

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 212.082.06,
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ «КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ», МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ, ПО ДИССЕРТАЦИИ
НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 21 декабря 2021 г., № 45

О присуждении Петрову Тимур Игоревичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата технических наук.

Диссертация «Метод комплексной топологической оптимизации ротора синхронного электрического двигателя с постоянными магнитами» по специальности 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты принята к защите 12 октября 2021 г., протокол № 42 диссертационным советом Д 212.082.06, созданным на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования (ФГБОУ ВО) «Казанский государственный энергетический университет», Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, 420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51, приказ № 552/нк от 23.05.2018 г.

Соискатель Петров Тимур Игоревич, 09 июля 1993 года рождения, в 2017 году соискатель окончил ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», диплом магистра с отличием № 101618 0952225, в 2021 году окончил очную аспирантуру при ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», диплом об окончании аспирантуры № 101624 4877552.

работает в должности ассистента кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» в ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», Министерство науки и высшего образования

Российской Федерации.

Диссертация выполнена на кафедре «Электроснабжение промышленных предприятий» ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», Министерство науки и высшего образования Российской Федерации.

Научный руководитель – доктор технических наук Сафин Альфред Робертович, ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», кафедра «Электроснабжение промышленных предприятий», профессор.

Официальные оппоненты:

1. **Немировский Александр Емельянович**, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Вологодский государственный университет», кафедра «Электрооборудование», профессор;

2. **Табачникова Татьяна Владимировна**, кандидат технических наук, доцент, ГБОУ ВО «Альметьевский государственный нефтяной институт», кафедра «Электро- и теплоэнергетика», заведующий кафедрой

дали **положительные** отзывы на диссертацию.

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения», г. Ростов-на-Дону, в своем положительном отзыве, подписанном Гуда Александром Николаевичем, проректором по научной работе, Колпахчыном Павлом Григорьевичем, доктором технических наук, доцентом, заведующим кафедрой «Электрические машины и аппараты», Соломиным Владимиром Александровичем, доктором технических наук, профессором, профессором кафедры «Электрические машины и аппараты» **указала**, что 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 диссертационная работа «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».

Соискатель имеет 70 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликована 21 работа общим объёмом 7,276 печатных листа и авторским вкладом 3,48 печатных листа; работ, опубликованных в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базе данных SCOPUS / Web Of Science – 5, объёмом 2,156 печатных листа и авторским вкладом 1 печатный лист; в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК по специальности диссертации 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты – 3, объёмом 2,6 печатных листа и авторским вкладом 1,37 печатных листа; в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК по другим специальностям – 3, общим объёмом 1,91 печатных листа и авторским вкладом 0,92 печатных листа; свидетельств о государственной регистрации программы для ЭВМ – 1, объёмом 0,23 печатных листа и авторским вкладом 0,07 печатных листа; работ, опубликованных в материалах и тезисах международных научных конференций – 9, общим объёмом 0,38 печатных листа и авторским вкладом 0,12 печатных листа.

В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных

соискателем ученой степени работах, в которых изложены основные научные результаты диссертации.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. Петров, Т.И. Модель системы управления станком-качалкой на основе синхронных двигателей с бездатчиковым методом / Т.И. Петров, А.Р. Сафин, И.В. Ившин, А.Н. Цветков, В.Ю. Корнилов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2018. – Т. 20. № 7-8. – С. 107-116. 10 с./4 с. (0,81 п.л./0,486 п.л.).

Содержит основные результаты, изложенные в первой главе диссертации.

2. Петров, Т.И. Разработка метода топологической оптимизации электрических машин на основе генетического алгоритма / А.Р. Сафин, Р.Р. Хуснутдинов, А.М. Копылов, В.В. Максимов, А.Н. Цветков, Р.Р. Гибадуллин, Т.И. Петров // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2018. – № 4 (40). – С. 77 – 85. 9 с./4 с. (0,525 п.л./0,236 п.л.).

