

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

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

Диссертация
на соискателя ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель – д.т.н., доцент
Сафин Альфред Робертович

Казань – 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. СИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ: ОБЗОР.....	11
1.1. Существующие виды электродвигателей.....	11
1.2. История разработки электродвигателей с постоянными магнитами	20
1.3. Альтернативы редкоземельным магнитам в конструкции ЭД.....	22
1.4. Методы оптимизации конструкции ротора.....	26
1.5. Задача исследования	36
1.6. Выводы	36
2. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПРОЦЕССЫ, ПАРАМЕТРЫ И ПОТЕРИ В СИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯХ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ.....	38
2.1. Синхронный электродвигатель с постоянными магнитами	38
2.2. Коэффициент мощности.....	41
2.3. Ток короткого замыкания и размагничивание	45
2.4. Потери в синхронных электродвигателях	46
2.5. Выводы	49
3. КОНСТРУКЦИЯ СДПМ	50
3.1. Параметры исходного электродвигателя.....	50
3.2. Выбор магнитов.....	51
3.3. Методика топологической оптимизации ротора с комбинацией ферритовых и редкоземельных магнитов.....	56
3.4. Проектирование экспериментального ротора.....	71
3.5. Размагничивание	76
3.6. Выводы	80

4. СРАВНЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО И ИСХОДНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ	81
4.1. Проверка работоспособности экспериментального электродвигателя	81
4.2. Сборка экспериментального стенда	87
4.3. Проведение эксперимента	97
4.4. Результаты эксперимента	101
4.5. Сравнительный анализ характеристик исходного и экспериментального СДПМ	104
4.6. Потери	107
4.7. Сравнительный анализ стоимости магнитной системы экспериментального и исходного электродвигателя	110
4.8. Сравнение момента, магнитной индукции для трех конфигураций СДПМ	111
4.9. Сравнительный анализ характеристик спроектированного ротора с известным спицевой конструкцией	113
4.10. Выводы	115
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	116
ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ	117
СПИСОК РАБОТ АВТОРА, ОТРАЖАЮЩИХ ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ	118
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	120
ПРИЛОЖЕНИЯ	133
Приложение А. Описание программы для определение геометрических размеров ферритовых магнитов синхронных двигателей с постоянными магнитами с заменой редкоземельных магнитов	133
Приложение Б. Технические характеристики преобразователя интерфейса	138
Приложение В. Технические характеристики автономного регистра	139

Приложение Г. Метрологические характеристики цифрового преобразователя.....	140
Приложение Д. Графики магнитной индукции в воздушном зазоре	142
Приложение Е. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.....	147
Приложение Ж. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.....	148
Приложение И. Акт о практическом использовании результатов диссертации	149

ВВЕДЕНИЕ

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: 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 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

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» (приложение И).

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 наименования и 8 приложений. Содержит 149 страницы основного машинописного текста, 61 рисунка и 12 таблиц.

1. СИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ: ОБЗОР

1.1. Существующие виды электродвигателей

Электрические машины (ЭМ) известны с начала XIX века и широко применяются в промышленности, энергетике и на транспорте. ЭМ представляет собой электротехническое устройство, которое преобразовывает электрическую энергию в механическую при помощи электромагнитной индукции.

К ЭМ относятся ЭД, электрогенераторы, трансформаторы и т.д. Первый ЭД был разработан еще в 1831 году, с тех пор конструкция ЭД дорабатывалась, однако основные принципы остались неизменными.

Существует большое количество разновидностей ЭД, но в общем случае их можно разделить на две группы. К первой группе относится ЭД, работающие на постоянном токе, а ко второй группе относятся ЭД, работающие на переменном токе (рисунок 1.1) [1].

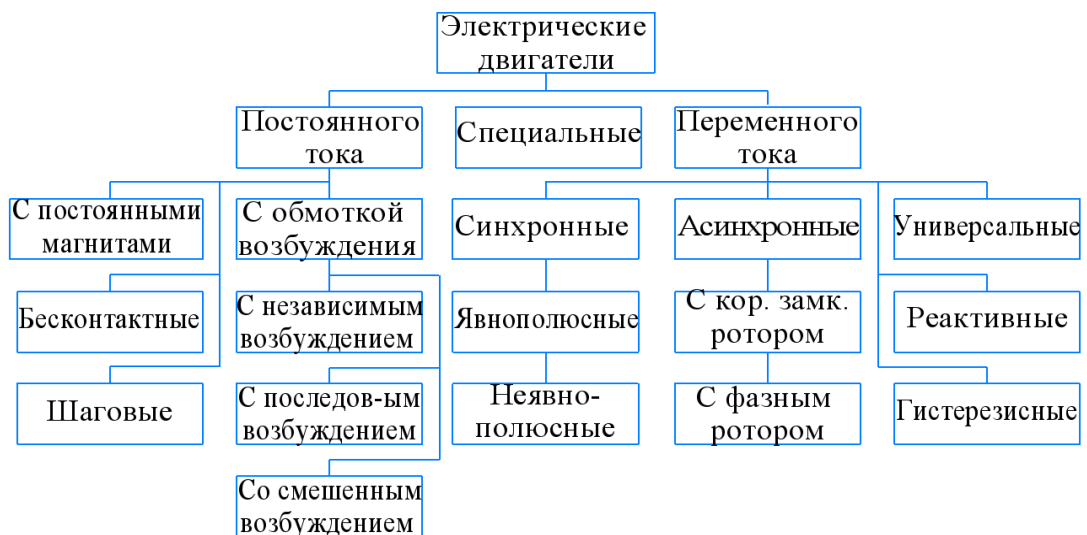


Рисунок 1.1 – Типология электродвигателей

К первой группе ЭД относятся:

Двигатели постоянного тока (ДПТ) питаются постоянным напряжением и делятся на щеточные и бесщеточные. По способу создания вращающегося поля ДПТ делятся на коллекторные и вентильные (бесколлекторные). В вентильном двигателе коммутация фаз обмотки статора выполняется встроенным полупроводниковым инвертором, тогда как в коллекторном исполнении она выполняется механическим щеточно-коллекторным узлом [2, 3]. В современном мире ДПТ востребованы в основном в двух крупных областях: на электротранспорте и в промышленных установках. Конструктивно ДПТ состоит из статора (индуктора), может быть выполнен с обмоткой возбуждения или с постоянными магнитами (ПМ) и ротора (якоря) [4].

К плюсам бесщеточного ДПТ можно отнести:

1. В таких ДПТ трение сведено к минимуму за счет отсутствия щеточного узла.

2. Бесшумность работы.

3. Небольшие электрические потери.

4. Простота регулировки крутящего момента.

К минусам бесщеточного ДПТ можно отнести:

1. Высокая стоимость.

2. Значительная вибрация, возникающая при работе на минимальных скоростях.

Бесщеточные ДПТ находят преимущественное применение в задачах, требующих высоких скоростей вращения, что обусловлено их конструктивными особенностями. В связи с этим бесщеточные ДПТ являются предпочтительным выбором для приводного оборудования в металлургической и иных видах тяжелой промышленности [5].

К плюсам щеточного ДПТ можно отнести:

1. Низкая стоимость по сравнению с бесщеточным.

2. Более простая конструкция по сравнению с бесщеточным.

3. Малый вес и размеры.

К минусам щеточного ДПТ можно отнести:

1. Быстрый износ щеток.
2. Низкая мощность по сравнению с бесщеточным.
3. При работе ДПТ есть вероятность возникновения искрения на щеточно-коллекторном узле.
4. Невысокий КПД (менее 60 %).

Ко второй группе ЭД относятся:

ЭД переменного тока делятся на асинхронные (АД) и синхронные (СД). Наибольшее распространение в промышленности получили АД благодаря конструктивной простоте и низкой себестоимости. АД применяются в электромобилях (Tesla, Mercedes-Benz, Toyota и др.), промышленном оборудовании, бытовой технике и на транспорте [6, 7]. По конструкции ротора АД подразделяются на машины:

1. С фазным ротором.
2. С короткозамкнутым ротором.

Статор АД с фазным и короткозамкнутым ротором выполняется одинаково: в виде шихтованного сердечника из изолированных листов электротехнической стали. Конструктивные различия касаются только ротора. Сердечник ротора любого типа также набирается из штампованных стальных листов [8]. Трехфазную обмотку, уложенную в пазы ротора, соединяют по схеме «звезда». Концы обмотки идут к изолированным контактным кольцам. Через щеточный аппарат к кольцам подключается трехфазный пусковой или регулировочный реостат. Короткозамкнутый ротор вместо обмотки содержит медные или алюминиевые стержни, замкнутые по торцам кольцами (конструкция «беличья клетка») [9].

Принцип действия АД: вращающееся поле статора наводит ток в короткозамкнутой обмотке ротора («беличья клетка»). Этот ток взаимодействует с полем и формирует вращающий момент.

К числу основных преимуществ АД с фазным ротором относятся следующие характеристики:

1. Высокий пусковой момент, обеспечивающий уверенный старт механизма даже под нагрузкой.

2. Повышенная перегрузочная способность, допускающая кратковременные значительные механические перегрузки.

3. Благодаря жесткой механической характеристике частота вращения сохраняется почти неизменной при любых колебаниях нагрузки.

4. Сравнительно низкие значения пусковых токов по сравнению с двигателем с короткозамкнутым ротором, что снижает нагрузку на питающую сеть.

5. Совместимость с системами автоматического управления, позволяющая легко интегрировать электродвигатель в автоматизированные пусковые устройства и технологические процессы.

К недостаткам АД с фазным ротором можно отнести:

1. Большие габариты.
2. КПД и $\cos\phi$ ниже, чем у АД с короткозамкнутым ротором.

К достоинствам АД с короткозамкнутым ротором можно отнести:

1. Скорость вращения стабильна при изменениях нагрузки.
2. Возможность кратковременных механических перегрузок.
3. Простота пуска и легкость его автоматизации.
4. Более высокий $\cos\phi$ и КПД, чем у АД с фазным ротором.
5. Имеет более простую конструкцию, чем другие виды ЭД.

К недостаткам АД с короткозамкнутым ротором можно отнести:

1. Сложности с регулировкой скорости вращения.
2. Большой пусковой ток.
3. Низкий $\cos\phi$ при низких нагрузках.

АД с фазным ротором выбираются, когда требуется снижение пускового тока, увеличение пускового момента или регулировка скорости в малых пределах [10, 11]. В свою очередь, АД с короткозамкнутым ротором служат основным решением для приводов без регулирования скорости.

СД подразделяются на СД с обмоткой возбуждения, с ПМ (СДПМ), реактивные (СРД), гистерезисные (ГД) и шаговые (ШД).

В СД с обмоткой возбуждения поле ротора создается током, который подается через контактные кольца. У СРД нет ни обмотки возбуждения, ни ПМ. В

СРД момент обусловлен разностью магнитных проводимостей по продольной и поперечной осям. Варианты исполнения ротора СРД показаны на рисунке 1.2 [12].

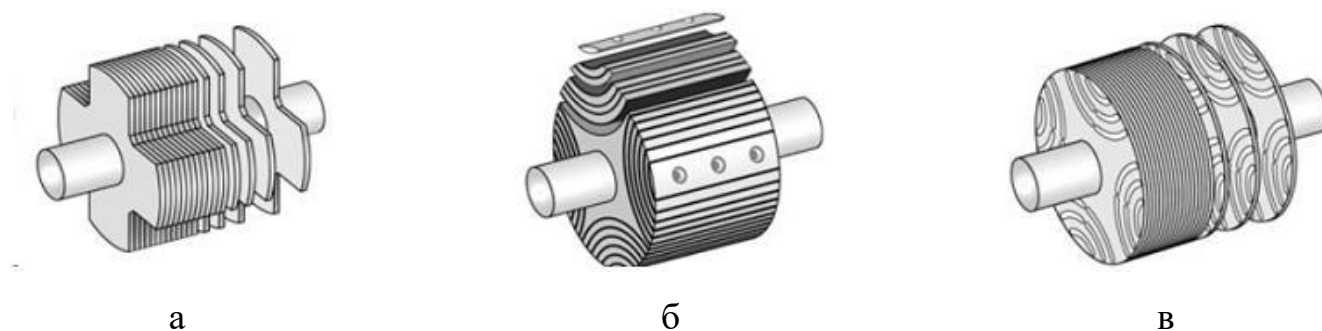


Рисунок 1.2 – Конструкции ротора СРД: а – ротор с явновыраженными полюсами; б – аксиально-расслоенный ротор; в – поперечно-расслоенный ротор

Работа СРД основана на свойстве магнитно-анизотропного ротора по-разному проводить магнитный поток по осям d и q . При угловом рассогласовании между d -осью ротора и полем статора возникает деформация магнитного потока, и ротор, стремясь уменьшить магнитное сопротивление, развивает вращающий момент [13].

К преимуществам СРД следует отнести:

1. Простота и высокая надежность конструкции ротора, который не содержит ПМ и короткозамкнутой обмотки.
2. Низкий нагрев. Вследствие того, что в роторе отсутствуют токи, ротор не нагревается во время работы, что положительно сказывается на сроке службы ЭД.
3. Низкая стоимость, за счет того, что в роторе СРД нет ПМ.
4. Отсутствие в роторе обмотки возбуждения и ПМ обуславливает снижение момента инерции. Это обеспечивает повышенную динамичность привода и сокращение потерь электроэнергии.
5. Регулирование скорости вращения.

К минусам СРД можно отнести:

1. Требуется преобразователь частоты.
2. Низкий коэффициент мощности.

Увеличить коэффициент мощности можно за счет включения ПМ в ротор СРД (СРДПМ). Также применение ПМ в СРД позволяет решить проблему невозможности работы СРД без преобразователя частоты [14]. Ферритовые магниты в СРДПМ дополняют реактивную конструкцию ротора. Это позволяет получить следующие преимущества:

1. Высокий коэффициент мощности.
2. Повышенный КПД.
3. Пониженная обратная ЭДС и меньшие токи КЗ по сравнению с СДПМ [15].

К недостаткам СРДПМ относятся:

1. Повышенная инерционность ротора.
2. Завышенное значение тока на холостом ходу при работе от сети с нерегулируемой амплитудой напряжения.

ШД осуществляет преобразование последовательности управляющих импульсов в дискретные угловые или линейные перемещения исполнительного органа без использования датчиков обратной связи. Конструктивной основой ШД является сердечник с явно выраженными полюсами, а исполнение, как правило, является многофазным, при этом количество фаз варьируется в диапазоне от двух до пяти [16]. По конструкции ротора выделяют следующие типы ШД:

1. Реактивный ШД.
2. ШД с ПМ.
3. Гибридный.

К плюсам ШД можно отнести:

1. Надежность, длительный срок эксплуатации.
2. Небольшая стоимость.

К минусам ШД можно отнести:

1. Невысокий КПД.
2. Шум при работе.
3. Невозможность быстрого ускорения.

ГД выполнен как синхронная машина с неявнополюсным ротором. В качестве источника магнитного поля в нем применяется ротор, выполненный из магнитотвердого материала, характеризующегося значительной величиной остаточной намагниченности. Запуск и вхождение в синхронный режим ГД осуществляется за счет потерь на гистерезис, возникающих в магнитном материале ротора в процессе его перемагничивания [17]. Следовательно, основной рабочий механизм данного двигателя базируется на гистерезисном моменте.

К преимуществам ГД относятся:

1. Простота конструкции.
2. Надежность.
3. Отсутствие пускового приспособления.
4. Практически неизменный ток при пуске и работе.

К недостаткам ГД относятся:

1. Высокая стоимость.
2. Низкий коэффициент мощности.
3. При динамических нагрузках частота вращения становится нестабильной.

Рост применения СДПМ на электротранспорте объясняется ужесточением экологических норм, энергетическими требованиями и нестабильностью поставок сырья. В таких двигателях используются магниты из редкоземельных материалов [18]. К основным элементам СДПМ относятся статор и ротор. На роторе установлены ПМ [19]. Среди распространенных материалов ПМ неодимовые магниты (NdFeB), алюминий-никель-кобальт (AlNiCo) и самарий-кобальт (SmCo) [20].

По конструкции ротор СДПМ делится на:

1. На рисунке 1.3 (а) показан СДПМ с поверхностной установкой ПМ. СДПМ с поверхностным расположением ПМ обладают следующими недостатками: ограниченная способность ослабления поля, ограниченная область постоянной мощности. Также существует вероятность размагничивания ПМ, в основном это

связано с повышением температуры или может быть следствием короткого замыкания [21].

2. СД со встроенными (инкорпорированными) ПМ, представлен на рисунке 1.3 (б). Такая установка ПМ является более защищенной. Такая конструкция СДПМ отличается большей надежностью, высокой плотностью потока в зазоре и способностью долговременно работать при постоянной нагрузке.

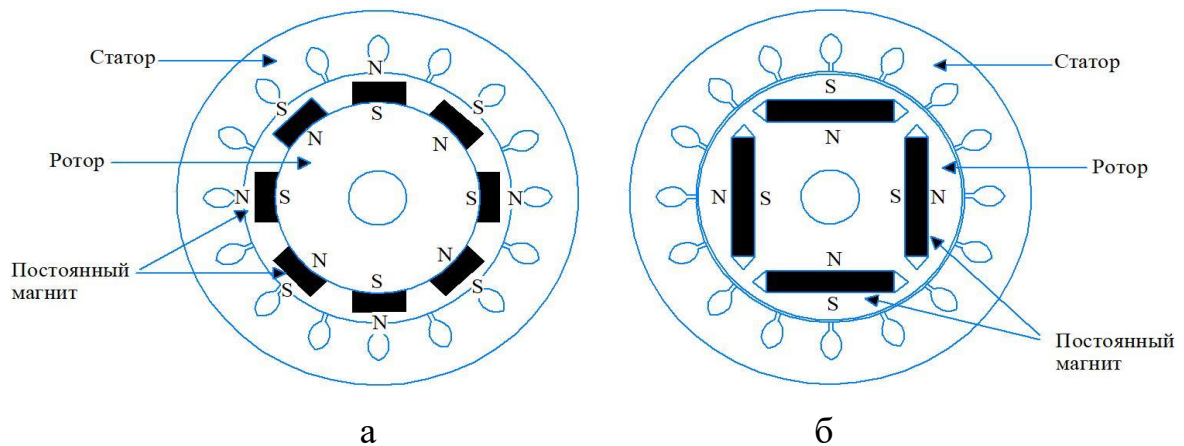


Рисунок 1.3 – Различная конструкция ротора СДПМ: а – ротор СДПМ с поверхностным расположением ПМ; б – ротор СДПМ со встроенными ПМ

По конструкции статора СДПМ различают (представлены на рисунке 1.4):

1. С распределенной обмоткой.
2. С сосредоточенной обмоткой.



Рисунок 1.4 – Конструкция статора СДПМ: а – статор СДПМ с распределенной обмоткой; б – статор СДПМ с сосредоточенной обмоткой

При взаимодействии вращающегося поля статора и поля ротора возникает момент, который разгоняет ротор до синхронной скорости. После чего ротор вращается синхронно с полем [22]. Достоинство синхронной машины заключается в возможности работы с $\cos\varphi=1$, что обеспечивает меньшие габариты и более высокий КПД по сравнению с АД [23, 24]. При перевозбуждении электродвигатель отдает реактивную мощность в сеть, тем самым повышая коэффициент мощности. В режиме невозбуждения электродвигатель потребляет реактивную мощность [25].

К плюсам СДПМ можно отнести:

1. Меньшая чувствительность к колебаниям напряжения по сравнению с АД. У СДПМ момент зависит от напряжения линейно, тогда как у АД эта зависимость квадратичная.

2. Важным преимуществом СДПМ является высокая перегрузочная способность. Кроме того, данный параметр может быть оперативно увеличен путем повышения тока возбуждения, что позволяет эффективно компенсировать резкие кратковременные возрастания нагрузки на валу.

3. СД поддерживает постоянную скорость вращения при изменении нагрузки на валу в пределах своей перегрузочной способности.

К минусам СДПМ можно отнести:

1. Более сложная конструкция, чем у АД.
2. Одним из самых дорогих элементов СДПМ являются редкоземельные ПМ. Поэтому СДПМ оказывается дороже многих других типов ЭД.

Благодаря способности создавать легкие и высокоэффективные ЭД, СДПМ с редкоземельными магнитами стали основным выбором для современных электромобилей [26].

На данный момент Китай является главным поставщиком ПМ из редкоземельных материалов для ЭД. Вследствие того, что нет больше никаких альтернативных поставщиков ПМ из редкоземельных элементов, у производителей ЭД существует риск резкого возрастания цен или уменьшения объемов поставок магнитов [27]. Производители электромобилей активно ищут замену редкоземельным магнитам.

Немецкая компания Mahle разработала конструкцию СРД без использования ПМ. Разработка такого типа ЭД позволяет решить следующие проблемы:

1. Повысить КПД ЭД.
2. Снизить стоимость как самого ЭД, так и его обслуживания.

1.2. История разработки электродвигателей с постоянными магнитами

Первое упоминание о создании СДПМ датируется еще XIX веком. Толчком к разработке таких машин послужила потребность в двигателе с независимым источником магнитного поля, что позволило бы повысить эффективность системы.

Первый генератор (диск Фарадея) был создан Майклом Фарадеем еще в 1831 году, однако данное изобретение не нашло широкого практического применения.

В 1882 году Никола Тесла предложил принцип вращающегося магнитного поля, который стал основой для последующей разработки СД.

Широкое распространение СДПМ получило в XX веке благодаря прогрессу в производстве ПМ [28, 29]. Первоначально применялись магнитотвердые сплавы типа AlNiCo. Уступая по магнитным свойствам редкоземельным материалам (NdFeB, SmCo), AlNiCo, тем не менее, обладает высокой магнитной энергией (рисунок 1.5), термостойкостью (температура Кюри ~ 800 °C), коррозионной стойкостью и низкой стоимостью из-за отсутствия редкоземельных элементов. Главными недостатками AlNiCo являются слабая коэрцитивная сила (рисунок 1.6), склонность к размагничиванию, особенно при низких температурах, и ограниченный срок службы [30].

Вторым поколением стали ферритовые («керамические») магниты. Они несколько превосходят AlNiCo по характеристикам, дешевле всех типов, обладают высокой коррозионной стойкостью и термостойкостью (температурой Кюри ~ 450 °C), однако также подвержены размагничиванию при низких температурах [31].

В конце 1970-х годов появились самарий-кобальтовые магниты (SmCo) — первые редкоземельные магниты. Они обеспечивают значительно более высокую магнитную энергию (рисунок 1.5), отличную коррозионную стойкость и

термостойкость (температура Кюри $\sim 700^\circ\text{C}$). Коэрцитивная сила SmCo ниже, чем у NdFeB (рисунок 1.6). Существенные минусы — хрупкость и высокая цена, обусловленная дороговизной редкоземельных компонентов и сложностью очистки самария. Сегодня SmCo используют только в специальных областях [32].

Сплавы неодим-железо-бор (NdFeB), независимо разработанные в 1983 году, являются самыми мощными среди всех типов ПМ. Они отличаются максимальной удельной магнитной энергией (рисунок 1.5) и высокой коэрцитивной силой, что обеспечивает им преимущества в приложениях с высокоинтенсивными полями и увеличенными воздушными зазорами (томографы, ускорители). Стандартные марки работают до $+80\dots 150^\circ\text{C}$, термостойкие — до $+180\dots 220^\circ\text{C}$ (температура Кюри может повышаться добавкой кобальта, но с удорожанием). Неодимовые магниты подвержены коррозии. Для защиты от коррозии наносят специальный защитный слой (цинк, никель) и изготавливают в бескислородной среде. Большинство марок NdFeB не содержит кобальта и имеет меньше редкоземельных элементов. Благодаря этому неодимовые магниты дешевле чем, SmCo. Это объясняет их широкое применение в современных ЭД [33, 34]. Магнитные свойства (энергия и коэрцитивная сила) рассматриваемых магнитов представлены на рисунках 1.5 и 1.6.

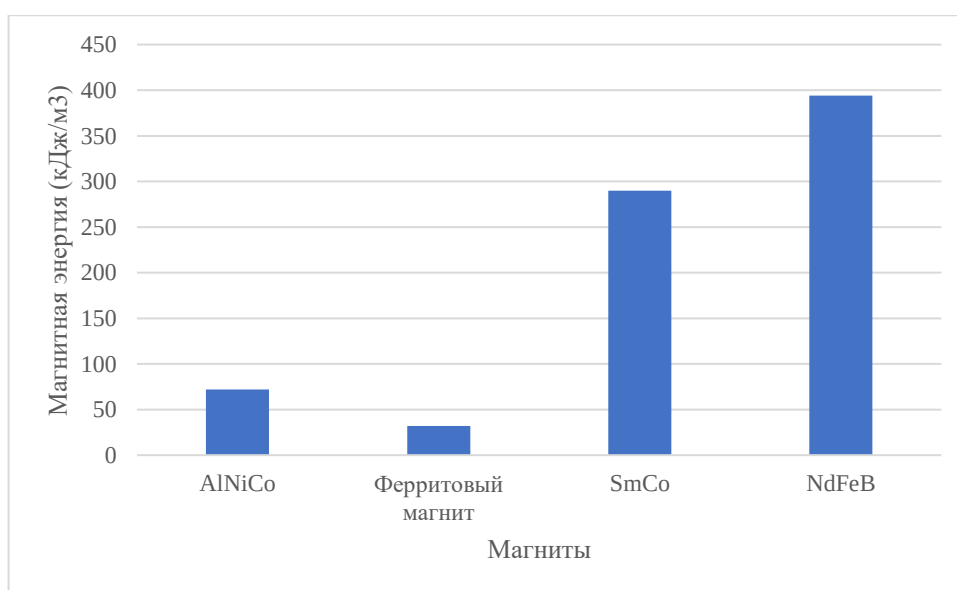


Рисунок 1.5 – Сравнение удельной магнитной энергии ферритового, NdFeB, AlNiCo и SmCo магнитов

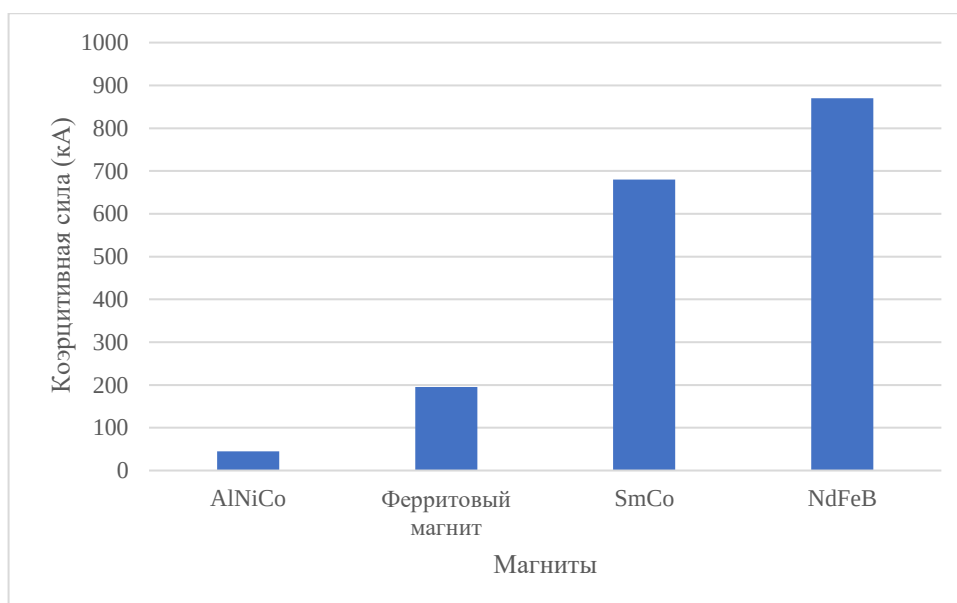


Рисунок 1.6 – Сравнительная диаграмма коэрцитивной силы ферритов, NdFeB, AlNiCo и SmCo

1.3. Альтернативы редкоземельным магнитам в конструкции ЭД

Редкоземельные магниты, такие как неодимовые магниты, сильно повышают КПД ЭД. Но стоимость таких электродвигателей существенно зависит от цен на эти магниты. В 2012 году, когда резко выросли цены на редкоземельные магниты, также резко выросли цены сами ЭД. В современном мире геополитическая нестабильность, риски повторного роста стоимости редкоземельных магнитов вызывают тревогу. Именно поэтому поиск альтернативы редкоземельным магнитам занимает ключевое место.

