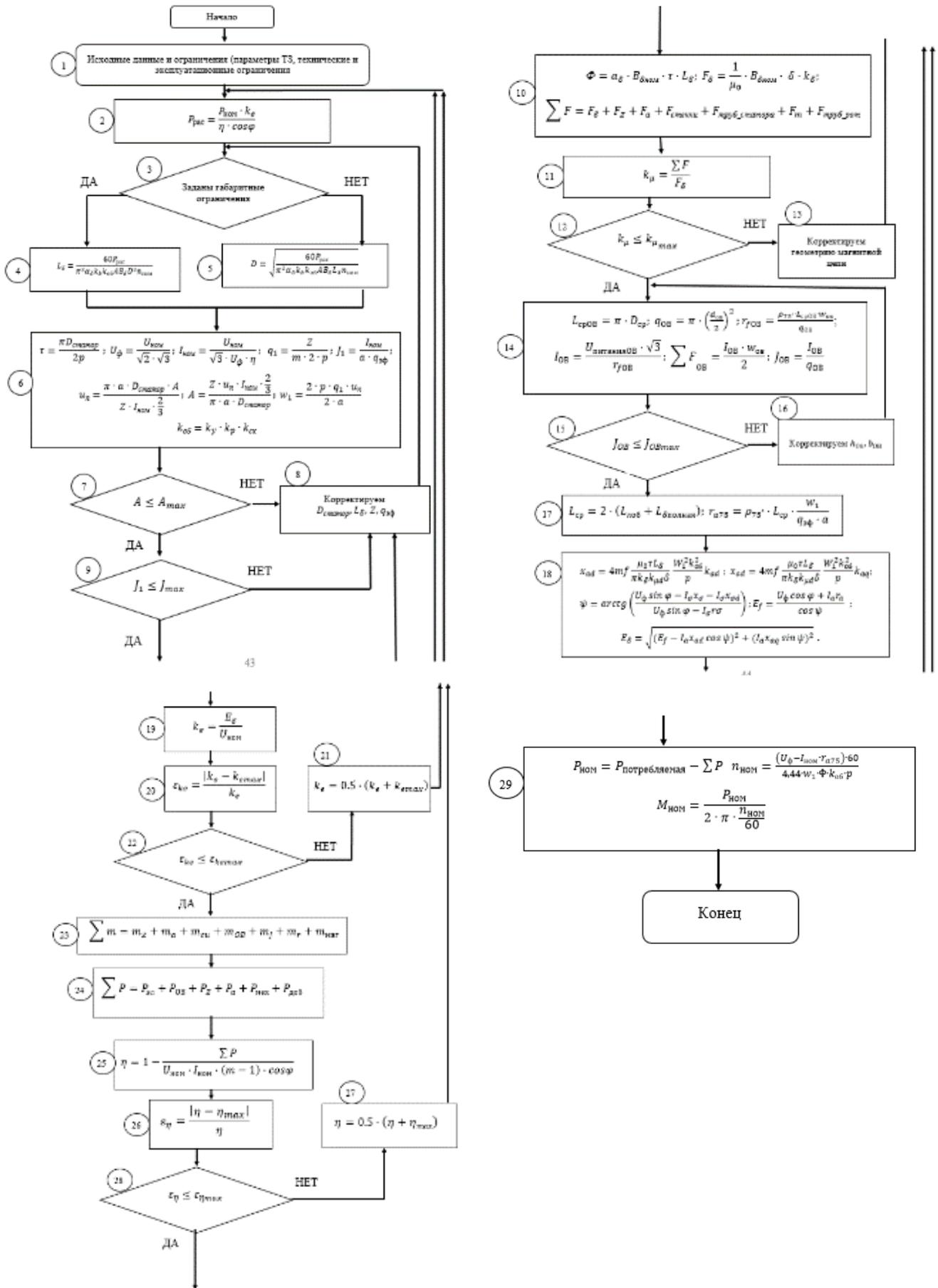


Рисунок 3 - Блок-схема алгоритма расчетов ВЭКВ

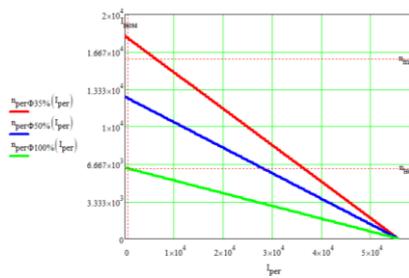


Рисунок 4 - Зависимость момента от тока якоря при различных токах возбуждения

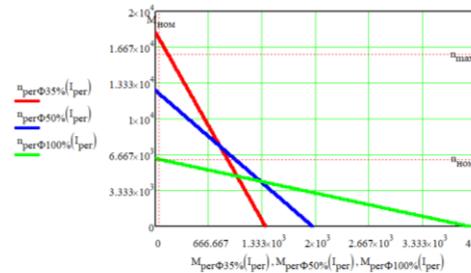


Рисунок 5 - Зависимость скорости от момента при различных токах возбуждения

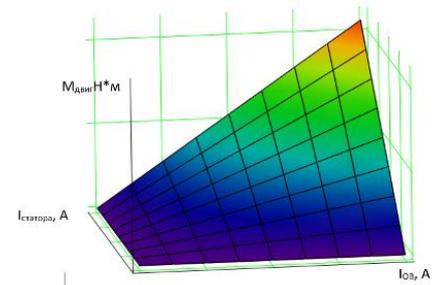


Рисунок 6 - Зависимость момента от тока якоря и тока возбуждения

**Требования к математической модели.** Основным требованием, предъявляемым к математической модели, является гибкость. Гибкость математической модели означает, что она должна включать в себя как можно больше конструктивных исполнений и модификаций. Она должна позволять закладывать в расчет различные материалы, учитывать различные режимы работы. В данном проекте в математическую модель заложена только обращенная конструкция, но модульный принцип построения позволяет в дальнейшем включить в нее нормальную конструкцию. Таковую возможность следует оставить на перспективу.