Содержит основные результаты, изложенные в первой и второй главе диссертации.

3. Petrov, T.I. Modification Genetic Algorithm for Topological Optimization the Rotor of Synchronous Motors / T.I. Petrov, A.R. Safin // In: Vankov Y. (eds) Proceedings of ICEPP 2021. ICEPP 2021. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 190. Springer, Cham. pp 151-156. 4 с./2 с. (0,33 п.л./0,198 п.л.).

Содержит основные результаты, изложенные в третьей главе диссертации.

4. Петров, Т.И. Модификация генетического алгоритма для комплексной топологической оптимизации ротора синхронных двигателей / Т.И. Петров // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2021. – Т. 23. № 3. – С. 70-79. 10 с./5 с. (0,763 п.л./0,42 п.л.).

Содержит основные результаты, изложенные в третьей главе диссертации.

5. Петров, Т.И. Разработка и реализация стенда для подтверждения эффективности топологической оптимизации ротора синхронных двигателей с

постоянными магнитами / Т.И. Петров, А.Р. Сафин // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2021. - №2 (50) – С. 109-117. 9 с./5 с. (0,75 п.л./0,375 п.л.)

Содержит основные результаты, изложенные в четвертой главе диссертации.

На диссертацию и автореферат поступило **9** отзывов, все положительные. В **9** отзывах содержатся следующие замечания:

1) В отзыве доктора технических наук, профессора, профессора кафедры «Систем автоматизированного проектирования», ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева-КАИ» (г. Казань) **Гизатуллина Зиннура Марселевича** имеются вопросы и замечания:

1. Желательно указать какие дополнительные преимущества, кроме времени исполнения, учитывались при выборе генетического алгоритма (рис. 1)?
2. Требуется пояснить по каким критериям оптимизации проведена оценка метода эквивалентных схем магнитных цепей и метода конечных элементов (стр. 7), и почему выбран метод конечных элементов?
3. Каким образом в программе Elcut были рассчитаны тепловые параметры СДПМ, какие допущения были при этом использованы?

2) В отзыве кандидата технических наук, доцента, доцента кафедры «Электрооборудования судов и автоматизации производства» ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет» (г. Керчь) **Савенко Александра Евгеньевича** имеются замечания:

1. Требуется пояснить, как сравнивались экспериментальные данные с результатами моделирования электромагнитного расчета СДПМ в программе Elcut.

2. В автореферате не указано, какие материалы для магнитов могут применяться для СДПМ, кроме NdFeB.

3) В отзыве доктора технических наук, доцента, заведующего кафедрой

«Электрических станций» ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет» (г. Новосибирск) **Русиной Анастасии Георгиевны** имеются вопросы и замечания:

1. Из текста автореферата не ясно, какие нормативные значения температуры нагрева элементов ротора использовались в расчетах (стр. 10).

2. В проведенных исследованиях не показано, на основании какого метода выбираются исходные параметры СДПМ для комплексной топологической оптимизации (стр. 11).

3. Рассматривался ли вопрос, каким образом возможно повысить прочностные характеристики ротора?

4) В отзыве кандидата технических наук, доцента, заведующего кафедрой «Электроснабжение» ФГБОУ ВО «Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина» (г. Орел) **Бородина Максима Владимировича** имеются замечания:

1. Желательно пояснить, как проведена верификация имитационной модели.

2. Неясно, как проводилась оценка перспективности комплексной топологической оптимизации СДПМ.

5) В отзыве кандидата технических наук, доцента, доцента кафедры «Электроснабжения» ФГБОУ ВО "Юго-Западный государственный университет" (г. Курск) **Куделиной Дарьи Васильевны** имеются замечания:

1. Не рассмотрен вопрос технико-экономической оценки модернизированного СДПМ.

2. Не указано, каким нормативным значениям температуры статора должны соответствовать результаты оптимизации (стр. 10).

