

ОТЗЫВ

официального оппонента

доктора технических наук, профессора Казакова Юрия Борисовича
на диссертацию Чуйдука Ивана Александровича
«Синтез и анализ вентильных электродвигателей комбинированного возбуждения
для электротрансмиссий наземных транспортных средств»,
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по
специальности 2.4.2. «Электротехнические комплексы и системы»

На отзыв представлены:

- Диссертация, включающая введение, пять глав, заключение, список литературы из 182 наименований, 2 приложения. Работа изложена на 145 страницах, из них 107 страниц основного текста. Работа содержит 48 иллюстраций, 142 аналитических выражений, 2 таблицы.
- Автореферат диссертации.

Актуальность темы диссертации

Исследования, разработка и совершенствование электротрансмиссий для гибридного транспорта и электротранспорта интенсивно развиваются в России и за рубежом. Переход на электротрансмиссии обусловлен исчерпанием способов совершенствовании механической трансмиссии. Также существенное ограничение на развитие автотранспорта на основе двигателей внутреннего сгорания (ДВС) оказывают требования экологии. Электротранспорт, помимо решения экологических проблем, имеет ряд технических преимуществ, связанных с более оптимальной компоновкой узлов и элементов трансмиссий, лучшей управляемостью и лучшими динамическими характеристиками транспортных средств, более высоким КПД. Прогрессу электротранспорта способствуют достижения в материаловедении, развитии топливных элементов, совершенствовании силовой электроники. Целесообразно проведение исследований по выбору и компоновке тягового электродвигателя для электротрансмиссий транспортных средств, системе управления, источнику питания. В связи с этим актуальность диссертации Чуйдука И.А., посвященной разработке систем синтеза, анализа и управления вентильного электродвигателя комбинированного возбуждения (ВЭКВ) электротрансмиссии транспортных средств с размещением привода в мотор-колесе, не вызывает сомнений.

Цель диссертации - 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, соответствует направлениям исследований научной специальности 2.4.2 - Электротехнические комплексы и системы.

Для достижения цели диссертации и решения поставленных задач автором использованы **современные методы исследований**: аналитические методы общей теории электромеханических преобразователей энергии, численные методы компьютерного моделирования физических полей в электрических машинах на основе метода конечных элементов, методы параметрической многоуровневой оптимизации конструкции, методы имитационного моделирования режимов работы электротрансмиссии, реализованные в распространенных программных комплексах. Выполнено физическое моделирование двигателя, изготовлен макетный образец, подтвердивший научные результаты.

Оценка содержания и оформления диссертации. Диссертация написана ясно, использованная терминология и стиль соответствуют общепринятым нормам. Структура диссертации традиционная, имеет внутреннее единство, по каждой главе и диссертации в целом сделаны выводы, которые отражают результаты работы. Даны рекомендации практического применения результатов диссертации и перспективы развития темы. При использовании в тексте диссертации результатов других авторов сделаны соответствующие ссылки.

В первой главе проведен сравнительный анализ различных вариантов электротрансмиссий транспортных средств и тяговых электродвигателей для них. Выбран базовый вариант электротрансмиссии и тягового электродвигателя в виде вентильного электродвигателя комбинированного возбуждения обращенной конструкции. Разработана математическая модель ВЭКВ обращенной конструкции на основе эквивалентных схем замещения и блок-схема алгоритма расчета по разработанной математической модели.

Вторая глава посвящена разработке проектной системы, как части системы синтеза ВЭКВ на основе многоуровневой однокритериальной оптимизации. Система реализует 8 уровней оптимизации - от полной габаритной оптимизации до поверочного расчета.

В третьей главе разработана система анализа ВЭКВ на базе программной среды Ansys Electronics Desktop, связанной с системой синтеза через программный код, который передает исходные данные из системы синтеза в систему анализа. Так как ВЭКВ имеет обращенную конструкцию и усложненную магнитную систему, то для формирования цифровой модели ВЭКВ выполняется трехмерное твердотельное моделирование с предварительной параметризацией конструкции, при которой размеры являются переменными, что позволяет выстраивать различные варианты конструкции по результатам оптимизации. Анализ режимов работы ВЭКВ проводился с расчетом динамических характеристик с учетом изменения положения ротора и частоты вращения двигателя. Выполнен анализ электромагнитного состояния двигателя. В модели учитывалось влияние вихревых токов на поверхностях магнитов и в магнитной системе. При анализе динамических характеристик ВЭКВ выполнено моделирование электронного коммутатора. Подсистема теплового анализа ВЭКВ реализована на основе разработанной эквивалентной тепловой схемы замещения. Показана сложность оценки теплового состояния транспортного средства, так как в процессе движения меняются электромагнитные нагрузки. Выполнены динамические тепловые расчеты.

