



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(ФГБОУ ВО «КГЭУ»)



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по НР

Ахметова И.Г.

«25» Июня 2021 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования
«Казанский государственный энергетический университет»
(ФГБОУ ВО «КГЭУ»)

Диссертация «Метод комплексной топологической оптимизации ротора синхронного электрического двигателя с постоянными магнитами» выполнена на кафедре «Электроснабжение промышленных предприятий».

В период подготовки диссертации соискатель Петров Тимур Игоревич работал в ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» в должности ассистента (с сентября 2017 – по настоящее время) кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».

В 2017 г. Петров Т.И. окончил ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» с присуждением степени магистра по направлению подготовки «Электроэнергетика и электротехника», диплом № 101618 0952225 от 03 июля 2017 года.

С 2017 г. по 2021 г. Петров Т.И. обучался в аспирантуре ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет».

Документ об обучении в аспирантуре и сданных кандидатских экзаменах выдан в 2021 г. в ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет».

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

По итогам обсуждения диссертации «Метод комплексной топологической оптимизации ротора синхронного электрического двигателя с постоянными магнитами» принято следующее заключение.

1. Актуальность

Синхронный двигатель с постоянными магнитами (СДПМ) широко используется в бытовой технике, промышленности, энергетике, роботах, гибридных электромобилях и многих других приводах. Синхронный двигатель с постоянными магнитами имеет небольшие размеры, высокий КПД и высокую производительность. Распределение материалов (топология) в корпусе ротора СДПМ (постоянных магнитов, железо, воздух и т.д.) определяет характеристики электрической машины.

На сегодняшний день, топологическую оптимизацию используют для сохранения прочностных параметров конструкции при уменьшении массы при использовании метода конечных элементов.

Предлагаемый метод позволяет перенести топологическую оптимизацию на электромагнитные и тепловые процессы в СДПМ с целью повышения энергетических характеристик и надежности электрической машины при заданных массо-габаритных показателях. В настоящее время отсутствуют работы по комплексной топологической оптимизации (КТО) ротора СДПМ.

Алгоритм КТО ротора СДПМ с учетом электромагнитных, тепловых процессов и прочностного расчета позволит проектировать прототипы ротора СДПМ с высокими энергетическими характеристиками для подготовки эскизной и рабочей конструкторской документации.

КТО СДПМ заключается в изменении конструкции ротора с целью повышения вращающего момента, при сохранении (или уменьшения) объема ПМ, тепловых и прочностных параметров.

Вопросы, связанные с моделями СДПМ, топологической оптимизацией конструкции, электромагнитными, тепловыми и прочностными расчетами, нашли решения в работах коллективов НИУ «МЭИ», НИУ «МАИ», СПБГЭТУ ЛЭТИ, НГТУ, ЧГУ, РГУПС, КАИ, КНИТУ, авторов А. Аракеляна, А. Афанасьева, Г. Соколовского, Е. Lyshevski, Р. Ferraris, Р. Vas, Rathnakumar, М. Aguirre, А. Зайцева, Ф. Сарапулова, А. Глотов, Д. Корельского, Rahman M.F., Pillay P., Morimoto S. и других. В большинстве работ улучшение характеристик СДПМ достигается за счет изменения алгоритмов управления, а решений, связанных с оптимизацией конструкции недостаточно. В свою очередь, работы, связанные с топологической оптимизацией, не исследуют электрические двигатели в плане применения комплексного подхода, который позволяет выявить и проанализировать зависимости между электромагнитными, тепловыми и прочностными параметрами.

2. Научная новизна результатов работы

Научная новизна работы заключается в следующем.

1. Разработан алгоритм изменения геометрической модели СДПМ для

повышения скорости проектирования, включающий в себя упрощение формы пазов, приведение к минимальному расчетному сектору двигателя и минимизации размера сетки для метода конечных элементов (МКЭ).