Для того, чтобы неодимовые магниты (NdFeB) работали при высоких температурах, их покрывают диспрозием [35]. Применение диспрозия увеличивает коэрцитивную силу. Именно это позволило увеличить температуру эксплуатации неодимовых магнитов (NdFeB).

Благодаря высокой плотности магнитного поля неодимовых магнитов габариты ЭД можно уменьшить (при сохранении мощности ЭД). Наглядное представление об эффективности NdFeB дает следующее сравнение: для создания магнитного поля, эквивалентного полю магнита толщиной 3 мм, потребовалась бы

катушка, содержащая 220 витков медного провода при токе 13 А. Однако при реалистичной плотности тока 10 А/мм^2 поперечное сечение такой катушки в 5-6 раз превысит сечение самого магнита, а омические потери в меди составят не менее 50 Вт на каждый метр длины обмотки.

В современных ЭД чаще всего применяются неодимовые магниты (NdFeB). Применение неодимовых магнитов дает высокий КПД и компактность. К минусам неодимовых магнитов можно отнести:

1. Плохая сопротивляемость механическим воздействиям.
2. Недостаточная термостабильность.
3. Снижение магнитных свойств при нагреве.
4. Технологическая сложность изготовления.
5. Постоянное удорожание.

Китай доминирует на рынке поставок редкоземельных магнитов. В 2011-2012 годах угрозы ограничения экспорта вызвали резкий рост цен на редкоземельные магниты. После скачка цены стабилизировались на докризисных значениях. Однако вероятность нового скачка цен на редкоземельные магниты стимулирует многие компании к поиску альтернативных вариантов.

Применение альтернативных материалов взамен редкоземельных магнитов может снизить стоимость ЭД. Замена магнитов невозможна без пересмотра конструкции ЭД [36, 37].

Магнитное поле ротора в СДПМ постоянно и сохраняется при любом режиме работы. Поэтому даже после отключения питания вращающийся ротор наводит в статорных обмотках ЭДС [38], что приводит к следующим проблемам:

1. Высокое напряжение на разомкнутых клеммах.
2. Большие токи при коротком замыкании.

Противо-ЭДС, возникающая в обмотках статора при вращении ротора, возрастает с увеличением скорости в режиме ослабления поля. Достигнув определенного уровня, противо-ЭДС уравнивает приложенное напряжение и ограничивает разгон [39]. Для увеличения скоростного диапазона в статор вводят демпфирующий ток по оси d . Встречно направленный потоку магнитов

демпфирующий ток ослабляет поле в зазоре, позволяя увеличить скорость в 3-5 раз. Плата за это – повышенные потери в обмотках и падение КПД.

Применение редкоземельных магнитов обеспечивает высокий момент и поток в ЭД. Применение альтернатив редкоземельным магнитам позволяет получить следующие преимущества:

1. Снижение себестоимости.
2. Уменьшение экологического следа.
3. Разнообразие поставщиков.

Приведенные выше недостатки применения в ЭД неодимовых магнитов (NdFeB) заставляют рассмотреть альтернативы редкоземельным магнитам. Для снижения зависимости от редкоземельных материалов предлагаются следующие варианты решения:

1. Рециклирование редкоземельных материалов. В этом направлении можно выделить две стратегии:

1.1. Первая – снижение доли редкоземельных элементов в самих магнитах. Существующие исследования показывают, что содержание диспрозия можно уменьшить за счет диффузионного насыщения объемной структуры магнита [40]. В этом случае диспрозий вводят не по всему объему, а локально. Вторым приемом – уменьшение размера зерна (чем мельче зерно, тем выше коэрцитивная сила при том же химическом составе).

1.2. Вторая стратегия – повторное использование уже отработанных магнитов. Переработка редкоземельных магнитов давно применяется в компьютерной промышленности. При этом магнитные свойства материала ухудшаются (из-за окисления и загрязнения примесями). Именно поэтому вторичные магниты пока не могут полностью заменить первичные в ответственных применениях.

Важным аспектом разработки стало создание ЭД, использующих магнитные системы с минимизированным содержанием редкоземельных элементов. В таких двигателях удастся сохранить или даже улучшить характеристики [41]. Наиболее эффективным решением проблемы дефицита редкоземельных материалов стал

переход к гибридным двигателям. В таких двигателях количество магнитов из редкоземельных материалов значительно ниже, чем в классических СДПМ.

2. Прочие магнитные материалы. Разработка магнитных материалов, не содержащих неодим, является предметом интенсивных исследований значительного числа компаний. Среди магнитных материалов, используемых в ЭД, широко применяются неодимовые (NdFeB), самарий-кобальтовые (SmCo) и ферритовые магниты.

В качестве альтернативных типов электродвигателей рассматриваются:

3. АД доминируют в промышленной автоматизации, однако в качестве тяговых приводов используются ограниченно [42]. Исключением является компания Tesla Motor Corporation, внедрившая АД в силовую платформу своих электромобилей. Особенностью двигателя Tesla является применение медного ротора (вместо алюминиевого), что частично снижает потери, однако увеличивает массу, габариты, себестоимость двигателя и усложняет систему управления.

4. Двигатели с фазным ротором востребованы в промышленности (краны, лифты, станки), однако наличие контактно-щеточного узла для питания роторной обмотки снижает надежность и требует обслуживания, что ограничивает их применение.

5. СРД отличаются сравнительно низкой стоимостью, однако обладают рядом существенных недостатков. Для достижения мощности, сопоставимой с СДПМ, требуется увеличение либо габаритов СРД, либо мощности питающего преобразователя, что неизбежно повышает итоговую стоимость.

6. Ферритовые СДПМ дешевле редкоземельных и эффективнее на высоких скоростях, но имеют меньший максимальный момент [43].

Ферритовые магниты обладают значительно меньшей электропроводностью, чем редкоземельные (например, NdFeB), что снижает потери на вихревые токи и повышает стойкость к размагничиванию. Однако остаточная индукция ферритов значительно ниже, чем у редкоземельных материалов. Перспективное направление – разработка ферритовых СДПМ. Необходимо, чтобы такой СДПМ обеспечивал момент, мощность и габариты, сопоставимые с СДПМ с редкоземельными

магнитами. Примером такого двигателя служит СД со спицевой конфигурацией компании Infineon Technologies. В данном СДПМ ферритовые магниты позволили достичь характеристик на уровне АД. Именно поэтому СДПМ с ферритовыми магнитами являются более предпочтительной заменой СДПМ с редкоземельными магнитами, чем АД и СРД [44].

1.4. Методы оптимизации конструкции ротора

Проектирование СДПМ сводится к поиску баланса между энергоэффективностью, мощностью и стоимостью магнитной системы. Обычно оптимизацию проводят на параметризованной геометрии. В таком виде оптимизации форма элементов ограничена заранее заданным набором параметров. Качество параметризации напрямую зависит от опыта разработчика – в этом главный минус. Это вносит субъективный фактор в процесс проектирования [45].

В отличие от параметрических подходов, топологическая оптимизация не ограничивает форму. Именно поэтому топологическая оптимизация расширяет пространство поиска решений [46]. Топологическая оптимизация позволяет оптимально распределить материал и достичь максимума электромагнитных характеристик. К основному преимуществу данного метода относится значительно большая свобода. Форма элементов не задается жесткими ограничениями и может изменяться в пределах проектного пространства.

Проведем сравнение параметрической и топологической оптимизации на примере ротора СДПМ (рисунок 1.7). Рисунок 1.7 (а) иллюстрирует результат параметрической оптимизации. Как видно рисунка, форма ищется в пределах заданных геометрических параметров [47]. При таком подходе оптимальное решение не может выйти за границы этих диапазонов.

На рисунке 1.7 (б) показана проектная область для топологической оптимизации ротора СДПМ. При топологической оптимизации ротор разбивается на множество элементов. Каждому элементу назначается материал (воздух, сталь

или ПМ). Распределения материалов итеративно изменяются с учетом ограничений. Итерации продолжаются до достижения целевых показателей.

На рисунке 1.7 (в) представлен результат топологической оптимизации. Как видно из рисунка ротор имеет нестандартную геометрию магнитов и воздушных полостей. Такое решение недостижимо при параметрическом подходе (рисунок 1.7 (а)). В отличие от параметрической оптимизации, топологическая оптимизация позволяет исследовать проектное пространство без жестких рамок [48]. Применение популяционного алгоритма требует значительно больших вычислительных ресурсов. Топологическая оптимизация позволяет сократить время разработки [49]. К главным недостаткам топологической оптимизации относится получение технически нереализуемых форм. Поэтому приходится преобразовывать полученные формы в технически реализуемые.

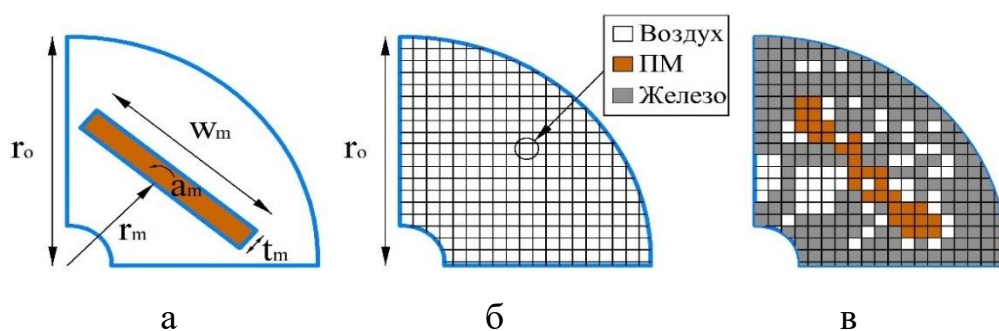


Рисунок 1.7 – Ротор СДПМ: а – результат параметрической оптимизации; б – топологическая оптимизация; в – потенциально оптимальная топология ротора

Развитие аддитивных технологий позволяет изготавливать элементы сложной геометрии. Аддитивные технологии можно применять при производстве деталей, полученных в результате топологической оптимизации. Главный минус аддитивных технологий – дороговизна [50, 51].

Топологическая оптимизация имеет несколько подходов. Наибольшее распространение получили ON-OFF, эволюционная оптимизация (ESO), двунаправленный метод BESO, а также SIMP, Level-Set. Рассмотрим каждый метод более подробно.

Метод ON-OFF. В основе метода ON-OFF – дискретизация расчетной области на конечные элементы. Каждому элементу назначается определенный материал (твердое тело, пустота). Реализация метода ON-OFF с эволюционными алгоритмами относительно несложна.

К недостаткам метода ON-OFF относится получение сложных геометрических форм. Для исключения получения такого результата используют фильтр Габора. Метод и его модификации широко используют при проектировании электромеханических устройств. Размерность задачи в ON-OFF достигает 10000 переменных. Поэтому требуются большие вычислительные ресурсы и затраты времени. Кроме того, без фильтрации результаты будут некорректны.

Метод ESO/BESO эффективен при оптимизации сплошных конструкций. Данный метод наиболее подходит в случаях, когда требуется оптимальное распределение пустот в пределах проектной области. Метод может быть применен к различным задачам различных масштабов (от макро- до микроуровня).

Метод ESO итеративно перераспределяет материал, удаляя или добавляя элементы. Критерием удаления элемента является уровень напряжения. Если уровень напряжений в элементе низок, этот элемент удаляют. Низкое значение напряжения свидетельствует о неэффективном использовании материала. Метод ESO направлен на выравнивание напряжений. На каждой итерации вычисляют отношение эквивалентного напряжения элемента к максимальному. Элементы с отношением ниже порога исключаются. Процесс повторяется, пока такие элементы есть. Затем порог понижают и запускают новый цикл до следующей стабилизации.

В отличие от классического метода ESO, метод BESO позволяет на каждой итерации не только удалять, но и добавлять материал в проектную область. Что позволяет ускорить сходимость и повышает качество оптимизации. При этом сохраняется сравнительная простота реализации.

Особенностью метода BESO является расчет чувствительности для пустых элементов. Чувствительность определяют линейной экстраполяцией поля перемещений, которое определяется методом конечных элементов (МКЭ). На каждом шаге исключаются наименее чувствительные элементы. Пустые элементы

с наибольшей чувствительностью заполняются материалом. Количество удаляемых и добавляемых элементов задается двумя независимыми параметрами. Количество добавляемых элементов регулируется коэффициентом добавления, а количество удаляемых элементов регулируется коэффициентом удаления.

Метод BESO в комбинации с фильтрами эффективно устраняет «шахматный» эффект [52]. Шахматный эффект представляет собой артефакт, который проявляется в виде:

- 1) Численных неустойчивостей.
- 2) Разрывов сплошности.
- 3) Изолированных зон в структуре.

Метод SIMP использует непрерывное поле псевдоплотности как косвенную характеристику распределения материала. Целью оптимизации является минимизация податливости (энергии деформации) при заданных нагрузках, связях и ограничении объема. Для этого материал итеративно перераспределяется в проектной области. Результатом проведения метода SIMP является конструкция, близкая к равнопрочной [53].

Оптимизация начинается с разбиения проектной области на конечные элементы. Для каждого элемента задаются постоянные свойства материала и его относительная плотность. Идеальным результатом является бинарное распределение плотности (0 или 1). Для подавления промежуточных значений вводят штрафной фактор. Зависимость модуля Юнга от плотности определяется следующим образом

$$E(x_i) = E_{min} + (x_i)^p (E_0 - E_{min}), \quad (1.1)$$

где E_0 – модуль упругости материала;

E_{min} – минимальный модуль (для устойчивости решения);

x_i – относительная плотность элемента (проектная переменная);

p – штрафной фактор.

Целевая функция при минимизации податливости конструкции задается как полная энергия деформации. Математическая формулировка задачи топологической оптимизации принимает следующий вид

$$\text{Найти: } X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_j\}^T, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (1.2)$$

$$\text{Минимизировать: } C(X) = F^T U = U^T K U = \sum_{i=1}^n u_i^T k_i u_i = \sum_{i=1}^n (x_i)^p u_i^T k_0 u_i, \quad (1.3)$$

$$\text{При ограничениях: } KU = F, \quad V = f_0 V_0 = \sum_{i=1}^n x_i V_i, \quad (1.4)$$

$$0 < x_{\min} \leq x_i \leq x_{\max} \leq 1, \quad (1.5)$$

где $C(X)$ – целевая функция (податливость конструкции);

X – вектор проектных переменных (относительных плотностей всех элементов);

F – глобальный вектор нагрузок;

U – глобальный вектор перемещений;

K – глобальная матрица жесткости;

k_i – матрица жесткости i -го элемента после интерполяции;

k_0 – матрица жесткости элемента из плотности материала;

u_i – вектор перемещения i -го элемента;

$V(X)$ – объем расчетной области;

f_0 – заданная доля материала от V_0 ;

$x_{\min}$ – ненулевая нижняя граница для проектной переменной, вводимая для предотвращения сингулярности матрицы жесткости.

Недостатком метода SIMP является наличие областей с промежуточной плотностью материала. Поскольку плотность материала в рамках данной модели является непрерывной переменной, это допускает возникновение промежуточных значений, лишенных физического смысла и не подлежащих прямой физической интерпретации. Для решения этой проблемы вводится дополнительная функция для проницаемости

$$u_T = (u_{FE} - u_{air}) p^p + u_{air}, \quad (1.6)$$

где u_{FE} и u_{air} – относительная проницаемость воздуха и электротехнической стали;

p – коэффициент.

Основное ограничение метода SIMP – потребность в прямом доступе к матрице жесткости, получаемой при конечно-элементном анализе. В большинстве коммерческих программ доступ к этой функции отсутствует, что затрудняет

использование метода. Однако отдельные пакеты такую возможность поддерживают.

Метод Level-Set характеризуется неявным заданием границы раздела сред (интерфейса) в виде нулевого уровня некоторой скалярной функции высшего порядка, эволюция которой определяет деформацию данной границы [54].

Область исследования Ω с гладкой границей. Вводится неявная функция уровня $\varphi(x)$, определяющая топологию и удовлетворяющая условиям

$$\varphi(x) \begin{cases} >0, x \in \Omega^+ \text{ (материальная область)} \\ =0, x \in \partial\Omega \text{ (граница раздела)} \\ <0, x \in \Omega^- \text{ (область пустоты)} \end{cases}, \quad (1.7)$$

Формулировка задачи топологической оптимизации конструкции при ограничении на объем материала и минимизации податливости принимает следующий вид

$$\min C_{(\varphi)} = \int_{\Omega} \frac{1}{2} E_{(\varphi)} \varepsilon^T D \varepsilon d\Omega, \quad (1.8)$$

$$\nabla(E_{(\varphi)} \varepsilon) = f, \quad (1.9)$$

$$\int_{\Omega} H_{(\varphi)} d\Omega = V, \quad (1.10)$$

где Ω – область проектирования;

D – тензор упругих постоянных;

V – допустимый объем материала;

E – переменный модуль Юнга, определяемый посредством функции Хэвисайда

$$E_{(\varphi)} = E_0 H_{(\varphi)} + (1 - H_{(\varphi)}) E_{\min}, \quad (1.11)$$

где E_0 – модуль Юнга материала;

$E_{\min}$ – малая положительная константа, обеспечивающая устойчивость расчета в областях, лишенных материала.

Метод Level-Set используется совместно с эволюционными и градиентными методами при решении задач топологической оптимизации электромеханических систем.

ГА – универсальный метод оптимизации, предложенный Джоном Холландом в 1960–70-х годах. Его идея состоит в представлении решения задачи как «особи» в «популяции» возможных решений. Качество особи определяется значением целевой функции (приспособленностью). ГА итеративно улучшает популяцию, применяя операторы, аналогичные природным генетическим механизмам: отбор, скрещивание (кроссовер) и мутацию.

Алгоритм работы ГА может быть описан следующей последовательностью этапов:

1. Инициализация. В начале необходимо задать размеры популяции. На следующем этапе формируется исходная популяция, где каждая особь представлена собственной хромосомой, кодирующей потенциальное решение. Хромосома – это закодированное (чаще всего бинарной строкой) возможное решение задачи.

2. Расчет функции приспособленности. На этом шаге для всех особей популяции определяется величина функции приспособленности, которая непосредственно соответствует целевой функции оптимизации задачи. Таким образом, качество решения находится в прямом соотношении с уровнем значения данной функции.

3. Отбор родителей. На основе полученных значений приспособленности производится выбор пар родителей для скрещивания. Необходимо выбрать наиболее приспособленные особи для скрещивания, для того чтобы в дальнейшем получить наилучшее решение.

4. Скрещивание (кроссовер). Выбранные пары родителей «скрещиваются» для создания одного или двух потомков. Данный оператор является ответственным за исследование пространства поиска и комбинирование полезных решений родителей.

5. Мутация. Суть мутации заключается в случайном изменении хромосом у потомков с малой вероятностью. Задача мутации состоит в том, чтобы не допустить преждевременной сходимости к локальному оптимуму.

6. Создание нового поколения. Созданные потомки формируют новую популяцию, заменяя старую или ее часть. Для сохранения лучших решений используется элитизм. Элитизм гарантирует, что лучшее найденное решение не будет потеряно.

7. Остановка. Процесс повторяет шаги 2-6, генерируя новые поколения. Процесс продолжается, пока не достигнет критерий останова. Остановка происходит по одному из условий: достигнут максимум итераций, решение перестало улучшаться, получено приемлемое значение целевой функции, истекло отведенное время.

ГА обладает существенными преимуществами:

1. Универсальность.
2. Глобальный поиск.
3. Работа со сложными пространствами поиска.
4. Параллелизм.
5. Гибкость.

К минусам ГА можно отнести:

1. Вычислительная сложность.
2. Настройка параметров: эффективность ГА сильно зависит от выбора параметров (размера популяции, типа оператора и т.д.).
3. Преждевременная сходимость. Популяция может сойтись к локальному оптимуму, не найдя глобального, особенно при неудачной настройке или недостаточном разнообразии.

Некоторые программные комплексы имеют встроенные возможности мультифизического анализа метода SIMP и Level-Set. Однако в большинстве программ эти методы имеют ограниченную функциональность, и в большей степени ориентированы на решение задач структурной механики. Таблица 1.1 содержит сравнительную оценку рассмотренных методов.

Таблица 1.1 – Сравнительный анализ методов оптимизации

Критерий сравнения	Метод ON-OFF	Метод BESO	Метод SIMP	Метод Level- Set	Метод ГА
Популярность в инженерных пакетах	Умеренная	Низкая	Высокая	Высокая	Умеренная
Скорость сходимости	Низкая	Высокая	Высокая	Зависит от решателя	Низкая
Наличие в САПР (ANSYS, COMSOL)	Отсутствует	Отсутствует	Присутствует	Присутствует	Присутствует
Основные ограничения	Высокая вычислительная сложность	Требует фильтрации	Появление «серых зон»	Зависимость от начального положения	Медлительная работа при большом числе переменных

Топологическая оптимизация электромагнитных устройств направлена на улучшение электромагнитных параметров и снижение материалоемкости. Это может ухудшить механические свойства, например привести к образованию воздушных полостей. Воздушные полости снижают прочность и жесткость, а также вызывают вибрации и дисбаланс. Необходимо при проведении оптимизации учитывать структурные требования. Это позволит обеспечить механическую надежность и получить оптимальную итоговую конструкцию.

Проектирование роторных узлов ЭД обычно ведется по одному из двух вариантов:

1. Первый вариант – модернизация существующей конструкции в заданных габаритах ротора.
2. Второй вариант – проектирование двигателя с «нуля». В этом случае нет жестких ограничений по габаритам. Но есть обязательное условие достижения требуемых характеристик. В этом случае проектировщик свободен в выборе форм и размеров.

Каждый из рассмотренных подходов требует собственной методики оптимизации. Также требуется использование специализированного ПО для многокритериального анализа. При модернизации существующих конструкций ротора целесообразно применять ГА. Потому что ГА обеспечивает эффективный поиск глобального оптимума при ограничении пространства параметров [55].

При создании принципиально новой конструкции ЭД наиболее эффективным методом является топологическая оптимизация. Данный метод позволяет оптимально расположить ПМ в роторе. Что позволит максимально использовать материал. Однако, как отмечалось ранее, топологическая оптимизация может привести к технически нереализуемым формам ПМ [56].

Программные комплексы ANSYS и COMSOL Multiphysics содержат встроенные библиотеки с методами топологической и параметрической оптимизации [57]. Использование встроенных методов оптимизации сокращает время проектирования ЭД. Это происходит благодаря автоматизированному поиску решений и снижению рутинной нагрузки на проектировщика.

1.5. Задача исследования

Редкоземельные материалы, в частности неодим-железо-бор (NdFeB), широко используются в ЭД благодаря высокой плотности крутящего момента и КПД. Применение редкоземельных магнитов позволяет создавать компактный, энергоэффективный ЭД.

Высокая стоимость и ограниченные запасы редкоземельных элементов делают их использование в ЭД проблематичным.

Однако даже при смягчении сырьевых ограничений разработка безредкоземельных ЭД остается актуальной. Некоторые производители электромобилей уже применяют такие решения. В перспективе СРД и СДПМ с ферритовыми магнитами могут занять ведущие позиции.

Рост цен на редкоземельные магниты, нестабильность их поставок делают проблему все более актуальной. Возникает необходимость в разработке ЭД без редкоземельных материалов. Такие ЭД не должны уступать по характеристикам ЭД с редкоземельными материалами. Наибольший интерес такие решения представляют для электротранспорта.

1.6. Выводы

1. СДПМ наиболее подходят для электротранспорта. СДПМ обеспечивают высокую плотность момента, хороший КПД и перегрузочную способность. Недостаток СДПМ – высокая стоимость. Высокая стоимость обусловлена применением редкоземельных магнитов. АД и СРД дешевле. Такие двигатели уступают СДПМ по удельным показателям и эффективности в широком диапазоне скоростей.

2. Неодимовые магниты превосходят ферритовые по остаточной индукции, коэрцитивной силе, максимальной энергии. Однако у них есть и слабые стороны: склонность к коррозии, ограниченная термостабильность, высокая стоимость, зависимость от международных поставок. Ферритовые магниты значительно

дешевле, устойчивы к коррозии, характеризуются низкими потерями на вихревые токи. Но остаточная индукция ферритовых магнитов ниже, чем у неодимовых. Именно поэтому замена неодимовых магнитов на ферритовые в существующих конструкциях требует изменения геометрии ротора и магнитной системы.

3. Параметрическая оптимизация работает только в заранее очерченных границах. Форма ротора при этом задается набором геометрических параметров, и результат зависит от опыта проектировщика. Топологическая оптимизация лишена этого ограничения. При топологической оптимизации зачастую дает технически нереализуемые формы. Для их реализации необходимо применять аддитивные технологии. Стоимость которых очень велика.

4. Наиболее реалистичная замена неодима в СДПМ – ферритовые магниты. Однако полный переход на ферритовые магниты без потери характеристик двигателя не удастся. Совместное использование ферритовых и неодимовых магнитов позволит снизить долю редкоземельных магнитов при сохранении характеристик двигателя. Но для этого нужен перерасчет геометрии ротора. Именно поэтому возникает необходимость в методике проектирования СДПМ с комбинацией ферритовых и неодимовых магнитов. Данная методика позволит найти баланс между стоимостью, моментом, температурой и прочностью.