В четвертой главе разработана система эффективного управления ВЭКВ в составе мотор-колеса электротрансмиссии транспортного средства. Модель учитывает статические и динамические моменты сопротивления при движении транспорта и включает в себя характеристики электродвигателя и транспортного средства. Представлен алгоритм управления по цепи якоря и по цепи возбуждения. В алгоритм заложены условия токоограничения. Разработана программа цифрового тестирования электротрансмиссии на базе мотор-колеса при прохождении транспортным средством конкретной трассы.

В пятой главе описана разработка конструкции макетного образца мотор-колеса на базе вентильного электродвигателя комбинированного возбуждения. Представлены результаты натурных испытаний макетного образца ВЭКВ в составе мотор-колеса.

В заключении содержатся выводы, сделанные по результатам всей работы, определены направления дальнейших исследований вентильных электродвигателей комбинированного возбуждения для электротрансмиссий транспортных средств.

Научная новизна результатов

1. Математическая модель и методика расчета вентильного электродвигателя комбинированного возбуждения обращенной конструкции, составленные на основе схемы замещения и ориентированные для задач синтеза оптимальной конструкции активных частей, отличающиеся учетом особенностей магнитной системы.

2. Метод параметрической многоуровневой оптимизации вентильного двигателя комбинированного возбуждения, отличающийся возможностью создания гибкой проектной системы.

3. Система анализа электромагнитного и теплового состояния вентильного двигателя комбинированного возбуждения в статических динамических режимах с использованием имитационного моделирования электромагнитного состояния двигателя и эквивалентных тепловых схем замещения.

4. Алгоритм и система эффективного управления вентильным электродвигателем комбинированного возбуждения, которые учитывают особенности управления по цепям якоря и возбуждения и обеспечивают увеличенный диапазон изменения частоты вращения и момента двигателя.

Теоретическая и практическая значимость результатов

Диссертационное исследование является развитием теории вентильных машин. Совокупность разработанных уточненных методик электромагнитного и теплового анализа имеет теоретическую значимость в расширении представлений об электромеханическом преобразовании энергии в вентильных машинах комбинированного возбуждения. Результаты диссертации, в виде разработанных автором моделей и методик расчета магнитной системы, параметрической многоуровневой оптимизации вентильных электрических машин комбинированного возбуждения, методов анализа их электромагнитного и теплового состояния на основе физического, математического, имитационного и компьютерного моделирования, представляют теоретическую значимость при их использовании в других типах электрических машин.

Практическая значимость результатов диссертации обусловлена созданием системы анализа и синтеза вентильных электрических машин комбинированного возбуждения с развитием их проектной системы. Макетный образец может вы-

ступать основой серийных мотор-колес электротрансмиссий наземных транспортных средств. Практическим результатом диссертации следует считать выполнение гранта ФСИ.

Обоснованность и достоверность результатов, научных положений, выводов и результатов обеспечена использованием известных математических методов теории преобразования энергии, компьютерным моделированием электромагнитного и теплового состояния двигателя на основе распространенных программных комплексов, методов математического, имитационного, компьютерного и физического моделирования, удовлетворительным совпадением с результатами испытаний натурального макетного образца.

Оценка научной квалификации автора. Чуйдук И.А. обладает высокой научной квалификацией – им для конструктивно усложненного вентильного электродвигателя комбинированного возбуждения обращенной конструкции разработаны уточненные методики анализа электромагнитных и тепловых расчетов, разработаны и применены аналитические и численные модели, выполнено компьютерное, имитационное и физическое моделирование.

Соответствие паспорту специальности. Диссертация соответствует следующим пунктам направлений исследования научной специальности 2.4.2 – Электротехнические комплексы и системы:

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, разработка алгоритмов эффективного управления» паспорта специальности.

Основные результаты диссертации опубликованы в 11 работах, из них 6 статей в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ, в том числе 5 работ индексируются в базе данных Scopus; 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ:

1. 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**).

