

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования



КГЭУ

«КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(ФГБОУ ВО «КГЭУ»)



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по НИК ФГБОУ ВО «КГЭУ»

И.В. Ившин

«1» июль 2026 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего
образования

«КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
ФГБОУ ВО «КГЭУ»

Диссертационная работа «Синхронный электродвигатель с комбинацией неодимовых и ферритовых магнитов в роторе для электротранспорта» выполнена на кафедре «Электроснабжение промышленных предприятий» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Казанский государственный энергетический университет».

В период подготовки диссертации соискатель Майоров Андрей Александрович являлся аспирантом на кафедре «Электроснабжение промышленных предприятий» ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» с 2021 года по 2025 год. С 2018 года (по настоящее время) работает в АО НИЦ «Инкомсистем» в должности старшего инженера. С 2026 года (по настоящее время) работает по совместительству в ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» в должности лаборанта-исследователя учебно-исследовательской лаборатории «Электроснабжение промышленных предприятий, надежности и диагностики в электроэнергетике».

В 2019 году Майоров А.А. закончил бакалавриат по направлению подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника», дипломом № 101624 4661289 от 12 июля 2019 года.

В 2021 году Майоров А.А. окончил ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» с присуждением степени магистра по направлению подготовки «Электроэнергетика и электротехника», диплом № 101635 0000302 от 09 июля 2021 года.

С 2021 года по 2025 год Майоров А.А. обучался в аспирантуре ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет».

Документ об обучении в аспирантуре и сданных кандидатских экзаменах выдан в 2025 году в ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет».

Научный руководитель – Сафин Альфред Робертович, доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник учебно-исследовательской лаборатории «Электроснабжение промышленных предприятий, надежности и диагностики в электроэнергетике» Казанского государственного энергетического университета.

По итогам обсуждения диссертации «Синхронный электродвигатель с комбинацией неодимовых и ферритовых магнитов в роторе для электротранспорта» принято следующее заключение:

1. Актуальность темы диссертационной работы

Синхронные двигатели с постоянными магнитами (СДПМ) в современном мире получили широкое распространение. Этому способствуют высокий коэффициент полезного действия (КПД), малые габариты и надежность. Однако повсеместное применение СДПМ ограничивается использованием дорогих редкоземельных магнитов, например NdFeB. Цена на редкоземельные магниты нестабильна. В настоящее время Китай доминирует на мировом рынке производства редкоземельных магнитов. Периодически Китай ограничивает экспорт редкоземельных магнитов, что создает угрозу для промышленности. Именно поэтому разработка СДПМ с альтернативными магнитами является актуальной задачей. Наиболее подходящими магнитами являются ферритовые магниты. Ферритовые магниты доступнее, экологичнее и термоустойчивее. Такие двигатели перспективны для транспорта, робототехники и специальных приводов.

К преимуществам ферритовых магнитов можно отнести дешевизну, устойчивость к коррозии, стойкость к высоким температурам. К недостаткам ферритовых магнитов можно отнести слабую индукцию, малую коэрцитивную силу. Для сохранения характеристик ЭД (момент, КПД, коэффициент мощности) необходимо доработать конструкцию. В настоящее время ведутся исследования, пытающиеся улучшить ситуацию точечными правками (например, меняют алгоритмы управления). Однако такие правки недостаточны. Необходим комплексный подход, который свяжет электромагнитные, тепловые и механические расчеты. К тому же существующие методики проектирования часто имеют ограничения. К примеру, существующие методы не учитывают специфику распределения материала в роторе.

Вопросы, связанные с использованием в СДПМ комбинаций ферритовых и редкоземельных магнитов, с оптимизацией конструкции ротора, с расчетом потерь и т.д., нашли решения в работах коллективов МЭИ, УРФУ, БНТУ, СамГТУ, КГЭУ, Indian Institutes of Technology, Khalifa University, Sheffield University, авторов В. Дмитриевского, В. Казакбаева, В. Прахта, В.В. Гомана, Б. Фираго, А. Гулькова, Л. Павлячик, Ю. Зубкова, А. Никулина, Т.И. Петрова, А.Р. Сафина, Z.Q. Zhu, L. Chen, L. Yang, K. Ranjan и других. Большинство существующих исследований предлагают либо модификацию систем управления, либо полный переход на ферритовые магниты, что увеличивает массогабаритные показатели ЭД. При этом комплексные решения для СДПМ, сочетающих ферритовые и редкоземельные материалы, практически не разработаны, а существующие методики оптимизации носят частный характер.

2. Научная новизна исследований

Научная новизна диссертационной работы состоит в следующем:

1. Разработана методика топологической оптимизации ротора СДПМ на основе генетического алгоритма (ГА) с учетом распределения материалов (ферритовые магниты, неодимовые магниты, сталь, воздух) для максимизации крутящего момента.
2. Разработан алгоритм расчета ферритовых магнитов, позволяющий определить требуемые геометрические параметры (длину, ширину, глубину) и обеспечивающий сохранение номинальных электромагнитных характеристик ЭД при частичной замене неодимовых магнитов.
3. Топология ротора с комбинацией ферритовых и редкоземельных магнитов, отличающаяся снижением доли редкоземельных материалов без значительной потери крутящего момента.