5. Разработка ЭД без редкоземельных магнитов или с их минимальным содержанием – актуальной задачей. Это особенно важно для электротранспорта, где критичны момент, КПД, стоимость магнитной системы.

2. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПРОЦЕССЫ, ПАРАМЕТРЫ И ПОТЕРИ В СИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯХ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

2.1. Синхронный электродвигатель с постоянными магнитами

Исследование электромагнитных процессов в СДПМ преимущественно осуществляется в системе координат d - q . Ключевое преимущество данной системы заключается в том, что данная система является неподвижной системой осей [58]. Ось d ротора по определению совпадает с осью d статора (рисунок 2.1).

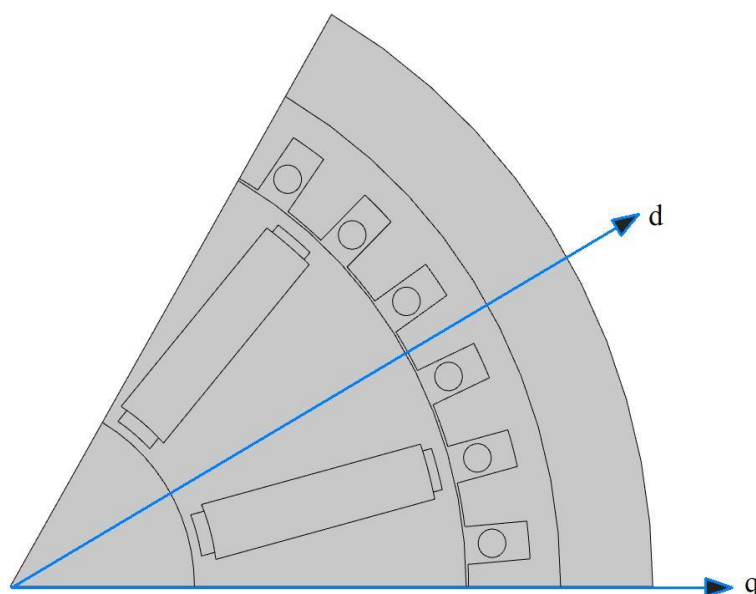


Рисунок 2.1 – Оси d и q СДПМ

Такие величины, как ток, напряжение, потокосцепление и т.д., могут быть преобразованы в систему альфа – бета, а затем преобразованы в систему d и q . Для этого необходима матрица преобразования между системой a, b, c и системой d, q

$$T_{dq,abc} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(p\theta_r) & \cos(p\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos(p\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(p\theta_r) & -\sin(p\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(p\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix}, \quad (2.1)$$

где θ_r – угол ротора;

p – число полюсов.

В этом случае проекции тока на оси d и q определяются следующим образом

$$i_{dq0} = T_{qd,abc} \cdot i_{abc}, \quad (2.2)$$

$$i_{dq0} = [i_d i_q i_0]^T, \quad (2.3)$$

Напряжения по осям d и q определяются как

$$v_{dq0} = T_{qd,abc} \cdot v_{abc}, \quad (2.4)$$

$$v_{dq0} = [v_d v_q v_0]^T, \quad (2.5)$$

Система уравнений напряжений для фаз машины имеет следующий вид

$$v_{abc} = R_s \cdot i_{abc} + \frac{d\Psi_{abc}}{dt} = R_s \cdot i_{abc} + \frac{d}{dt} (\Psi_{abc,PM} + L_{abc} \cdot i_{abc}), \quad (2.6)$$

где $v_{abc} = [v_{a,n} v_{b,n} v_{c,n}]^T$, $u_{a,n}$, $u_{b,n}$ и $u_{c,n}$ – фазное напряжение в А, В, С соответственно;

R_s – сопротивление статора;

$\Psi_{abc,PM}$ – потокосцепление ПМ в фазах А, В, С;

L_{abc} – матрица индуктивности.

После преобразования уравнения (2.6) из системы abc в dq , получим

$$v_{dq0} = R_s i_{dq0} + T_{dq0,abc} \frac{d}{dt} (\Psi_{abc,PM} + L_{abc} T_{dq,abc}^{-1} i_{dq0}), \quad (2.7)$$

После упрощения уравнение (2.7) примет следующий вид

$$u_d = R_s i_d + \frac{d\Psi_d}{dt} - \omega \Psi_q, \quad (2.8)$$

$$u_q = R_s i_q + \frac{d\Psi_q}{dt} - \omega \Psi_d, \quad (2.9)$$

где $\Psi_d = \Psi_{1,PM} + L_d i_d$, $\Psi_q = L_q i_q$, $\Psi_{1,PM}$ – пиковое значение потокосцепления ПМ.

Эквивалентная схема, соответствующая уравнениям (2.8, 2.9) представлена на рисунке 2.2 [59].

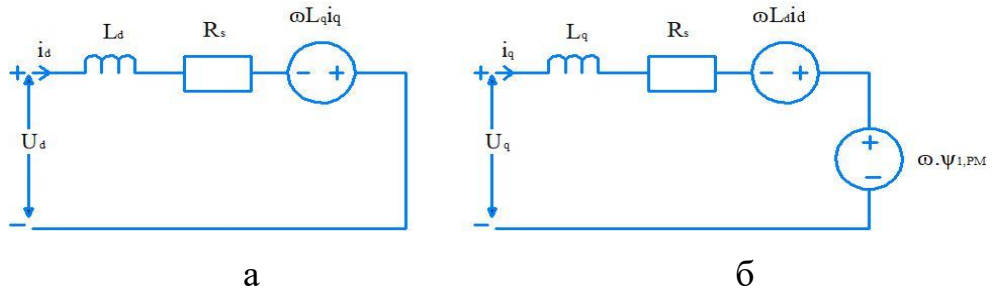


Рисунок 2.2 – Эквивалентная схема по оси q и d СДПМ: а – эквивалентная схема по оси d ; б – эквивалентная схема по оси q

ЭД питается от инвертора трехфазным напряжением. Ограничения напряжения и тока от инвертора можно представить следующим образом

$$\sqrt{u_d^2 + u_q^2} \leq \frac{u_{dc}}{\sqrt{3}}, \quad (2.10)$$

$$\sqrt{i_d^2 + i_q^2} \leq i_{max}, \quad (2.11)$$

где u_{dc} – максимальное постоянное напряжение от аккумуляторов;

$\frac{u_{dc}}{\sqrt{3}}$ – максимальное пиковое фазное напряжение;

i_{max} – максимальный ток от инвертора.

Подставив формулу (2.10) в формулу (2.9), получим

$$\frac{(i_d - i_{d0})^2}{a^2} + \frac{i_q^2}{b^2} = 1, \quad (2.12)$$

$$a = \frac{u_{max}}{\omega_r L_d}, \quad (2.13)$$

$$b = \frac{u_{max}}{\omega_r L_q}, \quad (2.14)$$

$$i_{d0} = -\frac{\Psi_{PM}}{L_d}, \quad (2.15)$$

где a – большая полуось;

b – малая полуось;

i_{d0} – центр эллипса.

Электромагнитный момент СДПМ складывается из двух составляющих: момента, создаваемого ПМ, и реактивного момента (момента от магнитного сопротивления) [60]. Крутящий момент можно записать в виде:

$$T_e = \frac{3p}{4} (\Psi_{PM} i_q + (L_d - L_q) i_d i_q), \quad (2.16)$$

Первая часть уравнения (2.16) – это крутящий момент ПМ, а вторая часть – это магнитное сопротивление. Крутящий момент ПМ пропорционален току q -оси и магнитному потоку, что обуславливает прямую зависимость момента двигателя от величины потокосцепления ПМ. Как видно из эквивалентных схем, магнитное сопротивление вдоль оси d высокое из-за наличия барьеров, в то время как индуктивность вдоль оси q низкая.

Разложим вектор тока по осям d и q , тогда

$$i_d = i_{max} \cos \theta_{dq}, \quad (2.17)$$

$$i_q = i_{max} \sin \theta_{dq}, \quad (2.18)$$

где θ_{dq} – текущий угол.

Подставив выражение (2.17, 2.18) в уравнение (2.16), получим

$$T_e = \frac{3p}{4} [\Psi_{PM} i_{max} \sin \theta_{dq} + (L_d - L_q) i_{max}^2 \sin \theta_{dq} \cos \theta_{dq}], \quad (2.19)$$

2.2. Коэффициент мощности

На основе формулы (2.15) можно построить векторную диаграмму. На рисунке 2.3 представлена рассматриваемая диаграмма с обозначениями: β_s – угол крутящего момента, Ψ_s – вектор потокосцепления, i_s – вектор тока, u_s – вектор напряжения, δ_s – угол нагрузки, γ_s – угол тока, ϕ_s – угол коэффициента мощности между векторами тока и напряжения [61].

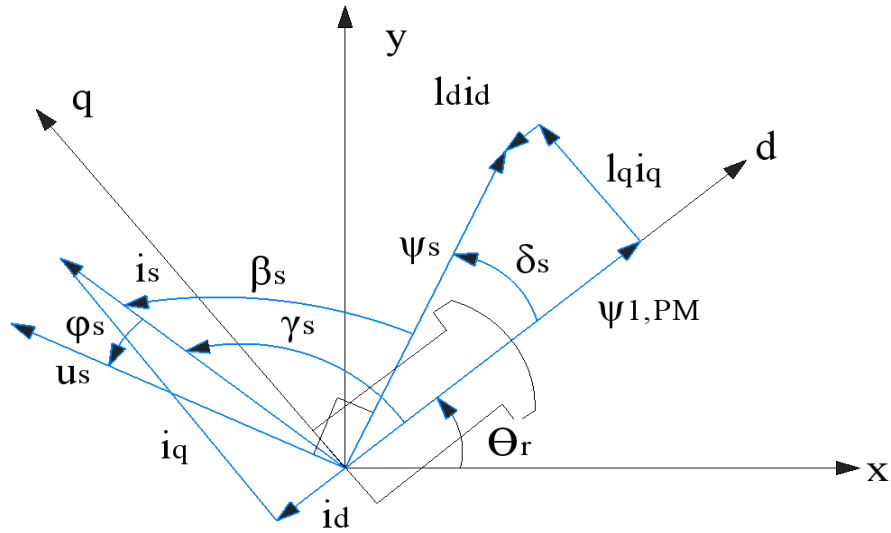


Рисунок 2.3 – Векторная диаграмма

На рисунке 2.3 показано, как изменяется коэффициент мощности с увеличением потокоцепления ПМ. Из этого следует, что

$$\frac{\pi}{2} + \delta_s = \gamma_s + \varphi_s, \quad (2.20)$$

$$\gamma_s = \beta_s + \delta_s, \quad (2.21)$$

Используя формулу (2.20), коэффициент мощности можно представить как

$$PF = \cos \varphi_s, \quad (2.22)$$

$$\varphi_s = \frac{\pi}{2} + \delta_s - \gamma_s, \quad (2.23)$$

$$PF = \cos \left(\frac{\pi}{2} + \delta_s - \gamma_s \right), \quad (2.24)$$

$$\tan \left(\frac{\pi}{2} + \delta_s - \gamma_s \right) = -\cot (\gamma_s - \delta_s), \quad (2.25)$$

Тогда можно записать

$$\cot(\gamma_s - \delta_s) = \frac{\cot \gamma_s \cot \delta_s + 1}{\cot \delta_s - \cot \gamma_s}, \quad (2.26)$$

где $\cot \gamma_s = \frac{i_d}{i_q}$ и $\cot \delta_s = \frac{\Psi_{1,PM} + L_d i_d}{L_q i_q}$.

Подставив значение $\frac{\pi}{2} + \delta_s - \gamma_s$, получим уравнение коэффициента мощности

$$PF = \sin \left(\arctan \left(\frac{-\Psi_{1,PM} i_q + (L_q - L_d) i_d i_q}{\Psi_{1,PM} i_d + L_d i_d^2 + L_q i_q^2} \right) \right), \quad (2.27)$$

Характеристики магнитов.

Каждый ПМ состоит из магнитных доменов, как показано на рисунке 2.4 [62].

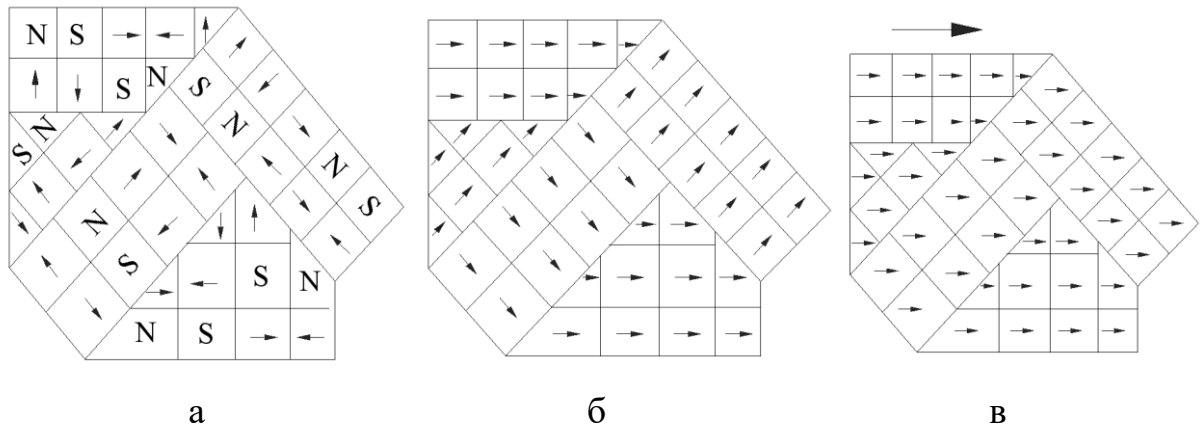


Рисунок 2.4 – Этапы намагничивания ПМ: а – ненамагниченный; б – частично намагниченное состояние; в – намагниченное состояние

На рисунке 2.4 (а) домены расположены случайным образом, так что их магнитные поля нейтрализуют друг друга. На рисунке 2.4 (б) при воздействии внешнего магнитного поля некоторые домены выравниваются по направлению поля, в то время как другие сохраняют случайную ориентацию [63]. Как демонстрирует рисунок 2.4, под воздействием мощного внешнего магнитного поля происходит упорядочивание всех доменов, что приводит материал в состояние магнитного насыщения. Магнитная индукция определяется:

$$\beta = \mu_0 \mu_r H, \quad (2.28)$$

где μ_0 – магнитная проницаемость свободного пространства;

μ_r – относительная магнитная проницаемость;

H – напряженность магнитного поля.

Благодаря широкой петле гистерезиса и высокой коэрцитивной силе H_c магнитотвердые материалы обеспечивают высокую остаточную индукцию. На практике наиболее важен участок нисходящей ветви петли (именно на нем фиксируются рабочие точки B_r и H_c). Участок от остаточной индукции B_r до коэрцитивной силы H_c называется кривой размагничивания, которая представлена на рисунке 2.5.

$$p = \frac{\Delta B}{\Delta H}, \quad (2.29)$$

2.3. Ток короткого замыкания и размагничивание

Воздействие короткого замыкания на ПМ СД приводит к их необратимому размагничиванию. Отдельные участки ПМ размагничиваются, если напряженность размагничивающего поля превышает коэрцитивную силу материала [65, 66]. Ток короткого замыкания находят расчетным путем. Для этого в формулах (2.8, 2.9) необходимо приравнять напряжение v_d и v_q к нулю таким образом, получим

$$R_s i_d + \frac{d\Psi_d}{dt} - \omega \Psi_q = 0, \quad (2.30)$$

$$R_s i_q + \frac{d\Psi_q}{dt} - \omega \Psi_d = 0, \quad (2.31)$$

В установившемся режиме производные потокосцеплений по времени равны нулю. Значения токов короткого замыкания в установившемся режиме равны

$$i_d = -\frac{\omega^2 \Psi_{1,PM} L_q}{R_s^2 + \omega^2 L_d L_q}, \quad (2.32)$$

$$i_q = -\frac{\omega \Psi_{1,PM} R_s}{R_s^2 + \omega^2 L_d L_q}, \quad (2.33)$$

Для расчета переходного тока короткого замыкания потокосцепление ПМ, индуктивность по оси d и индуктивность по оси q принимаются постоянными. Подставляя потокосцепление по осям d и q в формулы (2.30, 2.31), получаем

$$L_d \frac{di_d}{dt} = -R_s i_d + \omega L_q i_q, \quad (2.34)$$

$$L_q \frac{di_q}{dt} = -R_s i_q - \omega L_d i_d + \omega \Psi_{1,PM}, \quad (2.35)$$

На размагничивание магнитов в основном влияет ток по оси d , поскольку магниты намагничены по оси d , а отрицательный ток i_d создает магнитное поле, направленное против их намагниченности [67]. На рисунке 2.6 показано, как вектор плотности магнитного потока меняет свое направление в зависимости от напряженности внешнего магнитного поля. Ориентация результирующего вектора плотности магнитного потока в условиях отсутствия внешнего поля обозначена красной стрелкой.

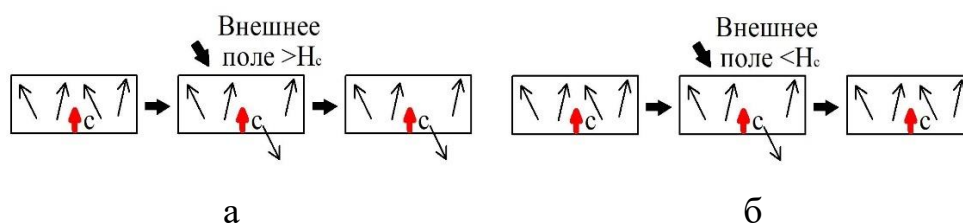


Рисунок 2.6 – Вектор плотности магнитного потока: а – воздействие размагничивающего поля $H_{в} > H_{с}$; б – воздействие размагничивающего поля $H_{в} < H_{с}$

На рисунке 2.6 стрелками показана ориентация магнитных моментов (намагниченности) доменов. Красная стрелка соответствует начальному направлению вектора плотности магнитного потока при отсутствии внешнего поля. На рисунках 2.6 (а) и (б) показаны состояния магнита после первоначального насыщения. Затем на рисунке 2.6 (а) показано приложение размагничивающего поля $H_{в} > H_{с}$, в то время как на рисунке 2.6 (б) показано размагничивающее поле $H_{в} < H_{с}$.

На рисунке 2.6 (а) приложенное внешнее поле достаточно велико, чтобы вызвать необратимое вращение некоторых областей, в то время как на рисунке 2.6 (б) этого не происходит [68]. Положительный температурный коэффициент коэрцитивной силы ферритов означает, что с ростом температуры их размагничивание усложняется. Для неодимовых магнитов этот коэффициент отрицательный. При нагреве у неодимовых магнитов коэрцитивная сила снижается [69].

2.4. Потери в синхронных электродвигателях

Основными потерями в СД являются электрические, магнитные, механические, дополнительные потери, включая нагрев ПМ и потери на перемагничивание. Электрические потери вызваны нагревом обмотки статора из-за протекающего по ней тока [70].

Гистерезис и вихревые токи – основные источники магнитных потерь. Для снижения вихревых потерь ротор СД выполняют шихтованным (собирают из тонких листов стали).

Механические потери возникают из-за трения в подшипниках, поддерживающих ротор, а также из-за сопротивления воздуха при вращении ротора и вентилятора [71].

К дополнительным потерям можно отнести:

1. Потери на вихревые токи. При переменном магнитном поле на высоких частотах в ПМ возникают вихревые токи. Они нагревают магнит и снижают его характеристики.

2. Потери на скин-эффект. На высоких частотах ток в обмотках статора вытесняется к поверхности проводника, из-за этого расчет активное сопротивление.

3. Потери на пульсацию поля. Они возникают из-за неравномерности магнитного поля, связанной с конструкцией двигателя.

ПМ могут нагреваться из-за вихревых токов и других факторов, что может привести к частичной потере магнитных свойств (размагничиванию). Данное обстоятельство приобретает особую значимость в условиях высокочастотных режимов и значительных механических нагрузок [72].

При изменении нагрузки или частоты ПМ могут частично перемagnetиваться, что вызывает дополнительные потери на гистерезис.

Для расчета электрических потерь необходимо определить сопротивление обмотки статора. На рисунке 2.7 показана общая схема для одной фазы машины, где s_c обозначает количество параллельных ответвлений каждой фазы, а $\frac{p}{2s_c}$ обозначает количество последовательно соединенных пар полюсов.

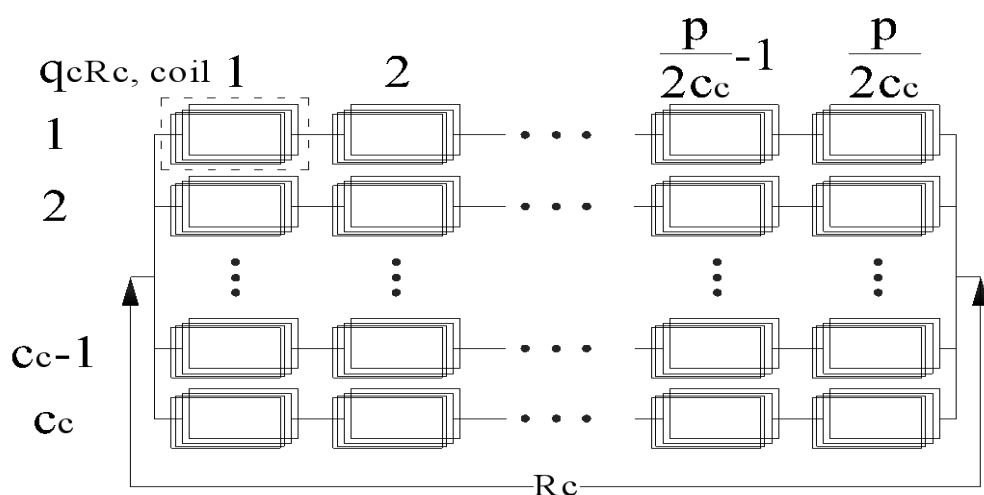


Рисунок 2.7 – Схема обмотки статора

Сопротивление фазной обмотки складывается из сопротивления последовательной секции и параллельных ветвей [73]. С учетом этого

$$R_s = \frac{\rho_{cu} p n_s q_s L_{coil}}{2 A_{cu} c_s^2}, \quad (2.36)$$

где L_{coil} – средняя длина витка обмотки;

A_{cu} – площадь поперечного сечения одного медного проводника;

ρ_{cu} – удельное электрическое сопротивление меди;

n_s – количество витков в одной катушке;

q_s – количество пазов/полюсов/фаз статора.

Средняя длина витка обмотки представляет собой комбинацию длины пакета и длины выступа. Средняя длина катушки рассчитывается по формуле

$$L_{coil} = 2(l_{active} + l_{passive}) = 2(l_{stk} + 1,2\tau_p + 2d_{ext}), \quad (2.37)$$

где l_{active} – активная длина катушки – это часть обмотки, которая расположена в пазах магнитопровода и непосредственно участвующая в создании электромагнитного поля;

$l_{passive}$ – пассивная длина катушки – это концевая часть обмотки, находящаяся за пределами активной зоны. Она не генерирует полезное магнитное поле, но обеспечивает электрическое соединение между активными участками;

l_{stk} – длина пакета;

τ_p – длина шага полюсов обмотки;

d_{exp} – длина выступа концевой обмотки.

Формула для расчета электрических потерь

$$P_{cu} = 3I^2 R_s, \quad (2.38)$$

где I – среднеквадратичный фазный ток.

2.5. Выводы

1. На основе анализа векторной диаграммы показано, что коэффициент мощности СДПМ зависит от соотношения токов по продольной и поперечной осям, а также от параметров магнитной системы, в первую очередь от величины потокоцепления ПМ. Увеличение потокоцепления при неизменной нагрузке ведет к росту коэффициента мощности.

2. Исследование режима короткого замыкания позволило выявить критические условия, способные вызвать необратимое размагничивание постоянных магнитов:

2.1. Доминирующим фактором размагничивания является отрицательная составляющая тока по продольной оси, создающая магнитное поле, направленное навстречу полю постоянных магнитов.

2.2. Характер воздействия внешнего поля на состояние магнита определяется соотношением напряженности этого поля и коэрцитивной силы материала магнита.

2.3. С учетом известных температурных зависимостей коэрцитивной силы установлено, что ферритовые магниты благодаря положительному температурному коэффициенту коэрцитивной силы менее подвержены необратимому размагничиванию при повышенных температурах по сравнению с неодимовыми магнитами, что подтверждает их перспективность для применения в двигателях.

3. Выделены основные виды потерь в СДПМ.

3. КОНСТРУКЦИЯ СДПМ

3.1. Параметры исходного электродвигателя

В качестве исходного (серийного, широко применяемого) двигателя был выбран СДПМ VM1424ZXF с неодимовыми ПМ марки NdFeB N42 (рисунок 3.1). Основные номинальные и климатические характеристики двигателя приведены ниже:

- Номинальная частота вращения: 620 об/мин;
- Номинальная мощность: 3 кВт;
- Диапазон рабочих температур окружающей среды: от минус 40 °С до плюс 50 °С;
- Относительная влажность: до 80 % при температуре 27 °С;
- Степень защиты по ГОСТ/IEC: IP55.



Рисунок 3.1 – Общий вид ЭД

Данный СДПМ имеет поверхностное расположение магнитов на роторе (8 магнитов). Фотография ротора ЭД представлена на рисунке 3.2.



Рисунок 3.2 – Ротор ЭД

Параметры ротора и статора, выбранного ЭД приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Параметры ротора и статора исходного ЭД

Параметр	Значение
Осевая длина	100 мм
Внешний диаметр статора	135 мм
Внешний диаметр ротора	80 мм
Длина воздушного зазора	1 мм

3.2. Выбор магнитов

При выборе ферритовых магнитов, подходящих для данной работы, основным критерием являлась высокая остаточная магнитная индукция [74]. Проведено сравнение ферритовых магнитов марок Y30, Y35, 3A (таблица 3.3).

Магниты Y30 имеют низкую стоимость (сравнение представлено в таблице 3.2), но обладают самыми низкими характеристиками среди рассматриваемых ПМ. Они наиболее целесообразны для ЭД вентиляторов и насосов.

Магниты Y35 имеют оптимальную стоимость и обладают хорошими магнитными характеристиками. Их наиболее целесообразно применять для ЭД мощностью до 10 кВт.

Магниты 3A имеют максимальные магнитные характеристики среди рассматриваемых магнитов, но имеют и большую стоимость. Их применение наиболее целесообразно при температурах до 180 °С, для высокооборотных двигателей [75, 76].

Таблица 3.2 – Стоимость ферритовых магнитов (цены приведены по состоянию на 2023-2025 гг.)