**Требования к системе оптимизации.** В оптимальном проектировании существует понятие многоуровневой оптимизации. Оно означает следующее. Допустим, имеется однокритериальная система оптимизации с несколькими варьируемыми переменными. При переборе всех переменных мы имеем полную габаритную оптимизацию.

В зависимости от требований проекта одна из переменных может быть зафиксирована, например, для мотор-колеса это может быть наружный диаметр, ограниченный ободом. В этом случае система оптимизации может работать не корректно, так как фиксация одной переменной потребует перестройки математической модели. В тоже время многоуровневая оптимизация позволяет фиксировать от одной, до нескольких независимых переменных без перестройки математической модели. Подробное описание уровней оптимизации, заложенных в проектную систему, представлено ниже.

**Требование совместимости с существующими программными системами.** При проектировании двигателя разработчику необходимо выполнить электромагнитные, тепловые, вентиляционные, прочностные расчеты. Для самостоятельной разработки программ этих расчетов потребуется много времени и усилий. Современное развитие САЕ-систем позволяет воспользоваться уже готовыми, хорошо апробированными на практике программными средствами для этих расчетов. Разработчику нет необходимости идти по сомнительному пути самостоятельного создания этих систем. Задача разработчика заключается в том, чтобы включить в проектную систему на этапе анализа уже существующие программные средства. В качестве инструментов могут быть использованы следующие программные продукты:

– программный комплекс Ansys, позволяющий реализовать анализ электромагнитного и теплового состояния электрической машины по методу конечных элементов;

– программы 3D-моделирования, такие как Solidworks, Autodesk Inventor, КОМПАС 3D;

– программный продукт Ansys Citrix, позволяющий моделировать электронные схемы и алгоритмы взаимодействия между элементами электромеханических систем.

Указанные программные средства показали свою эффективность при проектировании электрических машин в условиях реального промышленного производства. Эти программные средства могут быть включены в систему анализа в виде готовых блоков.

Создаваемая проектная система должна обладать открытым исходным кодом, чтобы пользователь мог корректировать структуру системы в зависимости от поставленных задач.

**Выбор типа оптимизации.** Электроприводы, в которых применяются ВЭКВ, в настоящее время проходят этап инновационного развития. На данном этапе для проектирования ВЭКВ больше всего подходит однокритериальная оптимизация, но для обеспечения гибкости проектной системы в нее может быть встроен ряд однокритериальных задач с различными показателями качества. Решение многокритериальной задачи предполагается реализовать на следующих этапах развития ВЭКВ на основе опыта эксплуатации.

**Выбор метода оптимизации.** Исходя из имеющегося опыта, был выбран метод, который сочетает в себе детерминированный метод покоординатного спуска (Гаусса-Зейделя) при движении к экстремуму с методом однопараметрической оптимизации Фибоначчи, при выборе длины шага поиска. Этот метод позволяет работать как с непрерывными параметрами, так и с дискретными. Он положен в основу формирования блока оптимизатора для системы синтеза.

**Формирование уровней оптимизации.** Для того чтобы проектная система была гибкой, она должна включать в себя несколько уровней оптимизации.

Для нового проекта, когда еще не определены ограничивающие факторы, имеется возможность изменять все варьируемые параметры, реализуя полную габаритную оптимизацию. Частичные габаритные оптимизации возникают, как правило, при модернизации существующего изделия, когда необходимо спроектировать не всю машину, только ее отдельную часть, например, якорь или индуктор. При формировании проектной системы были определены следующие уровни оптимизации:

**1. Полная габаритная оптимизация** (варьируемые параметры: линейная нагрузка, индукция в воздушном зазоре, число полюсов, диаметр якоря, диаметр вала). В качестве критериев оптимальности были выбраны: наименьшая масса активных материалов, наименьший объем активных материалов, наименьшая масса постоянных магнитов.

**2. Оптимизация при заданном числе полюсов** (варьируемые параметры: линейная нагрузка, индукция в воздушном зазоре, число полюсов,

диаметр расточки якоря, диаметр вала). Число полюсов для этого уровня является заданным параметром.

Критерии оптимальности для этой проектной ситуации аналогичны показателям качества полной габаритной оптимизации, а именно: минимальная масса активных материалов, минимальный объем активной части, минимальная масса магнитов.

**3. Оптимизация при заданном наружном диаметре.** Оптимизация при заданном наружном диаметре достаточно часто встречается на практике. Она возникает для вновь разрабатываемых изделий при ограничении внешнего габарита. Основной задачей разработчика при этом является получение мощности при минимальной активной длине, которая обеспечивает заданную мощность.

**4. Оптимизация при фиксированном внутреннем диаметре.** Для этого уровня ограничения совпадают с полной габаритной оптимизацией.

