

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА
кандидата технических наук, доцента Малеева Руслана Алексеевича на
диссертационную работу
Верещагина Владислава Евгеньевича
«Тяговый электродвигатель с магнитоэлектрическим возбуждением для транспортных средств малой грузоподъемности»,
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по
специальности 2.4.2 - Электротехнические комплексы и системы

Актуальность темы диссертационной работы

Преимущества тягового электродвигателя (ТЭД) над двигателем внутреннего сгорания в трансмиссии транспортного средства (ТС) очевидны. Упрощение системы привода влечет за собой повышение надежности и снижение эксплуатационных расходов транспортных средств малой грузоподъемности.

Быстрый рост производства легковых ТС на электрической тяге не привело к такому же прогрессу в области ТС малой и средней грузоподъемности, что объясняется рядом факторов, которые влияют в первую очередь на стоимость, надежность, энергоэффективность всего привода и ТЭД в частности. Важнейшим требованием к системе электропривода ТС остается его конкурентная цена, которая во многом определяется стоимостью наиболее дорогого компонента современного ТЭД - высокоэнергетических постоянных магнитов.

Диссертационная работа Верещагина В.Е. посвящена разработке эффективного тягового магнитоэлектрического электродвигателя автомобильного транспорта малой грузоподъемности на основе уточненного электромагнитного анализа, совершенствования методик и алгоритмов проектирования. Разработка эффективного тягового двигателя напрямую связана с уточнением и совершенствованием методов расчета электрических машин этого назначения, проведением исследований, которые учитывают особенности работы ТЭД в широком диапазоне изменения частоты вращения и момента.

В силу вышеизложенного актуальность темы исследований Верещагина В.Е. не вызывает сомнений.

Структура и объем диссертационной работы

Диссертационная работа по своей структуре и объему соответствует требованиям, которые предъявляются к кандидатским диссертациям. Содержательная часть включает в себя 4 главы, заключение, список литературы и приложения. Работа изложена на 139 страницах основного текста, содержит 65 иллюстраций, 16 таблиц, 2 приложений.

Общая характеристика диссертационной работы

В **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована цель и задачи исследования, рассмотрены методы исследования, определена научная новизна и практическая значимость работы.

В **первой** главе проведен анализ типов трансмиссий гибридных автомобилей и конструкций тяговых электрических двигателей, на основе которого выявлены их достоинства и недостатки. Предложено использовать синхронный двигатель с магнитоэлектрическим возбуждением в качестве тягового электрического двигателя.

Во **второй** главе рассматриваются вопросы, посвященные проектированию и оптимизации активной части двигателя, определены базовые параметры электромагнитного расчета ТЭД и границы их изменения в процессе проектирования, составлен алгоритм проектирования. Проведен анализ численного моделирования магнитного поля ТЭД с различной структурой обмотки и конфигурацией магнитопровода, приведены результаты испытаний опытного образца ТЭД. Проведена параметрическая оптимизация якоря, включающая выбор типа обмотки и конфигурации сердечника статора, средствами пакета *Ansys Maxwell*. Рассчитаны характеристики различных моделей ТЭД мощностью 80 кВт на основе решения ряда задач магнитного поля в стационарной и нестационарной постановках при частотах вращения от 1500 до 5000 об/мин. Полученные данные о среднем моменте, его пульсациях, потерях и КПД двигателя определили преимущество распределенной обмотки с числом пазов на полюс и фазу равным двум.

В **третьей** главе разработана методика определения объема постоянных магнитов (ПМ), предложен подход к процедуре проектирования ТЭД и выбора материала ПМ для обеспечения заданной мощности и крутящего момента с учетом стоимости. Представлен алгоритм процедуры проектирования индуктора ТЭД. Осуществлена оптимизация объема ПМ, в результате которой установлено, что величина угла опережения оказывает существенное влияние на крутящий момент двигателя, а максимум момента соответствует значению фазового угла $\psi=30\ldots40$ эл. град. Посредством моделирования в *Maxwell* определены границы изменения объема ПМ при различной рабочей температуре для базовой линейки материалов. При рабочих температурах ПМ, превышающих 100°C , предпочтительным является выбор самарий-кобальтового сплава *R32S*. При меньших температурах следует использовать неодимовые ПМ.

В **четвертой** главе приведен анализ способов охлаждения ТЭД, из которого видно, что приемлемым вариантом построения системы охлаждения являются воздушное или жидкостное охлаждение с «водяной рубашкой»

статора, приведена разработанная тепловая схема замещения (ТСЗ) ТЭД и осуществлен расчет температуры его частей в соответствии с алгоритмом, который отличается наличием уточняющих итерационных циклов. Для подтверждения адекватности ТСЗ проведено 3D – моделирование методом конечных элементов, показавшее пригодность аналитической модели для предварительной оценки теплового состояния ТЭД с воздушным охлаждением на стадии проектирования и при оптимизационных расчетах (расхождения не более 8%). Аналитическая и численная модели теплового расчета проверены экспериментально.