3. Научная и практическая значимость результатов

Теоретическая значимость работы заключается в создании численной модели, интегрирующей электромагнитные, тепловые и механические процессы в СДПМ с

комбинацией ферритовых и неодимовых магнитов. Модель позволяет прогнозировать распределение магнитного потока, потери, КПД, крутящего момента.

Практическая значимость работы:

1. Создан экспериментальный образец СДПМ с комбинацией ферритовых и редкоземельных магнитов, демонстрирующий снижение стоимости магнитной системы.

2. В рамках исследования был спроектирован и создан специализированный испытательный стенд, предназначенный для экспериментального определения крутящего момента и скорости вращения.

3. Создан программный комплекс для проектирования ротора СДПМ с комбинацией ферритовых и редкоземельных магнитов.

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

Соискатель лично участвовал в получении всех результатов, представленных в диссертации и публикациях. Разработана численная модель СДПМ в программном комплексе COMSOL Multiphysics с учетом электромагнитных, тепловых и механических процессов, проведена проверка достоверности моделирования, создан и оптимизирован алгоритм топологической оптимизации ротора на основе генетического алгоритма с интеграцией Python и COMSOL, изготовлен экспериментальный образец СДПМ с комбинированной магнитной системой (феррит и неодим) и выполнены его испытания на разработанном стенде.

Кроме того, соискатель участвовал в создании стенда, включая стационарную и подвижную части, проведении экспериментов по оценке момента, скорости, определении коэффициента мощности, потерь, а также анализе полученных данных. Результаты работы докладывались на конференциях, форумах и выставках, опубликованы в виде статей и тезисов.

5. Степень достоверности результатов проведенных исследований

Достоверность полученных результатов обеспечивается четкой постановкой цели и задач, обоснованностью принятых допущений, а также согласием результатов численного моделирования с известными данными для аналогичных электромеханических систем. Адекватность модели проверена сопоставлением расчетных характеристик с экспериментальными значениями, полученными на изготовленном стенде.

6. Соответствие диссертации научной специальности

Диссертация соответствует специальности 2.4.2 – Электротехнические комплексы и системы.

Научные результаты, полученные в работе, соответствуют паспорту специальности: пп. 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 электротехнические, электромагнитные преобразователи энергии и электрические аппараты, системы электропривода, электроснабжения и электрооборудования»: проведен комплексный анализ электромагнитных процессов, параметров и потерь в СДПМ, что способствует развитию общей теории электрических машин. Пп. 3 «Разработка, структурный и параметрический синтез, оптимизация электрических комплексов, систем и их компонентов, разработка алгоритмов эффективного управления»: разработан алгоритм топологической оптимизации ротора СДПМ на основе метода ГА, реализованный в среде Python и COMSOL Multiphysics. Алгоритм решает задачу оптимизации (крутящий момент, термическая стабильность, механическая прочность, стоимость) для синтеза гибридной магнитной системы. Пп. 4 «Исследование работоспособности и качества функционирования электрических комплексов, систем и их компонентов в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях, диагностика электротехнических комплексов»: проведено исследование

потерь, КПД, коэффициента мощности и крутящего момента экспериментального СДПМ на специализированном стенде.

7. Полнота изложения результатов диссертации в работах, опубликованных соискателем ученой степени

По теме диссертации опубликованы 7 печатных работ в журналах и сборниках, в том числе 2 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 1 статья, индексируемая в международной базе данных SCOPUS или/и Web of Science, 2 свидетельства на программу для ЭВМ и 2 работы в сборниках материалов конференций.

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

1. Mayorov, A. Performance Evolution of Non-Rare-Earth Permanent Magnets in Motor Applications / A. Mayorov, A. Safin, T. Petrov // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). - 2025. - P. 386-390. (вклад соискателя – 50 %).

Статьи в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК РФ

2. Майоров, А. А. Возможность применения в электродвигателях постоянных магнитов без редкоземельных элементов / А. А. Майоров, А. Р. Сафин // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. - 2022. - Т. 24. № 4. - С. 116-130. (вклад соискателя – 60 %).

3. Майоров, А. А. Методы оптимизации роторов синхронных электродвигателей с постоянными магнитами / А. А. Майоров, А. Р. Сафин // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. - 2024. - Т. 26. № 3. - С. 50-65. (вклад соискателя – 55 %).

Патенты и свидетельства регистрации программ

4. Свидетельство № 2025663488 Рос. Федерация. Программа расчета геометрических размеров ферритовых магнитов на основе оптимизации конструкции ротора редкоземельных магнитов / А. Р. Сафин, Т. И. Петров, А. А. Майоров, Ю. Р. Кадырмятов - № 2025663488; заявл. 10.04.2025; опубл. 28.05.2025. – 1 с.

5. Свидетельство № 2025690865 Рос. Федерация. Программа топологической оптимизации ротора синхронного электродвигателя с ферритовыми и неодимовыми магнитами на базе генетического алгоритма поиска / А. Р. Сафин, А. А. Майоров, Т. И. Петров, Ю. Р. Кадырмятов - № 2025690865; заявл. 29.10.2025; опубл. 11.11.2025. – 1 с.

