

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по научной работе
Федерального государственного
бюджетного образовательного
учреждения высшего образования
«Ростовский государственный
университет путей сообщения»



Гуда А.Н.

2021 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации - федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения» на диссертационную работу

Петрова Тимура Игоревича

«Метод комплексной топологической оптимизации ротора синхронного электрического двигателя с постоянными магнитами», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты

Актуальность темы

На сегодняшний день синхронные двигатели с постоянными магнитами (СДПМ) находят все более широкое применение в различных сферах промышленности, благодаря высокой эффективности и малым размерам. Однако главный недостаток данных двигателей - высокая стоимость, в том числе, из-за стоимости постоянных магнитов (ПМ). Снизить объем ПМ возможно за счет изменения конструкции ротора посредством оптимального расположения материалов (топология ротора). Искомую топологию ротора можно найти с использованием комплексной топологической оптимизации на базе генетического алгоритма

Оптимизацией работы и расчетом различных параметров СДПМ занимались коллективы авторов из НИУ «МЭИ», НИУ «МАИ», СПбГЭТУ ЛЭТИ, НГТУ, и другие. Сделан вывод, что большинство работ рассматривают способы управления СДПМ, а не изменение конструкции, а имеющиеся виды оптимизации ограничены электромагнитными параметрами.

Поэтому разработка метода комплексной топологической оптимизации ротора СДПМ, которая позволит повысить энергетические характеристики и надежность электрической машины при заданных массо-габаритных показателях, является актуальной научной задачей.

На основании изложенного тема диссертационной работы соискателя Петрова Тимура Игоревича представляется актуальной и важной для науки и практики.

Цель работы

В диссертации поставлена и достигнута следующая цель: повышение энергоэффективности синхронного двигателя путем увеличения вращающего момента с учетом ограничений на объем постоянных магнитов, максимально допустимую температуру статора СДПМ и механических напряжений в роторе СДПМ.

Анализ содержания работы

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы и приложений. Общий объем работы 178 страниц, работа содержит 11 таблиц, 78 рисунков, 3 приложения. Библиографический список состоит из 101 наименования.

Во введении приведена общая характеристика работы. Обосновывается актуальность темы, научная новизна, цель и основные задачи диссертационного исследования, приводится практическая значимость работы и перечислены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ направлений в области проектирования и оптимизации СДПМ, который показал актуальность применения СДПМ в качестве электропривода различных механизмов, их высокую эффективность по сравнению со стандартными асинхронными двигателями, и перспективы дальнейшего развития конструкции.

Приведены примеры практического применения топологической оптимизации, доказывающие повышение характеристик за счет оптимального расположения материалов. Выбран метод расчета электромагнитных полей, пакет прикладных программ для метода конечных элементов. Методом поиска выбраны эволюционные алгоритмы и на основе сравнения выбран генетический алгоритм. Представлены основные решения в области изменения конструкции СДПМ, и в итоге выявлено, что работ в области комплексной топологической оптимизации не представлено.

Во второй главе представлена разработка метода комплексной оптимизации на базе двигателя 11ДВМ160. Были подготовлены исходные данные для оптимизации: геометрическая модель в 2D, параметры двигателя и необходимое ПО. Проведен электромагнитный расчет СДПМ в программе Elcut, проверена достоверность полученной модели, посредством сравнения с экспериментальными данными. Проведен электромагнитный расчет СДПМ с новым расположением магнитов - V-образными магнитами, время решения расчета электромагнитных параметров для одного случая) составило 150 секунд для одного узла сетки, поэтому принято решение оптимизировать геометрическую модель СДПМ, решением может стать модификация геометрической модели (уменьшение модели до определенного сектора, упрощение геометрических форм элементов СДПМ, ручная настройка сетки в Elcut). Проведены тепловые и прочностные расчеты. В итоге получен алгоритм топологической оптимизации для СДПМ.

Третья глава посвящена практической реализации комплексной топологической оптимизации на базе генетического алгоритма, для этого определены требуемые изменения в стандартный алгоритм. Наиболее очевидным дополнением является четкий фактор завершения генетического алгоритма -

наибольший крутящий момент обнаруживается на одной хромосоме, а не на популяции или паре хромосом.