2. Разработаны алгоритм и метод КТО конструкции ротора СДПМ для оценки возможности повышения вращающего момента и снижения объема ПМ, а также распределения материалов в роторе при достижении максимального вращающего момента с учетом электромагнитных, тепловых процессов и определения прочностных характеристик.

3. Разработана программа, реализующая метод КТО ротора СДПМ, содержащая для перебора вариантов расположения материалов в теле ротора генетический алгоритм с циклической проверкой тепловых и прочностных параметров.

3. Научная и практическая значимость результатов

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

Практическая значимость работы.

1. Разработан экспериментальный образец СДПМ с новой топологией ротора.

2. Разработан испытательный стенд для измерения вращающего момента и частоты вращения СДПМ.

Программа метода КТО 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.

Методика топологической оптимизации конструктивных параметров ротора синхронного электрического двигателя использована 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».

Разработанное математическое и программное обеспечение для реализации КТО ротора СДПМ, технология по модернизации синхронных двигателей с постоянными магнитами актуальны для проектных организаций

и могут быть использованы для разработок новых двигателей. Даная технология может быть реализована в виде компьютерного приложения, которое можно интегрировать в существующие программы САПР.

4. Личное участие автора в получении результатов научных исследований, изложенных в диссертации

Соискатель непосредственно участвовал в получении результатов, которые отражены в статьях и диссертации. Автор принимал участие в работе над разработкой математической модели СДПМ, проверкой достоверности результатов моделирования, созданием алгоритма топологической оптимизации, его реализации и оптимизации, изготовлением экспериментального образца СДПМ, и проведением испытаний.

Автор принимал участие в создании и разработке стенда, проведении экспериментов, анализе полученных результатов, представлял результаты работы на конференциях, форумах и выставках, в виде докладов и статей.

5. Степень достоверности результатов проведенных исследований

Достоверность полученных результатов работы и рекомендаций для последующих исследований подтверждается точностью поставленной цели и задач, корректными допущениями, которые были приняты в работе, результатами моделирования, которые совпадают с результатами работ в данной тематике, проверкой адекватности математического моделирования (при использовании актуальных компьютерных программ) на основе теоретических и экспериментальных значений, результатами реальных экспериментов над разработанным оборудованием.

6. Соответствие диссертации научной специальности

Диссертация соответствует специальности 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты.

Научные результаты, которые были получены в ходе работы соответствуют пп. 2 «Разработка научных основ создания и совершенствования электрических, электромеханических преобразователей и электрических аппаратов.», 3 «Разработка методов анализа и синтеза преобразователей электрической и механической энергии.», 5 «Разработка подходов, методов, алгоритмов и программ, обеспечивающих проектирование, надежность, контроль и диагностику функционирования электрических, электромеханических преобразователей и электрических аппаратов в процессе эксплуатации, в составе рабочих комплексов» Паспорта специальности.

7. Полнота изложения результатов диссертации в работах, опубликованных автором

По теме диссертации опубликованы 21 печатная работа в журналах и сборниках, в том числе 6 статей в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 5 статей, индексируемых в международных базах данных SCOPUS или/и Web

of Science, 1 свидетельство на программу для ЭВМ и 9 работ в сборниках материалов конференций.

Статьи в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в международных базах данных Web of Science/SCOPUS

1. Petrov, T.I. Topological optimization of the rotors of permanent magnet synchronous motors / A.R. Safin, T.I. Petrov // E3S Web of Conferences. – 2020. – Vol. 220. – paper № 01040. (вклад соискателя – 50%).

2. Petrov, T.I. Changing the design of a synchronous motor after testing / T. I. Petrov, V.Yu. Kornilov, A.R. Safin, N.E. Kuvshinov, A.N. Tsvetkov, R.R. Gibadullin // E3S Web of Conferences. – 2020. – Vol. 220. – paper № 01030. (вклад соискателя – 30%).

3. Petrov, T.I. Modification of the synchronous motor model for topological optimization / T.I. Petrov, A.R. Safin // E3S Web of Conferences. – 2020. – Vol. 178. – paper № 01016. (вклад соискателя – 55%).