Марка ПМ	Цена (руб./кг)
Y30	135-225
Y35	180-315
3A	270-450

Температурные зависимости остаточной индукции и коэрцитивной силы для марок Y30, Y35, 3A приведены на рисунках 3.3 и 3.4. Из них видно, что при охлаждении характеристики ферритовых магнитов ухудшаются.

Рассмотрим преимущество магнитов Y35 перед Y30:

1. Благодаря более высокой остаточной индукции (0,4-0,42 Тл вместо 0,38-0,40 Тл) габариты магнитов удастся уменьшить без потери момента.

2. Лучшая устойчивость к размагничиванию (200-220 кА/м против 180-200 кА/м). Критическое поле размагничивания для магнита Y35 выше, что очень важно при коротких замыканиях и низких температурах (минус 40 °С).

3. Более широкий температурный диапазон (минус 40 ... плюс 150 °С против минус 40 ... плюс 120 °С). Магнит Y35 стабильнее при нагреве.

4. Оптимальная стоимость. Магнит Y35 всего на 20-30 % дороже, чем магнит Y30, но обеспечивает 10-15 % прирост остаточной индукции и коэрцитивной силы.

Рассмотрим преимущество магнита Y35 перед магнитом 3А:

1. Экономическая целесообразность. Магнит 3А дороже Y35 на 40–50 %, но прирост остаточной индукции невелик (0,42–0,44 Тл против 0,4–0,42 Тл). Для двигателей мощностью 3 кВт такой прирост недостаточен, чтобы оправдать удорожание.

2. Достаточная термостабильность. Магнит 3А имеет смысл применять при температурах выше 150 °С и в высокооборотных двигателях. Для СДПМ с рабочим диапазоном от минус 40 до плюс 50 °С такая термостойкость избыточна.

Для СДПМ мощностью 3 кВт магниты Y35 обеспечивают:

1. Требуемый магнитный поток обеспечивается при умеренном увеличении размеров магнитов.

2. Устойчивы к размагничиванию в экстремальных условиях (короткое замыкание при температуре минус 40 °С).

3. Оптимальное соотношение цены и производительности.

Магнит 3А для рассматриваемого двигателя избыточен:

1. Прирост момента не превышает 5 % по сравнению с Y35, что не оправдывает удорожания магнитной системы.

2. Удорожание конструкции не оправдано для ЭД с рабочим диапазоном до 50 °С.

Магнит Y30 не рекомендуется из-за следующих причин:

1. Слишком низкая остаточная индукция, что потребует еще большего увеличения объема магнитов;

2. Ограниченная термостойкость до 120 °С.

На основании проведенного сравнительного анализа ферритовых магнитов марок Y30, Y35 и 3А для применения в СД был выбран ПМ Y35.

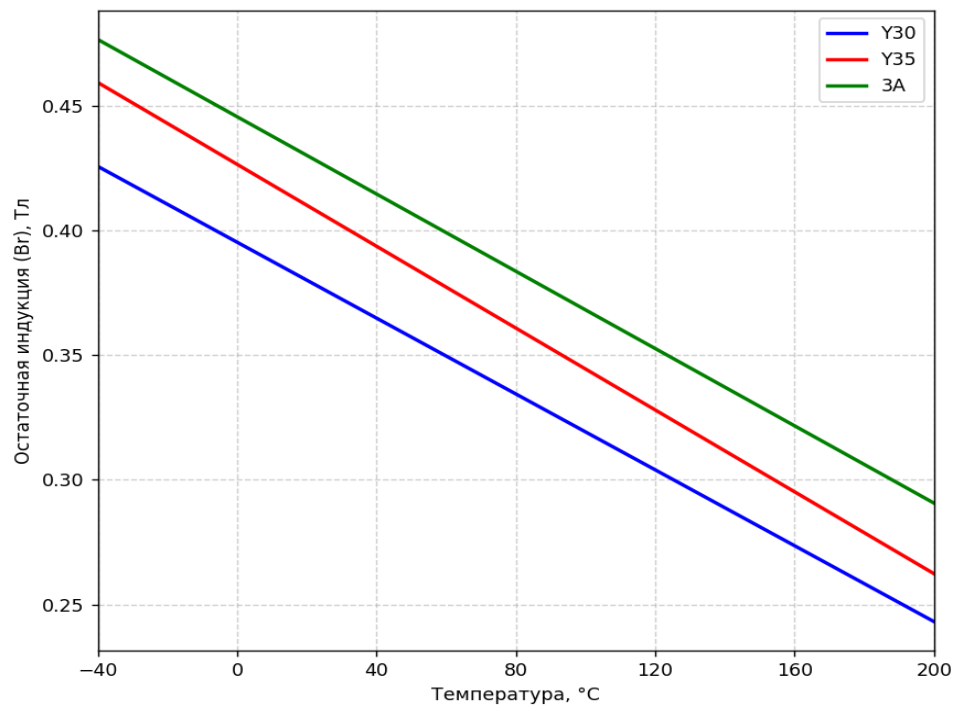


Рисунок 3.3 – Зависимость остаточной индукции ферритовых магнитов (Y30, Y35, 3A) от температуры

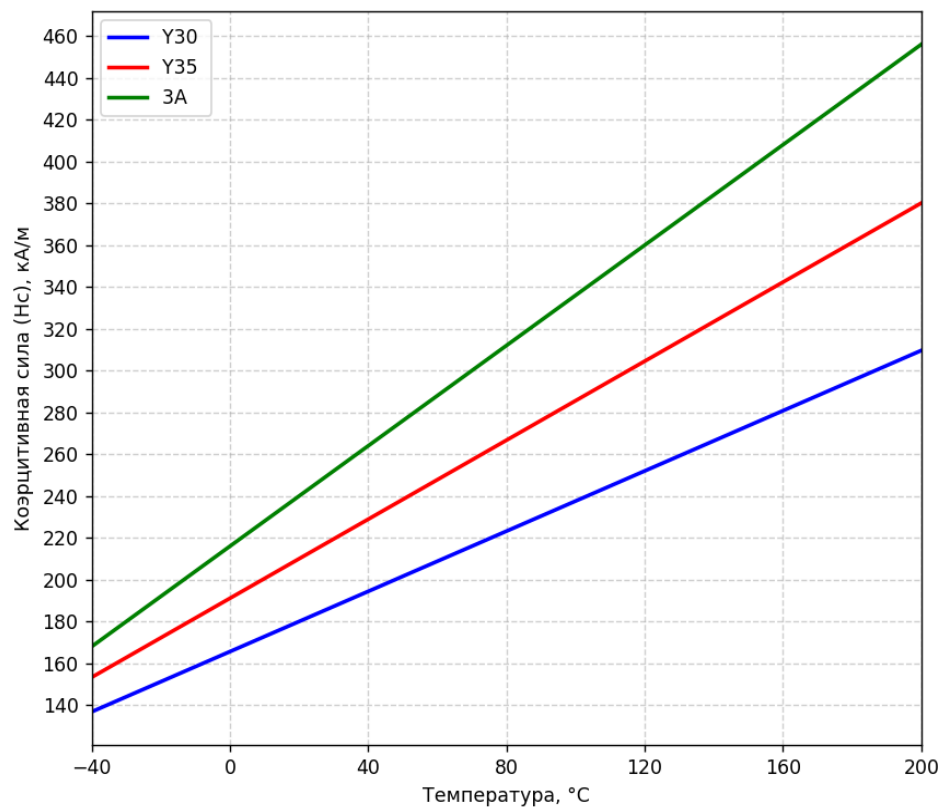


Рисунок 3.4 – Зависимость коэрцитивной силы ферритовых магнитов (Y30, Y35, 3A) от температуры

Таблица 3.3 – Характеристики ферритовых магнитов

Марка ПМ	Остаточная индукция (Тл)	Коэрцитивная сила (кА/м)	Магнитная энергия (кДж/м ³)	Рабочая температура (°C)	Температура Кюри (°C)	Плотность (г/см ³)
Y30	0,38-0,40	180-200	27-30	-40...+120	450	4,8-5,0
Y35	0,4-0,42	200-220	30-33	-40...+150	450	4,8-5,0
3A	0,42-0,44	230-250	33-36	-40...+180	450	4,9-5,1

3.3. Методика топологической оптимизации ротора с комбинацией ферритовых и редкоземельных магнитов

Чтобы компенсировать слабые стороны ферритовых магнитов и улучшить параметры двигателя, в ротор СДПМ вводят неодимовые магниты [77]. Такая замена позволит:

1. Компенсировать слабую остаточную индукцию ферритовых магнитов. У ферритов остаточная индукция 0,4-0,45 Тл, а у неодимовых магнитов – 1,0-1,4 Тл. Комбинированное применение неодимовых и ферритовых магнитов увеличивает общий поток в два три раза [78, 79].

2. Стабилизировать работу при нагреве. У ферритовых магнитов марки Y35 остаточная индукция снижается с температурным коэффициентом минус 0,2 %/°С, тогда как для неодимовых магнитов марки N42 этот коэффициент составляет минус 0,1 %/°С. При комбинации магнитов марки Y35 и N42 общий спад потока при высоких температурах уменьшится.

3. Оптимизировать массогабаритные показатели ротора. Когда в ротор включены только ферритовые магниты, требуется увеличить габариты ЭД на 30-50 % для получения таких же характеристик, как в роторе из неодимовых магнитов. Добавление неодимовых магнитов в небольшом количестве (10-20 %) позволит сохранить габариты ротора.

4. Расширить рабочие режимы. В ЭД с гибридной магнитной системой ферритовые магниты создают часть потока, но из-за низкой остаточной индукции суммарный поток невелик. Если бы электродвигатель работал только на ферритовых магнитах, то при повышенной скорости противо-ЭДС быстро достигла бы напряжения питания. В результате максимальный допустимый ток (а следовательно, и момент) пришлось бы снижать. Добавление неодимовых магнитов увеличивает суммарный поток, сдвигает точку ограничения по напряжению в область более высоких скоростей и позволяет двигателю сохранять момент в широком диапазоне (важно для тяговых приводов) [80, 81].

Добавление неодимовых магнитов в ротор с ферритовыми магнитами позволит достичь компромиссов между:

1. Стоимость.
2. Производительностью (неодимовые магниты усиливают момент ЭД).
3. Температурной стабильностью.

В рамках оптимизации конструкции ротора СДПМ требуется определить геометрические размеры ферритовых магнитов, способных заменить неодимовые магниты с небольшим ухудшением характеристик ЭД. Для реализации ГА был разработан код в Python (приложение А), для расчета физических параметров (крутящего момента, температуры, прочности) применяется программа COMSOL Multiphysics. На рисунке 3.5 показана методика топологической оптимизации.

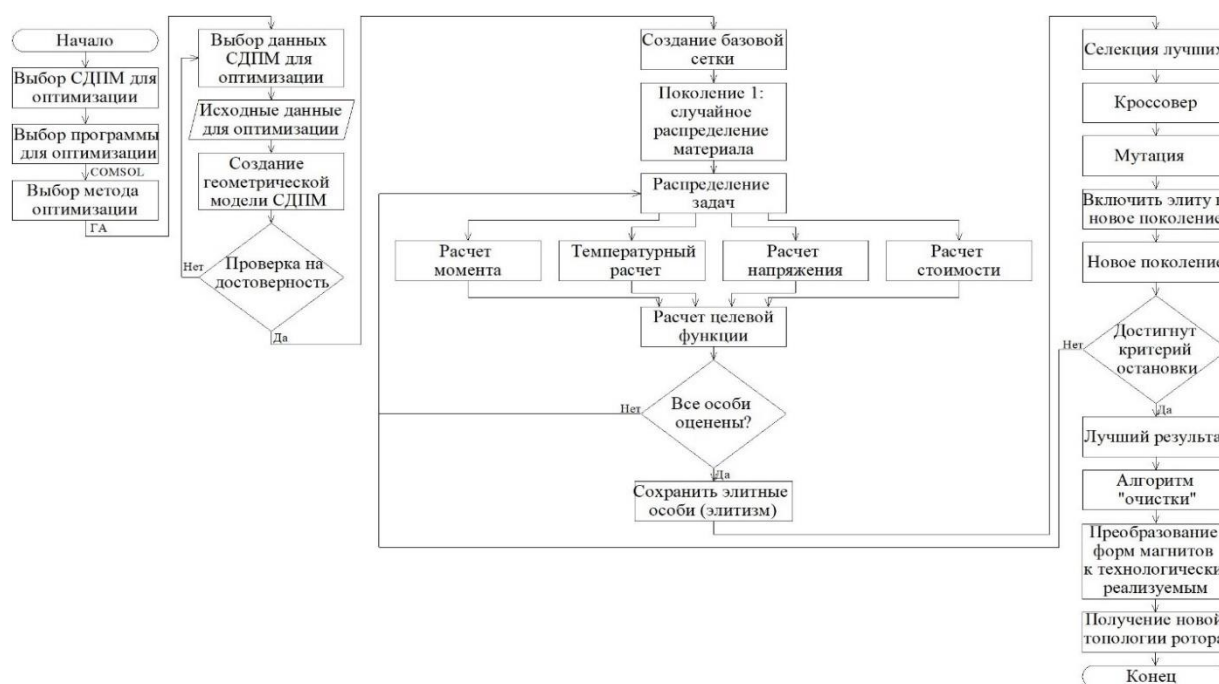


Рисунок 3.5 – Методика топологической оптимизации

Алгоритм программного комплекса включает этапы:

1. Для начала необходимо выбрать конкретный ЭД, для которого будет проводиться оптимизация. В качестве исходного ЭД выбран VM1424ZXF.
2. Для оптимизации был выбран программный комплекс COMSOL Multiphysics, потому что данный программный комплекс позволяет проводить

одновременно несколько расчетов магнитных полей, теплопередачи, механических напряжений. Существует возможность экспорта в САД-системы.

3. Выбор метода оптимизации. Для оптимизации был выбран метод ГА по следующим причинам:

а) Данный метод исследует много вариантов. Генерирует разнообразные, иногда неочевидные конфигурации магнитов.

б) Скрещивает удачные черты разных конфигураций.

в) Благодаря мутации не застревает в локальных оптимумах (неоптимальных решениях).

г) Позволяет легко учесть сложные ограничения.

4. Выбор данных СДПМ для оптимизации. Необходимо определить параметры ЭД, такие как размеры ротора, статора, материал обмоток и т.д., которые остаются неизменными в процессе оптимизации.

5. Создание геометрической модели СДПМ. Необходимо создать геометрическую модель ЭД в формате dxf и загрузить в программный комплекс COMSOL Multiphysics.

6. После ввода данных выполняется их проверка.

7. Создание базовой сетки. Создается расчетная сетка, количество элементов сетки составляет 2000.

8. Поколение 1 (создание начальной популяции). Первое поколение состоит из 20 случайных уникальных хромосом. Каждая хромосома содержит 2000 генов, которые кодируются числом от 0 до 9 (0 – сталь, 1-4 – неодимовые магниты (с разной ориентацией), 5-8 – ферритовые магниты (с разной ориентацией), 9 – воздух).

9. Распределение задач. Система распределяет расчеты таким образом, что для одной хромосомы параллельно выполняются четыре расчета (момента, температурной стабильности, прочности и стоимости). Все расчеты проводятся параллельно на отдельных ядрах.

9.1. Расчет момента. Для текущего распределения материала в роторе выполняется электромагнитное моделирование МКЭ в программном комплексе COMSOL Multiphysics, для расчета крутящего момента

$$T = \int_S (r \times (\sigma_m \cdot n)) dS, \quad (3.1)$$

где σ_m – тензор напряжений Максвелла;

n – нормаль к поверхности;

r – радиус-вектор.

9.2. Температурный расчет. Максимальную температуру в магнитах и обмотке определяют по данным электромагнитного расчета

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (k \nabla T) = Q, \quad (3.2)$$

где ρ – плотность;

C_p – теплоемкость;

k – теплопроводность;

Q – источники тепла (джоулевы потери, потери в стали и т.д.).

В установившемся режиме $\frac{\partial T}{\partial t} = 0$, поэтому

$$\nabla \cdot (k \nabla T) = Q, \quad (3.3)$$

9.3. Модуль Stress Analysis позволяет рассчитать механические напряжения в роторе от центробежных и магнитных сил

$$\nabla \cdot \sigma + F = 0, \quad (3.4)$$

где σ – тензор механических напряжений;

F – центробежная сила.

Для линейной упругости

$$\sigma = C : \epsilon, \quad (3.5)$$

где C – тензор упругости;

ϵ – тензор деформации.

$$\epsilon = \frac{1}{2} (\nabla u + |\nabla u|^T), \quad (3.6)$$

Для корректного учета взаимного влияния электромагнитных, тепловых и механических процессов в модели СДПМ с комбинацией ферритовых и

неодимовых магнитов использована последовательная (связанная) методика на основе мультифизических узлов программного комплекса COMSOL.

1. Электромагнитный расчет выполняется в модуле Rotating Machinery, Magnetic. Решатель находит векторный магнитный потенциал, из которого затем вычисляются распределение поля, потери в стали по модели Штейнметца и джоулевы потери в обмотках статора.

2. Для теплового расчета используется модуль Heat Transfer in Solids. В качестве источника тепла берутся потери в стали (из предыдущего шага). Передача мощности между электромагнитным и тепловым расчетами идет через узел Electromagnetic Heating. Данный узел автоматически передает мощность тепловыделений из электромагнитного расчета в тепловой. Результатом расчета является температурное поле по всем компонентам двигателя.

3. Для механических расчетов используется модуль Solid Mechanics. Нагрузки две: центробежная сила от вращения ротора и магнитные силы. Поля напряжений и деформаций определяются из уравнений упругости.

Все три расчета – стационарные. Исключение – моделирование короткого замыкания. Для моделирования короткого замыкания используется нестационарный решатель с шагом 0,1 мс.

10. Расчет целевой функции. Целевая функция имеет вид

$$F = \alpha \cdot F_1 + \beta \cdot F_2 + \gamma \cdot F_3 - \delta \cdot F_4, \quad (3.7)$$

где F – целевая функция;

F_1 – нормализованное значение крутящего момента определяется как

$$F_1 = \frac{F_M - F_{M.min}}{F_{M.max} - F_{M.min}}, \quad (3.8)$$

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 ЭД;

Указанные границы – значение от $F_{M.min}=1$ Н·м до $F_{M.max}=100$ Н·м – выбраны исходя из рабочего диапазона разрабатываемого гибридного двигателя

(комбинацией ферритовых и неодимовых магнитов). Минимальное значение 1 Н·м соответствует моменту, при котором электродвигатель надежно запускается и устойчиво вращается без остановки. Максимальное значение 100 Н·м превышает номинальный момент исходного ЭД и позволяет нормировать моменты вплоть до пиковых перегрузочных режимов. Такой диапазон обеспечивает линейное масштабирование момента F_1 от 0 до 1 для всех рабочих значений момента в пределах от 1 Н·м до 100 Н·м.

F_2 – нормализованное значение тепловых характеристик, определяется как

$$F_2 = 1 - \frac{F_T - F_{T.min}}{F_{T.max} - F_{T.min}}, \quad (3.9)$$

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 – нормализованное значение прочности, определяется как

$$F_3 = \frac{F_{\Pi} - F_{\Pi.min}}{F_{\Pi.max} - F_{\Pi.min}}, \quad (3.10)$$

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 – нормализованное значение стоимости ПМ, определяется как:

$$F_4 = \frac{F_c - F_{c.min}}{F_{c.max} - F_{c.min}}, \quad (3.11)$$

где F_c – стоимость ПМ, руб., определяется как

$$F_c = M_{\text{неодим}} \cdot C_{\text{неодим}} + M_{\text{феррит}} \cdot C_{\text{феррит}}, \quad (3.12)$$

где $M_{\text{неодим}}$, $M_{\text{феррит}}$ – масса 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.

Нижняя граница (100 руб.) соответствует минимальной массе ферритовой магнитной системы, конструктивно реализуемой для исходного ЭД. При минимальной толщине ферритового магнита 2 мм и плотности 4900 кг/м³ масса составляет примерно 0,25 кг, а стоимость – примерно 62,5 руб. С учетом запаса и округления принято $F_{c.min} = 100$ руб.

Верхняя граница (5000 руб.) определяется стоимостью 1 кг неодимового магнита при цене 5000 руб./кг. Хотя геометрически возможно разместить на ротор более 1 кг неодимовых магнитов, применение массы более 1 кг нецелесообразно. Значение 5000 руб. выбрано как заведомый «потолок», охватывающий все возможные варианты и обеспечивающий нормализацию F_4 в диапазоне от 0 до 1 для всех рассматриваемых конструкций.

Таким образом, диапазон от 100 руб. до 5000 руб. является достаточным и полностью покрывает фактические стоимости исследуемых гибридных магнитных систем, а также крайние предельные случаи.

Стоимость идет со знаком минус, потому что нам нужно минимизировать стоимость ЭД.

Значения весовых коэффициентов зависят от назначения проектируемого двигателя и предъявляемых к нему требований. При необходимости значения весовых коэффициентов могут быть изменены под конкретную задачу.

Рассмотрим три основных варианта, встречающихся наиболее часто:

1. Компромиссный вариант. В данном варианте приоритет отдается высокому крутящему моменту и низкой стоимости одновременно. Поэтому весовой коэффициент момента принимается равным 0,4 ($\alpha=0,4$) и весовой коэффициент для стоимости принимается равным 0,4 ($\delta=0,4$). Температура и прочность имеют второстепенное значение, для них значение весовых

коэффициентов принимаются равным 0,1 ($\beta=0,1$, $\gamma=0,1$). Эти коэффициенты выступают как ограничители - они начинают заметно влиять на результат только тогда, когда параметры приближаются к опасным границам. Сбалансированный вариант подходит для двигателей широкого применения, где ищется разумный компромисс между характеристиками и ценой ЭД.

2. Моментный вариант. В данном варианте критически важна удельная мощность при малых габаритах. В данном варианте момент выходит на первый план, весовой коэффициент принимается равным 0,6 ($\alpha=0,6$), а стоимость учитывается меньше, весовой коэффициент принимается равным ($\delta=0,2$). Весовые коэффициенты для температуры и прочности остаются такими же как для сбалансированного варианта ($\beta=0,1$, $\gamma=0,1$). Если же электродвигатель работает на пределе по нагреву или механической прочности, весовые коэффициенты можно немного увеличить (до 0,15), еще сильнее снизив вес стоимости.

3. Бюджетный вариант. Данный вариант подходит при массовом выпуске ЭД, где от двигателя не требуется рекордных характеристик. В данном варианте стоимость выходит на первое место, весовой коэффициент принимается равным 0,6 ($\delta=0,6$), а момент имеет пониженный весовой коэффициент и принимается равным 0,2 ($\alpha=0,2$). Весовые коэффициенты по теплу и прочности неизменны и равны 0,1 ($\beta=0,1$, $\gamma=0,1$). В результате оптимизация отбирает варианты с самой дешевой комбинацией магнитов, допуская некоторое снижение момента в разрешенных пределах.

Значение весовых коэффициентов в зависимости от необходимых параметров представлена в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Значение весовых коэффициентов в зависимости от применяемого варианта

Вариант	Момент (α)	Температура (β)	Прочность (γ)	Стоимость (δ)
Компромиссный	0,4	0,1	0,1	0,4
Моментный	0,6	0,1	0,1	0,2

Окончание таблицы 3.4

Вариант	Момент (α)	Температура (β)	Прочность (γ)	Стоимость (δ)
Бюджетный	0,2	0,1	0,1	0,6

Для нашей задачи выбран компромиссный вариант. Данный вариант обеспечивает приемлемый компромисс между стоимостью и моментом, что позволяет получить результат, применимый в различных отраслях. При изменении требований технического задания весовые коэффициенты могут быть легко скорректированы.

11. Сохранение элитной функции (элитизм). Элитизм – это стратегия сохранения лучших решений. Несколько лучших особей текущего поколения копируются напрямую в следующее поколение без изменений. Элитизм гарантирует, что лучшее найденное на данный момент решение не будет потеряно.

12. Селекция (выбор родителей). Целью селекции является выбрать из текущей популяции особи, которые станут родителями для создания потомства. Выбор родителей основан на отборе «лучшей» особи. Методы селекции:

12.1. При рулеточной селекции вероятность выбора особи пропорциональна ее приспособленности. К минусу данного метода можно отнести следующее: при наличии особи с исключительно высокой приспособленностью возникает эффект доминирования, приводящий к преждевременной сходимости и сокращению генетического разнообразия. В малом разбросе значений приспособленности селекция перестает быть направляющим фактором и вырождается в случайный отбор.

12.2. При селекции усечением в новую популяцию переходит фиксированная доля лучших особей – обычно от 10 до 50 %. Чем выше эта доля, тем быстрее теряется генетическое разнообразие.

12.3. Турнирная селекция выбирает особь с наивысшей приспособленностью. Выбор происходит случайным образом. Обычно количество участников составляет 2-5 особей. Турнирная селекция обеспечивает регулируемое давление отбора.

12.4. Ранговая селекция. Этот метод работает не с абсолютными значениями приспособленности, а с порядковыми номерами особей после сортировки. Это не дает одной особи с очень высокой приспособленностью подавить остальную популяцию и обеспечивает одинаковое давление отбора на всех участников.

12.5. Случайная селекция. При случайной селекции все особи имеют равную вероятность отбора. Эволюционное давление при этом отсутствует.

Для топологической оптимизации ротора выбран турнирный отбор. Размер турнира составляет четыре особи.

13. Кроссовер (скрещивание). На этапе кроссовера из отборных родительских пар формируются потомки путем рекомбинации генов. Это позволяет передавать полезные свойства и иногда улучшать их. К наиболее распространенным схемам кроссовера относятся:

13.1. В одноточечном кроссовере хромосома разрывается в случайно выбранной позиции. После разрыва родители обмениваются концевыми фрагментами. Одноточечный кроссовер отличается простотой реализации и низкой вычислительной сложностью. Это делает данный вид кроссовера удобным для задач с бинарными и целочисленными координатами.

13.2. В двухточечном кроссовере выбираются две случайные позиции разрыва, и участок хромосомы между ними обменивается между родителями. Это позволяет наследовать более крупные непрерывные блоки генов.

13.3. При равномерном кроссовере каждый ген наследуется независимо от одного из родителей. Равномерный кроссовер обеспечивает интенсивное перемешивание признаков, но может порождать технологически нереализуемые конфигурации.

Для оптимизации распределения материалов в роторе СДПМ предпочтительнее двухточечный кроссовер. Двухточечный кроссовер позволит сохранить функциональные блоки и исследовательскую способность.

14. Мутация. Она вносит в популяцию случайное разнообразие и не дает алгоритму застрять в локальном оптимуме. Используют несколько подходов:

14.1. Равномерная мутация. Ген случайно заменяется значением из допустимого набора. Этот вид подходит для дискретных параметров.

14.2. Гауссова мутация. Изменение размеров и углов происходит по нормальному закону.