Второе дополнение - это искомое количество определенного материала в каждой хромосоме, а именно ПМ, что необходимо для уменьшения объема дорогостоящего материала. Построена геометрическая модель, проведена верификация и в результате изменения геометрической модели СДПМ уменьшено время расчета. Разработана и реализована программа для проведения оптимизации по вращающему моменту с циклами последующей проверки по температуре и прочностным параметрам.

Таким образом получена новая конструкция СДПМ с улучшенными техническими характеристиками - значение момента увеличилось на 9,5 %, объем ПМ уменьшился на 9,7 %.

Четвертая глава посвящена экспериментальным исследованиям. Проверена работоспособность двигателей VM1418 ZXF, модернизирован VM1418 ZXF по результатам комплексной топологической оптимизации. Разработан и изготовлен экспериментальный стенд для измерений вращающего момента с возможностью задания нагрузки. Результаты экспериментов доказали возможность соблюдения условия сохранения вращающего момента при наличии нагрузки на модернизированном СДПМ. Отличие значений среднеквадратичного момента составляет менее 5 %, при уменьшении объема ПМ на 32,9 %.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы.

Анализ текста диссертации позволяет заключить, что она является завершенным, методически грамотно, доказательно и последовательно изложенным научным исследованием, в котором поставлена и решена актуальная научная задача в области развития методов повышения энергетической эффективности СДПМ. Результаты исследований доведены до практического применения, изготовлен экспериментальный образец модернизированного СДПМ действия в рамках реализации грантов РФФИ «Комплексная топологическая оптимизация роторов синхронных электрических машин с постоянными магнитами» № 19-37-90134 и «Разработка метода проектирования и топологической оптимизации роторов синхронных двигателей с постоянными магнитами для привода станков-качалок с целью повышения энергоэффективности нефтедобычи» № 18-48-160023.

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

1. Разработан метод комплексной топологической оптимизации конструкции ротора СДПМ позволяющий увеличить вращающий момента и снизить объем ПМ, за счет определения рациональной геометрии ротора, отличающийся от известных тем, что оптимизационный расчет, направленный на достижение максимального вращающего момента производится с учетом электромагнитных, тепловых процессов и определения прочностных характеристик.

2. Создан и научно обоснован подход к упрощению геометрической модели СДПМ, позволяющий сократить время проектирования.

3. Разработана программа, реализующая метод комплексной топологической оптимизации ротора СДПМ, отличающаяся от известных программ тем, что в ней реализован перебор вариантов геометрии ротора использующий генетический алгоритм с циклической проверкой тепловых и прочностных параметров.

Теоретическая и практическая значимость полученных автором диссертации результатов

Теоретическая значимость работы заключается в развитии теории расчета параметров СДПМ, а также разработке методов комплексной топологической оптимизации ротора СДПМ, что позволяет улучшить энергетические и массогабаритные характеристики СДПМ.

Практическая значимость работы заключается в том, что разработаны экспериментальный образец СДПМ с новой топологией ротора и экспериментальный стенд позволяющий исследовать характеристики разработанной электрической машины. Результаты выполненных в ходе выполнения диссертации исследований использовались при выполнении грантов РФФИ «Комплексная топологическая оптимизация роторов синхронных электрических машин с постоянными магнитами» № 19-37-90134 и «Разработка метода проектирования и топологической оптимизации роторов синхронных двигателей с постоянными магнитами для привода станков-качалок с целью повышения энергоэффективности нефтедобычи» № 18-48-160023. Также отдельные результаты диссертации, такие как методика топологической оптимизации конструктивных параметров ротора синхронного электрического двигателя, использовались в ходе реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства на тему: «Создание серии электроприводов на базе российских высокоэффективных синхронных двигателей для станков-качалок нефти с применением беспроводных систем передачи данных и адаптивной системой управления для «умных» месторождений», в рамках Государственной программы Российской Федерации «Развитие науки и технологий» на 2013-2020 годы, утвержденными постановлением Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218, договор № ДР-936/17 от 26 октября 2017 года с участием ФГБОУ ВО «КГЭУ» и АО «ЧЭАЗ».

Разработанное математическое и программное обеспечение для реализации комплексной топологической оптимизации ротора СДПМ, технология по модернизации синхронных двигателей с постоянными магнитами могут представлять интерес для специалистов и проектных организаций, занимающихся разработкой и производством электрических машин с постоянными магнитами.