6) В отзыве кандидата технических наук, доцента, доцента кафедры «Электроснабжение» Гомельского государственного технического университета им. П. О. Сухого (Беларусь, г. Гомель) **Капанского Алексея Александровича** имеются замечания:

1. В тексте автореферата отсутствует информация о схеме соединения

электрических обмоток статора СДПМ.

2. В автореферате не показано почему генетический алгоритм выбран с одинарной мутацией, не представлена реализация алгоритма для данного случая, из каких этапов состоит, какие входные данные необходимы для работы.

7) В отзыве кандидата технических наук, доцента, доцента кафедры Электропривода ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет» (г. Липецк) **Синюковой Татьяны Викторовны** имеются вопросы и замечания:

1. На рисунке 8 представлена топология модернизированного ротора, но не приведено изображение исходного.

2. Алгоритм на рисунке 7 следовало бы сделать вертикальным, чтобы проследить путь оптимизации. По каким условиям в алгоритме выбрана температура нагрева статора 150 С?

8) В отзыве доктора технических наук, профессора, заведующего кафедрой «Электроснабжения и электротехники» ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет» (г. Иркутск) **Сулова Константина Витальевича** имеются вопросы и замечания:

1. Внедрение комплексной оптимизации позволит снизить объем ПМ, при этом необходимо было бы оценить экономию капиталовложений в модернизированный СДПМ.

2. Не представлены варианты прикладных программ для метода конечных элементов, какие использованы критерии выбора программы, почему выбрана программа Elcut, какими преимуществами она обладает?

3. В автореферате не приведена погрешность измерений при проведении лабораторных исследований, а также не указан доверительный интервал для полученных физических величин.

9) В отзыве кандидата технических наук, и.о. профессора кафедры «Электроснабжения и автоматики» Политехнический институт Таджикского технического университета им. академика М. С. Осими **Рахимова Охунбобо**

Сайфиддиневича и кандидата технических наук, ст.преп. кафедры «Электроснабжения и автоматики» Политехнический институт Таджикского технического университета им. академика М. С. Осими **Тошходжаевой Мухайё Исломовны** имеются вопросы и замечания:

1. В автореферате не показано, как разрабатывался и создавался экспериментальный стенд для испытания, модернизированного СДПМ, по каким критериям выбран именно этот вариант реализации.

2. Достаточно ли 4-х опытов таблицы №1 для подтверждения эффективности комплексной топологической оптимизации?

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается их известностью своими достижениями в данной отрасли науки, наличием публикаций в соответствующей сфере исследований и способностью определить научную и практическую ценность диссертации.

Официальный оппонент Немировский Александр Емельянович является доктором технических наук по специальности 05.20.02 – «Электротехнологии и электрооборудование в сельском хозяйстве», экспертом в области эксплуатации и проектирования электрических двигателей.

Официальный оппонент Табачникова Татьяна Владимировна является кандидатом технических наук по специальности 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы», экспертом в области повышения энергетической эффективности электрического привода и механизмов, технологических комплексов в различных отраслях промышленности.

Ведущая организация – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения», г. Ростов-на-Дону, занимается научной деятельностью по приоритетным направлениям развития науки, техники и технологий. В рамках научного направления кафедры "Электрические машины и аппараты" выполняются следующие работы - управление синхронными тяговыми двигателями с постоянными магнитами и проектирования электрических машин, энергосберегающие приводы

электроподвижного состава на базе вентильно-индукторных и асинхронных электрических машин. Сотрудники кафедры имеют соответствующие публикации.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработан алгоритм и метод комплексной топологической оптимизации конструкции ротора СДПМ для оценки возможности повышения вращающего момента и снижения объема постоянных магнитов, с учетом электромагнитных, тепловых процессов и расчёта прочностных характеристик;

разработана программа, реализующая метод комплексной топологической оптимизации ротора СДПМ, перебор вариантов расположения материалов в теле ротора реализован на основе генетического алгоритма с циклической проверкой тепловых и прочностных параметров;