14.3. Адаптивная мутация. Интенсивность регулируется по мере сходимости.

Для топологической оптимизации распределения материалов в роторе СДПМ лучше всего подходит равномерная мутация.

15. Новая популяция формируется из потомков. Новое поколение полностью замещает предыдущее поколение.

16. Проверка критерия останова:

16.1. ГА останавливается после создания и оценки заданного количества поколений. Данный критерий гарантирует завершение работы и позволяет контролировать время вычислений. Однако есть риск преждевременной остановки при продолжающемся улучшении или трате ресурсов, если решение уже стабилизировалось.

16.2. Стагнация решения. Алгоритм останавливается, если улучшение значения целевой функции лучшей особи за последние N поколений не превышает заданного порога. К преимуществам такого критерия можно отнести: алгоритм останавливается, когда дальнейшая оптимизация становится неэффективной, экономия вычислительных ресурсов. К недостаткам такого критерия можно отнести: требуется определить значения двух параметров (N поколений и значение порога), которые могут зависеть от задачи.

16.3. Ручная остановка. В данном случае вручную дается команда на остановку алгоритма во время его выполнения. К преимуществам такого метода можно отнести: полный контроль со стороны пользователя. Позволяет остановить алгоритм по любой субъективной или объективной причине, не охваченной автоматическими критериями. К недостаткам такого метода можно отнести: требуется постоянное внимание пользователя, не автоматизировано.

Алгоритм останавливается при стагнации. Значение целевой функции не улучшается более чем на 1 % в течение последних 5 поколений.

17. Лучший результат. После окончания ГА будет выведен результат с расположением материалов в роторе СДПМ.

По результатам запуска ГА получена следующая конструкция ротора СДПМ (рисунок 3.6).

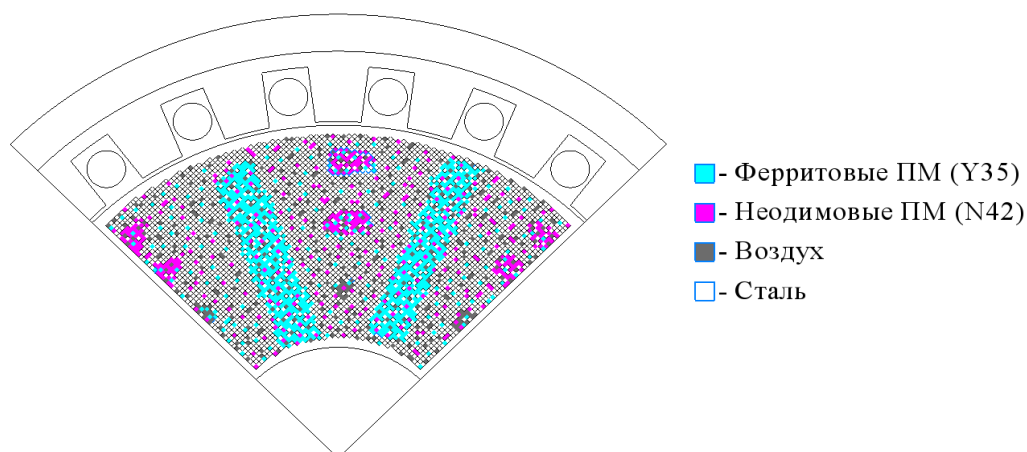


Рисунок 3.6 – Конструкция ротора СДПМ после оптимизации

18. На рисунке 3.6 видно, что в роторе СДПМ магниты содержат посторонние включения (воздух или сталь). Чтобы убрать их, необходимо применить алгоритм «очистки», который реализует следующие правила:

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

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

На рисунке 3.7 представлен результат проведения алгоритма «очистки».

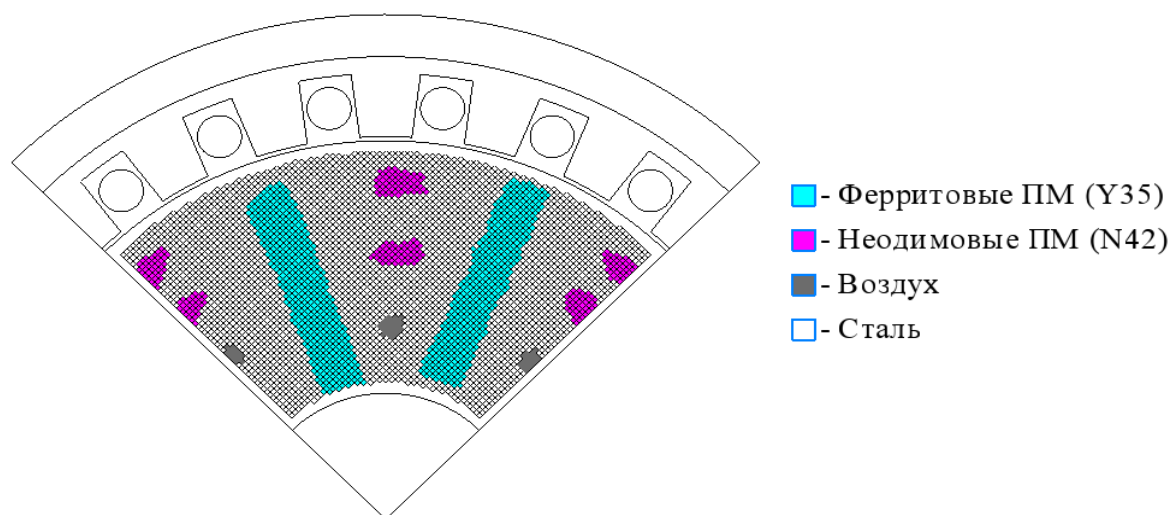


Рисунок 3.7 – Результаты применения алгоритма «очистки»

19. Магниты после оптимизации имеют сложную форму (рисунок 3.7). Поэтому необходимо доработать формы магнитов под технологические ограничения. Изготовить ПМ такой формы крайне сложно, поэтому необходимо использовать аддитивные технологии. Для того чтобы ПМ было проще изготовить, необходимо перейти к прямоугольным формам. На рисунке 3.8 представлена преобразованная форма ПМ, которую можно технологически реализовать.

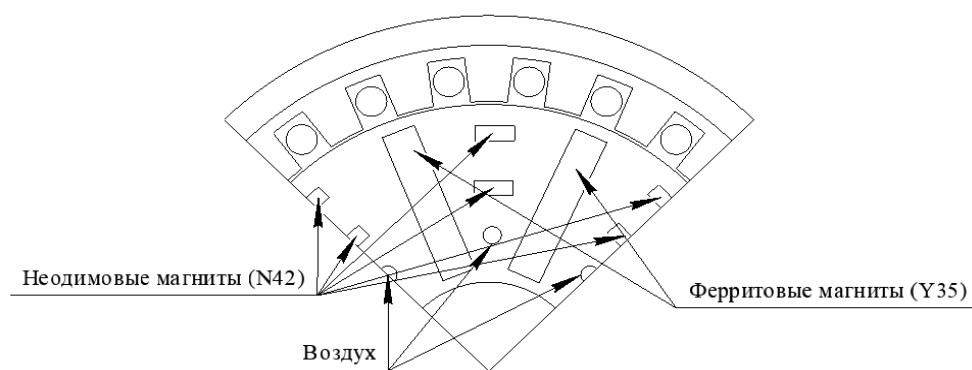


Рисунок 3.8 – Преобразованная форма магнитов пригодная для технологической реализации

На рисунке 3.9 показаны размеры ПМ после преобразования форм магнитов. Количество ферритовых магнитов составляет 8 штук, неодимовых магнитов 16 штук.

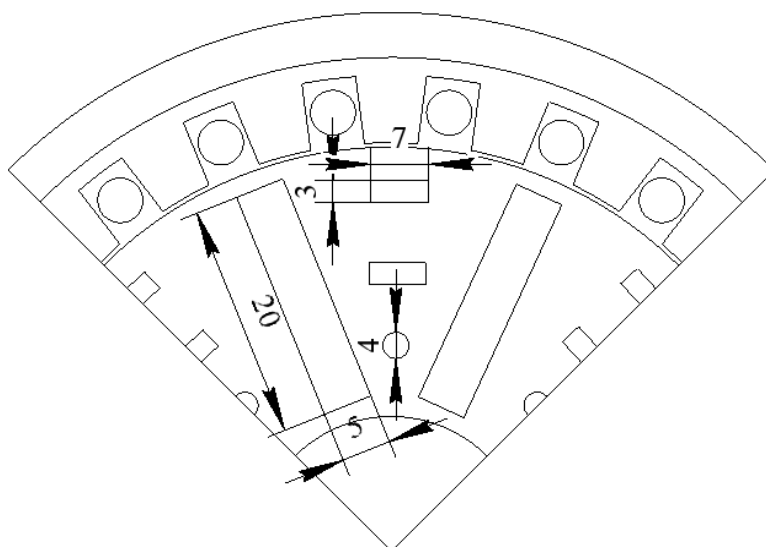


Рисунок 3.9 – Габаритные размеры ПМ

20. Оптимизированная конструкция ротора СДПМ представлена на рисунке 3.10.

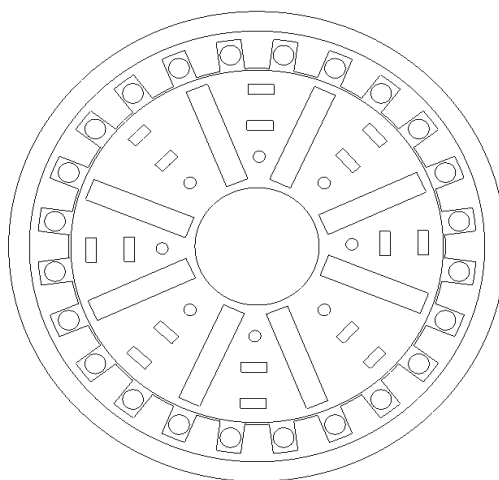


Рисунок 3.10 – Ротор СДПМ после проведения оптимизации

Как видно из результатов оптимизации, конструкция ротора приняла вид «спиц». СДПМ спицевого типа является привлекательной топологией для высокопроизводительных тяговых двигателей транспортных средств. Такая конфигурация может стать эффективной заменой СДПМ с поверхностным расположением ПМ. В частности, СДПМ спицевого типа обладает низким уровнем акустического шума (уровень акустического шума ниже на 8-12 дБ) и вибрации по сравнению с V-образным СДПМ [82]. Предлагаемый СДПМ спицевого типа

содержит радиально распределенные ферритовые и неодимовые магниты. Несмотря на низкую остаточную намагниченность ферритового магнита, в таких машинах можно активно использовать магнитный момент благодаря радиальному расположению магнитов [83]. Реактивный момент должным образом используется путем изменения конструкции ротора, но это влияет на магнитный момент. Снижение энергетических показателей ферритовых магнитов может быть компенсировано использованием момента магнитного сопротивления в СДПМ спицевого типа конструкции.

СДПМ спицевого типа имеют высокий магнитный момент по сравнению с другими типами СДПМ [84]. Это связано с тем, что СДПМ спицевого типа имеют магниты большего размера, чем другие типы СДПМ. При проектировании ЭД спицевого типа необходимо учитывать следующее:

1. Ввиду низкой коэрцитивной силы ферритовых магнитов следует предусмотреть защиту от их необратимого размагничивания.
2. Необходимо предусмотреть меры, уменьшающие нагрузки на ротор, возникающие в результате установки в него магнитов большого размера (увеличивается масса ротора за счет увеличения массы ПМ).

На рисунке 3.11 представлен лист электротехнической стали после штамповки (ротор).



Рисунок 3.11 – Лист электротехнической стали после штамповки (ротор)

3.4. Проектирование экспериментального ротора

Проектирование ротора спицевой конфигурации с ферритовыми и неодимовыми магнитами выполнено в программном комплексе COMSOL Multiphysics. Расчеты в данном программном комплексе базируются на методе конечных элементов (МКЭ) и поддерживают совместное решение электромагнитных, тепловых и механических задач [85]. Выбор данного программного комплекса также обусловлен наличием специализированных модулей для моделирования вращающихся электрических машин [86].

Электромагнитные процессы моделировались в модуле AC/DC. Модуль AC/DC предназначен для моделирования низкочастотных и статических задач. Для вращающегося ротора применялся интерфейс Rotating Machinery, Magnetic. В данном интерфейсе происходит расчет уравнения Максвелла с использованием векторного и скалярного потенциала. Это обеспечивает корректное описание полей в подвижных и неподвижных элементах машины [87].

Для снижения вычислительной нагрузки вместо полной модели двигателя использовали его сектор. Размер сектора определялся числом полюсов. Модель включала сектор ротора с отверстиями под магниты, сектор статора с пазами для обмотки и область воздушного зазора. На границах сектора заданы антипериодические граничные условия (функция Sector Symmetry), обеспечивающие периодичность и непрерывность магнитного поля [88].

Материалы для каждого элемента геометрии были заданы с использованием встроенной библиотеки материалов COMSOL Multiphysics, а также путем добавления пользовательских материалов. Материалы, применяемые для моделирования ЭД, представлены на рисунке 3.12.

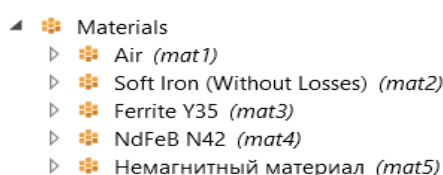


Рисунок 3.12 – Материалы, применяемые для моделирования ЭД

1. Сердечник ротора и статора: магнитомягкая электротехническая сталь (Soft Iron). Для нее задана нелинейная кривая намагничивания (В-Н кривая), учитывающая эффект насыщения [89].

2. Постоянные магниты:

2.1. Ферритовый магнит марки Y35 – задавался через модель намагничивания Remanent flux density с фиксированным значением остаточной индукции и направления намагниченности.

2.2. Неодимовый магнит марки NdFeB N42 – задавался аналогично с соответствующими значениями остаточной индукции [90].

3. Немагнитный материал. Для элементов, не проводящих магнитный поток, использован материал с относительной магнитной проницаемостью $\mu \approx 1$ – стекло. Стеклянная вставка крепит ПМ в заданных позициях. Это не дает им смещаться под действием электромагнитных сил. На рисунке 3.13 показан СДПМ конфигурации спицевого типа с указанием расположения стеклянных крепежных вставок.

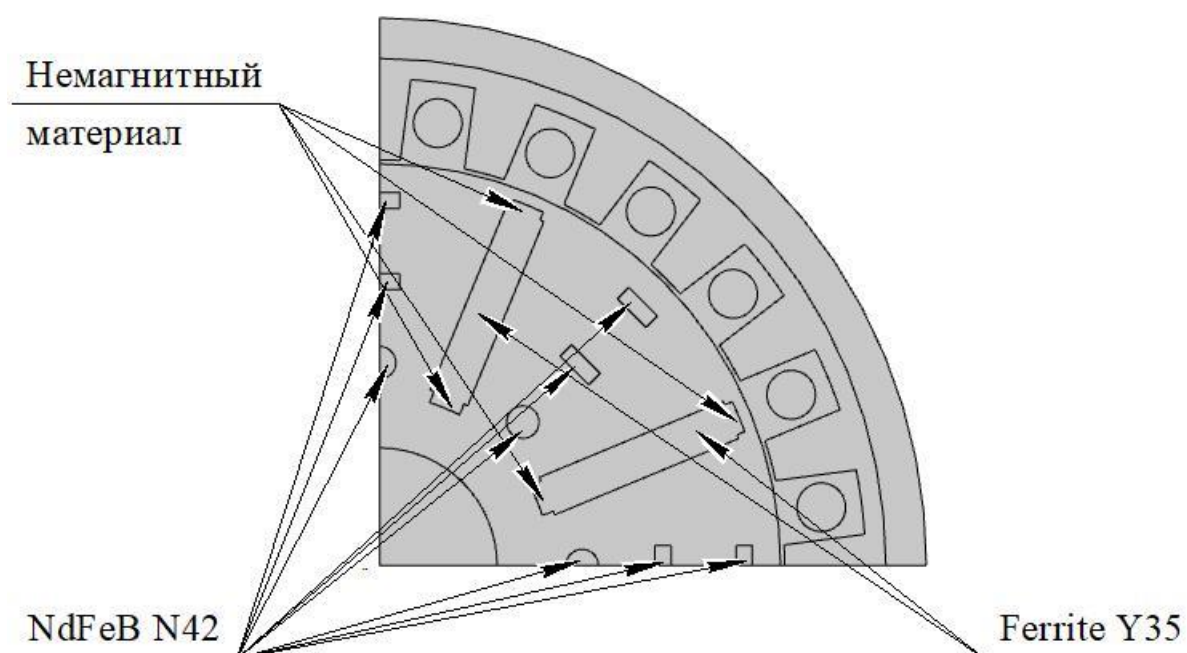


Рисунок 3.13 – СДПМ конфигурации спицевого типа

4. Обмотки статора: задавались через модель Homogenized Multiturn Conductor, что позволяет описывать катушки как однородную область с заданным количеством витков, сечением проводника и удельной проводимостью материала (медь) [91].

Модели материалов для ПМ задавались в разделе Amperes Law интерфейса Rotating Machinery, Magnetic. Для каждого магнита указывалось направление намагничивания – вдоль оси d или против нее. Для магнитомягкой стали использовалась модель B-H curve, нелинейная зависимость подставляется автоматически из библиотеки COMSOL.

Обмотки статора настраивались пофазно.

От качества расчетной сетки зависит точность и время сходимости решателя. Чтобы корректно рассчитать распределение магнитного поля между ротором и статором, выбран максимальный размер элемента 3 мм. В остальных областях (сердечник статора, тело ротора) сетка строилась более крупной, но с плавным переходом размеров элементов на границах. Для этого использовались функции управления сеткой Boundary Layers (рисунок 3.14).

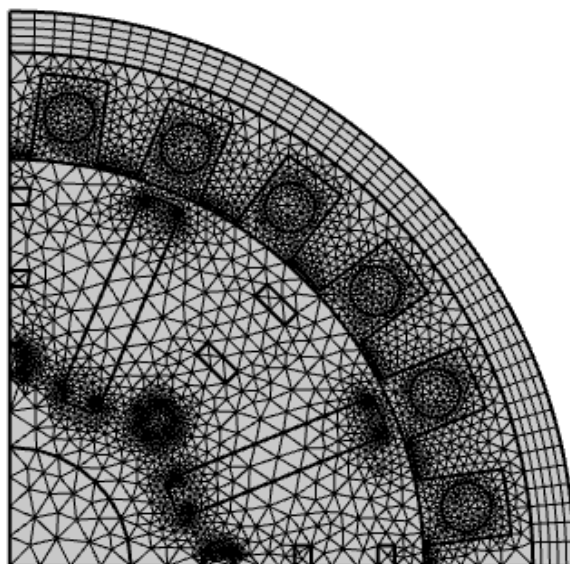


Рисунок 3.14 – Сетка модели ЭД

Для решения уравнений использовались два типа исследований в зависимости от поставленной задачи:

1. Stationary (стационарное исследование) – применялось для расчета начального распределения магнитных полей в заданных точках ротора и статора без учета движения. Это позволяло верифицировать правильность задания граничных условий и материалов.

2. Time Dependent (нестационарное исследование) – применялось для расчета переходных процессов, в частности для моделирования короткого замыкания. Временной диапазон был задан от 0 до 50 мс с шагом 0,1 мс, что обеспечивало выполнение условия Куранта-Фридрихса-Леви для численной устойчивости решения. В качестве прямого решателя использовался MUMPS, хорошо зарекомендовавший себя для задач с разреженными матрицами [92].

После завершения расчета проводилась визуализация распределения магнитного поля, линий магнитного потока и плотности тока в сечениях двигателя. Пример распределения магнитного поля в модели двигателя с комбинированной магнитной системой показан на рисунке 3.15. Распределения магнитного поля в модели двигателя с ферритовыми магнитами показано на рисунке 3.16.

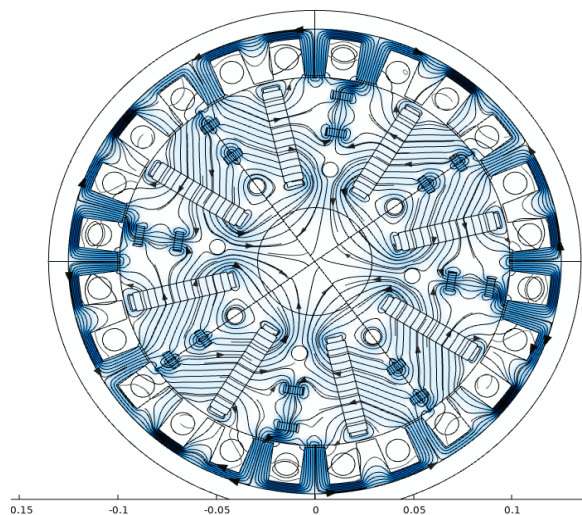


Рисунок 3.15 – Распределение магнитных полей в экспериментальном СДПМ с комбинацией ферритовых и неодимовых магнитов

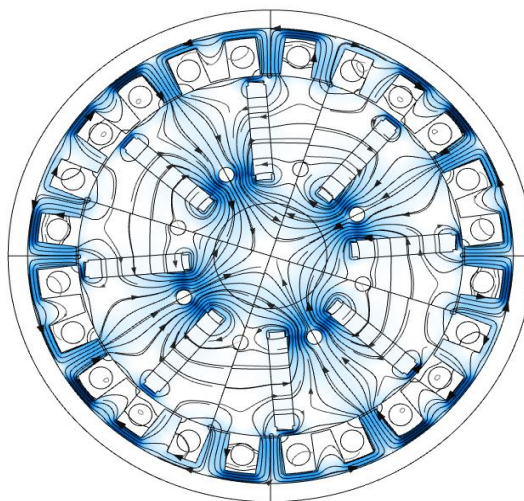


Рисунок 3.16 – Распределение магнитных полей в модели СДПМ с ферритовыми магнитами

Как видно из рисунка 3.15, СДПМ с комбинацией ферритовых и неодимовых магнитов обеспечивает значительно более высокую плотность магнитного потока в воздушном зазоре, по сравнению с двигателем только с ферритовыми магнитами (рисунок 3.16).

Для оценки нагрева ПМ и электротехнической стали в роторе выполнен тепловой расчет с использованием модуля Heat Transfer in Solids и мультифизической связи Electromagnetic Heating (потери в стали и вихревые токи в магнитах передаются как источники тепла). Результаты расчета распределения температуры в роторе СДПМ представлены на рисунке 3.17.

Максимальная температура 57,5 °С зафиксирована в ферритовых магнитах, что значительно ниже их предельной рабочей температуры 120 °С. Неодимовые магниты нагреты до 50 °С. Электротехническая сталь имеет температуру от 40 °С до 55 °С. Верхняя граница цветовой шкалы 70 °С выбрана с запасом и не достигается в экспериментальном образце СДПМ.

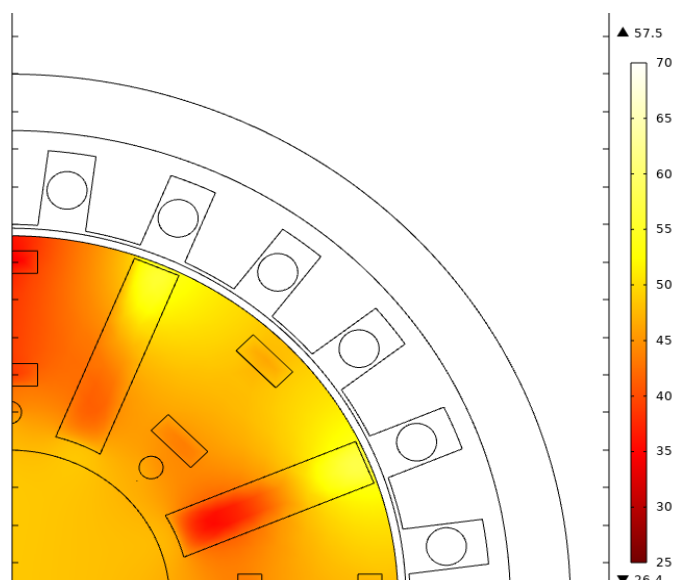


Рисунок 3.17 – Распределение температуры в экспериментальном СДПМ при номинальном токе 5,6 А

3.5. Размагничивание

Как говорилось ранее, ферритовые магниты при низкой температуре стремятся к размагничиванию. На рисунке 3.18 представлена кривая размагничивания ферритового магнита Y35 при температуре минус 40 °С, которая используется для исследования необратимого размагничивания [93].

Необратимая потеря намагниченности ферритовых магнитов возникает при превышении магнитным потоком критического порога в зоне перелома кривой размагничивания. Плотность потока в точке перегиба достигает 0,021 Тл, а коэрцитивная сила составляет -220 кА/м. Процесс размагничивания активируется в экстремальных условиях, например, при коротком замыкании в сочетании с низкими температурами.

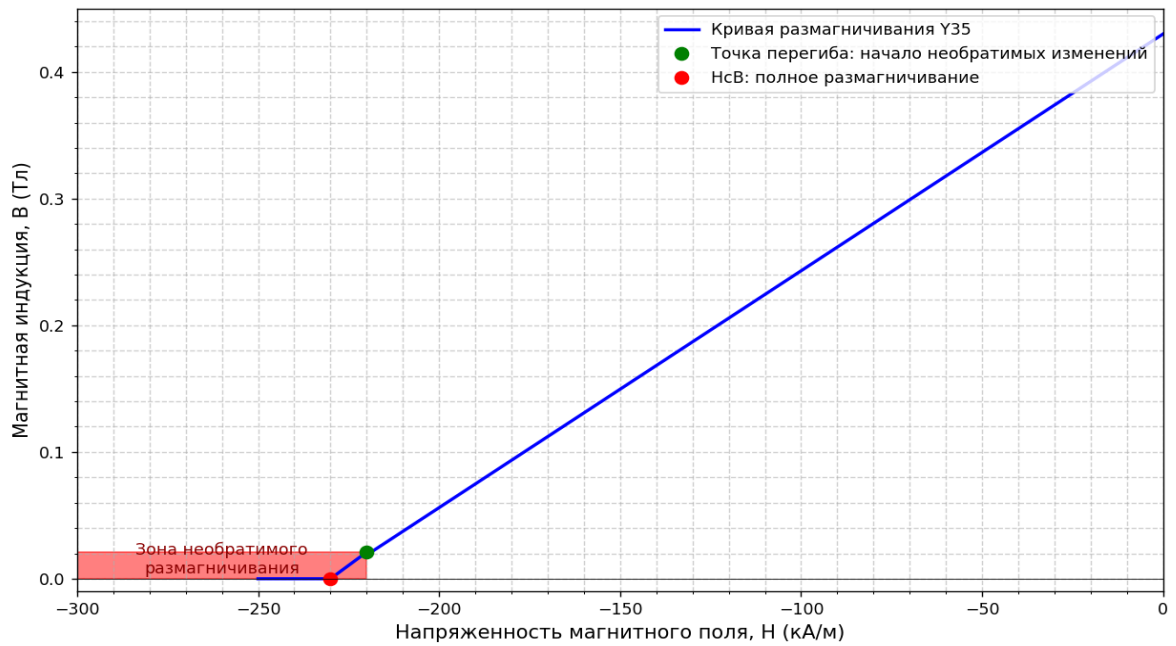


Рисунок 3.18 – Кривая размагничивания ферритового магнита (Y35) при температуре минус 40 °С

Для расчета токов короткого замыкания используются модули Magnetic Fields и Electric Circuits, а также исследование Time-Dependent [94]. Для анализа переходных процессов при коротком замыкании используется система уравнений электромагнитного поля в формулировке через магнитный векторный потенциал

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times A \right) = -\sigma \frac{\partial A}{\partial t} + J_{PM} + J_{ext}, \quad (3.13)$$

где μ – магнитная проницаемость;

σ – проводимость материала;

J_{PM} – эквивалентный ток намагничивания;

J_{ext} – ток обмотки статора.