4. Petrov, T.I. Theoretical aspects of optimization synchronous machine rotors / T.I. Petrov, A.R. Safin // E3S Web of Conferences. – 2020. – Vol. 178. – paper № 01049. (вклад соискателя – 45%).

5. 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. (вклад соискателя – 60%).

Статьи в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК РФ

6. 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. (вклад соискателя – 60%).

7. Петров, Т.И. Разработка стенда для исследования электроприводов станков-качалок / А.Н. Цветков, В.Ю. Корнилов, А.Р. Сафин, Н.Е. Кувшинов, Т.И. Петров, Р.Р. Гибадуллин // Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. – 2020. – Т. 23. № 4. – С. 364-375. (вклад соискателя – 45%).

8. 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. (вклад соискателя – 45%).

9. Петров, Т.И. Разработка и реализация испытательного стенда для исследования характеристик синхронного электродвигателя / И.В. Ившин, А.Р. Сафин, Т.И. Петров, А.Н. Цветков, В.Ю. Корнилов, А.И. Мухаметшин // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2018. – № 3 (39). – С. 45-55. (вклад соискателя – 50%).

10. 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. (вклад соискателя – 55%).

11. 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. (вклад соискателя – 50%).

Патенты и свидетельства регистрации программ

12. Свидетельство № 2019610240 Рос. Федерация. Программа для топологической оптимизации ротора синхронной машины / А.Р. Сафин, А.М. Копылов, А.Н. Цветков, Р.Р. Гибадуллин, Р.Р. Хуснутдинов, В.В. Максимов, Т.И. Петров. - № 2019610240; заявл.18.12.2018; опубл. 09.01.2019. – 1 с.

Публикации в материалах докладов международных и всероссийских научных конференций

13. Петров, Т. И. Топологическая оптимизация синхронных двигателей / Т. И. Петров, А. Р. Холикова // Электромеханотроника и управление: Пятнадцатая Всероссийская (седьмая международная) научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых "Энергия-2020": Материалы конференции. В 6 томах, Иваново, 07–10 апреля 2020 года. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 2020. – С. 19. (вклад соискателя – 70%).

14. Петров, Т. И. Топологическая оптимизация вращающихся машин / Т. И. Петров, А. Р. Холикова, А. Р. Сафин // Диспетчеризация и управление в электроэнергетике: XIV Всероссийская открытая молодежная научно-практическая конференция, Казань, 06–08 ноября 2019 года. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2019. – С. 149-152. (вклад соискателя – 40%).

15. Петров, Т. И. Обзор станций управления электроприводом станков-качалок нефти / Д. В. Пономарева, А. Р. Сафин, Т. И. Петров // Диспетчеризация и управление в электроэнергетике: XIV Всероссийская открытая молодежная научно-практическая конференция, Казань, 06–08 ноября 2019 года. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2019. – С. 152-156. (вклад соискателя – 40%).

16. Петров, Т. И. Аналитический обзор работ по оптимизации конструкции синхронных двигателей / Т. И. Петров, А. Р. Холикова, А. Р. Сафин // Энергия молодежи для нефтегазовой индустрии: Материалы IV Международной научно-практической конференции молодых ученых, Альметьевск, 16–18 октября 2019 года. – Альметьевск: Альметьевский государственный нефтяной институт, 2019. – С. 418-422. (вклад соискателя – 40%).

17. Петров, Т. И. Топологическая оптимизация параметров синхронных электрических машин с постоянными магнитами в составе приводных комплексов / Т. И. Петров // Тинчуринские чтения: Материалы XIV Международной молодежной научной конференции. В 3-х томах, Казань, 23–

26 апреля 2019 года / Под общей редакцией Э.Ю. Абдуллазянова. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2019. – С. 241-244. (вклад соискателя – 40%).

18. Петров, Т. И. Проектирование роторов синхронных двигателей с постоянными магнитами / А. Р. Сафин, И. В. Ившин, Е. И. Грачева, Т. И. Петров // Вестник ПИГТУ имени академика М.С. Осими. – 2019. – № 3(12). – С. 25-37. (вклад соискателя – 40%).