разработан модернизированный синхронный двигатель с постоянными магнитами, с новым расположением магнитов в конструкции ротора, которое было определено в результате решения, полученного методом комплексной топологической оптимизации;

доказана сходимость результатов моделирования на основе сравнения с экспериментальными данными, полученными на разработанном испытательном стенде для проведения исследований синхронных двигателей.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

доказана эффективность применения разработанного метода комплексной топологической оптимизации для проектирования и оптимизации конструктивных параметров ротора синхронного двигателя с постоянными магнитами;

применительно к проблематике диссертации результативно использован комплекс существующих базовых методов теоретической электротехники, теплотехники, компьютерного моделирования электрических двигателей, поиска оптимизационных решений;

проведена модернизация генетического алгоритма, которая заключалась в изменении условий завершения алгоритма и реализации механизма задания определенного объема материала.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

разработан и внедрен (имеется акт внедрения) в процесс проектирования синхронных двигателей с постоянными магнитами энергетической компанией ООО «ЭнергоГазСервис» метод комплексной топологической оптимизации на основе генетического алгоритма для изменения конструкции ротора;

определены оптимальные конструктивные параметры ротора синхронного двигателя с постоянными магнитами 350 Вт для достижения минимального объема постоянных магнитов 9600 мм³ при сохранении вращающего момента 4 Н·м, температуре статора 52 °С и перемещении элементов ротора менее чем на 0,05 мм.

создана в программном комплексе *Elcut* модель синхронного электрического двигателя с постоянными магнитами, которая позволяет на этапе проектирования рассчитывать электромагнитные, тепловые и прочностные параметры;

создан стенд для проверки эффективности модернизированных двигателей, который реализован в рамках гранта РФФИ «Разработка метода проектирования и топологической оптимизации роторов синхронных двигателей с постоянными магнитами для привода станков-качалок с целью повышения энергоэффективности нефтедобычи» № 18-48-160023.

Оценка достоверности результатов исследований выявила:

для экспериментальных работ результаты получены на сертифицированном измерительном оборудовании, применены апробированные методики;

идея базируется в получении оптимального распределения материалов в конструкции ротора синхронного двигателя с постоянными магнитами, для

повышения вращающего момента, при сохранении объема постоянных магнитов, с учетом максимально допустимой температуры и механических напряжений в роторе;

установлено соответствие полученных данных результатам, представленным в независимых источниках по данной тематике; соответствие результатов экспериментальных работ, полученных автором при исследовании модернизированного синхронного двигателя с постоянными магнитами, результатам моделирования в программном комплексе *Elcut*;

использованы современные методики экспериментальных исследований, сбора и обработки получаемых данных.

Личный вклад соискателя состоит в непосредственном участии во всех этапах получения результатов, представленных в диссертации и публикациях, в разработке модели синхронного двигателя с постоянными магнитами, которая позволяет рассчитывать электромагнитные, тепловые и прочностные параметры, в разработке алгоритма упрощения элементов конструкции двигателя, для повышения скорости расчета, модернизации генетического алгоритма, в реализации метода комплексной топологической оптимизации в программном коде, в создании модернизированного двигателя и испытательного стенда, в анализе теоретических значений моделирования, в обработке и интерпретации экспериментальных результатов исследований, в подготовке публикаций и докладов на конференциях.

Диссертационный совет рекомендует использовать результаты диссертационного исследования Петрова Т.И. в научно-исследовательских учреждениях и лабораториях, занимающихся исследованием и разработкой электрических двигателей, а также в организациях, которые разрабатывают программное обеспечение для систем автоматизированного проектирования. Полученные в работе результаты могут быть использованы в АО «ЧЭАЗ» (г. Чебоксары), ОАО «Электросила» (г. Санкт-Петербург), НПО «ЭРГА» (г. Калуга), ООО НТЦ «СИСТЭМ» (г. Воронеж), ООО «Русэлпром. Электрические машины» (г. Москва) и других предприятиях и организациях, занимающихся

проектированием и созданием электрических двигателей.