Личный вклад соискателя в получение результатов исследования

Соискателем получены основные результаты исследований, которые отражены в публикациях по теме диссертации. Личный вклад автора заключается в постановке задач исследования, в разработке подхода и методов комплексной

топологической оптимизации ротора СДПМ, в реализации разработанного подхода в виде программного продукта, проведении расчетов и выполнении экспериментальных исследований, в анализе и обобщении полученных результатов.

Публикации и апробация результатов диссертации

Результаты исследований прошли апробацию на 21 российской и международной конференциях и в достаточно полной мере опубликованы в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в международной базе данных SCOPUS/Web Of Science (5 статей), в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК (6 статей), в материалах всероссийских и международных конференций (9 статей). Также получено 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ. Опубликованные по результатам исследований материалы достаточно полно отражают основное содержание диссертации, имеются ссылки на авторов и источники заимствования материалов.

В целом диссертационная работа соответствует предъявляемым требованиям к содержанию и оформлению: изложение материала, оформление текста, таблиц и иллюстраций выполнено логично, на хорошем научном уровне, заслуживает положительной оценки. Результаты работы относительно достоверности и обоснованности выводов не вызывают сомнения.

Значимость полученных автором результатов для развития соответствующей отрасли науки, научная новизна

Полученные диссертантом результаты являются реальным вкладом в развитие теории и практики методов повышения энергетической эффективности СДПМ. Для организаций, работающих в области проектирования СДПМ, теоретическую и практическую значимость представляют следующие результаты диссертационного исследования, характеризующие также его научную новизну.

1. Алгоритм преобразования геометрической модели синхронного двигателя, позволяющий значительно повысить скорость вычислений вращающего момента методом конечных элементов в процессе комплексной топологической оптимизации ротора.

2. Метод, реализующий алгоритм комплексной топологической оптимизации ротора СДПМ для определения параметров двигателя, обеспечивающих повышение его энергетической эффективности и снижение себестоимости оборудования с учетом электромагнитных, тепловых процессов и расчёта прочностных характеристик.

3. Программа для проектирования СДПМ, реализующая метод комплексной топологической оптимизации ротора на основе генетического алгоритма.

Сформулированные автором положения научной новизны обоснованы и следуют из материалов исследований, изложенных в диссертации. Они представляют собой новые научные результаты, позволяющие повысить эффективность СДПМ за счёт увеличения значения вращающего момента при уменьшении объема ПМ, путем оптимизации расположения материалов в конструкции ротора.

Программа метода комплексной топологической оптимизации и стенд для проверки эффективности модернизированных двигателей реализованы в рамках грантов РФФИ «Комплексная топологическая оптимизация роторов синхронных электрических машин с постоянными магнитами» № 19-37-90134 и «Разработка метода проектирования и топологической оптимизации роторов синхронных двигателей с постоянными магнитами для привода станков-качалок с целью повышения энергоэффективности нефтедобычи» № 18-48-160023.

Метод топологической оптимизации конструктивных параметров ротора синхронного электрического двигателя использован при реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства на тему «Создание серии электроприводов на базе российских высокоэффективных синхронных двигателей для станков-качалок нефти с применением беспроводных систем передачи данных и адаптивной системой управления для «умных» месторождений», в рамках государственной программы Российской Федерации «Развитие науки и технологий» на 2013-2020 годы, утвержденными постановлением Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218, договор № ДР-936/17 от 26 октября 2017 года с участием ФГБОУ ВО «КГЭУ» и АО «ЧЭАЗ».

Обоснованность и достоверность выводов и результатов работы подтверждается корректными допущениями, принятыми в работе, применением современных методов моделирования и обработки экспериментальных данных, получением результатов, совпадающих с результатами работ других авторов по данной тематике.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности

Диссертация соответствует специальности 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты. Научные результаты, полученные в работе, соответствуют п. 2 «Разработка научных основ создания и совершенствования электрических, электромеханических преобразователей и электрических аппаратов.», п. 3 «Разработка методов анализа и синтеза преобразователей электрической и механической энергии.», п. 5 «Разработка подходов, методов, алгоритмов и программ, обеспечивающих проектирование, п.6 надежность, контроль и диагностику функционирования электрических, электромеханических преобразователей и электрических аппаратов в процессе эксплуатации, в составе рабочих комплексов» паспорта специальности.