Исследование Time-Dependent задается в диапазоне от 0 до 50 мс (чтобы зафиксировать переходный процесс), шаг по времени 0,1 мс. Шаг времени 0,1 мс обеспечивает выполнение условия Куранта-Фридрихса-Леви для численной устойчивости

$$\Delta t < \frac{\mu \sigma (\Delta x)^2}{2}, \quad (3.14)$$

где Δx – характерный размер сетки в зоне воздушного зазора.

Для моделирования условий короткого замыкания в программном модуле Electric Circuits используется нулевое значение напряжения на обмотках. Ток в обмотках рассчитывается через интеграл плотности тока

$$I(t) = \frac{1}{S} \int_S J dS, \quad (3.15)$$

где S – площадь сечения проводника обмотки.

Влияние вихревых токов учитывается с помощью опции Eddy Currents.

Плотность вихревых токов

$$J_{eddy} = -\sigma \frac{\partial A}{\partial t}, \quad (3.16)$$

Результаты моделирования тока короткого замыкания для разработанного ЭД представлены на рисунке 3.19. Согласно графику, максимальное значение тока в режиме короткого замыкания достигает 138,9 А.

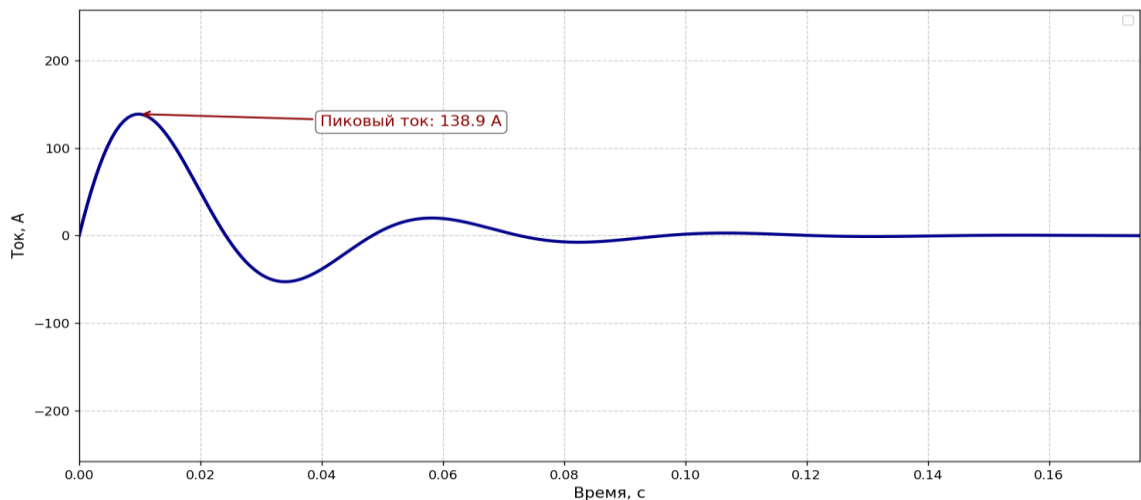


Рисунок 3.19 – Результаты расчета тока короткого замыкания для СДПМ с ферритовыми и неодимовыми магнитами

На рисунке 3.20 показано размагничивание 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.

Для ПМ необратимое размагничивание происходит, если вектор напряженности магнитного поля H внутри магнита направлен против вектора

намагниченности и его модуль превышает коэрцитивную силу H_c (для ферритов Y35 – 220 кА/м при температуре минус 40 °С) [95-97].

При численном моделировании в программном комплексе COMSOL вычисляется поле H в каждой точке магнита. Затем определяется нормированное значение

$$h_{norm} = \frac{|H|}{H_c}, \quad (3.17)$$

где $|H|$ – модуль вектора напряженности магнитного поля в данной точке магнита, кА/м;

H_c – коэрцитивная сила материала магнита (минимальная напряженность внешнего размагничивающего поля, необходимая для полного размагничивания предварительно намагниченного образца), кА/м.

Если $h_{norm} \geq 1$, то рабочая точка магнита выходит за пределы прямоугольника $(0, H_c)$ на кривой размагничивания, что означает локальное необратимое размагничивание. При $h_{norm} < 1$ магнит остается намагниченным.

На рисунке 3.20 четко видно области с $h_{norm} \geq 1$ – в этих зонах феррит размагничивается. Таким образом, по распределению нормированной напряженности можно количественно оценить степень опасности и определить необходимые меры (например, увеличить объем магнита или изменить геометрию).

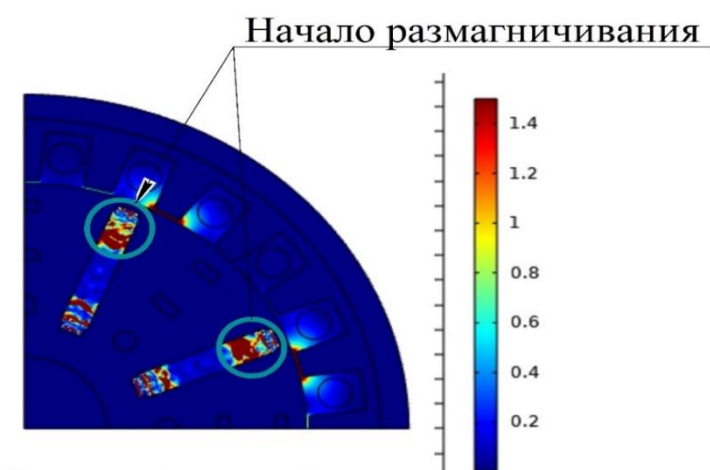


Рисунок 3.20 – Распределение нормированной напряженности магнитного поля H/H_c в ферритовом магните Y35 при температуре минус 40 °С

3.6. Выводы

1. Проведен сравнительный анализ и выбор ферритовых магнитов для замены неодимовых магнитов в СДПМ. Проведен комплексный сравнительный анализ магнитных свойств ферритовых магнитов с учетом их энергетических параметров, температурной стабильности и экономической целесообразности. На основании критериев остаточной индукции, коэрцитивной силы и температурных коэффициентов осуществлен выбор оптимального типа ферритовых магнитов для замены редкоземельных аналогов в ЭД.

2. Разработан алгоритм расчета параметров ферритовых магнитов (приложения Е, Ж). Алгоритм позволяет определить требуемые геометрические параметры (длину, ширину, глубину) и количество ферритовых магнитов, которые обеспечивают сохранение номинальных электромагнитных характеристик ЭД при замене неодимовых магнитов.

3. Построена многопараметрическая модель двигателя с ферритовыми и неодимовыми магнитами в программном комплексе COMSOL Multiphysics.

4. Рассмотрены два варианта размагничивания ферритовых магнитов: деградация при сверхнизких температурах, а также сочетание отрицательной температуры с токами КЗ.

4. СРАВНЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО И ИСХОДНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

4.1. Проверка работоспособности экспериментального электродвигателя

В рамках работы был модернизирован ротор существующего СДПМ ВМ1424ZXF мощностью 3 кВт. Рассматриваемая конструкция ротора характеризуется поверхностным расположением неодимовых ПМ. Конструктивной особенностью разработанного ротора спицевого типа является интегрированное расположение ферритовых и неодимовых магнитов, обеспечивающее их механическую фиксацию и улучшенные магнитные характеристики.

Для сборки нового ротора были изготовлены шихтованные пакеты из электротехнической стали, обеспечивающие требуемую конструктивную длину магнитопровода. На рисунке 4.1 представлены основания для сборки ротора с ферритовыми и неодимовыми магнитами для СДПМ.

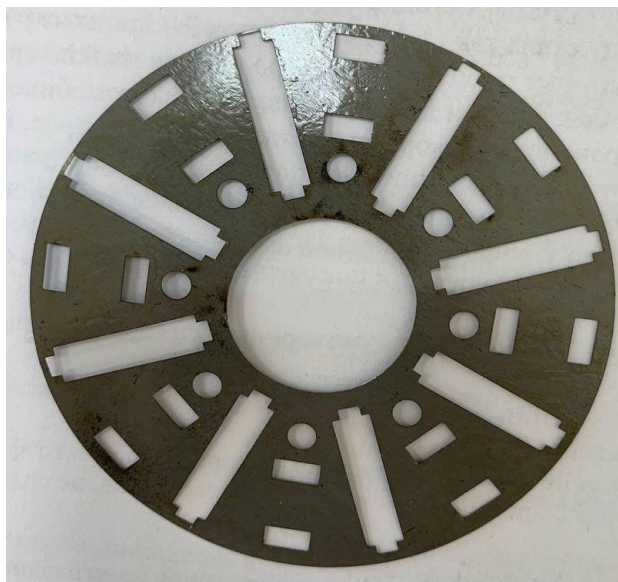


Рисунок 4.1 – Основание для сборки ротора с ферритовыми и неодимовыми магнитами

Установка ферритовых и неодимовых ПМ осуществлялась в строго определенном порядке. На рисунке 4.2 представлена модель разработанного ротора с указанием порядка установки магнитов. Для ПМ в конструкции были выбраны феррит марки Y35 и неодимовый сплав N42. Геометрические размеры магнитов составили: для ферритовых – 5,0×20,0×77,0 мм (Ш×В×Г), для неодимовых – 7,0×3,0×77,0 мм.

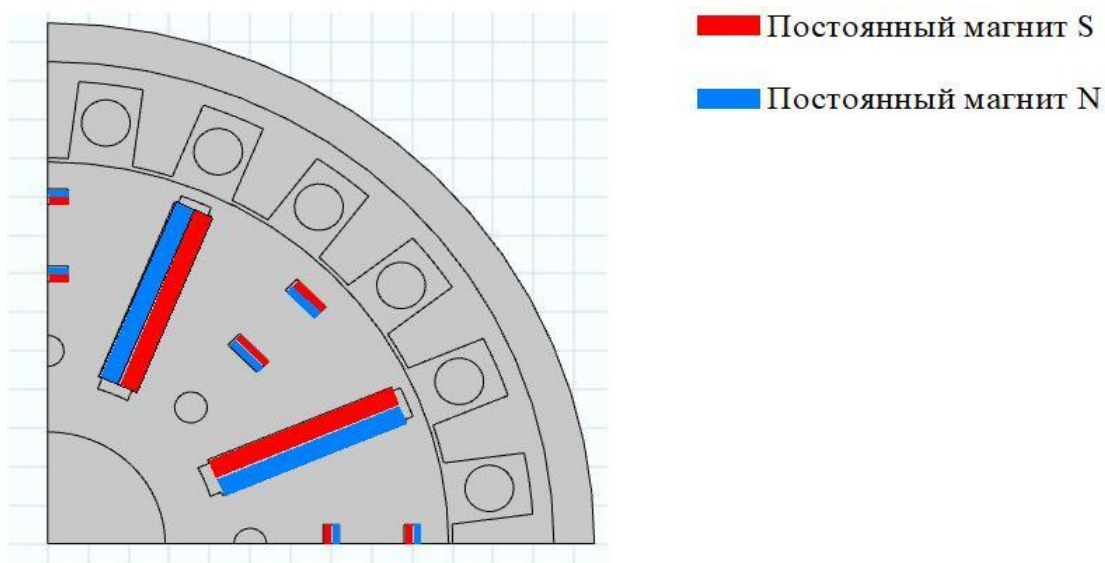


Рисунок 4.2 – Порядок установки ферритовых и неодимовых магнитов в спроектированном роторе

В исходном СДПМ ПМ (8 штук) имеют форму трапеций общим объемом 0,000062 м³. Вес ПМ составляет 462 грамма.

В модернизированной конструкции ротора использовано 24 магнита (8 ферритовых Y35 и 16 неодимовых N42), что привело к увеличению объема магнитной системы на 42 % (общим объемом 0,000087 м³) по сравнению с исходной моделью. Вес ПМ составляет 496 граммов. Общий объем ПМ увеличен на 42 %, вес увеличен на 7,3 %.

Основания ротора спроектированы с учетом чередования полярности магнитов, что обеспечивает равномерное распределение магнитного поля. Изготовленный ротор установлен на вал исходного ЭД и собран

экспериментальный ЭД. На рисунке 4.3 представлен СДПМ в сборе с экспериментальным ротором.



Рисунок 4.3 – СДПМ с экспериментальным ротором

Для экспериментальной проверки был собран стенд, в состав которого вошли: источник постоянного тока, контроллер управления, рукоятка и экспериментальный СДПМ (рисунок 4.4).

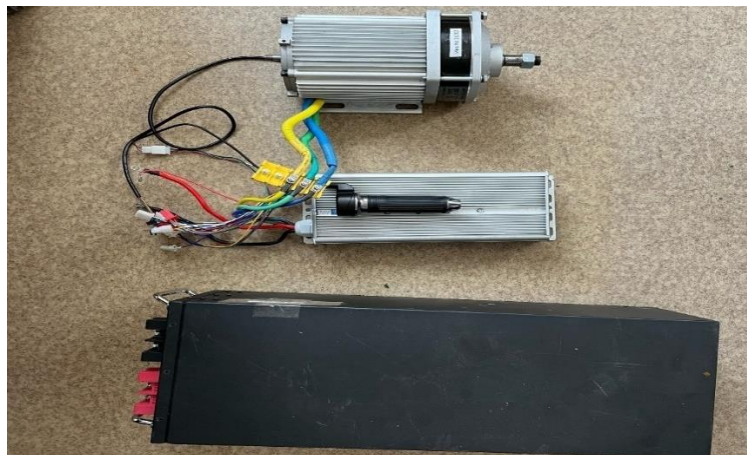


Рисунок 4.4 – Общий вид стенда

Состав стенда включает следующие ключевые компоненты:

1. Источник постоянного тока. Стенд питается от аккумуляторной батареи (АКБ) напряжением на 48 В (рисунок 4.5).



Рисунок 4.5 – Общий вид АКБ

2. Общий вид контроллера управления показан на рисунке 4.6



Рисунок 4.6 – Контроллер управления СДПМ

Характеристики контроллера:

- 1) Мощность – 3000 Вт;
- 2) Напряжение – 48...60/ 60...72 В;
- 3) КПД – 95 %;
- 4) Вес – 2,85 кг;
- 5) Габаритные размеры (Д×Ш×В) – 300×140×70 мм;
- 6) Степень защиты – IP55.

Контроллер ZH-3000/36М реализует алгоритм синусоидального векторного управления, обеспечивая плавную работу бесколлекторного ЭД. К основным компонентам контроллера относятся:

1. Силовая часть:

1.1. Силовые ключи – MOSFET-транзисторы, которые формируют трехфазное переменное напряжение. Они регулируют ток и момент через ШИМ и отключаются при перегрузке, если параметры выходят за допустимые значения. В контроллере применен транзистор IRFB4110PBF.

1.2. Драйверы ключей. В качестве драйверов используются микросхемы типа IE2104. Они управляют затворами транзисторов через гальваническую развязку.

1.3. В цепи питания силовой шины установлены сглаживающие конденсаторы, позволяющие снизить пульсацию входного напряжения.

2. Система управления:

2.1. В качестве микроконтроллера используется 32-битный процессор.

2.2. Цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) задает опорное напряжение для регулировки амплитуды тока. Аналого-цифровой преобразователь (АЦП) оцифровывает сигналы обратной связи с токовых шунтов и датчиков Холла.

3. Интерфейсы и защита:

3.1. Входы управления.

3.2. Для защиты от перегрузки по току защищают предохранители, а для защиты от перенапряжения используются TVS-диоды.

3.3. Корпус и охлаждение. Микросхемы охлаждает алюминиевый радиатор.

Контроллер работает по алгоритму синусоидального векторного управления. Алгоритм включает несколько этапов.

1. Определение положения ротора.

2. Генерация ШИМ-сигналов.

3. Управление силовыми ключами. Драйверы преобразуют ШИМ-сигналы в управляющие импульсы для MOSFET. Трехфазный мост подает на обмотки статора переменное напряжение с синусоидальной формой тока.

4. Обратная связь и коррекция. Токовые шунты предназначены для измерения фазных токов (I_A , I_B , I_C).

5. Защита и диагностика.

Преимущества контроллера ZH-3000/36M:

1. Ключевым преимуществом контроллера является снижение вибрации и шума на 30-40 % за счет синусоидальной формы тока, что обеспечивает плавный пуск и стабильную работу ЭД.

2. Высокий КПД.

3. Система обладает широкими возможностями адаптации настроек, включая программируемые параметры ограничения тока и управления его нарастанием.

Подключение контроллера:

1. К АКБ на минусовую клемму необходимо подключить черный провод большого сечения (идет от клеммы В- контроллера), к плюсовой клемме АКБ необходимо подключить красный провод большого сечения (идет от клеммы В+ контроллера).

2. Подключение к ЭД выполняется через комплектный клеммный блок, толстые желтый, зеленый, синий – фазные провода.

3. Подключение датчика Холла. Для определения углового положения ротора используется датчик Холла, который фиксирует магнитное поле ПМ. Это необходимо для синхронизации подачи тока в обмотки статора с движением ротора [98]. Также при запуске СДПМ датчик позволяет определить начальное положение ротора, предотвращая рывки или обратное вращение. Для подключения датчика

Холла в ЭД используются тонкие провода: красный, черный, синий, желтый, зеленый (клеммы на контроллере +5V, GND, H1, H2, H3).

4. Рукоятка для управления скоростью вращения СДПМ подключается тонкими проводами: красный, зеленый, черный провода (клеммы на контроллере +5V, GND, сигнал).

На рисунке 4.7 представлена рукоятка управления.



Рисунок 4.7 – Рукоятка управления

Рукоятка используется для изменения скорости вращения СДПМ, а также для включения и отключения питания СДПМ. В корпусе ручки находится датчик Холла, при повороте ручки выдается сигнал на контроллер.

Экспериментально подтверждена работоспособность экспериментального ЭД по стабильному вращению вала при подаче управляющих сигналов. Изменение скорости вращения вала при регулировке ручки управления фиксируется акустически и подтверждается визуально.

4.2. Сборка экспериментального стенда

Экспериментальный стенд состоит из стационарной (рисунок 4.8) и подвижной (рисунок 4.9) частей.



Рисунок 4.8 – Стационарная часть экспериментального стенда



Рисунок 4.9 – Подвижная часть экспериментального стенда

На рисунке 4.10 представлен общий вид экспериментального стенда.

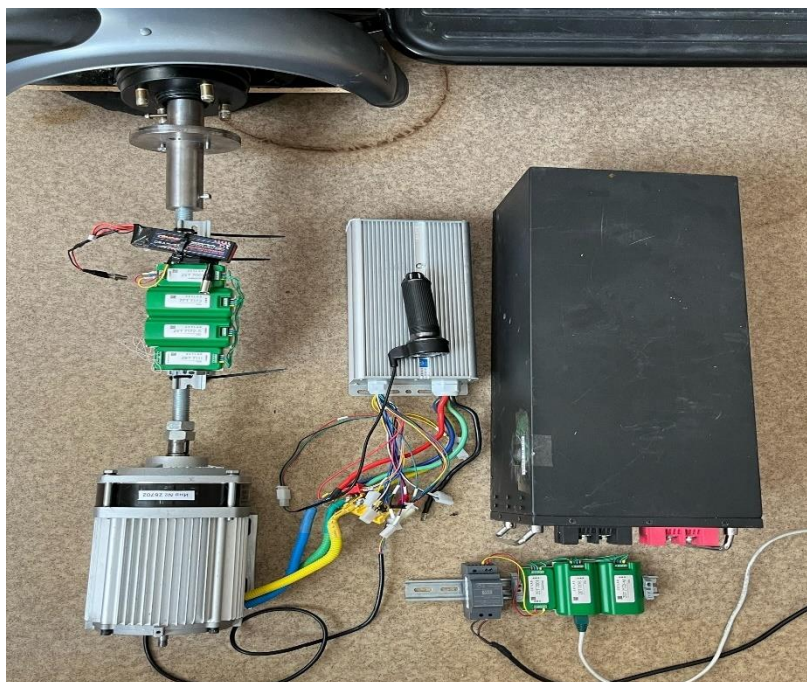


Рисунок 4.10 – Общий вид экспериментального стенда

Рассмотрим более подробно стационарную часть экспериментального стенда. Стационарная часть экспериментального стенда включает следующие компоненты:

1. Питание осуществляется от блока питания, понижающего напряжение с 220 В до 24 В. Основные параметры блока: входное напряжение $\sim 100\text{--}240$ В при токе 0,88 А и частоте 50/60 Гц, выходное напряжение 24 В при токе 1,5 А.

2. ZET 7001 соединитель измерительной линии. Данный соединитель необходим для обеспечения питания всей системы (стационарной части) от блока питания.

3. Преобразователь интерфейса ZET 7176. Преобразователь функционирует в качестве интерфейсного модуля, обеспечивающего сопряжение измерительных сетей на базе цифровых датчиков с интерфейсом CAN и вычислительной системой по сети Ethernet. На рисунке 4.11 представлена схема подключения преобразователя интерфейса ZET 7176.



Рисунок 4.11 – Схема подключения преобразователя ZET 7176

Корректная работа преобразователя ZET 7176 требует установки операционной системы Windows и специализированного программного комплекса ZETLAB. Данный программный комплекс служит для обработки сигналов, регистрируемых измерительным оборудованием ZET от первичных преобразователей. Для работы программы ZETLAB необходим электронный ключ ZETKEY, во время работы данный ключ должен быть подключен к USB разьему компьютера.

Перед запуском стенда необходимо привести IP-адреса Ethernet-портов компьютера и преобразователя к единой подсети, изменив адрес одного из устройств.

Начальный этап работы с системой предполагает обнаружение и идентификацию подключенных устройств. Это делается в диспетчере устройств ZET, в данном окне необходимо обновление страницы для того, чтобы отобразились подключаемые устройства. На рисунке 4.12 представлен список подключаемых устройств.

Устройство	Единица	Адрес	КУ вне...	Опо...	Смещ...	Т...	Уси...	Ц...	О...
ZET 7176 №d168a...		4..							
ZET7111 (03)	0 мВ/В	5..	1	0	0	DC	Нет	7...	о
Recorder (41)	0 kbps	1..	1	0	0	DC	Нет	1...	о
ZET7172-M (62)	0 dBm	1..	1	0	0	DC	Нет	2...	о
ZET7172-S (63)	0 g	1..	1	3e-05	0	DC	Нет	20	о

Рисунок 4.12 – Список подключаемых устройств

Преобразователь интерфейса ZET 7176 требуется для работы всей измерительной системы, а также для конфигурации.

4. Преобразователь интерфейса ZET 7172-M предназначен для приема сигналов с подвижной части экспериментального стенда (работает в паре с преобразователем интерфейса ZET 7172-S, установленным на подвижной части экспериментального стенда). Преимуществом преобразователей ZET 7172-M и ZET 7172-S является возможность передачи информации без физического подключения. Данное преимущество наиболее актуально в тех случаях, когда исследование проводится на перемещающихся или вращающихся объектах, где передача информации по кабелю невозможна или затруднительна. Максимальное расстояние между преобразователями ZET 7172-M и ZET 7172-S составляет 10 метров. Работа радиоканала обеспечивается совместной работой преобразователей интерфейса ZET 7172-M и ZET 7172-S. В измерительной линии преобразователь ZET 7172-M устанавливают после интерфейсного преобразователя ZET 7176. Преобразователь ZET 7172-S размещают в начале линии. Характеристики устройства указаны в приложении Б.

Рисунок 4.13 иллюстрирует схему подключения интерфейсного преобразователя ZET 7172-M и ZET 7172-S.



Рисунок 4.13 – Схема соединения преобразователя ZET 7172-M и ZET 7172-S

Рассмотрим более подробно подвижную часть экспериментального стенда:

1. АКБ предназначен для питания подвижной части экспериментального стенда.

2. ZET 7001 – соединитель измерительной линии.

3. ZET 7173 – автономный регистратор. Регистратор ZET 7173 обеспечивает автоматическую запись данных от цифровых датчиков на съемный носитель microSD. В случае отсутствия Ethernet-соединения устройство функционирует как основной сборщик информации. При нормальной работе функционирует как резервное накопительное звено. Для выгрузки записанных массивов SD-карта считывается напрямую компьютером. Характеристики устройства указаны в приложении В. Рисунок 4.14 иллюстрирует схему подключения автономного регистра.



Рисунок 4.14 – Схема подключения автономного регистратора ZET 7173

4. Преобразователь ZET 7172-S, установленный на подвижной части стенда, взаимодействует с парным устройством ZET 7172-M, смонтированным на подвижной части стенда, и служит для передачи сигналов. Преобразователь оснащен встроенным трехосевым акселерометром. Акселерометр предназначен для измерения постоянной составляющей ускорения по трем взаимно перпендикулярным осям (X, Y, Z).

Цифровой датчик ZET 7111 предназначен для измерения деформации, силы, веса, напряженности, крутящего момента и т.д. Для работы цифрового датчика необходим первичный преобразователь, представляющий собой тензорезистор. Рисунок 4.15 иллюстрирует схему подключения цифрового датчика ZET 7111.



Рисунок 4.15 – Схема подключения цифрового датчика ZET 7111

В приложении Г представлены метрологические характеристики цифрового преобразователя ZET 7111.

Крутящий момент измеряют датчиком ZET 7111 и тензорезисторами, которые регистрируют деформацию кручения вала. Для регистрации деформации используется тензометрическая полумостовая (мостовая) схема в виде изменения выходного напряжения. При использовании полумостовой схемы необходимо установить на вал два тензорезистора под углом 45° друг к другу, при этом необходимо, чтобы сопротивления двух тензорезисторов были примерно одинаковыми ($R_2 \approx R_1$). На рисунке 4.16 представлена схема подключения двух тензорезисторов при использовании полумостовой схемы.