Варьируемыми параметрами для этого уровня будут: линейная нагрузка, индукция в воздушном зазоре, число полюсов, диаметр якоря.

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

**5. Оптимизация при заданной наружной длине.** Проектная ситуация при заданной наружной длине является типичной при ограничении габарита по оси вращения. Показателями качества для этой проектной ситуации служат критерии полной габаритной оптимизации при условии обеспечения заданной мощности. Это минимальная масса активных материалов, минимальный объем активной части, минимальная масса магнитов.

**6. Оптимизация при заданных наружном и внутреннем диаметрах.** На практике часто встречаются ограничения более двух габаритов. В систему добавляются ограничения по наружному и внутреннему диаметрам.

В качестве варьируемых выбираются следующие параметры: линейная нагрузка, индукция в воздушном зазоре, число полюсов.

В качестве показателя оптимальности принимаются: минимальная масса активных материалов, минимальный объем активных частей, минимальная масса магнитов.

**7. Оптимизация при заданном наружном, внутреннем диаметрах и наружной длине.** Оптимизация в заданных габаритах – достаточно часто встречающаяся проектная ситуация для мотор-колеса. Для данного уровня в качестве независимых переменных принимаются следующие параметры: высота постоянного магнита, высота медного слоя, число полюсов. Основным критерием для данной ситуации становится максимальная мощность, которую можно получить в этих габаритах при допустимом уровне нагрева якорной обмотки.

**8. Оптимизация при фиксированных размерах постоянного магнита.** Эта проектная ситуация достаточно типична. Разработчику следует иметь в виду, что заданные размеры магнита могут значительно отличаться от оптимальных. Поэтому результаты данного уровня оптимизации целесообразно сравнить с полной габаритной оптимизацией. Это поможет сделать правильный

с экономической точки зрения выбор: использовать серийные магниты или заказать специальные магниты с оптимальной геометрией.

**Поверочный расчет.** Поверочный расчет не является оптимизационным, но он вписывается в систему оптимизации как вариант, при котором все варьируемые переменные заданы. При этом не происходит перебора вариантов, а делается расчет только одного варианта при известных исходных данных.

В отличие от существующих проектных систем, которые реализуют только одну проектную ситуацию, предлагаемая система синтеза покрывает практически все возможные варианты технических заданий. Если возникает проектная ситуация, которая не вписывается в систему, то ее всегда можно реализовать, выбрав близкий уровень оптимизации, а затем, выполнив поверочный расчет.

На основе данной концепции однокритериальной многоуровневой оптимизации с применением языка программирования Delphi была разработана система оптимального проектирования ВЭКВ, которая способна реализовать различные проектные ситуации. Интерфейс программы синтеза показан на рисунке 7.

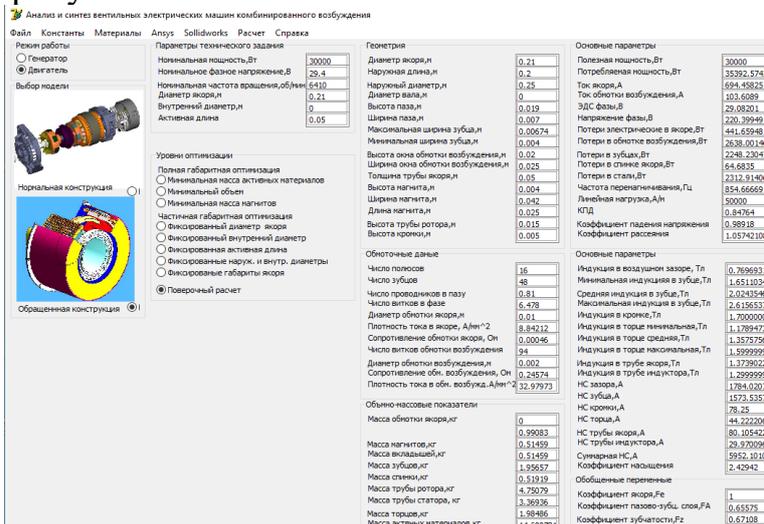


Рисунок 7 - Интерфейс системы однокритериальной многоуровневой оптимизации ВЭКВ

Система синтеза содержит в себе математическую модель, содержащую все необходимые взаимосвязи в электродвигателе. Она содержит поверочный расчет, который выводит все основные результаты. Возникает вопрос о необходимости и целесообразности разработки дополнительной системы анализа на основе достаточно трудоемких CAE-систем. Практика показывает, что это необходимо делать. Обусловлено это недостаточной точностью математической модели, базой которой является метод схем замещения. Для нашей системы анализа выберем хорошо проверенную на практике программу Ansys Electronics Desktop. На суперкомпьютере университета имеется лицензионная версия этой программы. Передача данных из системы синтеза в систему анализа осуществляется через встроенный программный код.

ВЭКВ имеет уникальную магнитную систему и не попадает в ряд стандартных конструкций. Для построения цифровой модели необходимо воспользоваться инструментом трехмерного твердотельного проектирования, встроенного в программу. Предварительно конструкция была параметризирована.

В третьей главе представлена разработка системы анализа ВЭКВ на базе программной среды Ansys Electronics Desktop, связанной с системой синтеза через программный код, который предает исходные данные из системы синтеза в систему анализа. После работы системы синтеза мы получаем полностью спроектированное изделие с оптимальными размерами.