Диссертация Петрова Т.И. «Метод комплексной топологической оптимизации ротора синхронного электрического двигателя с постоянными магнитами» соответствует критериям п. 9 – 14 Положения о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, является законченной научно-квалификационной работой, выполненной на актуальную тему, в которой содержится решение задачи повышения энергетической эффективности синхронного двигателя с постоянными магнитами, имеющей значение для развития отрасли энергетики, занимающейся созданием и проектированием электромеханических преобразователей с улучшенными характеристиками.

В ходе защиты диссертации были высказаны следующие критические замечания

От ведущей организации:

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

2. Не представлен экономический анализ обоснование эффективности модернизированного СДПМ.

3. После таблицы 2.3. не сделаны выводы о влиянии изменения витков обмотки статора на работу двигателя при повышенной частоте вращения. Не определено, сохраняется ли при повышении тока, значение коэффициента пропорциональности между электромагнитным моментом и проекцией обобщенного вектора тока статора на ортогональную ось прямоугольной системы, и соответствует ли оно теоретическим расчетам.

4. Для расчетов тепловых и прочностных параметров не представлены примеры количественных характеристик материалов, как в примере с

электромагнитными параметрами.

5. На рисунке 1.14 представлен алгоритм ГА, и в тексте указано, что это адаптированная под конкретное исследование блок-схема, не указано какие конкретно изменения внесены в данный алгоритм.

6. На стр. 75 сказано, что «Для оценки перспективности КТО необходимо предварительно оценить значения вращающего момента для СДПМ. С этой целью изменяется стандартное положение магнитов на V- или W-образные магниты, с сохранением объемов ПМ. В нашем случае, расположили магниты как на рисунке 2.13». Из текста не ясно, каким образом выбирается тип магнитов и их расположение.

Соискатель Петров Т.И. ответил на задаваемые ему в ходе заседания вопросы и привел собственную аргументацию:

1. По времени исполнения эволюционные алгоритмы позволяют снизить время расчета в несколько раз, что подтверждается обзором литературы. Степень точности решения во всех примерах составила более 98%, поэтому более важной характеристикой было выбрано время исполнения.

2. Экономический анализ состоит в оценке экономии наиболее дорогостоящего материала (в нашем случае постоянные магниты). Учитывая, что стоимость магнитов исходного СДПМ составляла 43% от общей стоимости, то после модернизации данный процент составил уже 18%.

3. Изменение витков обмотки позволит повысить мощность двигателя, без изменения конструкции преобразователя частоты. Коэффициент пропорциональности сохраняется, разница с теоретическими расчетами составила меньше 2%.

4. Количественные характеристики взяты из открытых источников. Были приведены примеры значений теплопроводности, плотности материала, коэффициентом теплопередачи и температуры окружающей среды.

5. Основное изменение – проверка параметров текущего поколения на соответствие температурным или прочностным режимам, связано это с комплексностью топологической оптимизации.

6. Имеющуюся конструкцию магнитов необходимо привести к V- или W-образным магнитам, на основе анализа электромагнитного расчета и оценке поля индукции внутри воздушного зазора. Объем магнитов необходимо оставить прежним.

На заседании 21 декабря 2021 года, протокол № 45, диссертационный совет за решение научной задачи, имеющей значение для развития отрасли знаний, занимающейся созданием и проектированием электромеханических преобразователей с улучшенными характеристиками присудить Петрову Т.И. ученую степень кандидата технических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 15 человек, из них 7 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 20 человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за 15, против 0.

Председатель
диссертационного совета

Ваньков Юрий Витальевич

Ученый секретарь
диссертационного совета

Зиганшин Шамиль Гаязович



21 декабря 2021 г.