Рисунок 4.16 – Схема подключения тензорезисторов при использовании полумостовой схемы

Чувствительность тензорезисторов при такой схеме определяется

$$S = \frac{4}{(2 \cdot K)}, \quad (4.1)$$

где K – чувствительность тензорезистора.

Применение мостовой схемы требует установки четырех тензорезисторов на вал, ориентированных под углом 90° друг к другу для компенсации температурных деформаций (на рисунке 4.17 представлена схема расположения тензорезисторов), при этом необходимо, чтобы сопротивления всех тензорезисторов были примерно одинаковыми ($R_4 \approx R_3 \approx R_2 \approx R_1$). Схема подключения четырех тензорезисторов представлена на рисунке 4.18.

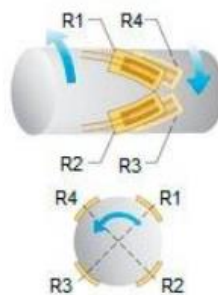


Рисунок 4.17 – Схема установки тензорезисторов на валу



Рисунок 4.18 – Электрическая схема подключения четырех тензорезисторов по мостовой схеме

Чувствительность тензорезисторов при такой схеме определяется

$$S = \frac{4}{(4 \cdot K)}, \quad (4.2)$$

Так как диаметр вала, исследуемого ЭД невелик (0,022 м), было принято решение использовать полумостовую схему с двумя тензорезисторами.

В качестве первичных преобразователей использованы тензорезисторы серии 2ФКП-350 (рисунок 4.19).

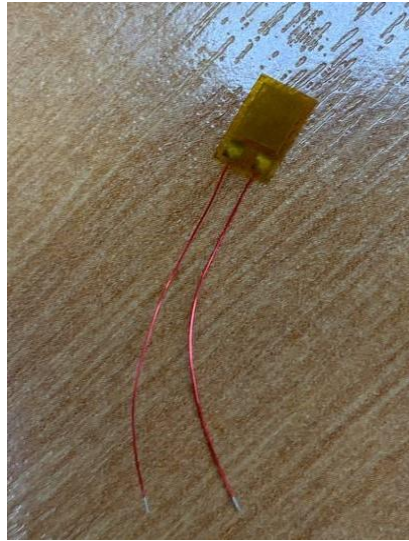


Рисунок 4.19 – Тензорезистор 2ФКП-350

Расчет крутящего момента связан с регистрируемой тензорезисторами деформацией

$$M = \Delta U \cdot S_r, \quad (4.3)$$

где ΔU – изменение выходного напряжения с тензометрических полумостовых схем;

S_r – коэффициент чувствительности.

Коэффициент чувствительности для сплошных валов определяется как

$$S_r = S \cdot E \cdot \pi \cdot D^3 / (1000 \cdot 16 \cdot (1 + \nu)), \quad (4.4)$$

где S – чувствительность схемы измерения;

E – модуль упругости для материала вала;

D – диаметр вала;

ν – коэффициент Пуассона для материала вала.

Коэффициент чувствительности для полых валов

$$S_r = S \cdot E \cdot \pi \cdot D^3 \cdot (1 - \frac{d^4}{D^4}) / (1000 \cdot 16 \cdot (1 + \nu)), \quad (4.5)$$

где d – внутренний диаметр полого вала.

Дополнительно к подвижной части стенда была подключена нагрузка (вал электроцикла). На рисунке 4.20 представлена подключаемая нагрузка (электроцикл) к подвижной части стенда. Таблица 4.1 содержит основные характеристики нагрузки.



Рисунок 4.20 – Нагрузка (электроцикл), подключаемая к подвижной части стенда

Таблица 4.1 – Основные характеристики нагрузки (электроцикла)

Параметр	Значение	Примечание
Тип транспортного средства	Электроцикл	Заднее ведущее колесо
Модель	Rutrike Пилот	-
Номинальное напряжение АКБ	48/60 В	-
Номинальная мощность приводного двигателя	650 Вт	Электродвигатель электроцикла (не испытываемый)

Окончание таблицы 4.1

Параметр	Значение	Примечание
Масса вращающихся частей (вал + колесо)	10 кг	-
Дата изготовления	Апрель 2023 г.	-
Страна производства	Китай	-

В рамках эксперимента экспериментальный ЭД обеспечивает вращение нагрузки. Исходный ЭД, используемый в качестве контрольного образца, демонстрирует стабильную работу при заданной нагрузке. Целью исследования является сравнительный анализ работоспособности экспериментального ЭД и исходной модели при воздействии идентичной нагрузки.

4.3. Проведение эксперимента

Перед началом испытаний требуется выполнить предварительную конфигурацию компонентов измерительного комплекса. Рассмотрим процедуру параметризации на примере цифрового датчика ZET 7111:

1. Подключение тензорезисторов выполнено по полумостовой схеме.
2. Значение частоты обновления данных (125 Гц) было выбрано из выпадающего списка доступных настроек программного комплекса.

3. Методика расчета:

3.1. Коэффициент передачи – применяется при наличии известной линейной статистической характеристики первичного преобразователя, используемого в комплекте с цифровым датчиком.

3.2. Калибровочная кривая – используется при отсутствии априорных данных о линейности характеристики первичного преобразователя, но при наличии в комплекте с цифровым датчиком.

4. Единица измерений. Данный параметр определяет физические величины, в которых регистрируют экспериментальные данные. В качестве базовой единицы измерения принята величина мВ/В, значение которой остается неизменным.

Аналогичным образом настраиваются все остальные элементы экспериментального стенда.

На рисунке 4.21 отображен пользовательский интерфейс с конфигурацией параметров цифрового датчика ZET 7111.

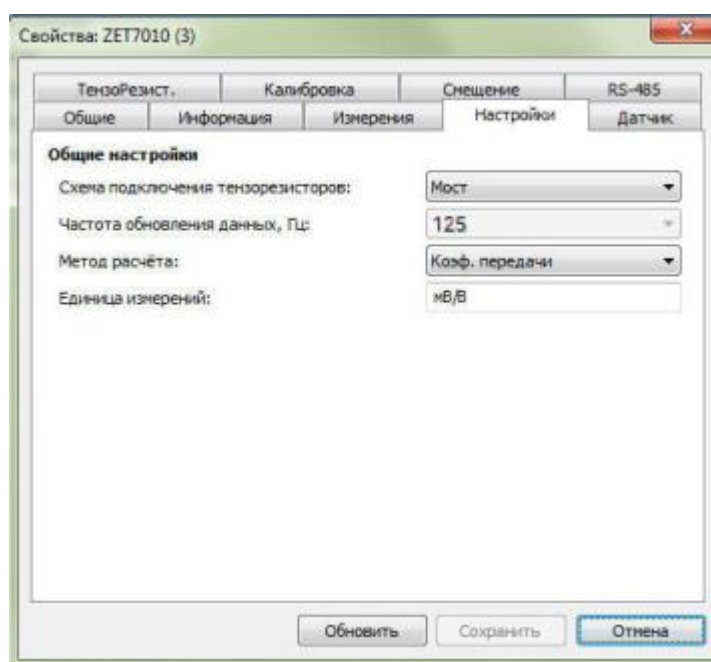


Рисунок 4.21 – Окно настройки цифрового датчика ZET 7111

Перед экспериментом рассчитывают коэффициент чувствительности S_r и вносят его значение в программу.

Коэффициент чувствительности тензорезисторов вычисляется по формуле (4.1), так как в эксперименте применяется полумостовая схема с двумя тензорезисторами (согласно документации на тензорезисторы, чувствительность тензорезисторов равна $K=1,9$)

$$S = \frac{4}{(2 \cdot 1.9)} = 1.05$$

Для расчета коэффициента чувствительности используем формулу (4.4), так как вал исследуемого ЭД сплошной. Для стального вала были приняты следующие

физико-механические характеристики: модуль упругости первого рода $E=210 \cdot 10^9$ Па, коэффициент Пуассона $\nu=0.28$. Геометрический параметр – внешний диаметр – составил $D=0.022$ м. Также задан коэффициент чувствительности тензорезистора. Подставив все значения в формулу (4.4), получим

$$S_r = \frac{1.05 \cdot 210 \cdot 10^9 \cdot 3.14 \cdot 0.022^3}{(1000 \cdot 16 \cdot (1 + 0.28))} = 361,05$$

Исходные данные и результаты вычислений заносят в проект ZetView на страницу «Настройки». Конфигурационная панель программного комплекса показана на рисунке 4.22.

SCADA-система ZETVIEW d:\Измерение крутящего момента тензо\version 5 (тарир...
Измерение крутящего момента **Настройки**

Параметры измерений

Тип вала: Диаметр вала (

Материал: Коэффициент Пуассона
Модуль Юнга (E), М

Тип схемы: Чувствительность тензорезистора (K
Исправочный коэффициент (K S

Расчетный коэффициент чувствитель

Формула крутящего момента:
 $M = \Delta U \cdot S_r$
 M – крутящий момент;
 $S_r = S \cdot E \cdot \pi \cdot D^3 / (1000 \cdot 16 \cdot (1 + \nu)) \cdot K_{Sr}$
 E – Модуль Юнга;
 D – диаметр вала;
 ν – коэффициент Пуассона для материала;
 K_{Sr} – поправочный коэффициент.
 S – чувствительность схемы измерений Полумост;
 $S = 4 / (2 \cdot K)$
 K – чувствительность тензорезистора

Рисунок 4.22 – Окно «Настройки» проекта ZetView

Из выпадающего списка «Тип вала» выбираем «Сплошной» (доступны для выбора сплошной или полый вал).

Диаметр вала всегда должен быть больше нуля. При описании геометрии полого вала в число определяющих параметров необходимо включить величину внутреннего диаметра.

Из выпадающего списка «Материал вала» выбираем «Сталь» (доступны на выбор алюминий, стекло, медь, сталь, бетон).

Тип схемы из выпадающего списка выбираем «Полумостовая» (доступны на выбор «Мостовая» и «Полумостовая» схема).

Измерительный модуль обеспечивает определение крутящего момента с использованием цифровых тензодатчиков. Работа с системой включает следующие этапы:

1. Выбор каналов из списка подключенных датчиков;
2. Интерфейс управления:
 - 2.1. Индикатор «U, мВ/В» - текущее напряжение;
 - 2.2. Индикатор « ΔU , мВ/В» - разность потенциалов;
 - 2.3. Кнопка «Сброс» - обнуление разности напряжений.
3. Выполнение измерений. Активация элемента управления «Старт» запускает процесс записи данных с выбранных измерительных каналов. Полученные данные сохраняются в директории, путь к которой задается в разделе «Конфигурация пользователя». Для визуализации и анализа записанных сигналов используется модель «Галерея сигналов», доступная через меню «Отображение» программного комплекса ZETLAB.

Процедура проведения измерений:

1. Необходимо запустить программу «Измерение крутящего момента», затем перейти в раздел параметров. Указать тип вала, его геометрические и характеристики материала.
 2. Необходимо убедиться, что напряжение («U, мВ/В») находится в диапазоне ± 2 мВ/В. Превышение значений требует проверки целостности тензометрической схемы.
 3. Необходимо выполнить калибровку нулевых показаний (« ΔU , мВ/В») перед началом экспериментов.
 4. Затем для начала измерений нажать кнопку «СТАРТ».
- На рисунке 4.23 представлено окно для проведения эксперимента.

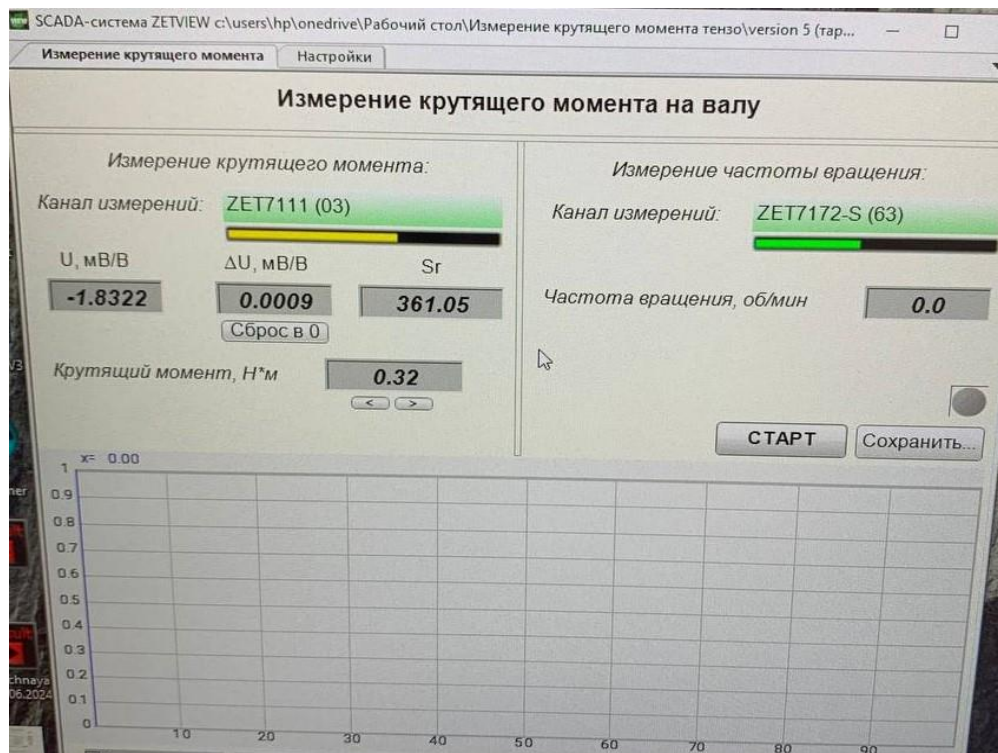


Рисунок 4.23 – Окно проведения измерений крутящего момента

4.4. Результаты эксперимента

ЭД испытывали с одинаковой нагрузкой – валом электроцикла массой 10 кг. Сравнение исходного и экспериментального СДПМ выполнено с обработкой данных в специализированном ПО.

По результатам испытаний экспериментальный СДПМ демонстрирует стабильность крутящего момента под нагрузкой. Расхождения среднеквадратичных значений между модифицированной и исходной моделью составили:

1. Опыт №1 – 18,05 %.
2. Опыт №2 – 19,29 %.
3. Опыт №3 – 16,34 %.

На рисунках 4.24 и 4.25 показана динамика изменения момента во времени для исходного СДПМ при скорости вращения 108 об/мин и экспериментального СДПМ при скорости вращения 107 об/мин.



Рисунок 4.24 – Динамика момента при скорости вращения исходного СДПМ 108 об/мин



Рисунок 4.25 – Динамика момента при скорости вращения экспериментального СДПМ 107 об/мин

Все результаты эксперимента представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Результаты проведенных экспериментов

	Исходный СДПМ				Экспериментальный СДПМ			
	$M_{\text{ср. кв.}} \cdot \text{Н} \cdot \text{м}$	$M_{\text{макс.}} \cdot \text{Н} \cdot \text{м}$	$\omega_{\text{ср. кв.}}, \text{об/мин}$	$\omega_{\text{макс.}}, \text{об/мин}$	$M_{\text{ср. кв.}} \cdot \text{Н} \cdot \text{м}$	$M_{\text{макс.}} \cdot \text{Н} \cdot \text{м}$	$\omega_{\text{ср. кв.}}, \text{об/мин}$	$\omega_{\text{макс.}}, \text{об/мин}$
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

4.5. Сравнительный анализ характеристик исходного и экспериментального СДПМ

Коэффициент мощности отражает эффективность преобразования электрической энергии в механическую [99]. Для определения КПД и коэффициента мощности экспериментального СДПМ используется программный комплекс COMSOL Multiphysics с решателем Frequency Domain.

В COMSOL Multiphysics активная мощность вычисляется через интеграл по объему

$$P_{эл} = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left(\int_V E J^* dV \right), \quad (4.6)$$

где E – вектор напряженности электрического поля;

J^* – комплексно-сопряженная плотность тока;

V – объем обмотки статора.

Реактивная мощность определяется через мнимую часть интеграла

$$Q = \frac{1}{2} \operatorname{Im} \left(\int_V E J dV \right), \quad (4.7)$$

Коэффициент мощности определяется как

$$\cos \varphi = \frac{P_{эл}}{\sqrt{P_{эл}^2 + Q^2}}, \quad (4.8)$$

где $P_{эл}$ – активная мощность;

Q – реактивная мощность.

Механическая мощность на валу определяется как

$$P_{мех} = M \cdot \omega, \quad (4.9)$$

где M – крутящий момент;

ω – угловая скорость.

Угловая скорость определяется как

$$\omega = \frac{2\pi n}{60}, \quad (4.10)$$

где n – скорость вращения.

Электрическая мощность определяется как

$$P_{эл} = U \cdot I \cdot \cos \varphi = \eta \cdot P_{мех}, \quad (4.11)$$

где η – КПД ЭД.

КПД определяется как

$$\eta = \frac{P_{\text{мех}}}{P_{\text{эл}}}, \quad (4.12)$$

Коэффициент мощности показывает, какая часть полной мощности, поступающей в электродвигатель, приходится на активную мощность, которая расходуется на совершение полезной работы и покрытие неизбежных потерь. Высокий коэффициент мощности у СДПМ означает малые реактивные токи и снижение потерь в меди [100].

В таблице 4.3 представлены расчетные значения коэффициента мощности для исходного и экспериментального СДПМ. Экспериментальный СДПМ демонстрирует более низкий $\cos\varphi$ (на 8,8 % по сравнению с исходным СДПМ), КПД (на 4,47 % по сравнению с исходным СДПМ) и момент (на 12 % по сравнению с исходным СДПМ).

Таблица 4.3 – Результаты расчета коэффициента мощности

Параметр	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

Для компенсации снижения момента экспериментального СДПМ до уровня исходного требуется увеличение тока в статоре. В таблице 4.4 приведены характеристики двигателя при токе 6,6 А.

Таблица 4.4 – Результаты расчета характеристик при повышенном токе

Параметр	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

Цель перехода к СДПМ с комбинацией ферритовых и неодимовых магнитов – снижение стоимости магнитной системы за счет частичной замены дорогих неодимовых магнитов на дешевые феррит. Масса неодимовых магнитов уменьшилась с 0,462 кг до 0,194 кг (на 57 %). При этом стоимость снижена с 2310 руб. до 970,2 руб. Ферритовые магниты массой 0,302 кг добавили 75,46 руб. Общая стоимость магнитной системы составила 1045,66 руб. Это на 54,7 % меньше, чем у магнитной системы исходного ЭД (2310 руб.). Рост тока на 1 А и снижение КПД на 14,28 % дали в 2,21 раза меньшую стоимость магнитной системы.

Увеличение тока с 5,6 А до 6,6 А (на 17,8 %) приводит к росту потерь в обмотке статора, пропорционально квадрату тока

$$\frac{P_{\text{потерь, эксп}}}{P_{\text{потерь, исх}}} = \frac{I_{\text{эксп}}^2 \cdot R}{I_{\text{исх}}^2 \cdot R} = \left(\frac{I_{\text{эксп}}}{I_{\text{исх}}} \right)^2 \approx \left(\frac{6,6}{5,6} \right)^2 \approx 1,389, \quad (4.13)$$

Следовательно, потери в меди возрастают на 38,9 %.

Установившийся перегрев обмотки относительно окружающей среды можно оценить по формуле

$$\Delta T = P_{\text{потерь}} \cdot R_{th}, \quad (4.14)$$

где ΔT – превышение температуры обмотки над температурой охлаждения среды, °С;

R_{th} – тепловое сопротивление между обмоткой и окружающей средой, °С/Вт.

Температуру обмотки статора при увеличении тока можно оценить через отношение потерь

$$\frac{\Delta T_{\text{эксп}}}{\Delta T_{\text{исх}}} = \frac{P_{\text{потерь, эксп}}}{P_{\text{потерь, исх}}} = \left(\frac{I_{\text{эксп}}}{I_{\text{исх}}} \right)^2 \approx \left(\frac{6,6}{5,6} \right)^2 \approx 1,389, \quad (4.15)$$

При номинальной нагрузке перегрев обмотки составляет не более 60 °С. После увеличения тока температура обмотки составит

$$\Delta T_2 = 60 \cdot 1,389 \approx 83,3 \text{ °С}$$

Значение абсолютной температура обмотки при температуре окружающей среды 40 °С

$$\Delta T_{\text{обм}} = 40 + 83,3 = 123,3 \text{ °С}$$

Полученное значение ниже предельной температуры для класса изоляции F (155 °С) и класса В (130 °С). Однако при длительной работе при высокой температуре окружающей среды, плохой вентиляции перегрев может приблизиться к предельному.

Меры охлаждения:

1. Увеличение поверхности теплообмена радиатора.
2. Установка вентилятора принудительного обдува.
3. Нанесение теплопроводящей пасты.

Жидкостное охлаждение целесообразно применять только в продолжительном режиме с максимальной нагрузкой при температуре окружающей среды выше 40 °С. Для предложенной конструкции ротора переработка системы охлаждения не требуется. Расчетное значение температуры обмотки 123,3 °С не превышает допустимые значения 155 °С.

4.6. Потери

Расчет потерь в СДПМ включает моделирование электромагнитных, тепловых и механических эффектов [101]. В COMSOL Multiphysics для этого используются модули Magnetic Fields и Heat Transfer. Для определения потерь в меди используются Джоулевы потери

$$P_{cu} = \sum_{k=1}^N I_k^2 R_k, \quad (4.16)$$

где I_k – ток в k -ой фазе обмотки;

R_k – активное сопротивление k -ой фазы.

Потери в стали рассчитывают с учетом:

1. Гистерезисные потери учитываются как

$$P_{hys} = k_h f B_{max}^\alpha V_{core} P_{hys}, \quad (4.17)$$

где k_h – коэффициент гистерезиса;

f – частота перемагничивания;

B_{max} – максимальная магнитная индукция;

α – степенной коэффициент;

V_{core} – объем магнитопровода.

2. Потери на вихревые токи учитываются как

$$P_{eddy} = \frac{\sigma d^2 f^2 B_{max}^2 V_{core}}{12}, \quad (4.18)$$

где σ – удельная проводимость стали;

d – толщина листа стали.

Потери в постоянных магнитах

$$P_{mag} = \int_V \frac{J_{eddy}^2}{\sigma_{mag}} dV, \quad (4.19)$$

где J_{eddy} – плотность вихревых токов;

σ_{mag} – проводимость магнита.

Механические потери (трение в подшипниках, вентиляторе) определяются как

$$P_{mech} = k_{fric} \omega^2 + C_{vent} \omega^3, \quad (4.20)$$

где k_{fric} – коэффициент трения;

C_{vent} – коэффициент вентиляционных потерь.

На рисунке 4.26 представлены потери в исходном СДПМ и экспериментальном СДПМ соответственно.

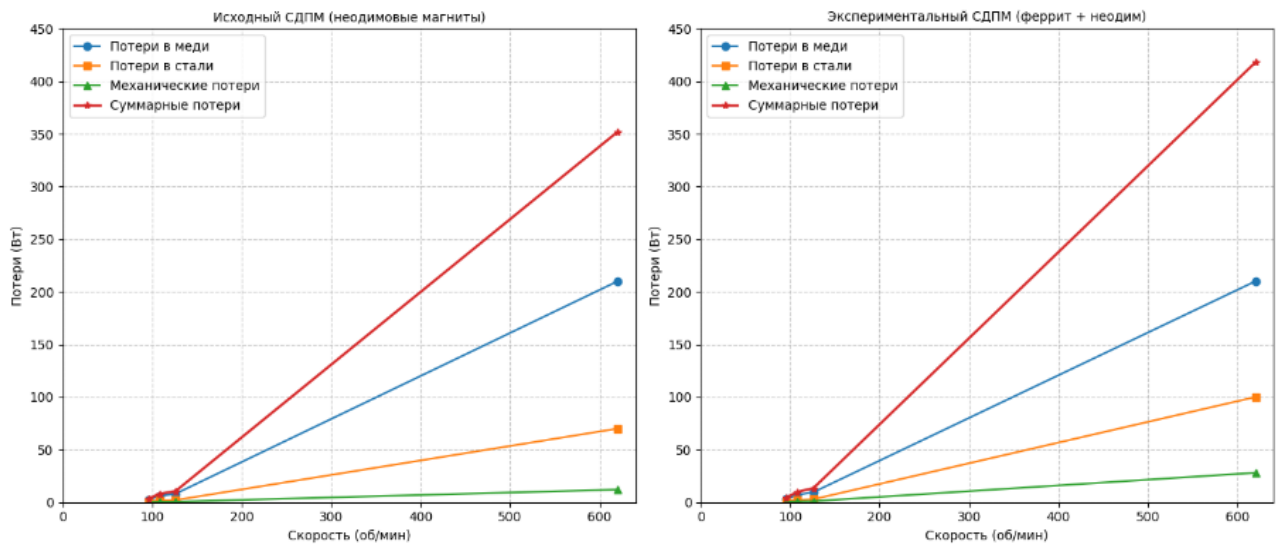


Рисунок 4.26 – Потери в исходном и экспериментальном СДПМ

Согласно рисунку 4.26:

1. Потери в меди при работе в номинальном режиме (ток статора 5,6 А) остались неизменными после модернизации, поскольку активное сопротивление обмотки не изменилось, а ток в номинальном режиме не увеличился. Сравнение характеристик в таблице 4.3 показывает, что при одном и том же номинальном токе (5,6 А) экспериментальный СДПМ имеет более низкий момент (40,68 Н·м), но потери в меди остаются такими же, как у исходного ЭД.

Для компенсации падения момента до 47 Н·м предусмотрен режим с повышенным током 6,6 А (таблица 4.4). Потери в меди при этом растут квадратично. Режим с повышенным током 6,6 А рассчитан только на кратковременные перегрузки.

2. Потери в стали экспериментального СДПМ выше, чем у исходного. Это связано с пульсациями поля на границе ферритовых и неодимовых магнитов, а также вихревыми токами в ферритах.

3. Механические потери в экспериментальном СДПМ возросли. Причина увеличения механических потерь заключается в увеличении массы магнитной системы на 7,3 %.

4.7. Сравнительный анализ стоимости магнитной системы экспериментального и исходного электродвигателя

Необходимо оценить экономический эффект предложенного решения. Для этого выполнен расчет стоимости магнитной системы исходного и экспериментального СДПМ.

Исходный СДПМ с неодимовыми магнитами NdFeB N42 размерами 24×4×77 мм (Ш×В×Г).

Экспериментальный СДПМ: ротор с неодимовыми магнитами NdFeB N42 – 16 магнитов размерами 7×3×77 мм (Ш×В×Г), ферритовые магниты Y35 – 8 магнитов размерами 5×20×77 мм (Ш×В×Г).

Расчет стоимости выполнен по формуле

$$C_{\text{магн}} = \sum_{i=1}^n (V_i \cdot \rho_i \cdot c_i) \quad (4.21)$$

где V_i – объем магнитов, м³;

ρ_i – плотность материала, кг/м³;

c_i – удельная стоимость материала, руб./кг.