Публикации в материалах докладов международных и всероссийских научных конференций

6. Майоров, А. А. Применение в электродвигателях ферритовых магнитов / А. А. Майоров, А. Р. Сафин // Тинчуринские чтения - 2022. Энергетика и цифровая трансформация: Международная молодежная научная конференция: в 3 т., Казань, 27-29 апреля 2022 года / под общей редакцией ректора КГЭУ Э. Ю. Абдуллазянова. – Казань: КГЭУ. - 2022. - Т. 1. - С. 199-201. (вклад соискателя – 70 %).

7. Майоров, А. А. Выбор метода оптимизации конструкции ротора синхронного электродвигателя с постоянными магнитами / А. А. Майоров, А. Р. Сафин // Тинчуринские чтения - 2023. Энергетика и цифровая трансформация: Международная молодежная научная конференция: в 3 т., Казань, 26-28 апреля 2023 года / под общей редакцией ректора КГЭУ Э. Ю. Абдуллазянова. – Казань: КГЭУ. - 2023. - Т. 1. - С. 208-211. (вклад соискателя – 70 %).

В перечисленных работах Майорова Андрея Александровича лично получены следующие результаты:

[1,3] – создание алгоритма топологической оптимизации на основе генетического алгоритма;

[2] – обработка и анализ экспериментальных данных;

[6,7] – изготовление экспериментального образца, проведение испытаний, разработка и создание испытательного стенда;

[4] – разработка программы расчета геометрических размеров ферритовых магнитов;

[5] – разработка программы топологической оптимизации ротора СДПМ на базе генетического алгоритма.

Все основные положения и результаты, выносимые на защиту, отражены в публикациях автора: по главе 1 – в [3, 6, 7], по главе 2 – в [2], по главе 3 – в [1, 5], по главе 4 – в [4].

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

8. Апробация работы

Результаты работы докладывались на Международной научной конференции «Тинчуринские чтения» (2022-2023 гг.), на Международной научно-технической конференции «Пром-Инжиниринг» (11-17 мая 2025 г.), на XXIX Международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы общества, науки и образования» (20.09.2026), на Всероссийской научно-практической конференции «Современные исследования: актуальные проблемы и перспективы развития» (21.09.2026).

9. Ценность научных работ соискателя

1. Разработан программный комплекс, реализующий методику топологической оптимизации ротора СДПМ на основе ГА с совместным учетом крутящего момента, температуры, прочности и стоимости магнитной системы.

2. Изготовлен экспериментальный образец СДПМ с комбинированной магнитной системой. Для проверки работоспособности СДПМ с комбинированной магнитной системой изготовлен стенд для измерения момента и скорости. Выявлено снижение характеристик по сравнению с исходным СДПМ. Крутящий момент экспериментального СДПМ снижен на 16,91 %, КПД – на 4,47 %, коэффициент мощности – на 8,8 % по сравнению с исходным СДПМ.

3. Потери экспериментального СДПМ превысили потери исходного СДПМ на 15,79 %.

4. Стоимость магнитной системы экспериментального СДПМ оказалась на 54,7 % ниже, чем у исходного СДПМ.

Рекомендации для дальнейших исследований:

Для повышения термостабильности исследовать комбинированные конструкции ротора с сегментированными магнитами (феррит и SmCo).

Также разработать алгоритмы компенсации реактивной мощности, улучшающие коэффициент мощности СДПМ.

Применение аддитивных технологий. Аддитивные технологии позволят изготавливать роторы нестандартной конфигурации.

Результаты исследования показали, что замена редкоземельных магнитов на ферритовые в СДПМ возможна без существенного снижения характеристик. Это позволяет создавать более экономичные и экологически безопасные ЭД.

10. Характер результатов

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

11. Выводы

Диссертация Майорова А.А. «Синхронный электродвигатель с комбинацией неодимовых и ферритовых магнитов в роторе для электротранспорта» 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 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 Майорова А.А. 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 (в актуальной редакции), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук.

Диссертация «Синхронный электродвигатель с комбинацией неодимовых и ферритовых магнитов в роторе для электротранспорта» Майорова Андрея Александровича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.2 «Электротехнические комплексы и системы».

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

Присутствовало на заседании 19 чел. Результаты голосования: «за» – 19 чел., «против» – 0 чел., «воздержалось» – 0 чел., протокол № 15 от 30 июня 2026 г.

Председатель заседания:
Петров Тимур Игоревич,
к.т.н., доцент, зав. кафедрой
«Электроснабжение
промышленных предприятий»
ФГБОУ ВО «КГЭУ»



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: epp.kgeu@mail.ru

Сведения о лице, утвердившем заключение:
Ившин Игорь Владимирович: доктор технических наук, профессор,
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет», проректор по науке и коммерциализации,
420066, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Красносельская, 51.
Тел. (843)519-42-02, e-mail: ivshin.iv@kgeu.ru



Петрова Т. И.
Подпись
Специалист ОК *И. И. Кабдрахманова О. А.*