

На правах рукописи



Майоров Андрей Александрович

СИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ С КОМБИНАЦИЕЙ НЕОДИМОВЫХ И
ФЕРРИТОВЫХ МАГНИТОВ В РОТОРЕ ДЛЯ ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА

2.4.2 – Электротехнические комплексы и системы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Казань – 2026

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» на кафедре «Электроснабжение промышленных предприятий»

**Научный
руководитель:**

доктор технических наук, доцент
Сафин Альфред Робертович

**Официальные
оппоненты:**

Татевосян Андрей Александрович, доктор технических наук, кафедра «Электрическая техника» ФГАОУ ВО «Омский государственный технический университет», профессор кафедры, доцент.

Синюкова Татьяна Викторовна, кандидат технических наук, кафедра «Автоматизированный электропривод и робототехника» ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет», доцент кафедры, доцент.

**Ведущая
организация:**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва

Защита состоится «15» декабря 2026 г. в 10 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета 24.2.310.02, созданного на базе ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» по адресу: 420066, г. Казань, ул. Красносельская, д.51, ауд. Д-224, тел./факс (843) 519-42-55.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, с указанием контактных данных и заверенные печатью организации, просим присылать по адресу: 420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51, ученому секретарю диссертационного совета 24.2.310.02.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» и на официальном сайте КГЭУ <https://kgeu.ru>.

Автореферат разослан «____» _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Зиганшин Ш.Г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности.

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 элементами являются ферритовые магниты. Ферритовые магниты доступнее, экологичнее и термоустойчивы. Двигатели с такими магнитами 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 относят: слабую индукцию, малую коэрцитивную силу. Для сохранения характеристик ЭД (момент, КПД, коэффициент мощности) необходимо доработать конструкцию. В настоящее время ведутся исследования для улучшения конструктивных элементов точечными правками (например, меняются алгоритмы управления). Однако такие правки недостаточны. Необходим комплексный подход, который свяжет электромагнитные, тепловые и механические расчеты. При этом 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, оптимизации конструкции ротора, расчет 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 исследований направлены на модификацию систем управления или 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.

Объект исследования: синхронные двигатели с постоянными магнитами.

Предмет исследования: методы проектирования и оптимизации роторов СДПМ с использованием комбинации ферритовых и редкоземельных магнитов.

Целью диссертационной работы является: разработка экспериментального образца СДПМ с комбинированным применением ферритовых и неодимовых магнитов в роторе, обеспечивающего снижение стоимости магнитной системы и

зависимости от редкоземельных материалов при сохранении требуемых для электротранспорта электромагнитных и тепловых характеристик.

Задачи исследования:

1. Анализ современных типов СДПМ, их преимуществ и недостатков, а также материалов для постоянных магнитов (ПМ).
2. Анализ методов оптимизации конструкции СДПМ, их преимуществ и недостатков.
3. Разработка программного комплекса для топологической оптимизации ротора СДПМ с комбинацией ферритовых и неодимовых магнитов, обеспечивающего совместный учет крутящего момента, температуры, прочности и стоимости магнитной системы.
4. Моделирование СДПМ с топологически оптимизированной конструкцией ротора (комбинация ферритовых и неодимовых магнитов) в программном комплексе COMSOL Multiphysics.
5. Создание экспериментального СДПМ с комбинированной магнитной системой (ферритовые и неодимовые магниты) и создание испытательного стенда для измерения крутящего момента и скорости вращения.
6. Проведение экспериментального исследования характеристик экспериментального и исходного СДПМ и расчет стоимости магнитной системы экспериментального и исходного СДПМ.

Методология и методы исследования.

Исследование включает теоретический анализ электромеханических систем, численное моделирование в программном комплексе COMSOL Multiphysics и экспериментальную проверку на разработанном стенде. Топологическая оптимизация ротора выполнена методом генетического алгоритма (ГА) с учетом распределения материалов (ферритовые магниты, неодимовые магниты, сталь, воздух) для максимизации крутящего момента.

На защиту выносятся:

1. Методика топологической оптимизации ротора СДПМ с комбинацией ферритовых и неодимовых магнитов, отличающаяся совместным учетом крутящего момента, температуры, прочности и стоимости магнитной системы.
2. Программный комплекс, обеспечивающий расчет оптимальных геометрических параметров ферритовых и неодимовых магнитов, оценку потерь, КПД, коэффициента мощности и крутящего момента.
3. Экспериментальный образец СДПМ с комбинацией ферритовых и неодимовых магнитов, характеризующийся снижением доли редкоземельных материалов на 58 % при сохранении 83 % номинального крутящего момента исходного СДПМ.

Теоретическая значимость работы.

Разработана численная модель, интегрирующая электромагнитные, тепловые и механические процессы в СДПМ с комбинацией ферритовых и неодимовых магнитов. Модель позволяет прогнозировать распределение магнитного потока, потерь, КПД, крутящего момента.

Практическая значимость работы:

1. Создан экспериментальный образец СДПМ с комбинацией ферритовых и редкоземельных магнитов с уменьшенной стоимостью магнитной системы.
2. Спроектирован и создан специализированный испытательный стенд для экспериментального определения крутящего момента и скорости вращения.
3. Создан программный комплекс для проектирования ротора СДПМ с комбинацией ферритовых и редкоземельных магнитов.

Достоверность и обоснованность результатов исследования подтверждена согласованностью данных моделирования и эксперимента, а также сопоставлением с работами известных ученых.

Научная новизна диссертационной работы состоит в следующем.

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

Соответствие паспорту 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 электротехнических 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 электротехнических 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

Внедрение результатов.

Теоретические выводы и практические разработки нашли применение:

- при разработке, оптимизации и создании прототипа энергоэффективного тягового привода электромобиля на базе синхронного двигателя с ферритовыми магнитами по гранту Российского научного фонда (РНФ) № 24-29-00099;
- в процесс проектирования АО «Татэлектромонтаж».

Апробация работы. Основные положения и научные результаты диссертации докладывались и обсуждались на следующих научно-технических конференциях: Международной научной конференции «Тинчуринские чтения», 2022-2023 гг., Международной научно-технической конференции «Пром-Инжиниринг», 11-17 мая 2025 г., XXIX Международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы общества, науки и образования», 20 сентября 2026 г., Всероссийской научно-практической конференции «Современные исследования: актуальные проблемы и перспективы развития», 21 сентября 2026 г.