2. Чуйдук, И.А. Мотор-колесо на базе вентильного электродвигателя комбинированного возбуждения лучшее решение для гибридного и электротранспорта / И.А. Чуйдук, Д.С. Ганджа // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2023. – № 45. – С. 80–106. DOI: 10.15593/2224-9397/2023.1.04 (**ВАК**, спец 2.4.2 с 15.02.2023. Статья опубликована 07.06.2023).

3. 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.

4. 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.

Апробация результатов диссертации. Основные положения и результаты диссертации обсуждались на международных и всероссийских конференциях.

Соответствие автореферата содержанию диссертации. Автореферат отражает содержание и основные положения диссертации, содержит выводы и полученные результаты. По автореферату можно оценить значимость работы.

Замечания по диссертации

1. В обращенной конструкции вентильного двигателя комбинированного возбуждения принят индуктор с радиальным расположением магнитов. Необходимо было рассмотреть другие магнитные системы, например, с тангенциальным расположением или радиально-тангенциальным расположением магнитов и выбрать наилучшую компоновку по величине магнитного потока в воздушном зазоре.

2. В вентильном электрическом двигателе комбинированного возбуждения обмотка возбуждения (ОВ) и обмотка якоря (ОЯ) неподвижны друг относительно друга. Поток ОВ относительно ОЯ не меняет направление, но модулируется изменяющимся внешним магнитным сопротивлением. ОВ генерирует пульсирующий

поток в ОЯ и в ОЯ будет наводиться ЭДС от модулированного потока ОВ частоты модуляции. Изменения магнитного потока возбуждения через ОЯ будут, как минимум, в 2 раза меньше, чем при изменении во времени и пространстве полярности полюсов ОВ относительно ОЯ, как это реализуется в машинах классического типа.

3. Утверждение о том, что созданная цифровая модель вентильного электрического электродвигателя комбинированного возбуждения является цифровым двойником реальной электрической машины не правомочно, так как цифровой двойник изделия, согласно ГОСТ Р 57700.37— 2021, это система, состоящая из цифровой модели изделия и двусторонних информационных связей с изделием или его составными частями. Двусторонних информационных связей цифровой модели двигателя с самим двигателем нет.

4. Не показано, как в модели электродвигателя учитывается влияние вихревых токов на поверхностях магнитов и в теле магнитной системы при моделировании динамических режимов работы.

5. При компоновке трансмиссии на базе мотор-колес увеличивается неподресоренная масса транспортного средства, что будет влиять на динамические характеристики транспортного средства. Каким образом решается эта задача для предлагаемой электротрансмиссии?

6. Требуется более детального анализа режим рекуперация энергии в математической модели электротрансмиссии при прохождении транспортного средства по трассе с подъемами и спусками.

7. В диссертации присутствуют некоторые погрешности оформления, стилистические и орфографические неточности: ошибки в слове статор (с. 22); ошибки в ссылках на публикации [59, 66, 100, ...] и др.

Устранение данных замечаний позволило бы повысить качество представленных научных исследований, но они не снижают научной ценности диссертации в целом.

Заключение

Диссертация Чуйдука Ивана Александровича «Синтез и анализ вентильных электродвигателей комбинированного возбуждения для электротрансмиссий наземных транспортных средств», является законченной научно-квалификационной работой, которая по содержанию, объекту и направлению исследований, полученным новым научно обоснованным результатам соответствует паспорту научной специальности 2.4.2 Электротехнические комплексы и системы.

Диссертационная работа выполнена лично, на актуальную тему, имеет научную новизну, теоретическую и практическую значимость, содержит решение актуальной задачи разработки приводного электродвигателя для электротрансмиссии гибридного и электротранспорта.

Диссертация удовлетворяет всем требованиям, установленным в пункте 9 Положения о присуждении ученых степеней ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Чуйдук Иван Александрович заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.2 –Электротехнические комплексы и системы.

Официальный оппонент, доктор технических наук (докторская диссертация защищена по специальности 05.09.01 –Электромеханика), профессор, профессор кафедры «Электромеханика» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» (ИГЭУ)

153003, РФ, г. Иваново, ул. Рабфаковская, д.34, ИГЭУ, корп. А, ауд.149

Телефон: +7 (493) 226-97-015

E_mail: elmash@em.ispu.ru

Я, Казаков Юрий Борисович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку



Казаков Юрий Борисович

Дата составления отзыва «30» августа 2023

Подпись д.т.н., профессора Казаков Ю.Б. заверяю:

Ученый секретарь Ученого совета ИГЭУ



М- Вылгина Юлия Вадимовна