В **заключении** сформулированы основные научные и практические результаты диссертации, которые позволяют сделать вывод о том, что цель работы достигнута, поставленные задачи решены. Сформулированы перспективы дальнейшей разработки темы.

Новизна проведенных исследований, полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

В диссертационной работе Верещагина В.Е. были получены следующие научные результаты:

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.

Значимость для науки и производства, полученных автором диссертационной работы результатов

Полученные в диссертационной работе результаты имеют следующую теоретическую и практическую значимость:

1. Результаты проведенных исследований расширяют теоретическую базу в области проектирования тяговых электрических двигателей с магнитоэлектрическим возбуждением;
2. Установлена целесообразность использования ТЭД магнитоэлектрического возбуждения с инкорпорированными в индуктор

магнитами в электрической части трансмиссии полностью электрического или гибридного ТС малой грузоподъемности;

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

Степень обоснованности и достоверности научных положений и рекомендаций

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов, рекомендаций, содержащихся в диссертационной работе Верещагина В.Е., подтверждается аprobацией основных результатов на международных, всероссийских конференциях и семинарах, публикацией в рецензируемых научных изданиях. Эффективность предложенных методик проектирования и возможность их применения для создания перспективных ТЭД ТС с электрическим приводом доказана в ходе серии экспериментов. Их аprobация проведена на предприятии, специализирующемся на разработке и производстве синхронных электрических машин специального назначения, что подтверждается актом внедрения.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертационной работы

Методики электромагнитного, теплового расчетов позволяющие проектировать ТЭД и оптимизировать его активные части с малыми временными затратами в соответствии с заданными техническими характеристиками могут быть применены при создании электрических автомобилей малой грузоподъемности.

Соответствие паспорту специальности. Диссертация соответствует 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...».

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.

Автореферат соответствует содержанию диссертации и дает представление о методах исследований и полученных результатах. Язык, стиль изложения диссертации, автореферата и публикаций свидетельствуют о высоком научном уровне автора.

Замечания по диссертации и автореферату

1. Не понятно по какому критерию производился выбор типа тягового электродвигателя и почему соискатель остановился на синхронной машине с постоянными магнитами?

2. Недостаточно освещены вопросы процесса переноса тепла, а именно участие теплопроводности и/или конвекции.

3. Тепловые расчеты показали, что температура активных частей ТЭД достаточно высока, особенно при воздушной системе охлаждения. При этом не указан класс изоляции и отсутствуют рекомендации по выбору изоляционных материалов.

4. В работе недостаточно уделено внимание генераторному режиму работы электрической машины, хотя он имеет место быть.

Замечания носят рекомендательный характер и могут быть учтены автором в дальнейшей работе по теме исследования.

Заключение

Диссертационная работа Верещагина Владислава Евгеньевича на тему «Тяговый электродвигатель с магнитоэлектрическим возбуждением для транспортных средств малой грузоподъемности» соответствует паспорту специальности 2.4.2 - Электротехнические комплексы и системы (технические науки), является завершенной научно-квалификационной работой, в которой изложены новые научно-обоснованные положения по проектированию и исследованию тяговых электрических двигателей.

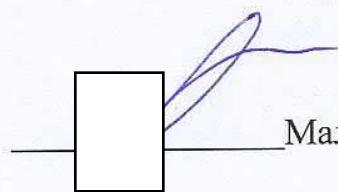
Диссертационная работа соответствует требованиям п.9 Положения ВАК РФ о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г., № 842 (п.28), предъявляемым к кандидатским диссертациям. Использование результатов, выводов и рекомендаций для создания тягового электродвигателя с магнитоэлектрическим возбуждением вносит существенный вклад в развитие электрических транспортных средств малой грузоподъемности.

На основании вышеизложенного считаю, что автор диссертационной работы, Верещагин В.Е., заслуживает присуждения ученой степени кандидата

технических наук по специальности 2.4.2 - Электротехнические комплексы и системы.

Официальный оппонент:

к.т.н., доцент, профессор кафедры
«Электрооборудование и
промышленная электроника»
ФГАОУ ВО «Московский
политехнический университет»,
г. Москва
e-mail: 19rusmal@gmail.com



Малеев Руслан Алексеевич

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Московский политехнический университет»

Адрес: 107023, г. Москва, ул. Большая Семёновская, д. 38,
т. +7 (495) 223-05-23
факс: +7 (499) 785-62-24

подпись Малеева Р.А. заверяю

Специалист по
кадровому
делопроизводству
Бирюкова И.

03.03.2023