Публикации. По теме диссертации опубликованы 9 печатных работ в журналах и сборниках, в том числе 2 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 1 статья, индексируемая в международной базе данных SCOPUS, 2 свидетельства на программу для ЭВМ и 4 работы в сборниках материалов конференций.

Личный вклад автора. Основные научные результаты, изложенные в диссертации и сопутствующих публикациях, были достигнуты автором в рамках исследований, проведенных под руководством д.т.н., доцента Сафина Альфреда Робертовича.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 4-х глав, заключения, списка литературы, включающего 101 наименование и 8 приложений. Содержит 149 страниц основного машинописного текста, 61 рисунок и 12 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность исследования, связанная с необходимостью снижения зависимости производства электродвигателей от редкоземельных материалов. Показано, что проблема замены дорогих магнитов на ферритовые без потери характеристик пока не имеет комплексного решения.

Сформулирована цель работы – разработка экспериментального образца СДПМ с комбинированным применением ферритовых и неодимовых магнитов в роторе, отличающегося снижением стоимости магнитной системы при незначительном снижении крутящего момента за счет топологической оптимизации. Для достижения цели поставлены задачи: сравнительный анализ типов электродвигателей и альтернативных материалов, разработка программного комплекса для оптимизации ротора и экспериментальная проверка полученных решений.

Представлены научная новизна и практическая значимость работы, методы исследования. Представлены положения, выносимые на защиту, и обоснована

достоверность результатов. Приведены сведения об апробации и структуре диссертации.

В первой главе проведен анализ современных типов ЭД, в том числе, синхронных и асинхронных машин. Основное внимание уделено конструктивным особенностям СДПМ. Анализ показал, что, несмотря на преимущества, в т.ч. высокой плотности магнитного потока и КПД, достигающего 95 %, такие ЭД обладают рядом существенных недостатков: высокой стоимостью магнитных материалов, зависимостью от поставок редкоземельных элементов, рынок которых, в значительной степени контролируется Китаем.

Проведен анализ эволюции материалов ПМ – от ферритов до AlNiCo к современным редкоземельным сплавам NdFeB и SmCo.

Проанализированы альтернативные решения, в частности, особенности ферритовых магнитов. Ферритовые магниты отличаются низкой стоимостью и коррозионной стойкостью. Однако, ферритовые магниты уступают неодимовым магнитам по остаточной индукции: 0,38-0,42 Тл против 1,2-1,4 Тл. Поэтому замена требует модернизации конструкции ЭД.

Представлен анализ параметрических и топологических методов оптимизации. Параметрическая оптимизация оперирует геометрией в заранее очерченных границах. Ее результат во многом определяется квалификацией разработчика. Как правило, результат не выходит за пределы уже известных конфигураций. Иной подход демонстрирует топологическая оптимизация. Она предоставляет существенно большую степень свободы. В этом случае алгоритм самостоятельно перераспределяет материалы в пределах проектной области – магниты, сталь, воздух.

Для расчета параметров экспериментального СДПМ с комбинацией ферритовых и неодимовых магнитов использование ГА позволило найти глобальный оптимум в рамках заданных ограничений. Алгоритм работает сразу с четырьмя критериями (момент, потери, стоимость, температура). Каждый элемент ротора описывается дискретным значением (0 – сталь, 1-4 – неодимовые магниты, 5-8 – ферритовые магниты, 9 – воздух).

Во второй главе представлен анализ принципов работы СДПМ, их математических моделей и основных характеристик двигателей. Для анализа электромагнитных процессов в СДПМ обычно используют систему координат d и q . Система координат d и q удобна тем, что позволяет описывать потокосцепление по продольной и поперечной осям отдельно.

Момент СДПМ состоит из двух составляющих. Первая составляющая – это взаимодействие потока ПМ с током статора. Вторая составляющая – это реактивная составляющая, которая возникает из-за различия индуктивностей L_d и L_q .

Необратимое размагничивание ПМ под воздействием токов короткого замыкания и внешних полей требует отдельного рассмотрения. Ферритовые магниты более устойчивы к перегреву, чем неодимовые. Однако при низкой температуре (минус 40 °С) у ферритовых магнитов резко падает коэрцитивная сила, и магнит становится уязвимым к размагничиванию.

Потери в СДПМ делятся на четыре группы: электрические, магнитные, механические и дополнительные. При высоких нагрузках преобладают электрические. Снизить их можно за счет увеличения сечения проводника. Дополнительно используют шихтованные сердечники и магнитомягкие материалы с узкой петлей гистерезиса. Однако, единого подхода, который одновременно уменьшал бы все виды потерь, пока нет.

Дальнейший рост эффективности СДПМ связан с переходом от традиционных конструкций к топологически оптимизированным. Такой переход улучшает момент и снижает потери. Это потребует новых методов проектирования (алгоритмы оптимизации и аддитивные технологии). Полного отказа от применения редкоземельных материалов в СДПМ пока добиться не удалось.

В третьей главе рассмотрены конструктивные решения, снижающие зависимость производства СДПМ от редкоземельных материалов. За основу взят серийный двигатель ВМ1424ZXF мощностью 3 кВт с неодимовыми магнитами N42. При частичной замене неодимовых магнитов на ферритовые стоимость магнитной системы СДПМ снижается, а основные характеристики незначительно снижаются.

Среди марок Y30, Y35, 3A лучшим по соотношению цены и характеристикам выбран магнит Y35. Его остаточная индукция 0,4-0,41 Тл, коэрцитивная сила составляет 200-220 кА/м. Этих значений достаточно для двигателей мощностью до 10 кВт. Для ферритов марки Y30 остаточная индукция составляет 0,38-0,40 Тл, а термостойкость ограничена +120 °С. Ферриты марки 3A дороже Y35 на 40-50 %, но прирост характеристик составляет около 5 % - для двигателя 3 кВт, что экономически неоправданно.