Это означает, что все размеры, однозначно определяющие геометрию, являются переменными, что позволяет выстраивать различные конструкции по результатам оптимизации.

Анализ режимов работы ВЭКВ проводился в режиме Transient, который имеет возможность рассчитывать динамические характеристики с учетом изменения положения ротора и частоты его вращения. Во вращающуюся область Bond были включены постоянные магниты и спинка индуктора, которые имеют более простую геометрию. В модели учитывалось влияние вихревых токов на поверхностях магнитов и в теле магнитной системы.

Результаты анализа электромагнитного состояния двигателя представлены на рисунке 8.

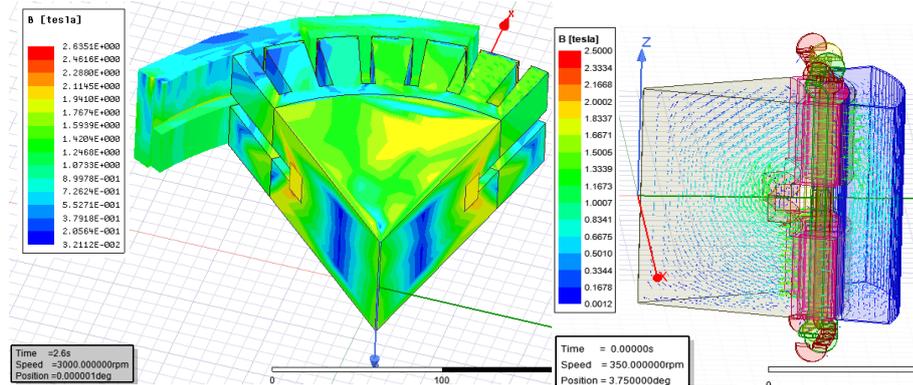


Рисунок 8 - Результаты расчета электромагнитного состояния

В процессе цифрового тестирования электродвигатель разогнался от нулевой скорости до скорости холостого хода.

**Моделирование электронного коммутатора для анализа динамических характеристик.** Особенность работы вентильных двигателей заключается в том, что бесконтактный токоподвод к нему осуществляется через электронный коммутатор.

Теоретически для вентильного двигателя можно применить векторное управление и дискретную коммутацию.

Векторное управление имеет сложный алгоритм. Достоинством его является плавное управление вектором намагничивающей силы поля якоря. По энергетическим характеристикам этот тип коммутации превосходит другие известные типы, но этот способ управления является самым дорогим. Его имеет смысл применять для высокоточных приводов. Для электротрансмиссии транспортного средства это достаточно дорого, хотя многочисленные попытки развивать колесо в этом направлении имеются.

Выберем дискретную 120-градусную коммутацию, которая хорошо зарекомендовала себя на практике и имеет приемлемую цену. Задача анализа несколько упрощается из-за наличия имитатора схем с этим коммутатором в программе.

Коммутатор подключен к фазам ВЭКВ как внешняя цепь. Он имеет настройки реального коммутатора, так как учитывает ЭДС фаз, активные и индуктивные сопротивления фазных обмоток. Разработанная модель двигателя, рассчитанная по методу конечных элементов с подключенным к ней

коммутатором, является цифровым близнецом ВЭКВ. Ниже приводятся характеристики, полученные в результате цифрового моделирования двигателя для мотор-колеса.

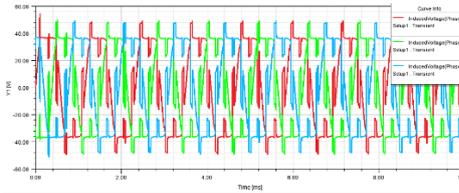


Рисунок 9 – Фазные ЭДС

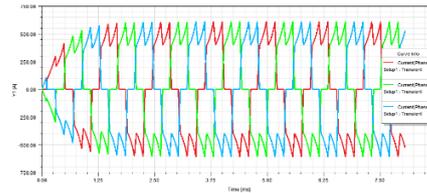


Рисунок 10 - Осциллограмма фазных токов

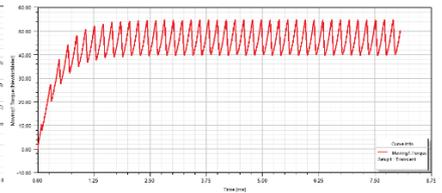


Рисунок 11 - Момент на валу

Приведенные кривые основных параметров и характеристик соответствуют параметрам реального макетного образца ВЭКВ, а также характеристикам, полученным на этапе синтеза. Это говорит о том, что созданная цифровая модель является цифровым двойником реальной электрической машины и может быть использована для системы анализа при проектировании ВЭКВ данного типа.

**Разработка подсистемы теплового анализа ВЭКВ.** Сложность оценки теплового состояния для транспортного средства осложняется тем, что в процессе движения меняются электромагнитные нагрузки и требуется проводить не стационарные расчеты, а динамические.

Для мотор-колеса выберем жидкостное охлаждение из-за значительных нагрузок и закрытого исполнения. Этот выбор благоприятен тем, что в транспортном средстве уже имеется жидкостное охлаждение других устройств и двигатель можно подключить к этой системе.

Следует отметить, что основная часть потерь концентрируется в зубцовой зоне и в зоне обмотки возбуждения. Следовательно, охлаждающую жидкость следует провести под обмоткой возбуждения. Такое расположение охлаждающих каналов позволит эффективно охлаждать саму обмотку возбуждения.