19. Петров, Т. И. Сравнение различных типов электроприводов для станков-качалок нефти / Т. И. Петров // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Тезисы докладов, Москва, 15–16 марта 2018 года. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью "Центр полиграфических услуг " РАДУГА", 2018. – С. 437. (вклад соискателя – 40%).

20. Петров, Т. И. Синхронные двигатели в нефтяной промышленности / А. Р. Сафин, А. Н. Цветков, И. В. Ившин [и др.] // Достижения, проблемы и перспективы развития нефтегазовой отрасли: Материалы Международной научно-практической конференции, Альметьевск, 14–17 ноября 2018 года. – Альметьевск: Альметьевский государственный нефтяной институт, 2018. – С. 469-472. (вклад соискателя – 40%).

21. Петров, Т. И. Разработка метода проектирования синхронных двигателей с постоянными магнитами для привода станков-качалок / Т. И. Петров // XII Ежегодная научная сессия аспирантов и молодых ученых: Материалы межрегиональной научной конференции. В 2-х томах, Вологда, 19–23 ноября 2018 года. – Вологда: Вологодский государственный университет, 2018. – С. 100-103. (вклад соискателя – 40%).

В перечисленных работах Петровым Тимуром Игоревичем лично получены следующие результаты:

- [1,3] – разработка алгоритма топологической оптимизации;
- [2] – обработка данных и анализ полученных результатов после проведения экспериментов;
- [4,7] – постановка задачи ;
- [5] – разработка математической модели СДПМ;
- [6,8] – разработка и описание стенда для исследования СДПМ;
- [9] – разработка программы для топологической оптимизации ротора синхронной машины;
- [10,11,14] – выбор методики исследования, обработка результатов;
- [12] – патентный поиск по использованию СДПМ в составе электроприводов;
- [15,18] – разработка программы проектирования роторов СДПМ;
- [16,17] – сравнение электроприводов, на базе СДПМ;
- [19] – получение тепловых моделей для двигателей;
- [20,21] – получение функциональных зависимостей, выбор методики исследования.

Все основные положения и результаты, выносимые на защиту, отражены в публикациях автора: по главе 1 – в [5, 6, 12, 13, 15, 16, 17, 20, 21],

по главе 2 – в [2, 4, 18, 19], по главе 3 – в [1, 3, 10, 14], по главе 4 – в [7, 8, 9, 11].

В диссертационной работе не выявлено использования материалов или отдельных результатов без ссылок на автора или источник заимствования, включая работы, выполненных соискателем лично и/или в соавторстве.

8. Апробация работы

Конкурс "Энергоэффективное оборудование и технологии" в рамках Татарстанского международного форума по энергоресурсоэффективности и экологии (г. Казань, 21-23 апреля, 2021); International symposium "Sustainable energy and power engineering 2021" "SUSE-2021" (Kazan, Russia, 18-20 February, 2021); Sustainable energy systems: innovative perspectives "SES-2020" (Russia – India, October 29-30, 2020, Saint-Petersburg, Russia); High speed turbomachines and electrical drives conference 2020 (14-15 th of May 2020, Prague, Czech Republic); XV Всероссийская открытая молодежная научно-практическая конференция "Диспетчеризация и управление в электроэнергетике", (г. Казань, 21-22 октября 2020 г.); Пятнадцатая Всероссийская (седьмая международная) научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых "Энергия-2020" (г. Иваново, 2020г.); «Диспетчеризация и управление в электроэнергетике» XIV Всероссийская открытая молодежная научно-практическая конференция (г. Казань, 2019); «Энергия молодежи для нефтегазовой индустрии» IV Международной научно-практической конференции молодых ученых (г. Альметьевск, 2019); «1st international conference on control systems, mathematical modelling, automation and energy efficiency, summa» (г. Липецк, 2019); «E3S Web of Conferences. International Scientific and Technical Conference Smart Energy Systems 2019, SES 2019» (г. Казань, 2019); «International conference on physics and photonics processes in nano sciences 2019» (Eluru, 2019); «IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Scientific Electric Power Conference 2019, ISEPC 2019» (г. Санкт-Петербург, 2019); «10TH International scientific and practical conference on water power energy forum 2018, WPEF 2018» (г. Казань, 2018).