Для уменьшения недостатков ферритовых магнитов и повышения характеристик ЭД предлагается конструкция ротора СДПМ с комбинацией ферритовых и неодимовых магнитов. Такая конфигурация решает следующие проблемы:

1. Компенсация низкой остаточной индукции ферритовых магнитов. Ферритовые магниты ограничивают магнитный поток и крутящий момент ЭД. Добавление неодимовых магнитов увеличит общий магнитный поток;

2. Стабилизация работы при нагреве. При нагреве остаточная индукция ферритовых магнитов снижается с температурным коэффициентом минус 0,2 %/°С. У неодимовых магнитов этот коэффициент составляет минус 0,1 %/°С. Поэтому комбинация феррита и неодима уменьшает общий спад потока при высоких температурах по сравнению с чисто ферритовой конструкцией.

3. Снижение массогабаритных показателей. Для достижения характеристик неодимового ротора чисто ферритовая конструкция требует увеличения габаритов ЭД. Введение неодимовых магнитов позволяет сохранить компактность ротора;

4. Расширение диапазона рабочих режимов. Неодимовые магниты обеспечивают поддержание момента на высоких скоростях вращения, где ферритовые магниты теряют эффективность.

Для замены неодимовых магнитов в роторе исходного двигателя разработана методика топологической оптимизации с использованием программного комплекса

Python. Для расчета крутящего момента, температуры и прочности использован программный комплекс COMSOL Multiphysics, а для реализации ГА разработан код на Python. Методика выполнения топологической оптимизации показана на рисунке 1.

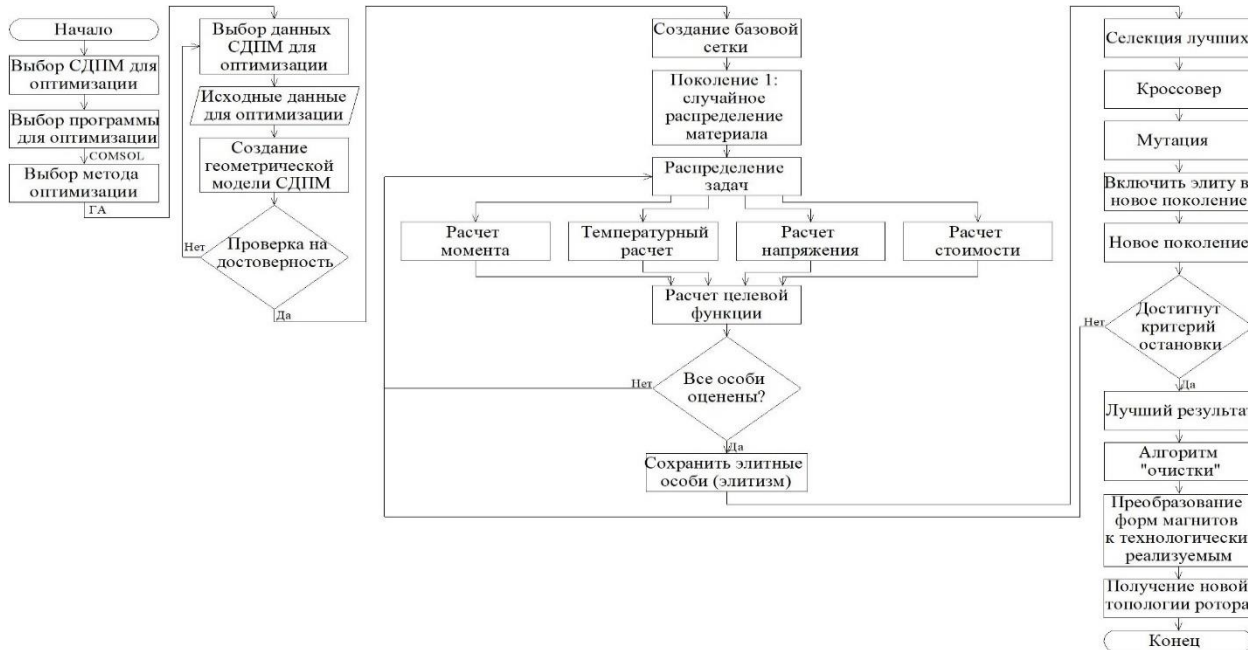


Рисунок 1 – Методика топологической оптимизации

Целевая функция имеет вид

$$F = \alpha \cdot F_1 + \beta \cdot F_2 + \gamma \cdot F_3 - \delta \cdot F_4, \quad (1)$$

где F – целевая функция;

F_1 – нормализация крутящего момента, определяется как

$$F_1 = \frac{F_M - F_{M.min}}{F_{M.max} - F_{M.min}}, \quad (2)$$

где F_M – крутящий момент, Н·м;

$F_{M.min}$ – минимальное значение момента, 1 Н·м;

$F_{M.max}$ – максимальное значение момента, 100 Н·м;

α – весовой коэффициент, равный 0,4, для крутящего момента. Один из главных параметров электродвигателя;

F_2 – нормализация тепловых характеристик, определяется, как

$$F_2 = 1 - \frac{F_T - F_{T.min}}{F_{T.max} - F_{T.min}}, \quad (3)$$

где F_T – температура, °С;

$F_{T.min}$ – минимальное значение температуры, 60 °С;

$F_{T.max}$ – максимальное значение температуры, 120 °С.

Так как мы ищем не максимальную температуру, было принято решение вычесть из 1 значения деления. Также необходимо дополнительно ввести ограничения по максимальной температуре, не более 120 °С;

β – весовой коэффициент, равный 0,1;

F_3 – нормализация прочности, определяется, как

$$F_3 = \frac{F_{\Pi} - F_{\Pi.min}}{F_{\Pi.max} - F_{\Pi.min}}, \quad (4)$$

где F_{Π} – прочность, МПа;

$F_{\Pi.min}$ – минимальное значение прочности, 100 МПа;

$F_{\Pi.max}$ – максимальное значение прочности, 500 МПа;

γ – весовой коэффициент, равный 0,1, для механической прочности;

F_4 – стоимость постоянных магнитов, определяется

$$F_4 = \frac{F_c - F_{c.min}}{F_{c.max} - F_{c.min}}, \quad (5)$$

где F_c – стоимость ПМ, руб., определяется как

$$F_c = M_{\text{неодим}} \cdot C_{\text{неодим}} + M_{\text{феррит}} \cdot C_{\text{феррит}}, \quad (6)$$

где $M_{\text{неодим}}$, $M_{\text{феррит}}$ – вес неодимовых и ферритовых магнитов соответственно;

$C_{\text{неодим}}$, $C_{\text{феррит}}$ – стоимость 1 кг неодимовых и ферритовых магнитов соответственно. $C_{\text{неодим}} = 5000$ руб/кг, $C_{\text{феррит}} = 250$ руб/кг.