Предлагаемая система охлаждения ВЭКВ и эквивалентная тепловая схема замещения изображены на рисунках 11 и 12.

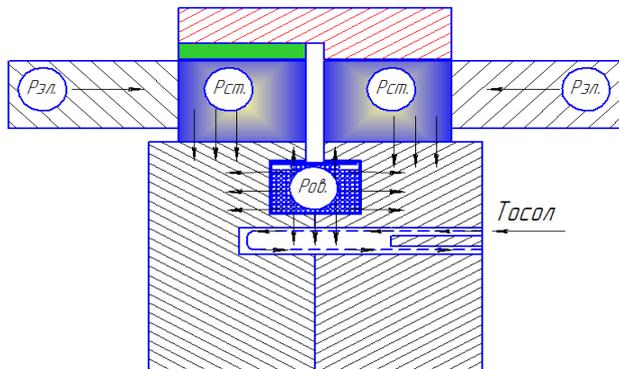


Рисунок 12 - Эскиз системы Охлаждения

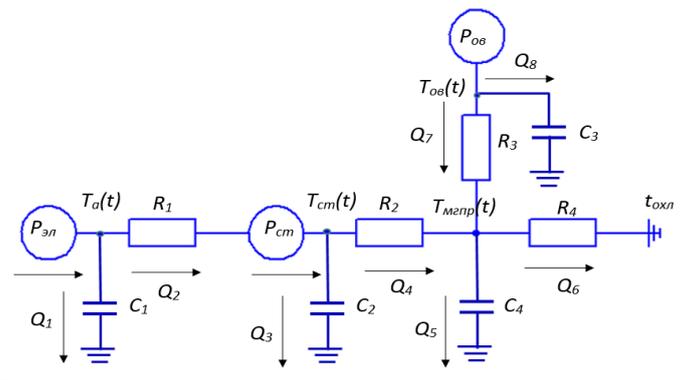


Рисунок 13 - Эквивалентная тепловая схема замещения

Эквивалентной схеме замещения соответствует нижеприведенная система дифференциальных уравнений, где функциями являются температуры наиболее

нагретых частей (обмотки якоря, пакета якоря, обмотки возбуждения, массивного магнитопровода).

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dT_a(t)}{dt} = \frac{P_{эл}}{C_1} - \frac{1}{C_1 R_1} (T_a(t) - T_{ст}(t)) \\ \frac{dT_{ст}(t)}{dt} = \frac{1}{C_2 R_1} (T_a(t) - T_{ст}(t)) + \frac{P_{ст}}{C_2} - \frac{1}{C_2 R_2} (T_{ст}(t) - T_{мгпр}(t)) \\ \frac{dT_{ов}(t)}{dt} = \frac{P_{ов}}{C_3} - \frac{1}{C_3 R_3} (T_{ов}(t) - T_{мгпр}(t)) \\ \frac{dT_{мгпр}(t)}{dt} = \frac{1}{C_4 R_2} (T_{ст}(t) - T_{ст}(t)) + \frac{1}{C_3 R_3} (T_{ов}(t) - T_{мгпр}(t)) - \frac{1}{C_4 R_4} (T_{мгпр}(t) - t_{охл}) \end{array} \right.$$

Данную систему уравнений можно решить одним из известных математических методов, например методом Рунге-Кутты реализованным в программной среде Mathcad в стандартной функции `rkfixed (y,x1,x2,p,D)`. Полученные значения температур показаны на рисунке 14.

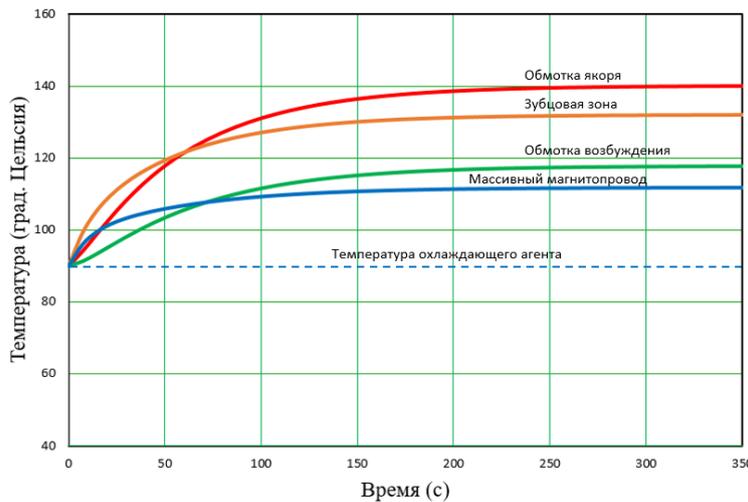


Рисунок 14 – Динамика нагрева активных частей ВЭКВ при непрерывном режиме работы

**В четвертой главе** разработан алгоритм эффективного управления ВЭКВ в составе мотор-колеса электротрансмиссии транспортного средства. Модель учитывает статические и динамические моменты сопротивления при движении транспортного средства. Она включает в себя как характеристики транспортного средства, так и характеристики электродвигателей.

Разработан алгоритм управления ВЭКВ при использовании его в электротрансмиссии. Алгоритм позволяет управлять ВЭКВ при движении транспортного средства в реальных условиях трассы. В алгоритм заложены условия токоограничения. На основании алгоритма управления ВЭКВ разработана программа в среде Delphi, которая позволяет провести цифровое испытание ВЭКВ при движении транспортного средства по заданной трассе. Программа позволяет замерить 16 характеристик электротрансмиссии и электродвигателя (рисунок 14).

**В пятой главе** описана разработка конструкции макетного образца мотор-колеса на базе ВЭКВ, основой для разработанной конструкции послужили выходные данные проектной системы. Созданная проектная система позволяет проектировать ВЭКВ для мотор-колес с различными выходными характеристиками и, как следствие, с различными массогабаритными показателями. Данный факт позволяет в условиях современного производства разрабатывать сразу несколько модельных рядов с различными характеристиками.

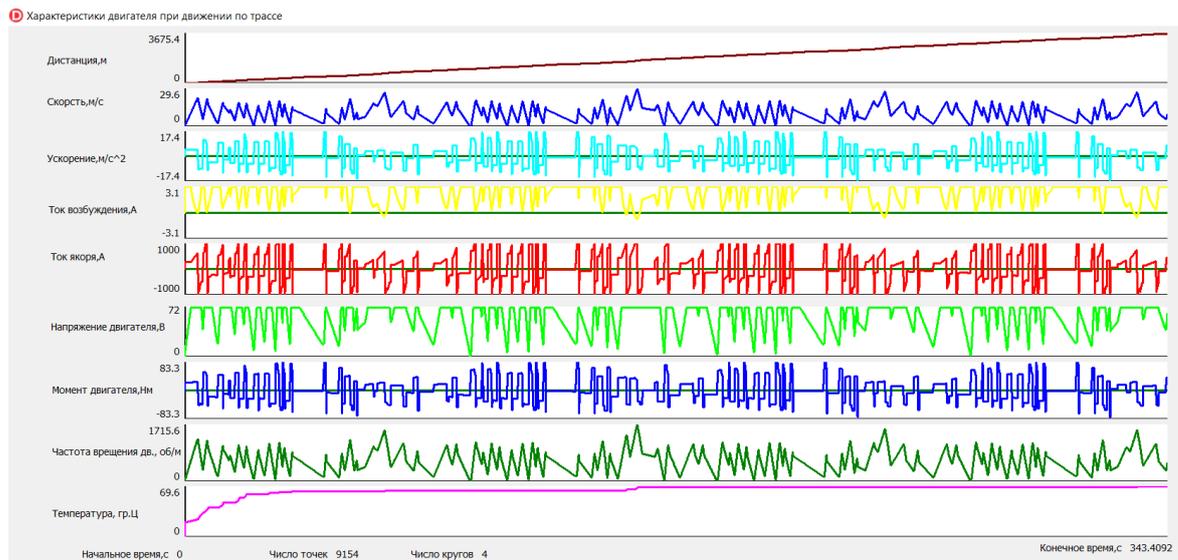


Рисунок 14 - Характеристики электродвигателя при движении по трассе

В рамках данного диссертационного исследования для верификации разработанной проектной системы было принято решение разработать макетный образец мотор-колеса по конкретному ТЗ: максимальные обороты вала колеса 1600 об/мин, максимальный крутящий момент колеса 450 Нм, напряжение АКБ 72 В, передаточное число понижающего редуктора 10, охлаждение жидкостное.

Данное ТЗ было сформировано в рамках подготовки гоночной команды ЮУрГУ (НИУ) к международным соревнованиям Формула студент. Для реализации полученного технического задания с помощью разработанной проектной системы были получены основные размеры активных частей и создана трехмерная твердотельная модель (рисунок 15). Представленный макетный образец рассчитан под стандартный колесный диск R14.

После разработки 3D-модели был изготовлен имитационный образец в масштабе 1:2. Имитационный образец позволил проверить собираемость изделия и работоспособность встроенного планетарного редуктора. Пластиковый имитационный образец на 90% состоит из деталей, напечатанных на 3D-принтере (рисунок 16), остальные 10% - это метизы и стальные детали, изготовленные на токарном станке. Благодаря подбору оптимальных режимов печати удалось достигнуть точности печати  $\pm 0,02$  мм. Высокая точность печати позволила ускорить сборку макетного образца и обеспечить идентичные механические взаимодействия как на реальном образце (рисунок 17).

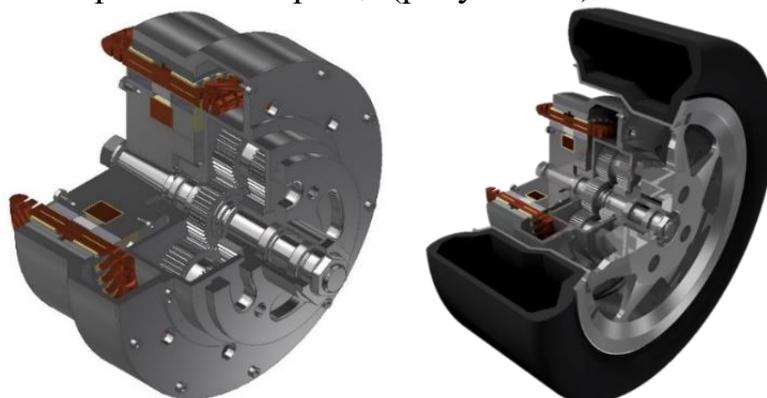


Рисунок 15 - 3D-модель мотор-колеса в сборе



Рисунок 16 - Процесс печати деталей и имитационный образец

Рисунок 17 - Процесс сборки статора

После корректировки 3D-модели был разработан полный комплект конструкторской документации в соответствии с нормами ЕСКД.

Изготовление деталей и сборка мотор-колеса производились на мощностях НОЦ «Машиностроения» ЮУрГУ. Благодаря технологичной конструкции сборка мотор-колеса с ВЭКВ не требует специальных приспособлений и инструментов, что обеспечивает высокую надежность и ремонтпригодность. Для окончательной проверки корректности работы разработанной проектной системы были проведены натурные испытания макетного образца. Для проведения испытаний была изготовлена фиксирующая штанга с основанием. Исходя из наличия в конструкции ВЭКВ обмотки возбуждения, было принято решение спроектировать и изготовить испытательный коммутатор, который позволяет наиболее эффективно использовать преимущества ВЭКВ (рисунок 18).

На первоначальном этапе испытаний было измерено сопротивление изоляции обмотки статора и обмотки возбуждения, после чего были проведены опыт холостого хода и короткого замыкания. Полученные результаты испытаний показывают, что основные характеристики опытного образца мотор-колеса соответствуют расчетным, отклонение составило не более 8%.



Рисунок 18 - Макетный образец мотор-колеса и испытательный коммутатор

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационном исследовании обоснована актуальность разработки электротрансмиссии для гибридного и электротранспорта, проведен анализ научной проработки исследуемой темы, определены задачи по разработке проектной системы синтеза и анализа вентильных электродвигателей

комбинированного возбуждения для мотор-колес электромеханических трансмиссий транспортных средств на основе физического, математического, имитационного и компьютерного моделирования, параметрической многоуровневой оптимизации. На основе решенных в диссертации научных задач были получены следующие научные результаты:

1. На основе проведенного анализа существующих типов трансмиссий в качестве базового был выбран вариант мотор-колеса с встроенным вентильным двигателем комбинированного возбуждения и планетарным редуктором с двухвенцовыми сателлитами. Данное решение позволило сократить массу и габариты электротрансмиссии разместив ее в объеме диска колеса.

2. Разработана методика и математическая модель расчета ВЭКВ на основе метода схем замещения. Приведена блок-схема алгоритма расчета по математической модели. Блок-схема алгоритма реализована в программной среде Delphi и включена в подсистему синтеза проектной системы. Данная модель позволяет сократить время расчета при сохранении точности определения основных параметров до 3-5 %.

3. Разработана система синтеза ВЭКВ на основе параметрической многоуровневой оптимизации. Для блока оптимизации выбран метод, который сочетает в себе метод покоординатного спуска (Гаусса-Зейделя) при движении к оптимуму с методом Фибоначчи при определении шага. Для придания гибкости проектной системе сформировано несколько критериев, которые разработчик может выбирать в зависимости от особенностей проекта. Это позволяет реализовать до 8 проектных ситуаций в зависимости от технического задания заказчика - от полной габаритной оптимизации до поверочного расчета.

4. Разработана система анализа электромагнитного состояния с использованием имитационного моделирования в программной среде Ansys Electronics Desktop. Модель связана с системой синтеза через программный код, который передает параметры оптимальной геометрии в систему анализа. Компьютерная модель подключена к имитатору электронной системы управления, которая позволяет снять характеристики в режиме реальных нагрузок. Данная модель представляет собой цифровой двойник реального электродвигателя, что позволяет снизить технические риски перед производством промышленного образца.

5. Разработана система жидкостного охлаждения ВЭКВ и математическая модель для нее, которая позволяет выполнить динамический анализ теплового состояния электродвигателя при различных режимах функционирования. Модель включена в проектную систему и позволяет контролировать нагрев ВЭКВ.

6. Разработан алгоритм эффективного управления ВЭКВ, который учитывает возможность управления мотор-колесом транспортного средства как по силовой цепи якоря, так и по слаботочной цепи возбуждения, что позволяет изменять частоту вращения и момент на валу в широких пределах. Данный алгоритм разработан на базе математической модели, которая составила основу программы, позволяющей провести цифровое испытание транспортного средства при прохождении им аналога реальной трассы. Программа позволяет контролировать 16 параметров электродвигателя и транспортного средства.

7. Разработана проектная система синтеза и анализа вентильного электродвигателя комбинированного возбуждения для мотор-колеса электромеханической трансмиссии транспортных средств на основе физического, математического, имитационного и компьютерного моделирования, параметрической многоуровневой оптимизации для заданных электромагнитных характеристик. Данная проектная система может составить научную основу для проектирования, создания и эксплуатации промышленного ряда электродвигателей данного типа.

8. На основе выходных данных проектной системы была разработана конструкция мотор-колеса, которая содержит вентильный электродвигатель комбинированного возбуждения с жидкостным охлаждением и планетарный редуктор с двухвенцовыми сателлитами. Изготовлен макетный образец мотор-колеса для гоночного электроболида. Исследованы работоспособность и качество функционирования макетного образца мотор-колеса в различных режимах. Отклонение от расчетных параметров составляет не более 8%.

9. В результате диссертационного исследования расширена научная и инженерная база по разработке электротрансмиссий транспортных средств.

**Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки.** Проведенные научные исследования по созданию электротрансмиссии транспортных средств можно развивать в следующих направлениях: дальнейшее развитие созданной проектной системы до уровня сквозной безбумажной технологии, включение в нее других модификаций вентильных электродвигателей комбинированного возбуждения, подсистемы проектирования встроенного редуктора; разработка системы управления всем транспортным средством, включая функции рекуперации при торможении, безрулевое управление за счет изменения скорости колес, электропитания от топливного элемента; разработка мощностного ряда электротрансмиссий для легкового и грузового гибридного и электротранспорта.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*Публикации в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ:*

1. Gandzha, S. Design of a Combined Magnetic and Gas Dynamic Bearing for High-Speed Micro-Gas Turbine Power Plants with an Axial Gap Brushless Generator / S. Gandzha, N. Neustroev, **I. Chuyduk**, S. Shabiev // Processes 2022, 10 (6), 1067. 1,0 п. л./0,25 п. л. (Scopus).

2. Gandzha, S. Development of a Motor-Wheel Based on a Brushless Machine of Combined Excitation for Hybrid and Electric Transport / S. Gandzha, **I. Chuyduk**, M. Nazarov // Proceedings – 2021 International Ural Conference on Electrical Power Engineering, UralCon. – September 2021. – pp. 630 – 633, 0, 31 п. л./0,10 п. л. (Scopus).

3. Neustroev, N. Starter Generator Design Development for Modern Micro Gas Turbine Plant/ N. Neustroev, A. Kotov, **I. Chuyduk** // Proceedings – 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, (ICIEAM). – 2020. – 9111922. 0,31 п. л./0,11 п. л. (Scopus).

4. Kotov, A. Mathematical Modeling Asynchronized Synchronous wind Turbine Generator on the Basis of Generalized Variables with the Purpose of Main Machine Geometrical Parameters Optimization / A. Kotov, N. Neustroev, **I. Chuyduk** // Proceedings – 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM. – 2020. – 9111967. 0,437 п. л./0,143 п. л. (Scopus).

5. Neustroev, N. Passive Magnet Bearing Development for Axial Flux Permanent Magnet Generator with Diamagnetic Armature / N. Neustroev, S. Gandzha, **I. Chuyduk** // Proceedings – 2020 Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research and Practice, PEAMI. – September 2020, – 9234313. pp. 98 – 102, 0,31 п. л./0,11 п. л. (Scopus).

6. Котов, А.А. Разработка математической модели асинхронизированного синхронного ветрогенератора для задачи оптимизации основных геометрических размеров на основе обобщенных переменных / А.А. Котов, **И.А. Чуйдук**, Н.И. Неустроев // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. -2020. - № 33 - С. 78-98; 1,31 п. л./0,33 п. л.

*Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ*

7. Ганджа, Д.С., **Чуйдук, И.А.** Программа синтеза оптимальных конструкций вентильных электрических машин комбинированного возбуждения. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023613204. Дата госрегистрации в Реестре программ для ЭВМ 13 февраля 2023 г.

8. Ганджа, Д.С., **Чуйдук, И.А.** Моделирование движения электромобиля на базе двигателей комбинированного возбуждения. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023613637. Дата госрегистрации в Реестре программ для ЭВМ 17 февраля 2023 г.

*Публикации в других изданиях*

9. **Чуйдук, И. А.** Дизель-стартер-генераторная установка с высокими массоэнергетическими показателями / И. А. Чуйдук, С. А. Ганджа // Материалы 4-й научной выставки-конференции научно-технических и творческих работ студентов «Молодой исследователь». – Челябинск: Южно-Уральский государственный университет, 2017. С 89-93; 0,31 п. л./0,19 п. л.

10. Пахомеев, Н.В. Разработка колесно-ступичного узла гоночного электроботида класса Formula Student / Н.В. Пахомеев, А.В. Лопухов, **И.А. Чуйдук**, Г.Н. Салимоненко // Материалы Международной научно-практической конференции Института агроинженерии «Сервис технических систем – агропромышленному комплексу России». – Челябинск: Южно-Уральский государственный аграрный университет, 2019. - С. 140-147; 0,5 п. л./0,13 п. л.

11. **Чуйдук, И. А.** Разработка электротрансмиссии электроботида с учетом регламента соревнований «Формула студент» / И.А. Чуйдук, А.Е. Ларин, Г.Н. Салимоненко, А.В. Лопухов, Н.В. Пахомеев // Материалы Международной научно-практической конференции Института агроинженерии «Сервис технических систем – агропромышленному комплексу России». – Челябинск: Южно-Уральский государственный аграрный университет, 2019. С. 165-174; 0,5 п. л./0,1 п. л.

В статьях [1-3] автору принадлежит разработка структуры многоуровневой оптимизации, в статьях [4-6] построение принципов системы анализа и синтеза, разработка цифровой модели, в статьях [9-11] разработка трехмерных твердотельных моделей и рабочих чертежей.

**Чуйдук Иван Александрович**  
**СИНТЕЗ И АНАЛИЗ ВЕНТИЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ**  
**КОМБИНИРОВАННОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ ДЛЯ**  
**ЭЛЕКТРОТРАНСМИССИЙ НАЗЕМНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ**

2.4.2. Электротехнические комплексы и системы  
АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Издательский центр Южно-Уральского государственного университета

Подписано в печать . Формат 60×84 1/16. Печать цифровая.

Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. 1,0. Тираж 80 экз. Заказ

Отпечатано в типографии Издательского центра ЮУрГУ.

454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 76.