9. Ценность научных работ соискателя

Основные достоинства работы:

1. Результаты исследований алгоритмов оптимизации конструкции СДПМ, методов расчета целевой функции и методов поиска показали целесообразность применения КТО роторов СДПМ на базе генетического алгоритма с расчетом целевой функции в программе Elcut.

2 Создана геометрическая модель СДПМ, которая позволяет рассчитывать электромагнитные, тепловые и прочностные параметры.

3. Обоснованы и реализованы рациональные изменения параметров геометрической модели СДПМ для упрощения расчета по методу КТО без потери достоверности полученных результатов.

4. Модернизирован ГА с учетом особенностей КТО ротора СДПМ, который позволил снизить объем ПМ без уменьшения значения вращающего момента.

5. Разработаны алгоритм, программа и метод КТО на базе ГА для ротора СДПМ.

6. Для физического моделирования СДПМ изготовлен экспериментальный образец, а также стенд для его испытаний, что позволило верифицировать разработанную имитационную модель. При этом отклонение расчетных и экспериментальных данных составило не более 5 %.

Для дальнейшего развития проведенных исследований рекомендуется использование других методов поиска (или дополнительная модернизация ГА) для повышения скорости расчетов, применение программ с опцией МКЭ для определения электромагнитных, тепловых и прочностных параметров. При этом возможным является разработка алгоритмов оптимизации конструктивных параметров статора.

10. Характер результатов

Характер результатов диссертации соответствует п. 9 Положения о присуждении ученых степеней ВАК Министерства образования и науки РФ.

11. Выводы

Диссертация Петрова Т.И. «Метод комплексной топологической оптимизации и создания роторов синхронных электрических двигателей с постоянными магнитами» является завершенной научно-квалификационной работой, выполненной на актуальную тему, в которой содержится решение задачи повышения энергоэффективности синхронных двигателей с постоянными магнитами.

Решение данной задачи имеет значение для развития области науки и техники, занимающейся исследованием по физическим и техническим принципам создания и совершенствования силовых и информационных устройств для взаимного преобразования электрической и механической энергии.

Диссертация обобщает самостоятельные исследования автора, обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения, выдвигаемые на защиту, свидетельствует о личном вкладе автора в науку. При выполнении диссертационной работы Петров Т.И. проявил себя зрелым научным работником, способным ставить и решать сложные теоретические и практические задачи.

Работа соответствует критериям п. 9 – 14 Положения о присуждении ученых степеней, принятого Постановлением Правительства Российской

Федерации от 24 сентября 2013 г. №842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук.

Диссертация «Метод комплексной топологической оптимизации и создания роторов синхронных электрических двигателей с постоянными магнитами» Петрова Тимура Игоревича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.01 «Электромеханика и электрические аппараты».

Заключение принято на заседании кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Казанский государственный энергетический университет».

Присутствовало на заседании 18 чел. Результаты голосования: «за» – 18 чел., «против» – 0 чел., «воздержалось» – 0 чел., протокол № 37 от «24» июня 2021 г.



Ившин Игорь Владимирович,
докт. техн. наук, профессор, кафедра
«Электроснабжение промышленных
предприятий» ФГБОУ ВО «КГЭУ», заведующий
кафедрой

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет»,
420066, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Красносельская, 51.
Тел. (843)519-42-73, e-mail: erp.kgeu@mail.ru

Сведения о лице, утвердившем заключение:

Ахметова Ирина Гареевна: доктор технических наук, доцент,
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет», Проректор по научной работе, 420066, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Красносельская, 51.
Тел. 843) 519-42-02, e-mail: prorectornauka@gmail.com



10

Подпись: Ившин И. В.
Специалист УИ