$F_{c.min}$ – минимальное значение стоимости, 100 руб.;

$F_{c.max}$ – максимальное значение стоимости, 5000 руб.;

δ – весовой коэффициент, равный 0,4, для стоимости.

Стоимость имеет знак «минус», т.к. необходимо минимизировать стоимость ЭД.

Весовые коэффициенты целевой функции определяются назначением двигателя и требованиями технического задания, а, при необходимости, могут быть уточнены под конкретную задачу. Рассмотрим три основных варианта, встречающихся наиболее часто:

1. Компромиссный вариант. Компромиссный вариант балансирует между крутящим моментом и стоимостью ($\alpha = 0,4$, $\delta = 0,4$). Температура и прочность необходимы только для ограничений ($\beta = 0,1$, $\gamma = 0,1$). Этот вариант подходит для двигателей общепромышленного применения, где важны и момент, и цена.

2. Моментный вариант. Этот вариант отдает приоритет удельной мощности при малых габаритах ($\alpha = 0,6$, $\delta = 0,2$). Коэффициенты температуры и прочности сохраняются на уровне $\beta = 0,1$, $\gamma = 0,1$. Стоимость магнитной системы здесь играет второстепенную роль.

3. Бюджетный вариант. Данный вариант применяется при массовом выпуске, когда не требуются рекордные характеристики ($\delta = 0,6$, $\alpha = 0,2$). Температура и прочность сохраняют коэффициенты ($\beta = 0,1$, $\gamma = 0,1$). Оптимизация в данном случае показывает наиболее дешёвую комбинацию магнитов, допуская контролируемое снижение момента.

Для данного случая был выбран компромиссный вариант, потому что данный вариант имеет решение, которое можно применять в самых разных областях. При изменении требований технического задания весовые коэффициенты могут быть легко скорректированы.

По результатам запуска ГА получена следующая конструкция ротора СДПМ (рисунок 2).

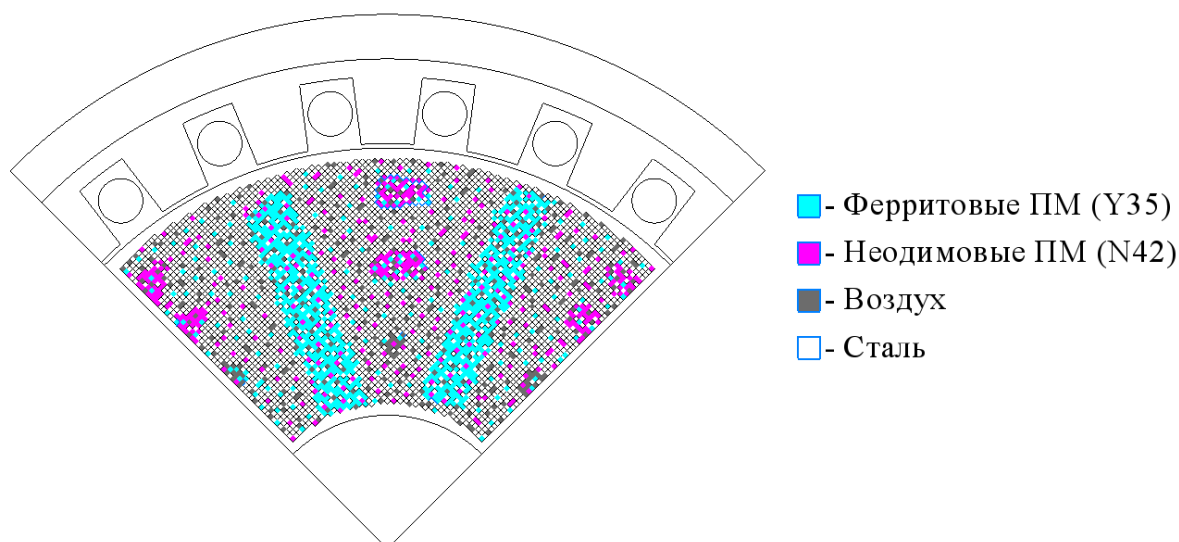


Рисунок 2 – Конструкция ротора СДПМ после оптимизации

Как показано на рисунке 2, распределение материалов в роторе СДПМ неоднородно – в центре магнитов наблюдается вкрапление воздуха или стали. Для коррекции данной проблемы используется алгоритм «очистки», действующий по принципу:

1. Заполнение внутренних полостей. Отверстия размером менее 3 смежных ячеек, окруженные одним материалом (например, воздух внутри магнита), заменяются на материал оболочки.

2. Удаление изолированных включений. Группы из 1-3 ячеек, окруженные чужеродным материалом (например, сталь в воздушной зоне), заменяются на материал окружения.

Итог применения алгоритма «очистки» показан на рисунке 3.