Исходные данные для расчета приведены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Исходные данные для расчета

Материал	Плотность, кг/м ³	Стоимость, руб./кг
Неодимовый магнит (NdFeB N42)	7500	5000
Ферритовый магнит (Y35)	4900	250

Результаты расчета представлены в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Сравнение стоимости ПМ в конструкции СДПМ

Параметр	Исходный СДПМ	Экспериментальный СДПМ	Изменения
Неодимовые магниты			
Объем, м ³	0,000062	0,000026	-58%

Окончание таблицы 4.6

Параметр	Исходный СДПМ	Экспериментальный СДПМ	Изменения
Масса, кг	0,462	0,194	-57%
Стоимость, руб.	2310	970,2	-58%
Ферритовые магниты			
Объем, м ³	-	0,000062	-
Масса, кг	-	0,302	-
Стоимость, руб.	-	75,46	-
Общая стоимость, руб.	2310	1045,66	-54,7%

Модернизированная конструкция снизила стоимость магнитной системы на 1264,34 руб. (54,7 %). Несмотря на добавление ферритовых магнитов, общая масса магнитов увеличилась незначительно на 7,3 % (0,03388 кг).

4.8. Сравнение момента, магнитной индукции для трех конфигураций СДПМ

Для оценки эффективности разработанной конструкции СДПМ с комбинацией ферритовых и неодимовых магнитов выполнено сравнение трех вариантов исполнения ротора СДПМ:

1. Исходный СДПМ – в конструкции ротора присутствуют только неодимовые магниты (марка магнита NdFeB N42, масса неодимовых магнитов 0,462 кг).

2. Экспериментальный СДПМ с комбинацией ферритовых и неодимовых магнитов – в конструкции ротора присутствуют как неодимовые, так и ферритовые магниты (марка неодимового магнита NdFeB N42, ферритового магнита Y35, масса неодимовых магнитов 0,194 кг, масса ферритовых магнитов 0,302 кг).

3. Экспериментальный СДПМ – в конструкции ротора присутствуют только ферритовые магниты (марка ферритового магнита Y35, масса ферритовых магнитов 0,302 кг).

Расчеты проводились в программном комплексе COMSOL Multiphysics в номинальном режиме: ток статора 5,6 А, скорость вращения 620 об/мин. Результаты расчета момента для трех конфигураций СДПМ представлены на рисунке 4.27.

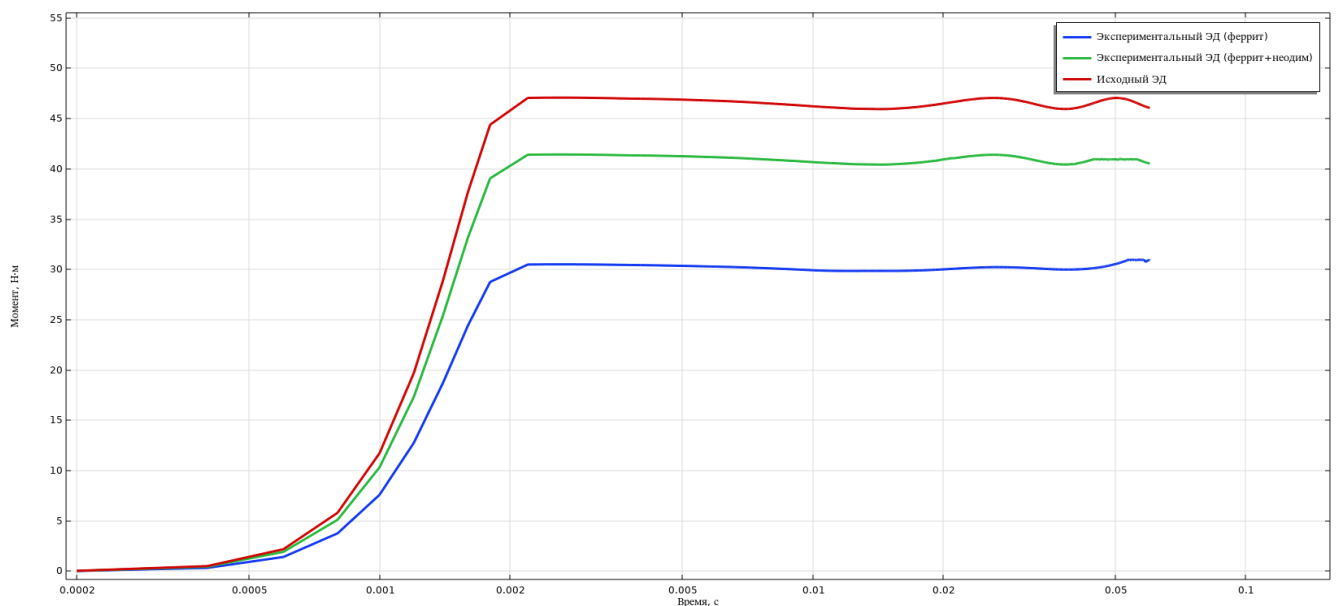


Рисунок 4.27 – Изменение момента для трех вариантов конфигураций СДПМ

Как видно из графиков момента, у СДПМ с комбинацией ферритовых и неодимовых магнитов момент снижен на 5,55 Н·м по сравнению с исходным ЭД (исходный ЭД 46,23 Н·м, экспериментальный ЭД с комбинацией ферритовых и неодимовых магнитов 40,68 Н·м). При этом масса неодимовых магнитов уменьшена на 57 % (с 0,462 до 0,194 кг), что обеспечивает существенное снижение стоимости магнитной системы.

У экспериментального ЭД с ферритовыми магнитами момент снижен на 15,27 Н·м по сравнению с исходным ЭД (исходный ЭД 46,23 Н·м, экспериментальный ЭД с ферритовыми магнитами 30,96 Н·м). Данное снижение является значительным и выходит за пределы допустимого уровня.

Таким образом, СДПМ с комбинацией ферритовых и неодимовых магнитов признается оптимальной, так как обеспечивает незначительное снижение момента при значительном снижении стоимости.

В приложении Д представлены графики магнитной индукции в воздушном зазоре в трех точках для исходного ЭД, экспериментального ЭД с комбинацией ферритовых и неодимовых магнитов, экспериментального ЭД с ферритовыми магнитами (для исходного ЭД рисунки Д.1...Д.3, для экспериментального ЭД с комбинацией ферритовых и неодимовых магнитов рисунки Д.4...Д.5, для экспериментального ЭД с ферритовыми магнитами рисунки Д.6...Д.9).

4.9. Сравнительный анализ характеристик спроектированного ротора с известным спицевой конструкцией

Чтобы оценить эффективность предложенного ротора СДПМ с комбинацией ферритовых и неодимовых магнитов выполнено сравнение его характеристик с известным спицевым СДПМ на ферритах HF085 (пиковая мощность 55 кВт, максимальная скорость 14 000 об/мин). Сравнение проведено по удельным показателям. Результаты сравнения представлены в таблице 4.7.

Таблица 4.7 – Сравнение характеристик экспериментального СДПМ с гибридной магнитной системой и известного СДПМ со спицевой конструкцией

Параметр	Экспериментальный СДПМ (гибридная система)	Известный СДПМ спицевой конструкцией
Тип магнитов	NdFeB N42 + феррит Y35	Феррит HF085
Суммарная масса магнитов, кг	0,496	2,66

Окончание таблицы 4.7

Параметр	Экспериментальный СДПМ (гибридная система)	Известный СДПМ спицевой конструкцией
Номинальный момент, Н·м	40,68	112,5
Удельный момент на массу магнитов, Н·м/кг	82,0	42,3
КПД при номинальной мощности, %	85,4	92,2
Коэффициент мощности	0,83	н/д
Стоимость магнитной системы, руб.	1045,66	665*

* - оценка по удельной стоимости феррита 250 руб./кг.

Анализ полученных результатов показывает:

- Удельная моментная отдача на килограмм магнитов экспериментального СДПМ в 1,95 раза выше, чем у известного аналога.

- Стоимость магнитной системы экспериментального СДПМ на 36 % выше, чем у известного аналога со спицевым ротором. Но удельный момент – в 1,95 раза больше. За счет этого предложенное решение дает компромисс между стоимостью и тяговыми характеристиками.

- Более низкий КПД (85,4 % против 92,2 %) и коэффициент мощности (0,83) экспериментального двигателя связаны с меньшими абсолютными размерами двигателя и отсутствием оптимизации обмотки под повышенный коэффициент заполнения паза.

Сопоставление с известным СДПМ спицевого типа 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.

4.10. Выводы

1. По результатам моделирования в COMSOL Multiphysics изготовлен экспериментальный образец СДПМ с новым ротором, содержащим комбинацию ферритовых и неодимовых магнитов.
2. Испытания подтвердили работоспособность экспериментального СДПМ.
3. Экспериментальный стенд был разработан для сравнительного анализа момента исходного и экспериментального СДПМ.
4. В программном комплексе COMSOL Multiphysics проведено сравнение КПД, коэффициента мощности, потерь исходного и экспериментального СДПМ.
5. По результатам эксперимента видно, что момент исходного СДПМ в среднем на 16,91 % больше (на 96 об/мин – на 18,22 %, на 108 об/мин – на 19,25 %, на 126 об/мин – на 13,27 % больше), чем у экспериментального СДПМ, коэффициент мощности на 8,8 % у экспериментального СДПМ меньше, чем у исходного СДПМ, КПД на 4,4 7% меньше, чем у исходного СДПМ. Суммарные потери экспериментального СДПМ превышают потери исходного СДПМ на 15,79 %. Стоимость магнитной системы экспериментального СДПМ уменьшилась на 54,7 % по сравнению с исходным СДПМ, а масса экспериментального СДПМ увеличилась на 7,3 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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.

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ

ЭМ	- электрическая машина
ЭД	- электродвигатель
ДПТ	- электродвигатель постоянного тока
ПМ	- постоянный магнит
АД	- асинхронный электродвигатель
СД	- синхронный электродвигатель
ЭДС	- электродвижущая сила
КПД	- коэффициент полезного действия
СДПМ	- синхронный электродвигатель с постоянными магнитами
СРД	- синхронный реактивный электродвигатель
ГД	- гистерезисный электродвигатель
ШД	- шаговый электродвигатель
СРДПМ	- синхронный реактивный электродвигатель с постоянными магнитами
BESO	- Bi-directional Evolutionary Structural Optimization
SIMP	- Solid Isotropic Material with Penalization
АКБ	- аккумуляторная батарея
ШИМ	- широтно-импульсная модуляция
АЦП	- аналого-цифровой преобразователь
ЦАП	- цифро-аналоговый преобразователь
КЗ	- короткое замыкание
ПИД	- пропорционально-интегрально-дифференцирующий регулятор
ПК	- персональный компьютер
CAN	- Controller Area Network – сеть контроллеров
USB	- Universal Serial Bus – универсальная последовательная шина
ГА	- генетический алгоритм

СПИСОК РАБОТ АВТОРА, ОТРАЖАЮЩИХ ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

А1. 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.

А2. 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.

А3. 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.

А4. 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.

А5. 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.

А6. Майоров, А. А. Применение в электродвигателях ферритовых магнитов / А. А. Майоров, А. Р. Сафин // Тинчуринские чтения – 2022. Энергетика и цифровая трансформация: материалы Международной молодежной научной конференции: 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.

А7. 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: материалы Международной молодежной научной конференции: 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.

А8. 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.

А9. Майоров, А. А. Модель синхронного двигателя с ферритовыми и неодимовыми магнитами / А. А. Майоров // Современные исследования: актуальные проблемы и перспективы развития: сборник статей Всероссийского научно-практической конференции (21 сентября 2026 г.). – Петрозаводск: МЦНП «НОВАЯ НАУКА», 2026. – С. 142-146.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Малюшин, С. В. Некоторые вопросы применения электродвигателей в современном машиностроении / С. В. Малюшин // Международный научный журнал Вестник науки. – 2021. – Т. 1. № 7 (40). – С. 107-110.
2. Ibrahim, I. A. The DC Motor Advantages: Key Benefits and Improvements over AC Motors / I. A. Ibrahim, M. A. Baballe // Global Journal of Research in Engineering & Computer Sciences. – 2024. – Vol. 4. No. 4. – P. 83-88.
3. Кузьмина, Ю. А. Исследование работы двигателей постоянного тока на холостом ходу / Ю. А. Кузьмина, С. Ю. Труднев // Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития: материалы Четвертой международной научно-технической конференции. – Петропавловск-Камчатский, 2022. – С. 43-45.
4. Sharma, M. A Novel Approach to Design and Analyze Fractional Order PID Controller for Speed Control of Brushless DC motor / M. Sharma, S. Sharma, J. Vajpai // Journal of Renewable Energy and Sustainable Development. – 2024. – Vol. 10. No. 2 – P. 279-293.
5. Линенко, А. В. Применение бесколлекторных двигателей постоянного тока в сельскохозяйственной технике / А. В. Линенко, П. Л. Лекомцев, В. В. Лукьянов, А. И. Азнагулов // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. – 2025. – № 1 (73). – С. 142–147.
6. Мещеряков, В. Н. Повышение энергоэффективности асинхронного электродвигателя с векторным управлением за счет регулирования продольной составляющей тока статора при неполной статической нагрузке / В. Н. Мещеряков, В. В. Данилов // Электротехнические системы и комплексы. – 2018. – № 3 (40). – С. 4-11.
7. Васильев, Д. А. Энергоэффективное управление асинхронным электродвигателем / Д. А. Васильев, Л. А. Пантелеева, П. Н. Покоев, В. А. Носков // Вестник НГИЭИ. – 2019. – № 4 (95). – С. 100-115.

8. Боннет, Я. В. Определение загрузки асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором в процессе эксплуатации / Я. В. Боннет, А. Ю. Логинов, А. Ю. Прудников, С. В. Подъячих // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. – 2024. – Т. 71. № 1 (54). – С. 17-23.

9. Вавилов, В. Е. Исследование внешнего магнитного поля асинхронного электродвигателя / В. Е. Вавилов, Д. Ю. Пашали, И. Ф. Саяхов, В. В. Айгузина // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2016. – Т. 20. № 1 (71). – С. 122-127.

10. Филин, В. А. Расчет механической характеристики асинхронного электродвигателя для работы в составе приводов буровых установок / В. А. Филин // Молодой ученый. – 2020. – № 38 (328). – С. 15-19.

11. Бубнов, А. В. Оптимизация закона управления при пуске асинхронного электропривода с фазным ротором на основе моделирования динамических режимов его работы / А. В. Бубанов, Г. В. Малыгин, В. Д. Ровкин // Омский научный вестник. – 2017. – № 2 (152). – С. 33-40.

12. Дмитриевский, В. А. Экспериментальное сравнение асинхронного и синхронного реактивного электродвигателей / В. А. Дмитриевский, В. А. Прахт, В. М. Казакбаев, А. С. Поздеев, С. Х. Ошурбеков, А. Ф. Михалицын // Труды Международной шестнадцатой научно-технической конференции «Электроприводы переменного тока». – Екатеринбург: Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, 2015. – С. 19-22.

13. Кутупов, И. И. Электроприводы с новыми типами синхронных реактивных машин / И. И. Кутупов, Д. А. Садыков, А. А. Тимеев // Вестник науки. – 2021. – Т. 3. № 7 (40). – С. 88-91.

14. Rajini, V. Comparative analysis of Synchronous Reluctance Motor with different Permanent Magnet materials / V. Rajini, V. S. Nagarajan, S. Bharath Kumar, M. Barathkumar, R. Balaji, C. J. Manojshyaam // Materials Today: Proceedings. – 2022. – Vol. 62. – P. 738-745.

15. Shah, A. A. Development of Synchronous Reluctance Motor for Industrial application / A. A Shah, V. Kumar, M. U. Keerio, M. A. Niazi, Q. Sajid // Sukkur IBA Journal of Emerging Technologies. – 2024. – Vol. 7. No. 1. – P. 15-23.

16. Enjeti, P. T. Electric Press Machine by Using Stepper Motor / P. T. Enjeti, G. Gaddam, V. S. K. Gali, S. K. R. Gurram, S. Isukala, S. S. R. Kamasani, B. R. Kunduru, L. C. Jagarlamudi // International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology. – 2022. – Vol. 10. No. 3 – P. 1251-1259.

17. Anih, L. U. Analytic synthesis of a hysteresis motor / L. U. Anih, E. S. Obe, E.O. Agbachi // Energy Conversion and Management. – 2011. – Vol. 52. No. 1. – P. 391-396.

18. Юшина, Т. И. Обзор рынка РЗМ и технологий переработки редкоземельного сырья / Т. И. Юшина, И. М. Петров, С. И. Гришаев, С. А. Черный // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2015. – № S1. – С. 577-608.

19. Карташов, Е. Ю. История открытия и области применения постоянных магнитов на основе РЗМ: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.02 / Карташов Евгений Юрьевич; [Место защиты: Северский государственной технологической академии]. Северск, 2006.

20. Буйновский, П. А. Получение магнитных сплавов на основе РЗМ и магнитов из них: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.02 / Буйновский Павел Александрович; [Место защиты: Томский политехнический университет]. – Томск, 2001.

21. Крюков, В. А. Редкоземельная промышленность – реализовать имеющиеся возможности / В. А. Крюков, В. А. Яценко, Я. В. Крюков // Горная промышленность. – 2020. – № 5. – С. 68-84.

22. Бербиренков, И. А. Тяговые двигатели на постоянных магнитах в электроприводе электромобиля / И. А. Бербиренков, В. В. Лохнин // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 318. № 4. – С. 148-150.

23. Rajini, V. Electromagnetic design, sensitivity analysis, optimization and Multiphysics capability of rare-earth-free synchronous reluctance motor for electric trike

vehicle / V. Rajini, V. S. Nagarajan, K. Harikrishnan, M. Kolhe // AIMS Energy. – 2024. – Vol. 12. No. 5. – P. 1027-1053.

24. Balta, B. A. Performance Comparison of Permanent Magnet Synchronous Motor with Different Magnet Configuration Used in Electric Vehicle / B. A. Balta, E. Aycicek, M. G. Aydeniz, H. Dedecan // Balkan Journal of Electrical and Computer Engineering. – 2025. – Vol. 12. No. 4. – P. 364-368.

25. An, Z. Design of Permanent Magnet Synchronous Motor for Electric Vehicle / Z. An // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 1881. No. 2. – Art. 022071.

26. Yang, Y. Efficiency improvement of permanent magnet synchronous motor for electric vehicles / Y. Yang, Q. He, C. Fu, S. Liao, P. Tan // Energy. – 2020. – Vol. 213. – Art. 118859.

27. Croat, J. J. Current Status and Future Outlook for Bonded Neodymium Permanent Magnets / J. J. Croat // Journal of Applied Physics. – 1997. – Vol. 81. No. 8. – P. 4804-4809.

28. Aguilar, A. R. Permanent Magnet Biased Inductors—An Overview / A. R. Aguilar, S. Mumk-Nielsen, F. B. Bendixen, Z. Ouyang, M. Duffy, H. Zhao // IEEE Open Journal of Power Electronics. – 2024. – Vol. 5. – P. 1309-1327.

29. Ghorbani, Y. Rare earth permanent magnets for the green energy transition: Bottlenecks, current developments and cleaner production solutions / Y. Ghorbani, I. M. S. K. Itlankoon, N. Dushyantha, G. T. Nwaila // Resources, Conservation and Recycling. – 2025. – Vol. 212. – Art. 107966.

30. Sergeyev, V. Magnetic Properties of Alnico Phases and Temperature Instability of Permanent Magnets / V. Sergeyev, T. Bulygina // Journal of Applied Physics. – 1969. – Vol. 40. No. 3. – P. 1307.

31. Gershov, I. Y. Properties and uses of barium ferrite ceramic magnets / I. Y. Gershov // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. – 1963. – Vol. 2. No. 3. – P. 227-234.

32. Валеев, Р. А. Оптимизация содержания кобальта как способ температурной стабилизации редкоземельных магнитов / Р. А. Валеев, В. П.

Пискорский, Д. В. Королев, Р. Б. Моргунов // Труды ВИАМ. – 2023. – № 3 (121). – С. 58-66.

33. Sebastian, T. Temperature Effects on Torque Production and Efficiency of PM Motors Using NdFeB Magnets / T. Sebastian // IEEE Transactions on Industry Applications. – 1995. – Vol. 31. No. 2. – P. 353-357.

34. Hamler, A. The use of soft magnetic composite materials in synchronous electric motor / A. Hamler, V. Gorican, B. Sustarsic, A. Sirc // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2006. – Vol. 304. No. 2. – P. 816-819.

35. Yamada, E. Separation process of dysprosium and neodymium from waste neodymium magnet / E. Yamada, H. Murakami, S. Nishihama, K. Yoshizuka // Separation and Purification Technology. – 2017. – Vol. 192. – P. 62-68.

36. 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.

37. 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.

38. 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.

39. Shen, Y. Study on the flux-weakening capability of permanent magnet synchronous motor for electric vehicle / Y. Shen, W. Wei // Mechatronics. – 2016. – Vol. 38 – P. 115-120.

40. Aryani, W. M. Review of Recovery and Purification Processes of Rare Earth Elements from Nickel-Metal Hydride Spent Batteries: Circular economy for renewable resources / W. M. Aryani, A. Manaf, E. Prasetyo, D. Susanti, A. S. Handoko, F.

Nurjaman, U. Herlina, R. Siburian, F. Bahfie // Johnson Matthey Technology Review. – 2025. – Vol. 69. No. 2. – P. 158-169.

41. Le Breton, J. -M. Ferrite Magnets: Properties and Applications / Jean-Marie Le Breton // Encyclopedia of Materials: Technical Ceramics and Glasses. – 2021. – Vol. 3. – P. 206-216.

42. Мумиков, А. Д. Линейные индукционные электрические машины / А. Д. Мумиков, Н. И. Сентюрихин // Вопросы науки и образования. – 2018. – № 8 (20). – С. 21-24.

43. Коршунов, А. И. Электромагнитный момент синхронного двигателя с постоянными магнитами / А. И. Коршунов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2015. – Т. 58. № 1. – С. 61-66.

44. Cui, W. A New IPMSM with Hybrid Rotor Structure for Electrical Vehicle with Reduced Magnet Loss / W. Cui, L. Ren, J. Zhou, Q. Zhang // IEEE Transactions on Magnetics. – 2022. – Vol. 58. No. 2. – Art. 8700406.

45. Bramerndorfer, G. Modern electrical machine design optimization: techniques trends, and best practices / G. Bramerndorfer, J. Pyrhonen, J. A. Tapia, A. Cavagnino // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2018. – Vol. 65. No. 10. – P. 7672-7684.

46. Крыжевич, Г. Б. Комплексный подход к топологической и параметрической оптимизации судовых конструкций / Г. Б. Крыжевич, А. Р. Филатов // Труды Крыловского государственного научного центра. – 2020. – № 1 (391). – С. 95-108.

47. Kuznetsov, V. Technique of Evolutionary Optimization Permanent-magnet Synchronous Motors / V. Kuznetsov, N. Zykov, M. Ivanov // Procedia Computer Science. – 2017. – Vol. 103. – P. 198-204.

48. Zhao, J. Modal Analysis and Structure Optimization of Permanent Magnet Synchronous Motor / J. Zhao, Z. Wang, H. Liu, F. Ning, X. Hong, J. Du, M. Yu // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 151856-151865.

49. Петров, Т. И. Топологическая оптимизация параметров синхронных электрических машин с постоянными магнитами в составе приводных комплексов / Т. И. Петров // Тинчуринские чтения – 2019. Энергетика и цифровая

трансформация: Международная молодежная научная конференция: в 3 т., Казань, 23-26 апреля 2019 года / Под общей редакцией КГЭУ Э. Ю. Абдуллазянова. – Казань: КГЭУ. – 2019. – Т. 1. – С. 241-244.

50. Сафин, А. Р. Аддитивное производство и оптимизация топологии магнитных материалов для электрических машин / А. Р. Сафин, R. K. Behera // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2021. – Т. 23. №3. – С. 14-33.

51. Volegov, A. S. Additive manufacturing of heavy rare earth free high-coercivity permanent magnets / A. S. Volegov, S. V. Andreev, N. V. Selezneva, I. A. Ryzhilhin, N. V. Kudrecatykh, L. Madler, I. V. Okulov // Acta Materialia. – 2020. – Vol. 188. – P. 733-739.

52. Kawamori, K. Topology optimization of continuum using hybrid method combining IESO method and SIMP method / K. Kawamori, M. Terai, M. Manabe, D. Fujii // Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ). – 2024. – Vol. 89. No. 826. – P. 1379-1384.

53. Jia, H. Level set method for structure topology optimization with asymmetrical microstructure model / H. Jia, J. Wu, L. Dong, J. Dou // IET Conference Proceedings. – 2024. – Vol. 2024. – P. 850-858.

54. Tang, P. Topology Optimization and 3D Printing of Steel Joints by SJ-BESO and FDM Method / P. Tang, W. Du, C. Wang, J. Gu // International Journal of Steel Structures. – 2024. – Vol. 24. – P. 743-757.

55. Петров, Т. И. Методы комплексной топологической оптимизации ротора синхронного электрического двигателя с постоянными магнитами: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.01 / Петров Тимур Игоревич; [Место защиты: Казанский Государственный Энергетический Университет]. – Казань, 2021.

56. 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.

57. 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.

58. Сайидов, М. К. Исследование систем векторного управления синхронного электропривода / М. К. Сайидов, Х. Ш. Муродов, Д. Ш. Мардонов, Ш. Ш. Абдуллаев // Наука и образование сегодня. – 2020. – № 6 (53). Ч. 1. – С. 6-9.

59. Lu, R. Investigation of a novel intensifying-flux hybrid excited permanent magnet machine for electric vehicles / R. Lu, Z. Q. Liu, X. Liu, B. Sun // COMPEL – The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering. – 2024. – Vol. 43. No. 4 – P. 993-1006.

60. Qu, J. Motor-Parameter-Free Solution of Optimal Harmonic Currents for Torque Ripple Reduction of PMSM Drives with Response Surface Method / J. Qu, F. Gao, P. Zhang, Y. Dong // IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics. – 2024. – Vol. 12. No. 3. – P. 2774-2786.

61. Zhou, Y. Maximum power factor of inverter for PMSM system with output filter / Y. Zhou, H. Li, K. Huang // Electric Power Automation Equipment. – 2014. – Vol. 34. No. 3 – P. 93-97.

62. Zhang, Z. -D. Magnetic structures, magnetic domains and topological magnetic textures of magnetic materials / Z. -D. Zhang // Acta Physica Sinica. – 2015. – Vol. 64. No. 6. – Art. 067503.

63. Sharipov, M. Magnetic domains and the process of technical magnetization / M. Sharipov, N. M. