

**Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Самарский государственный технический университет»**

На правах рукописи



**Верещагин Владислав Евгеньевич
ТЯГОВЫЙ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ С
МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ ДЛЯ
ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ МАЛОЙ ГРУЗОПОДЪЕМНОСТИ**

Специальность 2.4.2. - Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Самара – 2023

Работа выполнена на кафедре «Электромеханика и автомобильное электрооборудование» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Самарский государственный технический университет»

Научный руководитель: **Зубков Юрий Валентинович**,
доктор технических наук, доцент, кафедра
«Электромеханика и автомобильное
электрооборудование» ФГБОУ ВО «Самарский
государственный технический университет», г.
Самара.

Официальные оппоненты: **Ганджа Сергей Анатольевич**,
доктор технических наук, профессор кафедры
«Электропривод, мехатроника и электромеханика»
ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный
университет (национальный исследовательский
университет)»

Малеев Руслан Алексеевич,
кандидат технических наук, профессор кафедры
«Электрооборудование и промышленная
электроника» ФГАОУ ВО «Московский
политехнический университет»
Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский
университет «МЭИ»» (г. Москва)

Защита состоится 18 апреля 2023 г. в 12:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.377.06 на базе ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» по адресу: г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, Главный корпус, ауд. № 200.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Самарского государственного технического университета по адресу: 443100, Россия, г. Самара, ул. Первомайская, д. 18.

Отзывы на автореферат просим высылать в двух экземплярах, заверенных печатью, по адресу: 443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, Самарский государственный технический университет, Главный корпус, ученому секретарю диссертационного совета 24.2.377.06; тел. (846) 337-04-43, e-mail: Стрижаковой Елене Владимировне a-ezhova@yandex.ru.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.377.06



Стрижакова Е.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Актуальность и степень научной разработанности темы

Взрывной рост производства легковых транспортных средств (ТС) на электрической тяге не привел к столь же быстрому прогрессу в области ТС малой и средней грузоподъемности. Это объясняется рядом факторов, влияющих на стоимость, надежность, энергоэффективность всего привода и тягового электродвигателя (ТЭД), в частности. К ним можно отнести задачи обеспечения предельных тепловых нагрузок, а также высокого момента при изменении частоты вращения в широком диапазоне. Актуальность снижения массогабаритных характеристик тягового электродвигателя, размещаемого в ограниченном подкапотном пространстве или в ступице мотор-колеса – главная задача при проектировании этой электрической машины. Важнейшим требованием к системе электропривода ТС остается его конкурентная цена, которая во многом определяется стоимостью наиболее дорогого компонента современного ТЭД - высокоэнергетических постоянных магнитов. Решение перечисленных актуальных задач по разработке и совершенствованию электрических ТЭД ТС малой грузоподъемности должно обеспечиваться не только применением современных материалов и компонентов, но и за счет создания и совершенствования методик оптимизационного проектирования, включающих разработку аналитических и цифровых моделей анализа электромагнитного и теплового состояния машины, основанных на последних достижениях в области электромеханики.

В Российской Федерации многие научные учреждения и отдельные ученые занимались вопросами разработки тяговых электрических машин. Традиционно такие работы велись в области железнодорожного транспорта и электрической трансмиссии большегрузных самосвалов. Исследование и внедрение отечественных электроприводов в сфере легкового автомобильного транспорта и ТС малой и средней грузоподъемности находится на начальном этапе, что обусловлено сложившейся мировой конъюнктурой, которую в настоящее время приходится в корне менять.

Значительный вклад в развитие методов проектирования, оптимизации, анализа электромагнитных и электромеханических процессов преобразователей с постоянными магнитами в указанной области внесли такие ученые как: Сарапулов Ф.Н., Пластун А.Т., Казаков Ю.Б., Ковалев К.Л., Беспалов В.Я., Анучин А.С., Шевченко А.Ф., Приступ А.Г., Захаренко А.Б., Геча В.Я., Зубков Ю.В., Макаричев Ю.А., Ганджа С.А., Исмагилов Ф.Р., Вавилов В.Е. Среди работ зарубежных исследователей по тематике тяговых электрических машин следует выделить труды C.Chan, A. El-Refaie, Y. Gai, S. Han, J. Miller, S. Mizuno, G. Pellegrino, M. Schiefer.

Большое число научных публикаций и растущий интерес фирм-производителей тягового электрооборудования в Российской Федерации к возможности их практической реализации свидетельствует о перспективности данного научного направления. При этом ряд вопросов, связанных с проектированием и оптимизацией тяговых электрических двигателей, остаются не решенными.

Отсутствует методика выбора конструкции якоря и индуктора на стадии предварительных расчетов основных размеров ТЭД с магнитоэлектрическим возбуждением с учетом многообразия схем и способов исполнения обмотки и размещения ПМ в индукторе. Разработка алгоритма выбора типа обмотки и расчета объема ПМ, требуемого для реализации заданного момента в определенных габаритах, является насущной задачей.

Не решены вопросы оценки теплового состояния ТЭД простыми и эффективными методами. Существующие методики тепловых расчетов на основе тепловых схем замещения не адаптированы к конструктивным особенностям ТЭД и не учитывают изменение величин тепловыделений в элементах двигателя при вариации частоты вращения, нагрузки. С ростом температуры ухудшаются энергетические параметры ПМ и, следовательно, эффективность работы двигателя – это требует уточненного теплового расчета индуктора.

Объект исследования - тяговый электрический двигатель с возбуждением от постоянных магнитов, предназначенный для транспортных средств малой грузоподъемности.

Предмет исследования - методы проектирования, анализа электромеханических, электромагнитных, тепловых процессов.

Цель диссертационного исследования

Разработка эффективного тягового магнитоэлектрического электродвигателя автомобильного транспорта малой грузоподъемности на основе уточненного электромагнитного анализа, совершенствования методик и алгоритмов проектирования.

Основные задачи и направления исследований

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Обосновать рациональность применения синхронной электрической машины с магнитоэлектрическим возбуждением и инкорпорированными постоянными магнитами в качестве тягового двигателя транспортного средства малой грузоподъемности с электрическим или гибридным приводом.
2. Сформулировать требования к тяговому двигателю на транспортном средстве с параллельной или последовательной трансмиссией.
3. Разработать алгоритм и методику проектирования двигателя по максимуму электромагнитного момента с учетом габаритных ограничений.
4. Провести параметрическую оптимизацию конструкции сердечника и обмотки якоря средствами конечно-элементного компьютерного моделирования.
5. Разработать методику проектирования индуктора и оптимизировать его по минимуму объема постоянных магнитов с учетом рабочих температурных нагрузок.
6. Осуществить анализ теплового состояния двигателя по вновь разработанной тепловой схеме замещения с проверкой результатов численным моделированием и экспериментом.
7. На базе проведенных теоретических исследований разработать, изготовить и испытать опытный образец тягового двигателя.

Методы исследования

При решении поставленных задач использовались теория обобщенной

электрической машины, электромагнитного поля, электрических цепей с сосредоточенными параметрами, гармонического анализа, метод тепловых схем замещения. Для решения задач расчета электромагнитных и тепловых процессов применялись численные методы моделирования физических полей, реализованные в программных пакетах *Ansys Maxwell, Fluent*. Экспериментальная часть работы выполнена на опытном образце машины, изготовленном на основе проведенных исследований и при участии автора на предприятии-партнере СамГТУ – НПО «Шторм».

Научная новизна работы

1. Разработан алгоритм проектирования и методика электромагнитного расчета ТЭД, отличающиеся учетом стоимости ПМ, наличием этапа параметрической оптимизации сердечника и обмотки якоря.

2. Предложена методика проектирования индуктора, включающая блок минимизации объема ПМ средствами численного моделирования магнитного поля и отличающаяся учетом формы магнитов и их расположения в индукторе.

3. Усовершенствована тепловая схема замещения и разработан алгоритм оценки теплового состояния ТЭД, отличающийся наличием уточняющих итерационных циклов, в ходе которых учтено изменение электромагнитных свойств активных материалов при нагревании.

Теоретическая значимость

Полученные научные результаты расширяют теоретическую базу в области проектирования тяговых электрических двигателей с магнитоэлектрическим возбуждением. Новые аналитические зависимости уточняют и совершенствуют методы расчета электрических машин этого назначения. Проведенные исследования учитывают особенности работы ТЭД в широком диапазоне изменения частоты вращения и момента. Разработаны методики электромагнитного, механического и теплового расчетов, содержащие элементы оптимизации якоря и индуктора. Адекватность теоретических положений подтверждена результатами испытаний опытного образца двигателя.

Практическая значимость

Практическая значимость работы подтверждается актами внедрения результатов исследования на предприятии НПО «Шторм» и в учебный процесс ФГБОУ ВО СамГТУ.

1. В результате проведенных исследований установлена целесообразность использования ТЭД магнитоэлектрического возбуждения с инкорпорированными в индуктор магнитами в электрической части трансмиссии полностью электрического или гибридного ТС малой грузоподъемности.

2. Разработанные методики электромагнитного, теплового расчетов позволяют проектировать ТЭД и оптимизировать его активные части с малыми временными затратами в соответствии с заданными техническими характеристиками.

3. Эффективность предложенных методик проектирования и возможность их применения для создания перспективных ТЭД ТС с электрическим приводом доказана в ходе экспериментальных исследований.

4. Разработаны рекомендации по выбору электромагнитных нагрузок при разных способах охлаждения, конфигурации источников магнитного поля и типах обмотки якоря.

На защиту выносятся следующие положения

1. Методика электромагнитного расчета ТЭД и алгоритм оптимизационного проектирования по максимуму электромагнитного момента, включающий параметрическую оптимизацию сердечника якоря и обмотки.

2. Методика проектирования индуктора с элементами оптимизации по минимуму объема ПМ средствами численного моделирования, учитывающая конфигурацию и расположение магнитов в сердечнике.

3. Тепловая схема замещения и алгоритм оценки теплового состояния двигателя, включающий итерационные циклы, учитывающие изменение электромагнитных свойств активных материалов и условий теплопередачи при нагревании.

Соответствие паспорту специальности

Диссертация соответствует паспорту специальности 2.4.2. «Электротехнические комплексы и системы» по следующим пунктам: п.1. «Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, анализ системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем, включая электромеханические, электромагнитные преобразователи энергии и электрические аппараты, системы электропривода, электроснабжения и электрооборудования»; п.2. «Разработка научных основ проектирования, создания и эксплуатации электротехнических комплексов, систем и их компонентов»; п.3. Разработка, структурный и параметрический синтез, оптимизация электротехнических комплексов, систем и их компонентов...».

Степень достоверности полученных результатов

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций обеспечена корректным использованием математического аппарата, соответствием результатов теоретического анализа и вычислительных экспериментов, обсуждением положений и результатов работы с зарубежными и российскими специалистами в ходе конференций и научных мероприятий, подтверждается удовлетворительной сходимостью результатов теоретических и экспериментальных исследований.

Апробация результатов

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на международной научно-технической конференции «Бенардосовские чтения» (Иваново, 2013г.); международной научно-практической конференции «Электротехнические комплексы и системы» (Уфа, 2020); международной научно-технической конференции «International Ural Conference on Electrical Power Engineering» (Челябинск 2021).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 12 работ, в том числе 8 – в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 2 – в журналах, индексируемых в базе *Scopus*.

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка. Основная часть изложена на 122 страницах, содержит 65 рисунков, 16 таблиц. Библиографический список содержит 117 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность разработки тягового электродвигателя для транспортных средств малой грузоподъемности. Дан анализ научных публикаций по теме диссертационного исследования, определены цели, задачи, методы исследований и основные научные результаты, выносимые на защиту, изложены научная новизна и практическая значимость работы, приведена информация о публикациях по теме диссертации и ее апробации на конференциях, определен личный вклад автора в представленное исследование.

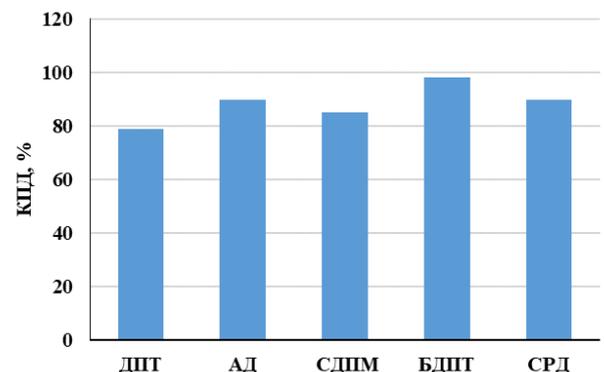
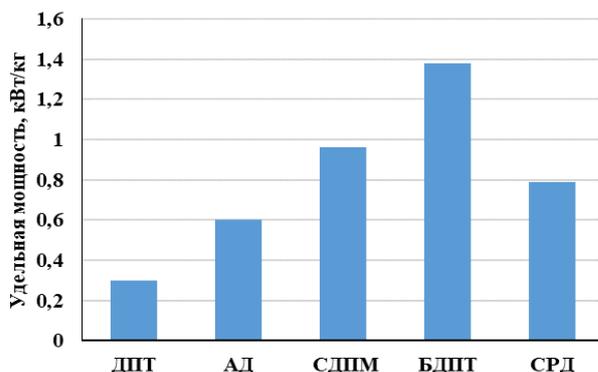
В первой главе проведен анализ типов трансмиссии гибридных автомобилей и конструкций тяговых электрических двигателей (ТЭД), которые в них используются. Выявлены их положительные стороны и отмечены недостатки.

Сравнение удельных характеристик двигателей постоянного тока (ДПТ), асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором (АД), синхронных двигателей с постоянными магнитами (СДПМ), бесконтактных двигателей постоянного тока (БДПТ), синхронных реактивных двигателей (СРД), используемых в качестве ТЭД, производилось по следующим параметрам: удельная мощность (кВт/кг), энергоэффективность (%), надежность (%), стоимость. На рис. 1 показаны гистограммы указанных критериев при сравнении различных типов электрических двигателей. В табл. 1 приведены значения удельного момента трех типов двигателей, которые наиболее часто используются в качестве тяговых для электромобилей и гибридных автомобилей.

Таблица 1

Удельный момент некоторых типов ТД

Тип двигателя	Момент/Объем, (Нм/ м ³)	Момент/Масса меди, (Нм/кг)
СДПМ	28860	28...48
АД	4170	6,6
СРД	6780	6,1



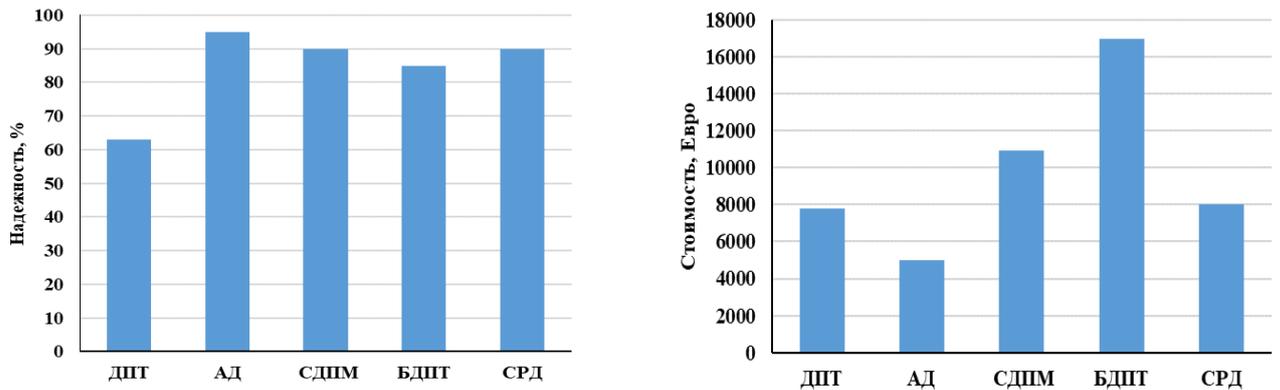


Рисунок 1. Сравнение электрических двигателей для тяговых приложений

В результате проведенных исследований в качестве базового варианта ТЭД для коммерческого транспортного средства малой грузоподъемности выбран синхронный двигатель с магнитоэлектрическим возбуждением и инкорпорированными в индуктор V-образными магнитами, как имеющей максимальную удельную мощность и степень использования активных материалов.

Вторая глава посвящена вопросам проектирования и оптимизации активной зоны двигателя. Нагрузка тягового двигателя постоянно меняется при изменении режимов движения ТС. Зная скоростной профиль автомобиля, передаточное отношение главной передачи и диаметр колеса ТС можно определить требуемый максимальный вращающий момент. На рис. 2. приведен пример скоростного профиля коммерческого автомобиля малой грузоподъемности.

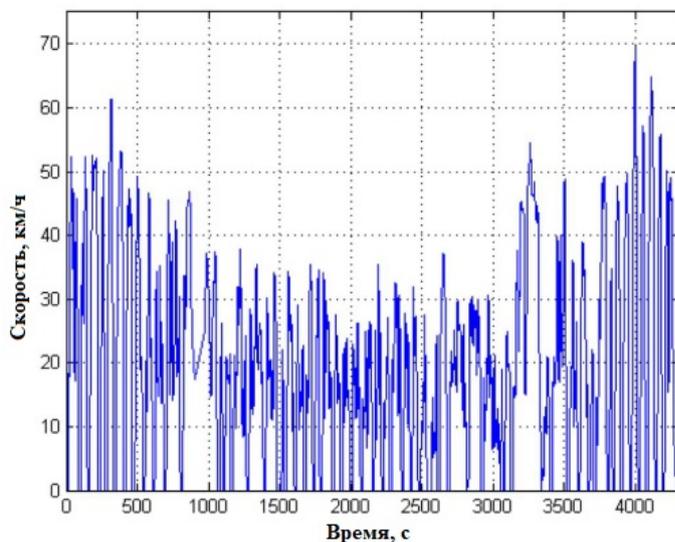


Рисунок 2. Скоростной профиль автомобиля малой грузоподъемности в городском цикле



Рисунок 3. Алгоритм проектирования ТЭД по максимуму момента

В работе определены базовые параметры электромагнитного расчета ТЭД и границы их изменения в процессе проектирования, составлен алгоритм проектирования по критерию максимума электромагнитного момента. Представленный на рис. 3 алгоритм содержит несколько этапов:

- определение основных размеров ТЭД;
- выбор типа обмотки и конфигурации зубцовой зоны;

- расчет индуктора и определение объема ПМ.

В качестве ограничения предлагается использовать внешний диаметр статора, выбираемый с учетом свободного пространства на борту ТС. Длина активной части в процессе проектирования должна обеспечить требуемые моменты.

Выходным критерием процесса проектирования является величина электромагнитного момента ТЭД, который он может обеспечить в указанных габаритах. Момент двигателя с наличием реактивной составляющей может быть найден как

$$M = \frac{mp}{4\pi^2 n^2} \left(\frac{U \cdot E_0}{L_d} \sin \theta + \frac{U^2 (L_d - L_q)}{2L_d L_q} \sin 2\theta \right), \quad (1)$$

где n - частота вращения; U - фазное напряжение; L_d , L_q - индуктивности обмотки статора по продольной и поперечной осям соответственно; θ - угол нагрузки.

В соответствии с предложенным алгоритмом на начальном этапе были заданы следующие параметры: бортовое напряжение шины постоянного тока, номинальная (базовая) частота вращения ТЭД, число полюсов с учетом частоты перематывания на верхнем пределе скорости и величины удельных магнитных потерь на этой частоте.

В ходе проектирования проведена параметрическая оптимизация якоря, включающая выбор типа обмотки и конфигурации сердечника статора средствами пакета *Ansys Maxwell*. Для выбора варианта обмотки были определены показатели сравнения (критерии оптимизации): максимальный электромагнитный момент; форма кривой противоЭДС и относительное содержание высших гармонических в ней; содержание высших гармоник в кривой МДС; магнитные потери в магнитопроводе; электрические потери в обмотке; уровень пульсаций момента. Данная многокритериальная задача, была сведена к однокритериальной путем выделения главного критерия оптимизации, в качестве которого выбран максимум электромагнитного момента ТЭД. Остальные критерии выступили как ограничения.

В качестве варьируемых переменных выбраны число пазов на полюс и фазу q и тип обмотки (распределенная или сосредоточенная). Задача решалась методом простого перебора, поскольку число независимых параметров невелико.

В ходе оптимизации были в программном комплексе *Ansys Maxwell* решены задачи расчета магнитного поля ТЭД на холостом ходу и нагрузочном режиме в стационарной и нестационарной постановках. Расчет характеристик ТЭД мощностью 80 кВт производился для частот вращения 1500 и 5000 об/мин. Основные результаты численного моделирования приведены в таблице 2.

По результатам моделирования электромагнитный момент модели 3 меньше других по причине относительно малой величины основной гармоники противоЭДС. Пульсации и малая величина синхронизирующего момента негативно сказываются на стабильности частоты вращения моделей 2 и особенно 3. На рис. 4 показано распределение магнитного поля в поперечном сечении ТД при работе под нагрузкой.

Результаты моделирования

Параметр	Ед.изм.	1500 об/мин		5000 об/мин		
		Мод.1	Мод.2	Мод.1	Мод.2	Мод.3
Холостой ход						
ЭДС	В	238	221	794	737	432
<i>THD</i>	%	9,8	8,9	9,8	8,9	35,2
Реактивный момент	Нм	116	47	385	158	42
Работа под нагрузкой						
Фазный ток	А	174				
Фазовый угол	Эл.град.	63,1	32,4	52,3	16,2	55,5
Средний момент	Нм	508		153		
Пульсации момента	%	13,4	23,6	17,6	137	45,8
Магнитные потери	Вт	371	361	1924	2266	1743
Электрические потери	Вт	3815	3433	3815	3433	3433
Выходная мощность	кВт	80				
КПД (электромагнитный)	%	0,950	0,955	0,933	0,933	0,939

Параметры обмотки якоря: Мод.1- число пазов $z=36$, число пазов на полюс и фазу $q=2$ (распределенная); Мод.2- $z=9$, $q=0,5$ (сосредоточенная); Мод.2- $z=18$, $q=1$ (сосредоточенная); *THD* – коэффициент гармонических искажений

$$THD = \frac{\sqrt{E_2^2 + E_3^2 + E_4^2 + \dots}}{E_1} \cdot 100\% \quad (E_1, E_2, E_3, \dots - \text{амплитуды гармоник противоЭДС}).$$

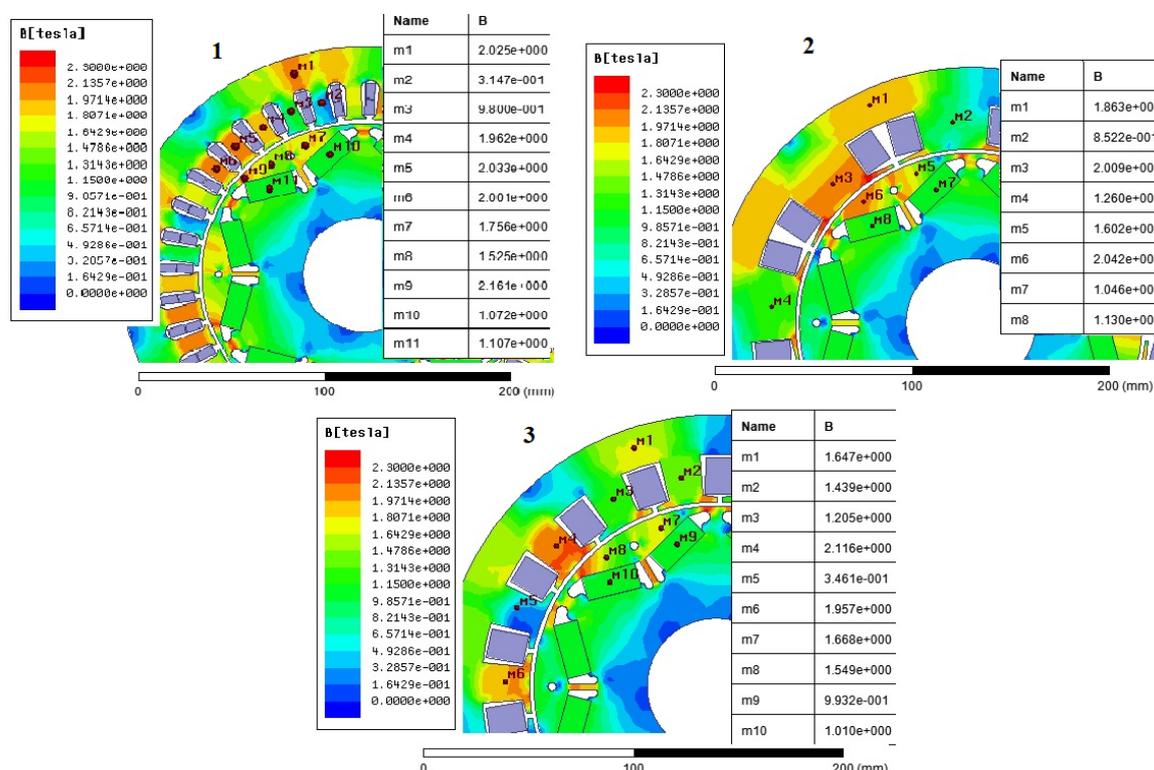


Рисунок 4. Распределение магнитного поля при нагрузке

Анализ картины поля показывает, что под действием реакции якоря насыщаются участки ярма статора в моделях 1 и 2 (m1) и зубцы (m5, m6).

Коронки зубцов модели 2 сильно насыщены (до 2,3 Тл), что вызывает увеличение высших пространственных гармоник в воздушном зазоре. В модели 3 происходит частичное размагничивание ПМ на сбегавшем крае полюса под действием поля якоря.

На диаграмме (рис. 5) показаны величины магнитных потерь в моделях 1 - 3 при разных частотах вращения двигателя.

Анализ результатов численного моделирования магнитного поля ТЭД с различной структурой обмотки и конфигурацией магнитопровода показал, что предпочтительной в качестве обмотки якоря ТЭД является распределенная обмотка (модель 1). Сосредоточенная обмотка (модель 3) не может быть применена, так как не создает синхронизирующего момента достаточной величины для удержания ТЭД в синхронизме при базовой частоте вращения. Двигатель с распределенной обмоткой создает в 2,5 раза больший реактивный момент по сравнению с машиной с сосредоточенной обмоткой (модель 2), имеет в 1,8 раза меньшие пульсации электромагнитного момента и одинаковые показатели по качеству противоЭДС и КПД.

На основе теоретических положений главы 2 был спроектирован и изготовлен опытный образец ТЭД (рис. 6) мощностью 80 кВт для использования в приводе коммерческого гибридного автомобиля и проведены его испытания. Масса двигателя составила 119 кг, КПД 93%, удельная мощность при базовой частоте вращения 0,67 кВт/кг. В двигательном режиме средний момент на валу при частоте вращения 1500 об/мин составил 498 Нм, что близко к расчетному показателю. Испытания опытного образца ТЭД с распределенной обмоткой якоря подтвердили правильность теоретических положений, лежащих в основе методики электромагнитного расчета.

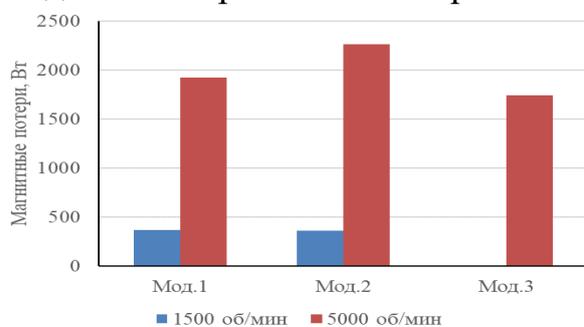


Рисунок 5. Магнитные потери



Рисунок 6. Тяговый электродвигатель

В третьей главе разработана методика определения объема ПМ, отличающаяся учетом формы магнитов и места их расположения в индукторе. Данные факторы напрямую влияют на размагничивание ПМ при воздействии реакции якоря.

Предложен подход к процедуре проектирования ТЭД и выбора материала ПМ для обеспечения заданной мощности и крутящего момента с учетом стоимости, и способности ПМ выдерживать влияние размагничивающего влияния температуры и внешнего поля. Алгоритм проектирования индуктора ТЭД с методикой определения объема ПМ приведен в виде блок-схемы на рис. 7.

Для определения коэффициентов формы поля возбуждения и реакции якоря были исследованы магнитные поля (основное и реакции якоря) средствами пакета *Ansys Maxwell*. По результатам моделирования установлено, что в диапазоне изменения конструктивного коэффициента полюсной дуги $\alpha_i = 0,667...1,0$ коэффициент формы поля возбуждения варьируется в пределах $k_f = 1,0...1,175$, а коэффициент продольной реакции якоря $k_{ad} = 0,72...0,81$. Для проектируемого ТЭД коэффициент использования в зависимости от величины зазора, коэффициента рассеяния индуктора и материала ПМ находится в пределах $\xi = 0,5 \div 0,8$. Величина объемного коэффициента ПМ определяется по формуле (2) и составляет

$$C_V = \frac{2k_p k_f k_{ad} (1 + k_{E0})}{\pi^2 \xi} = 0,636...1,443, \quad (2)$$

где k_p - коэффициент перегрузочной способности; k_{E0} - коэффициент ЭДС в режиме перевозбуждения.

Тогда объем всех постоянных магнитов

$$V_{PM} = C_V \frac{P_n}{f \cdot B_r \cdot H_c} = 2ph_m l_m b_m, \quad (3)$$

где h_m, l_m, b_m - высота, длина и ширина магнита; f - частота; B_r - остаточная индукция, H_c - коэрцитивная сила; P_n - номинальная мощность.

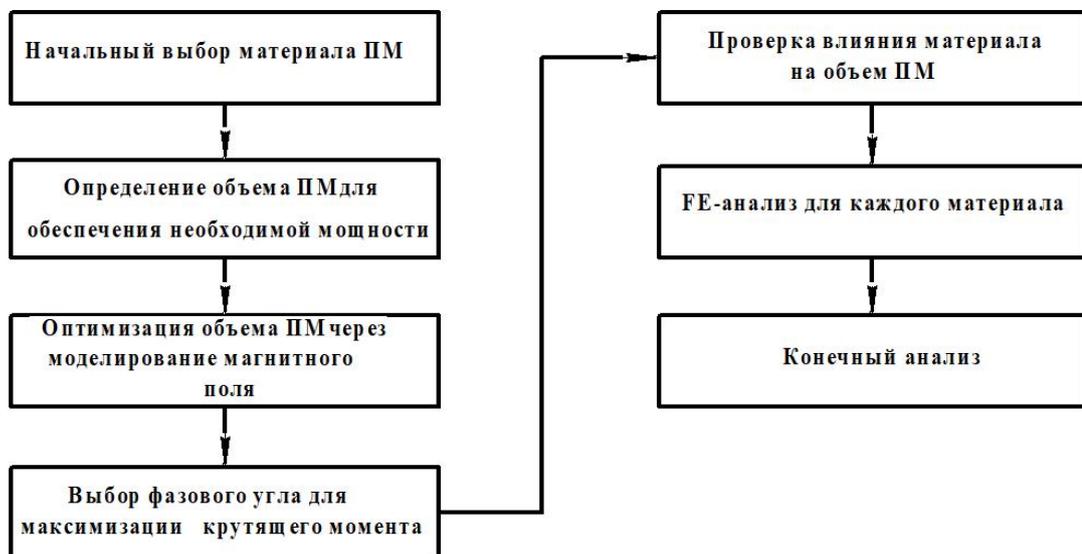


Рисунок 7. Алгоритм процедуры проектирования индуктора ТЭД

Следующим шагом была осуществлена оптимизация объема ПМ по критерию максимума крутящего момента.

$$M = \frac{3p}{2} \left[\Psi_{PM} \cdot I \cos \psi + \frac{1}{2} (L_q - L_d) \cdot I^2 \sin 2\psi \right]. \quad (4)$$

Эта задача решалась нахождением оптимального угла опережения по фазе ψ (угол между векторами ЭДС холостого хода и тока якоря).

На рис. 8 показана зависимость среднего момента двигателя от угла опережения при различных токах нагрузки для ТЭД с параметрами: $\psi_{PM} = 0,356$ Вб; $L_d = 3 \cdot 10^{-3}$ Гн; $L_q = 6 \cdot 10^{-3}$ Гн.

Из полученных зависимостей следует, что максимум момента смещен в сторону фазового угла 30...40 эл.град., причем его величина зависит от тока нагрузки и соотношения индуктивностей якоря по ортогональным осям.

Посредством моделирования в *Maxwell* определены границы изменения объема ПМ при различной рабочей температуре для базовой линейки материалов, в которую вошли неодимовые ПМ *N38UH*, *N35EH* и самарий-кобальтовые *R25*, *R32S*.

На рис. 9 приведены границы изменения объема ПМ в графической интерпретации. Анализ полученных данных показывает, что при рабочей температуре 170°C минимальный объем ПМ, позволяющий гарантировать заданные мощность и момент, обеспечивается использованием магнитов *Resota32S* из материала $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$.

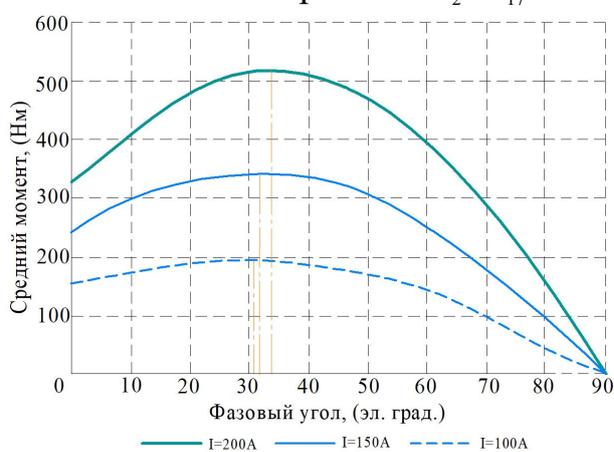


Рисунок 8. Зависимость среднего момента от угла опережения

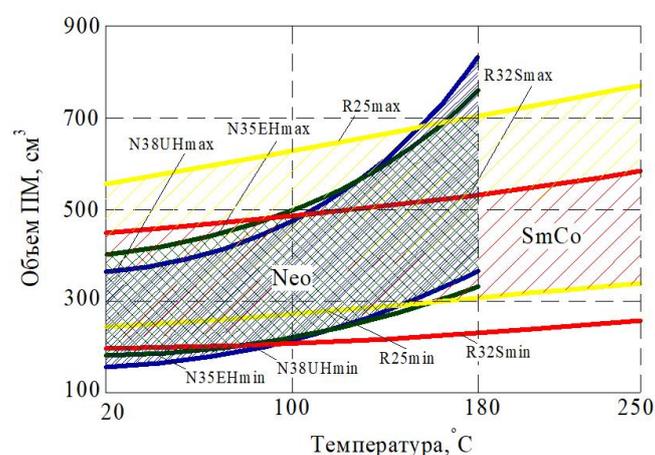


Рисунок 9. Изменение требуемого объема ПМ от температуры

Неодимовые магниты имеют примерно одинаковый объем с ПМ *R25* (SmCo_5) во всем диапазоне значений коэффициента C_v . Однако при более высоких температурах неодимовые ПМ не выдерживают конкуренции с самарий кобальтовыми. При рабочих температурах ПМ выше 100°C из базовой линейки материалов предпочтительнее выбирать сплав $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$.

В четвертой главе проведен анализ способов охлаждения ТЭД, который показал, что наиболее приемлемыми вариантами построения системы охлаждения являются принудительное воздушное или жидкостное охлаждение с «водяной рубашкой» статора. Для выбора окончательного типа охлаждения был проведен уточненный анализ обоих вариантов.

Тепловой расчет электрических машин базируется на решении неоднородного дифференциального уравнения теплопроводности

$$\frac{\partial u}{\partial t} - k\nabla^2 u = 0, \quad (5)$$

где k - постоянная, $\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \right)$ - оператор Лапласа.

Решение этого уравнения предполагает известными значения коэффициентов, входящих в составляющие процесса теплообмена нагретого тела с окружающей средой:

$$dQ_1 = q_V d\theta d\tau; \quad (6)$$

$$dQ_2 = C\rho \frac{\partial t}{\partial \tau} dt d\theta, \quad (7)$$

где q_V - удельная мощность внутренних тепловыделений, обусловленных потерями; C - удельная объемная теплоемкость; ρ - плотность.

Мощность теплового потока от ТЭД к охлаждающей среде в единицу времени пропорциональна превышению температуры над средой и обратно пропорциональна тепловому сопротивлению, которое складывается из сопротивления материала на пути теплового потока R_λ и сопротивления перехода тепла от нагретого тела к охлаждающей среде R_α

$$R_\lambda = \frac{\delta}{S_1 \cdot \lambda}; \quad R_\alpha = \frac{1}{\alpha \cdot S_2}, \quad (8)$$

где δ - толщина материала в направлении теплопереноса; S_1, S_2 - поверхности, через которую проходит тепловой поток и охлаждения соответственно, λ и α - коэффициенты теплопроводности и теплоотдачи с поверхности.

В диссертации разработана тепловая схема замещения (ТСЗ) ТЭД и осуществлен расчет температуры его частей в соответствии с алгоритмом, отличающимся наличием уточняющих итерационных циклов, в ходе которых учтено изменение электромагнитных свойств активных материалов (ПМ, обмотка) при вариации температуры. Задача решалась для установившегося теплового состояния ТЭД. Схема замещения ТЭД с косвенным воздушным охлаждением показана на рис. 10.

Данная ТСЗ получена соединением отдельных схем, соответствующих конструктивным элементам двигателя: статору и ротору. Ротор с точки зрения теплопередачи разделен на 2 части, являющимися источниками тепла со своими внутренними тепловыми сопротивлениями:

- сердечник и ПМ с источником тепловых потерь p_{nm} ;
- наружная цилиндрическая поверхность ротора с источником тепловых потерь p_{mex} , обусловленных аэродинамическими потерями.

Расчет тепловых сопротивлений осуществлен в соответствии с геометрической моделью (рис. 11) с указанными на ней размерами частей двигателя. При этом реальный ПМ заменен эквивалентным, имеющим вид сектора. Для упрощения вычисления тепловых сопротивлений использованы критерии подобия. Теплоотдача на основе принудительного метода конвекции определялась как функция чисел Рейнольдса (Re) и Прандтля (Pr).

$$Re = \frac{\rho DV}{\nu}; \quad (9)$$

$$Nu = f(Re, Pr), \quad (10)$$

где ρ - плотность среды; D - гидравлический диаметр; V - характерная скорость.

В виде допущения предполагалось, что различные источники тепла (потери) равномерно распределены в соответствующих тепловыделяющих элементах, а расчетные тепловые узлы расположены в их центре.

На рис. 12 приведен алгоритм расчета теплового состояния ТЭД на основе схемы замещения, отличающийся наличием уточняющих итерационных циклов.

С целью проверки аналитического расчета по ТСЗ проведено МКЭ 3D-моделирование стационарного теплового поля. Модель ТЭД (рис. 13) представляет собой однополюсный сегмент машины с учетом радиальной симметрии. Полагаем, что остальные полюсы находятся в идентичных тепловых условиях. Проведенное моделирование показало пригодность аналитической модели для предварительной оценки теплового состояния ТЭД на стадии проектирования и при оптимизационных расчетах.

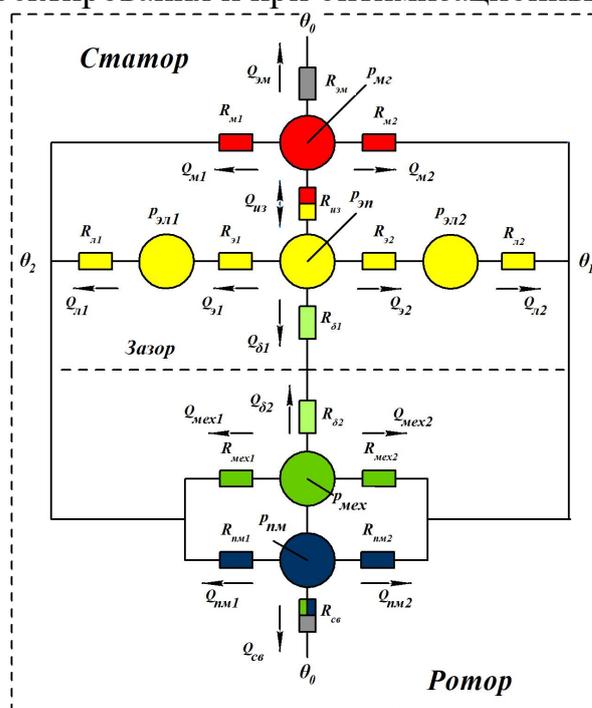


Рисунок 10. Тепловая схема замещения ТД

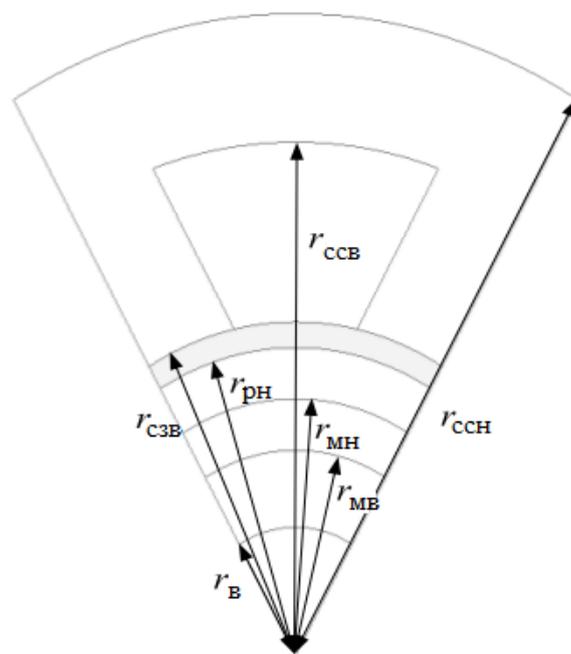


Рисунок 11. Размерная модель для расчета тепловых сопротивлений

Для получения приемлемого результата по температуре отдельных частей ТЭД был решен ряд задач с различным расходом хладагента. На рис. 14 представлены результаты моделирования при частоте вращения 4200 об/мин.

С целью повышения эффективности теплопереноса в зоне лобовых частей обмотки предложено их капсулирование композитным металлизированным компаундом. При моделировании были использованы следующие теплофизические характеристики материала капсулы: теплопроводность

$$\lambda_{кан} = 3 \frac{Вт}{м \cdot К}; \text{ теплоемкость } c_{кан} = 1000 \frac{Дж}{кг \cdot ^\circ C}; \text{ плотность } \gamma_{кан} = 1000 \frac{кг}{м^3}$$

Результаты моделирования представлены на рис. 15. Такое температурное состояние достигается при расходе воздуха $Q=0,05 \text{ м}^3/\text{с}$. При этом потери давления в охлаждающем тракте машины составили $H=4974 \text{ Па}$ и мощность потерь на охлаждение $P=250 \text{ Вт}$, что является вполне приемлемым результатом.

Для проверки аналитической модели теплового расчета проведено сравнение данных о средней температуре частей ТЭД, полученных из расчета ТСЗ с данными моделирования. Результаты сравнения приведены на диаграмме рис. 16.

Максимальная разница МКЭ и ТСЗ расчетов составляет 7,7%, что указывает на пригодность разработанной ТСЗ для предварительной оценки теплового состояния на стадии проектирования и при оптимизации двигателя, когда требуется обрабатывать большие массивы данных в области независимых переменных и малое время расчета одного варианта.

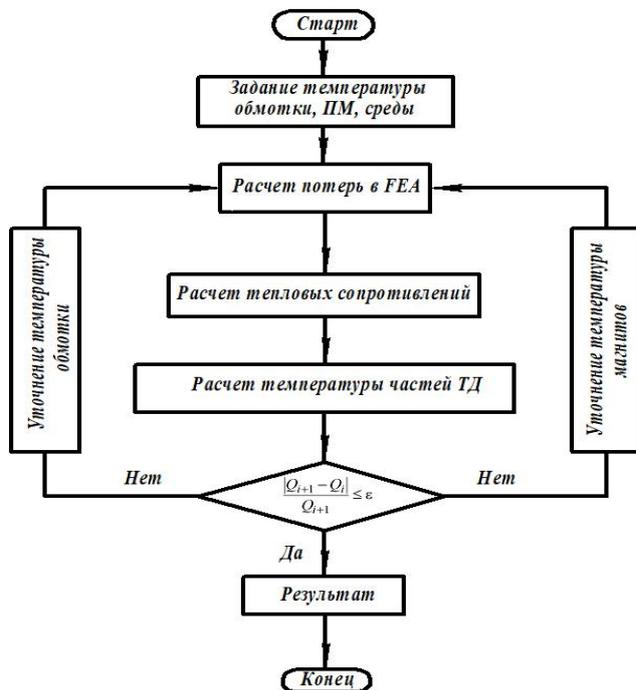


Рисунок 12. Алгоритм теплового расчета

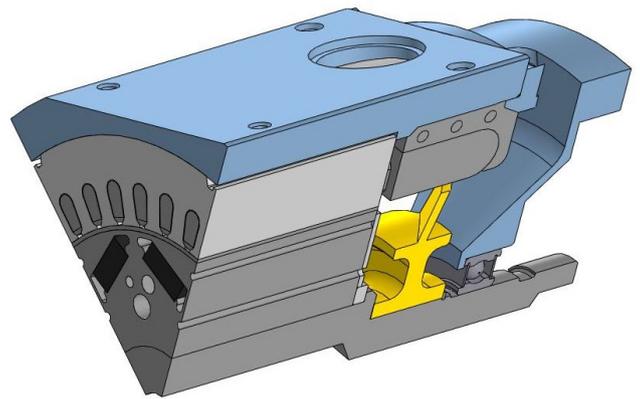


Рисунок 13. Геометрическая модель тягового двигателя

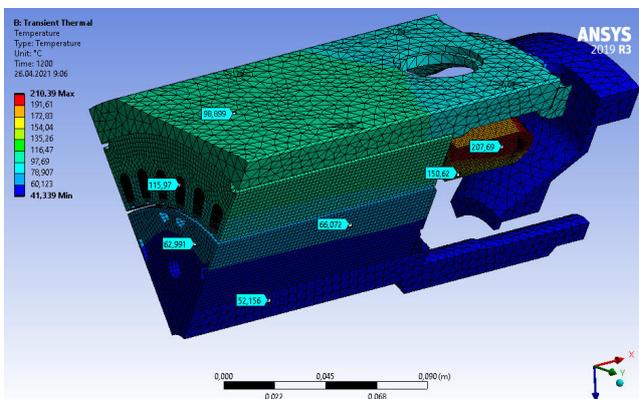


Рисунок 14. Температурное поле ТЭД

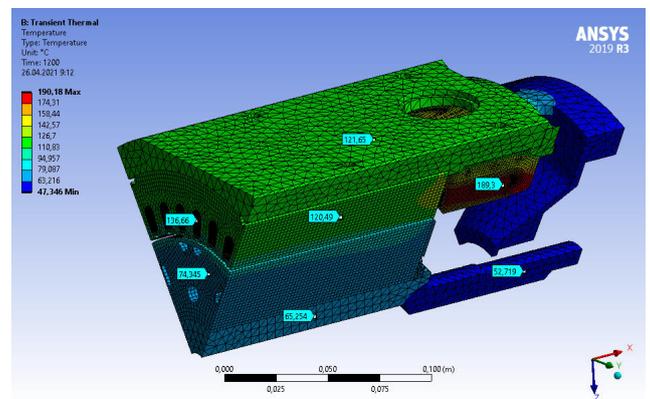


Рисунок 15. Температурное поле при капсулировании лобовых частей обмотки

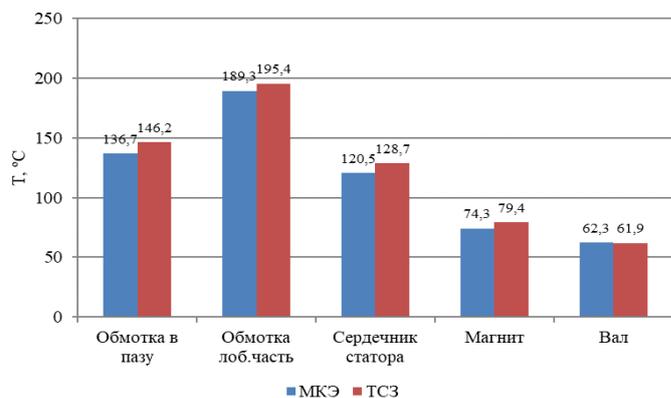


Рисунок 16. Результаты теплового расчета ТЭД по ТСЗ и МКЭ



Рисунок 17. Испытательная установка с опытным образцом

Испытания на нагревание, проведенные на опытных образцах (рис. 17) полностью подтвердили теоретические выкладки, положенные в основу методики оценки теплового состояния ТД.

Сравнение результатов эксперимента и расчетов по ТСЗ показало, что максимальное расхождение по температуре обмотки и ПМ составляет не более 4%. Обработка модели теплового расчета проводилась на системе принудительного открытого воздушного охлаждения. С такой же системой изготовлен и испытан опытный образец двигателя. Приемлемая точность разработанных в диссертации моделей теплового расчета (ТСЗ, МКЭ) позволяет распространить возможность их применения на ТЭД с более интенсивными системами охлаждения – жидкостного, комбинированного.

Заключение

В диссертации решена важная научно-техническая задача по разработке эффективного тягового магнитоэлектрического электродвигателя автомобильного транспорта малой грузоподъемности на основе уточненного электромагнитного анализа, совершенствования методик и алгоритмов проектирования.

Основные научные и практические результаты диссертации:

1. Обоснована рациональность применения синхронной электрической машины с магнитоэлектрическим возбуждением и инкорпорированными постоянными магнитами в качестве тягового двигателя транспортного средства малой грузоподъемности с электрическим или гибридным приводом.

2. На основе стандартного ездового цикла сформулированы требования к тяговому двигателю транспортного средства с параллельной и последовательной трансмиссией.

3. Определены базовые параметры электромагнитного расчета ТЭД и границы их изменения в процессе проектирования, разработаны алгоритм и методика электромагнитного расчета по критерию максимальной величины электромагнитного момента.

4. Проведена параметрическая оптимизация якоря, по результатам которой установлено, что ТЭД с распределенной обмоткой создает в 2,5 раза больший реактивный момент, имеет в 1,8 раза меньшие пульсации электромагнитного

момента и одинаковые показатели по качеству противоЭДС и уровню КПД по сравнению с ТЭД с сосредоточенной обмоткой.

5. Предложена методика расчета объема ПМ, позволяющая учесть форму магнитов и их расположение в индукторе. Осуществлена оптимизация объема ПМ, в результате которой определена величина угла опережения $\psi = 30...40^\circ$ эл., обеспечивающего максимум электромагнитного момента.

6. Разработана тепловая схема замещения ТЭД и осуществлен расчет температуры его частей в соответствии с алгоритмом, отличающимся наличием уточняющих итерационных циклов, в которых учтено изменение электромагнитных свойств активных материалов (ПМ и обмотки) при вариации температуры.

7. Осуществлено 3D – моделирование теплового поля ТЭД с воздушным принудительным охлаждением и испытания на нагревание, показавшие состоятельность использования тепловых схем замещения для предварительной оценки теплового состояния ТЭД на стадии проектирования и при оптимизационных расчетах (расхождение с экспериментом не более 7%).

8. На основании теоретических положений и практических рекомендаций разработан, изготовлен и испытан опытный образец тягового двигателя, превосходящий на 3,4% по удельной мощности и 1,1% по КПД отечественный аналог.

По теме диссертации опубликованы следующие работы В рецензируемых журналах из списка ВАК

1. Зубков, Ю.В. Проектирование активной зоны якоря тягового двигателя / Ю.В. Зубков, **В.Е. Верещагин** // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2022 г. Том 30, №4 С. 102 – 114.

2. Макаричев, Ю.А. Магнитоэлектрический двигатель-генератор автономного мобильного объекта / Ю.А. Макаричев, Ю.В. Зубков, **В.Е. Верещагин**, Д.А. Владимиров // ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЯ. Передача и распределение. – М.: Изд. ООО КАБЕЛЬ. №3(66), 2021. С.114-123.

3. Зубков, Ю.В. Исследование работы интегрированного стартер-генератора при запуске двигателя внутреннего сгорания / Ю.В. Зубков, **В.Е. Верещагин**, С.Ю. Кауров // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия Технические науки. 2020. №3(67), С. 125-138.

4. **Верещагин, В.Е.** Структура системы автоматизированного проектирования вентильных электрических машин с экспертной подсистемой / В.Е. Верещагин, С.С. Верещагина // Изв.Вузов. Электромеханика. 2014г. №5. С. 17-21.

5. **Верещагин, В.Е.** Приемы программной методики автоматизированного проектирования и визуального моделирования геометрии магнитной системы вентильной двигатель-генераторной установки / Вестник СамГУПС. 2012г. №3. с. 86 – 90.

6. **Верещагин, В.Е.** Система автоматизированного расчета и построения частей магнитной системы вентильной двигатель-генераторной установки для

производства опытных образцов / В.Е. Верещагин, С.А. Рожнов // Вестник СамГУПС. 2012г. №4. С. 81 – 86.

7. **Верещагин, В.Е.** Нейронно-сетевое оптимальное многокритериальное проектирование вентильных двигатель-генераторных электрических машин / Изв. Вузov Электромеханика. 2007г. №6.с. 9 – 12.

8. Высоцкий, В.Е. Система автоматизированного проектирования вентильных двигателей постоянного тока / В.Е. Высоцкий, П.В. Тулупов, **В.Е. Верещагин** // Электричество. №10. 2003 г. с.25-36.

В международных научных изданиях, индексируемых Scopus и WoS

9. Zubkov, Yu. Evaluation of thermal condition of permanent-magnet starter-generator in continuous operation mode / Yu. Zubkov, **V. Vereschagin**, S. Kaurov // Proceedings- 2020 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS), Ufa, 2020, 27-31 Oct.

10. Zubkov, Yu. Designing of high speed permanent magnet electric machines with rotor strength verification / Yu. Zubkov, **V. Vereschagin**, S. Kaurov // International Ural Conference on Electrical Power Engineering September 24-26, 2021.

Другие публикации

11. Высоцкий, В.Е. Вентильный стартер-генератор для автотракторного электрооборудования / В.Е. Высоцкий, **В.Е. Верещагин** // Энергосбережение – теория и практика. Сб. тр. Первой всероссийской школы-семинара молодых ученых и специалистов. Москва, 2002 г. с. 69 – 71

12. Высоцкий, В.Е. Бесконтактные двигатели-генераторы с позиционно-зависимым управлением для комбинированных силовых установок автотранспортных средств / В.Е. Высоцкий, **В.Е. Верещагин** // Автоматизированный электропривод. Сб. тр. межд. науч.- техн. конф. Магнитогорск, 2004. МЭИ. с. 74 76

Личный вклад автора. В работах [1,2,3] автору принадлежит постановка задачи исследования, в работах [1,2,9,10] моделирование и оптимизация магниной системы ТЭД, в работах [4,5,6,7,8] разработка алгоритма автоматизированного проектирования подобных установок.

Разрешено к печати диссертационным советом 24.2.377.06
ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»
Протокол № 8 от 07.02.2023

Заказ №35. Тираж 100 экз.

Отпечатано на ризографе.

ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет.
Отдел типографии и оперативной полиграфии
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