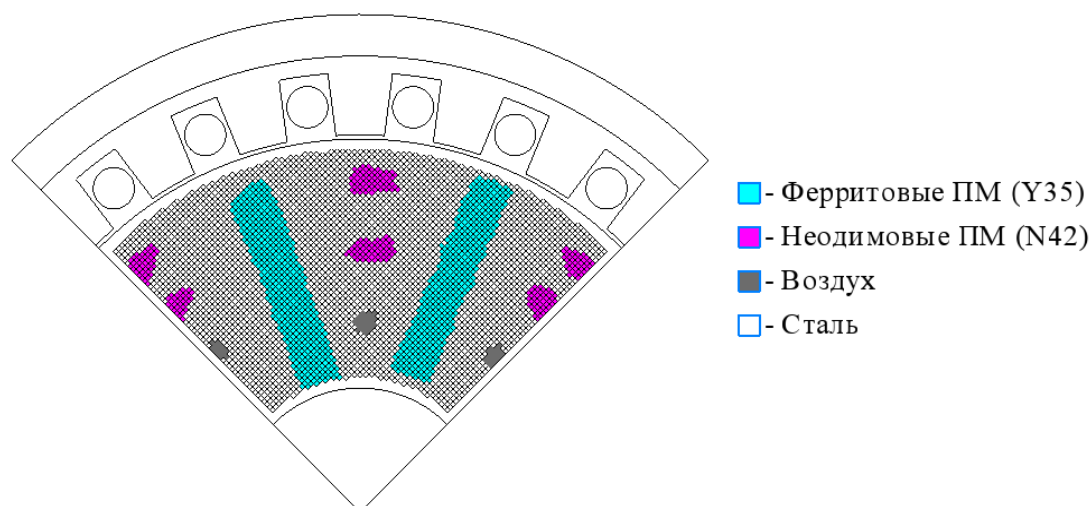


Рисунок 3 – Результаты применения алгоритма «очистки»

Как показывает рисунок 3, ПМ и воздух обладают сложной «облачной» формой, промышленное производство которых затруднено без использования аддитивных методов. Для снижения сложности изготовления необходимо заменить исходную форму на прямоугольную.

По результатам оптимизации и преобразования формы магнитов, пригодных для технологической реализации, размеры неодимовых магнитов составили $7 \times 3 \times 77$ мм (16 шт.), ферритовых $5 \times 20 \times 77$ мм (8 шт.), как показано на рисунке 4.

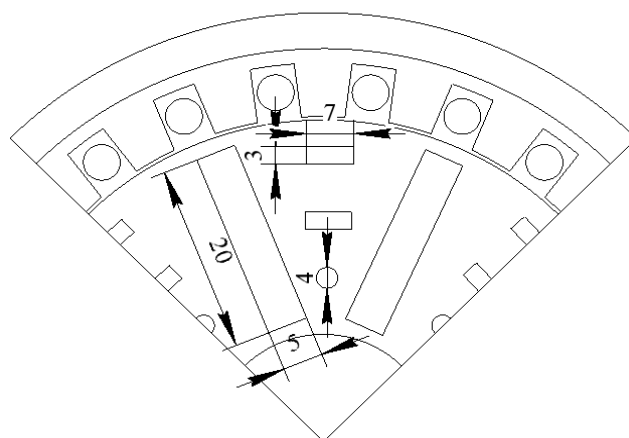


Рисунок 4 – Габаритные размеры ПМ

Результаты оптимизации показывают, что конструкция ротора приняла вид «спиц». Такая конструкция демонстрирует снижение акустического шума на 8-12 дБ по сравнению с традиционными решениями.

Моделирование двигателя выполнено в программном комплексе COMSOL Multiphysics с использованием модуля Rotating Machinery, Magnetic. Построена геометрия ротора и статора, заданы материалы (мягкое железо, феррит Y35, воздух, неодим N42), настроена сетка и решатели для стационарных и переходных процессов.

Распределение магнитного поля в модели ЭД с комбинацией ферритовых и неодимовых магнитов показано на рисунке 5. Распределение магнитного поля в модели ЭД с ферритовыми магнитами представлено на рисунке 6.

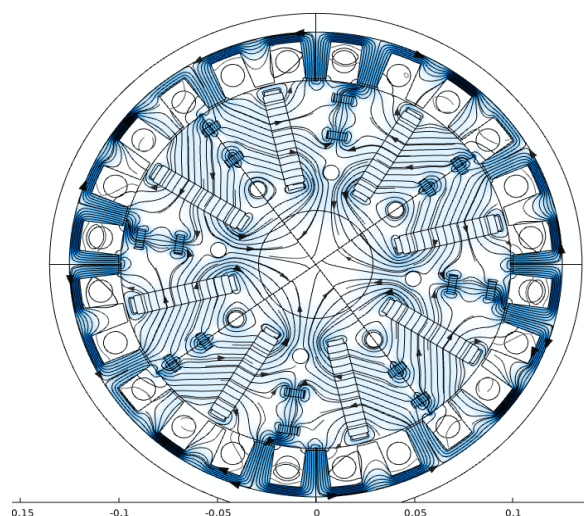


Рисунок 5 – Распределение магнитных полей в экспериментальном СДПМ с комбинацией ферритовых и неодимовых магнитов

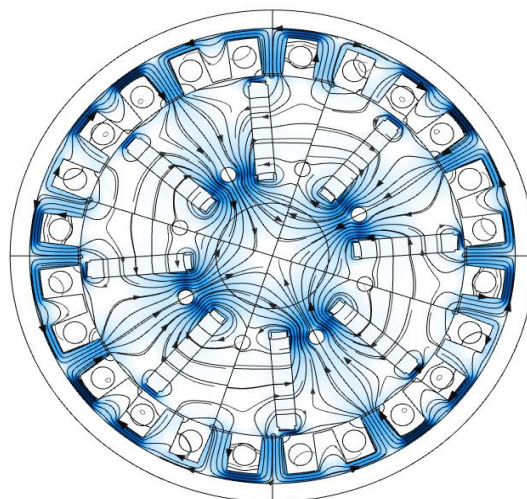


Рисунок 6 – Распределение магнитных полей в модели СДПМ с ферритовыми магнитами

Результаты расчета распределения температуры в экспериментальном СДПМ представлены на рисунке 7. Как видно из расчета, максимальная температура ($57\text{ }^{\circ}\text{C}$) зафиксирована в ферритовых магнитах, что значительно ниже их предельной рабочей температуры ($120\text{ }^{\circ}\text{C}$). Нагрев неодимовых магнитов не превышает $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, электротехнической стали – $55\text{ }^{\circ}\text{C}$. Таким образом, режим разработанной конструкции в номинальном режиме является допустимым и не требует специальных мер охлаждения.

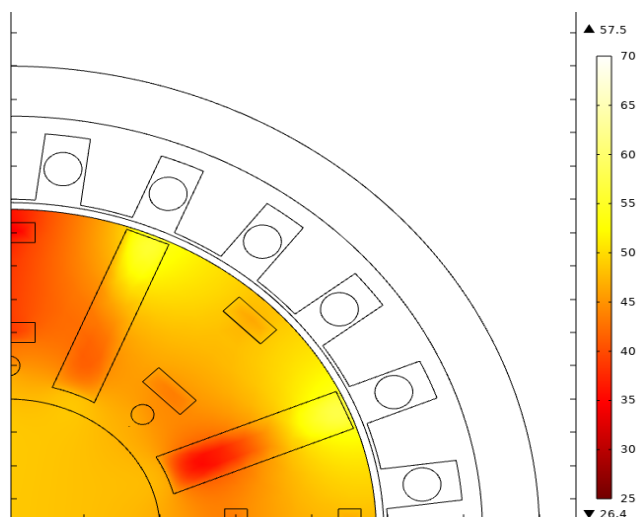


Рисунок 7 – Распределение температуры в экспериментальном СДПМ при номинальном токе 5,6 А

Однако, при этом выявлен риск размагничивания ферритовых магнитов при низких температурах. Для экспериментального СДПМ с комбинацией ферритовых и неодимовых магнитов максимальное значение тока в режиме короткого замыкания составляет 138,9 А.

На рисунке 8 показано начало размагничивания ферритовых ПМ, выделено круговой меткой, в условиях низкой температуры минус 40 °С. Данный процесс начался при токе 27,4 А, что намного меньше тока короткого замыкания 138,9 А.

Критерием необратимого размагничивания ферритовых магнитов является превышение нормированной напряженности магнитного поля $h_{\text{норм}} \geq 1$ (для ферритов Y35 при температуре минус 40 °С коэрцитивная сила составляет 220 кА/м). Моделирование показало наличие областей с $h_{\text{норм}} \geq 1$, в которых феррит размагничивается. По распределению нормированной напряженности можно количественно оценить степень опасности и определить необходимые конструктивные меры (увеличение объемов магнита или изменение геометрии).

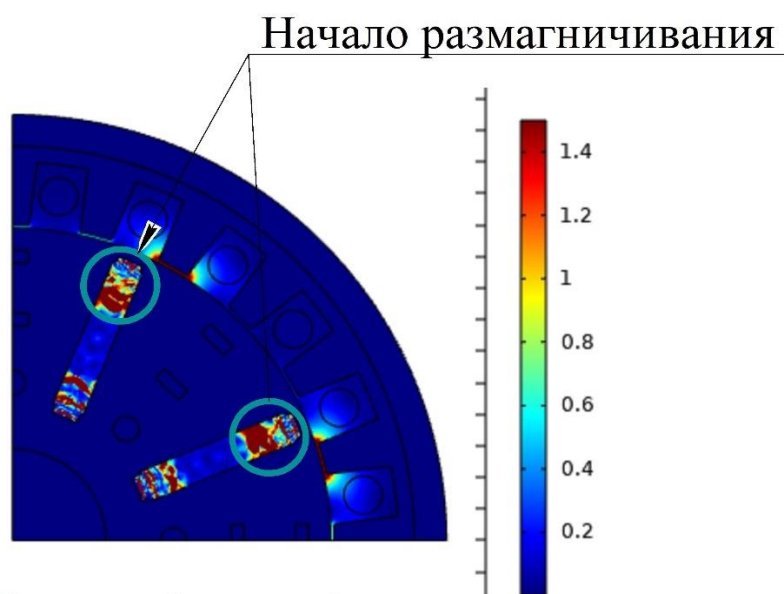


Рисунок 8 – Распределение нормированной напряженности магнитного поля H/H_c в ферритовом магните Y35 при температуре минус 40 °С

В четвертой главе проведено экспериментальное исследование экспериментального СДПМ оценки его работоспособности и сравнение с исходной моделью BM1424ZXF. Основной акцент сделан на замену неодимовых магнитов (NdFeB N42) в роторе на комбинацию из ферритовых магнитов (Y35) и неодимовых магнитов (NdFeB N42), что позволило сократить зависимость от редкоземельных материалов при сохранении эксплуатационных характеристик. При сборке необходимо установить ферритовые ПМ в определенном порядке. Для обеспечения равномерного распределения магнитного поля применено чередование полярности магнитов.

Экспериментальный ротор предусматривает переход на спицевую конструкцию с встроенными ферритовыми магнитами (8 шт.) и неодимовыми магнитами (16 шт.), что увеличило объем магнитной системы на 42 % и массу на 7,3 %. Сборка двигателя выполнена на базе исходного статора, что обеспечило совместимость с существующей системой управления. На рисунке 9 представлен вид собранного экспериментального СДПМ.



Рисунок 9 – СДПМ с экспериментальным ротором

Экспериментальный стенд включает в себя источник постоянного тока (АКБ 48 В), контроллер ZH-3000/36М, рукоятку управления, стационарную часть экспериментального стенда и подвижную часть экспериментального стенда. Стационарная часть экспериментального стенда состоит из: блока питания, соединителя измерительной линии ZET 7001, преобразователя интерфейса ZET 7176, преобразователя интерфейса ZET 7172-М. Подвижная часть экспериментального стенда состоит из: АКБ, соединителя измерительной линии ZET 7001, автономного регистратора ZET 7173, преобразователя интерфейса ZET 7172-S, цифрового датчика ZET 7111, тензорезисторов 2ФКП-350, установленных на валу СДПМ.

Общий вид экспериментального стенда представлен на рисунке 10.

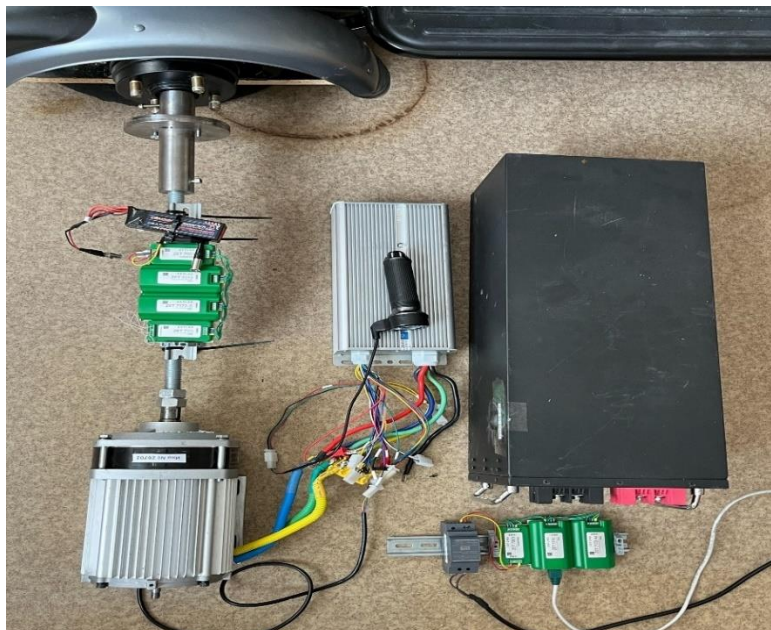


Рисунок 10 – Общий вид экспериментального стенда

Дополнительно к подвижной части стенда подключается нагрузка (вал электроцикла, масса вращающейся части 10 кг).

Результаты испытаний показали, что экспериментальный СДПМ показывает стабильную работу под нагрузкой. Результаты эксперимента приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты проведенных экспериментов

	Исходный СДПМ				Экспериментальный СДПМ			
	М _{ср. кв.} Н·м	М _{макс.} Н·м	ω _{ср. кв.} , об/мин	ω _{макс.} , об/мин	М _{ср. кв.} Н·м	М _{макс.} Н·м	ω _{ср. кв.} , об/мин	ω _{макс.} , об/мин
Опыт №1	2,25	3,38	96,69	99	1,84	2,66	95,57	98
Опыт №2	4,78	6,79	107,3	112	3,86	4,19	107,66	111
Опыт №3	5,35	7,59	125,9	130	4,64	5,62	125,75	130

Результаты эксперимента показывают, что крутящий момент экспериментального СДПМ снизился, в среднем, на 16,91 % по сравнению с исходным СДПМ.

Анализ коэффициента мощности выявил снижение коэффициента мощности на 8,8 % и КПД на 4,47 % (результаты расчета представлены в таблице 2).

Таблица 2 – Результаты расчета коэффициента мощности

	Исходный СДПМ	Экспериментальный СДПМ
Момент (Н·м)	46,23	40,68
Угловая скорость (рад/с)	64,93	64,93
Напряжение (В)	380	380
Ток (А)	5,6	5,6
Коэффициент мощности	0,91	0,83
КПД	89,4	85,4

Компенсация момента за счет увеличения тока статора до 6,6 А позволяет достичь сопоставимых значений момента (47 Н·м) (результаты расчета представлены в таблице 3).

Таблица 3 – Результаты расчета характеристик при повышенном токе

	Исходный СДПМ	Экспериментальный СДПМ
Момент (Н·м)	46,23	47
Угловая скорость (рад/с)	64,93	64,93
Напряжение (В)	380	380
Ток (А)	5,6	6,6
Коэффициент мощности	0,91	0,78
КПД	89,4	82

Замена части неодимовых магнитов на ферритовые позволила снизить стоимость магнитной системы на 54,7 % (с 2310 руб. до 1045,66 руб.) при уменьшении массы неодима на 58 %. Для компенсации снижения момента до уровня исходного (47 Н·м) потребовалось увеличение тока на 17,8 %. Это привело к росту потерь в меди на 38,9 % и снижению КПД на 14,28 %. Расчетный перегрев обмотки составил 83,3 °С, абсолютная температура – 123,3 °С. Это ниже предельно допустимой для класса изоляции F (155 °С). Существующая система охлаждения достаточна.

Расчет потерь представлен в программном комплексе COMSOL Multiphysics. Согласно результатам расчета:

1. Потери в меди при работе в номинальном режиме (ток статора 5,6 А) остались неизменными после модернизации, поскольку сопротивление обмотки и ток не изменились.

Отдельно режим с повышенным током (6,6 А) не рассматривается, так как данный режим не является номинальным и рекомендуется только для кратковременных перегрузок;

2. Потери в стали для экспериментального СДПМ выше, чем для исходного СДПМ.

3. Механические потери в экспериментальном СДПМ возросли, поскольку масса магнитной системы увеличилась на 7,3 %, что приводит к росту потерь на трение в подшипниках и аэродинамических потерь.

Экономическая эффективность предложенного решения оценивается с помощью сравнительного расчёта стоимости магнитной системы для исходной и экспериментальной конструкций ротора СДПМ.

Исходный ротор укомплектован 8 неодимовыми магнитами NdFeB N42 размерами 24×4×77 мм (Ш×В×Г). Экспериментальный ротор содержит 16 неодимовых магнитов NdFeB N42 размерами 7×3×77 мм (Ш×В×Г) и 8 ферритовых магнитов Y35 размерами 5×20×77 мм (Ш×В×Г).

Стоимость магнитов рассчитывается по формуле

$$C_{\text{магн}} = \sum_{i=1}^n (V_i \cdot \rho_i \cdot c_i), \quad (7)$$

где V_i – объем магнитов (м³);

ρ_i – плотность материала (кг/м³);

c_i – удельная стоимость материала (руб/кг).

В расчете использованы следующие справочные данные:

Плотность неодимового магнита (NdFeB N42) – 7500 кг/м³;

Плотность ферритового магнита (Y35) – 4900 кг/м³;

Стоимость неодимового магнита (NdFeB N42) – 5000 руб/кг;

Стоимость ферритового магнита (Y35) – 250 руб/кг.

При сравнении стоимости магнитной системы экспериментального и исходного ЭД получены следующие результаты:

1) Стоимость магнитной системы снизилась на 54,7 %;

2) Общая магнитная масса увеличилась на 7,3 %.

Для оценки эффективности разработанной конструкции выполнено сравнение трех вариантов ротора: с неодимовыми магнитами, с комбинацией

ферритовых и неодимовых магнитов, а также с одними ферритовыми магнитами. Расчеты проводились в программном комплексе COMSOL Multiphysics в номинальном режиме (5,6 А, 620 об/мин). Результаты расчета изменения значений момента для трех конфигураций ротора представлены на рисунке 11.

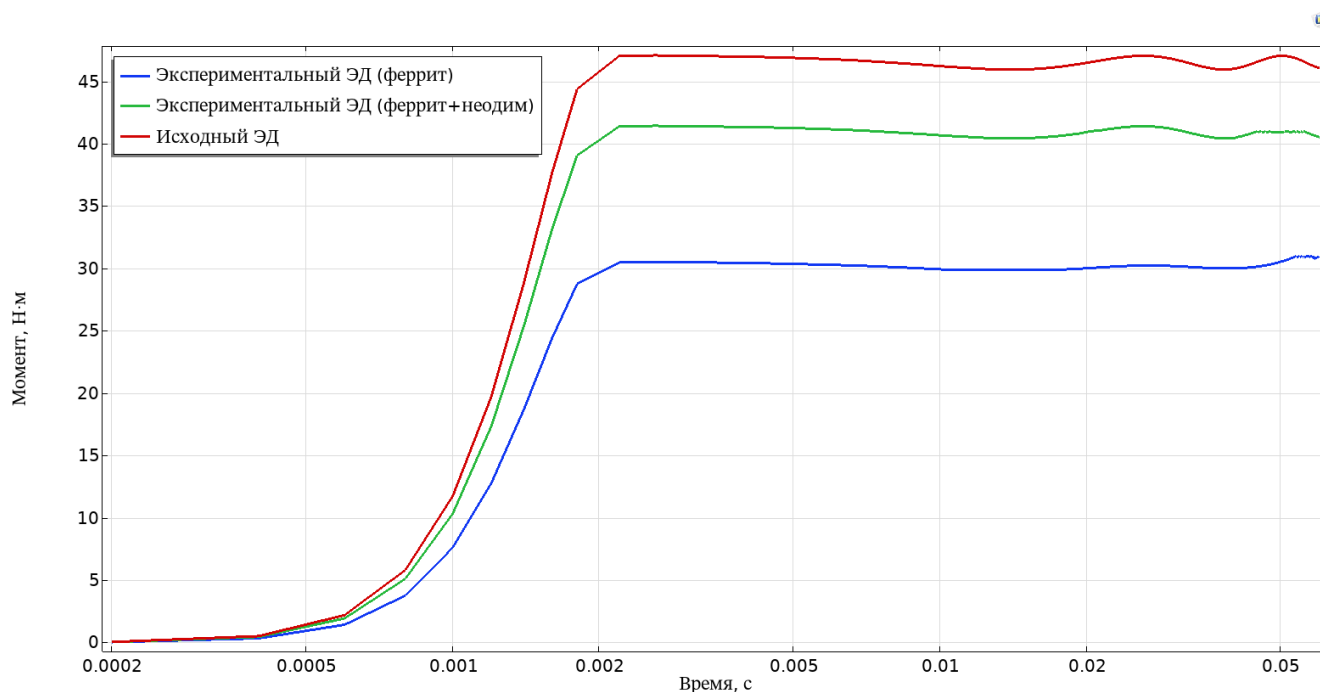


Рисунок 11 – Изменение момента для трех вариантов конфигураций СДПМ

СДПМ с комбинацией ферритовых и неодимовых магнитов обеспечивает момент 40,68 Н·м при снижении массы неодима на 58 %, тогда как при полностью ферритовом получается, соответственно, 30,96 Н·м, что выходит за допустимые пределы. Таким образом, комбинацию ферритовых и неодимовых магнитов СДПМ можно считать оптимальной, т.к. она обеспечивает незначительное снижение момента при существенном уменьшении стоимости магнитной системы.

Для объективной оценки эффективности предложенного гибридного ротора (NdFeB N42 + феррит Y35) выполнено сравнение его характеристик с известным спицевым синхронным двигателем на постоянных магнитах (СДПМ) на ферритах HF085 (пиковая мощность 55 кВт, максимальная скорость 14 000 об/мин). Сравнение проведено по удельным показателям.

Результаты показали:

1. Удельная моментная отдача на килограмм магнитов экспериментального СДПМ в 1,95 раза выше, чем у известного аналога.
2. Стоимость магнитной системы выросла с 665 до 1045,66 руб., но удельный момент увеличился почти вдвое.

3. Более низкие КПД (85,4 %) и коэффициент мощности (0,83) связаны с меньшими абсолютными размерами машины и отсутствием оптимизации обмотки.

Сравнение с известным СДПМ подтверждает, что предложенный СДПМ с комбинацией ферритовых и неодимовых магнитов занимает промежуточное положение между полностью редкоземельным и полностью безредкоземельным

исполнениями. Полученные результаты дают основу для дальнейшей доработки конструкции по КПД и тепловой стойкости.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработан программный комплекс, реализующий методику топологической оптимизации ротора СДПМ на основе ГА с одновременным 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).

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.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК по группе научных специальностей диссертации:

1. 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.

2. 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.

Статьи в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в международных базах данных SCOPUS:

3. Mayorov, A. Performance Evaluation 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.

Публикации в изданиях, включенных в РИНЦ

4. 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.

5. 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.

6. Майоров, А. А. Оптимизация ротора синхронного двигателя при совместном использовании ферритовых и неодимовых магнитов / А. А. Майоров, А. Р. Сафин // Актуальные вопросы общества, науки и образования: сборник статей XXIX Международной научно-практической конференции / под общей редакцией Г. Ю. Гуляева. – Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение». – 2026. – С. 49-52.

7. Майоров, А. А. Модель синхронного двигателя с ферритовыми и неодимовыми магнитами / А. А. Майоров // Современные исследования: актуальные проблемы и перспективы развития: сборник статей Всероссийской научно-практической конференции (21 сентября 2026 г.). – Петрозаводск: МЦНП «НОВАЯ НАУКА», 2026. – С. 142-146.

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ:

8. 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.

9. 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.

Подписано в печать 14.10.2026. Формат 60x84 1/16.

Бумага офсетная. Печать цифровая. Усл. печ. л. 1,25. Тираж 100. Заказ № 1410/2.

Отпечатано с готового оригинал-макета в типографии «Вестфалика» (ИП Колесов В.Н.)
420111, г. Казань, ул. Московская, 22. Тел.: +7(843)292-98-92
e-mail: westfalika@inbox.ru