Конкретные рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации

Разработанный в результате данной диссертационной работы метод проектирования СДПМ может быть в дальнейшем использован при разработке высокоэффективных двигателей проектными организациями. Программу оптимизации можно интегрировать в САПР, как отдельный модуль повышения эффективности СДПМ. В профильных вузах предлагается использование метода комплексной оптимизации для ознакомления с эволюционными алгоритмами,

автоматизацией расчетов электромагнитных полей двигателей, температурного режима и прочностных характеристик.

Модульность программы позволит заменить метод поиска на более эффективный для конкретного решения, алгоритм возможно настроить на оптимизацию и статора СДПМ.

Модернизированные СДПМ могут применяться в мощных электроприводах промышленного назначения, бытовой технике, энергетике, роботах, гибридных электромобилях и т.д.

Соответствие автореферата основному содержанию диссертации

Структура и содержание автореферата соответствуют основному содержанию диссертации и полностью отражают научные положения, результаты, основные выводы, научную новизну и практическую значимость диссертации.

Вопросы и замечания по диссертации

1. Утверждение, что метод конечных элементов не имеет сложностей по сравнению с другими методами аппроксимации поля внутри машины не подкреплено практическим сравнением точности полученных значений для расчета СДПМ. Не дается пояснений, почему выбрана именно многоточечная магнитостатическая модель.

2. Не приведены количественные характеристики сравнений стандартных методов поиска и эволюционных алгоритмов, только качественные. При сравнении 4-х типов эволюционных алгоритмов приведена только одна характеристика сравнения – время исполнения, но не указывается степень точности решения целевой функции. Не приведены примеры реализации всех алгоритмов, в каком виде выполнялось решение задачи.

3. В алгоритме топологической оптимизации указано, что при необходимости можно упрощать геометрию элементов конструкции СДПМ, однако в примере реализовано только упрощение формы пазов. Возможно ли упрощение других элементов?

4. Какие преимущества имеет программа Elcut для решения целевой функции (2 глава)? Какие еще программы можно использовать для решения таких задач?

5. В 3 главе используются одинаковые по смыслу термины генетического алгоритма «скрещивание» и «спаривание».

6. Не представлен экономический анализ обоснование эффективности модернизированного СДПМ.

7. Какие погрешности имеют результаты экспериментов по определению вращающего момента (рис. 4.26, табл. 4.2.)?

8. До какого значения возможно и целесообразно увеличить вращающий момент двигателя при топологической оптимизации?

Вышеуказанные замечания не носят принципиального характера и не меняют общего положительного мнения о диссертации.

Заключение по работе

Представленные в рассмотренной работе результаты исследований вносят важный вклад в развитие методов повышения эффективности электромеханических преобразователей, а также повышения качества проектирования электромеханических преобразователей. Вынесенные на защиту научные положения в достаточной мере обоснованы и соответствуют поставленным целям и решаемым задачам. Учитывая новизну, теоретическую и экспериментальную обоснованность сформулированных положений, научную и практическую значимость результатов, можно сделать заключение, что диссертация Петрова Тимура Игоревича «Метод комплексной топологической оптимизации ротора синхронного электрического двигателя с постоянными магнитами» является завершённой научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований предложены научно обоснованные технические решения и разработки по совершенствованию синхронных электрических машин с постоянными магнитами на роторе, имеющие существенное значение для развития страны.

Диссертация отвечает требованиям «Положения о присуждении ученых степеней» Российской Федерации, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор, Петров Тимур Игоревич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.01 – «Электромеханика и электрические аппараты».

Диссертация и отзыв обсуждены на расширенном заседании кафедры «Электрические машины и аппараты» ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения», протокол № 4 от 22 ноября 2021 года.

Заведующий кафедрой «Электрические
машины и аппараты» ФГБОУ ВО «РГУПС»

доктор технических наук, доцент

Тел.: +7 (863) 272-62-12

E-mail: ema@rgups.ru



Колпахчян Павел Григорьевич

Доктор технических наук, профессор
кафедры «Электрические машины и
аппараты» ФГБОУ ВО «РГУПС»

Тел.: +7 (863) 272-62-12

E-mail: ema@rgups.ru



Соломин Владимир Александрович

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО РГУПС)
344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2.
тел.: +7 (863) 245-06-13, факс: +7 (863) 255-32-83,
адрес сайта: <http://www.rgups.ru>, E-mail: up_del@rgups.ru.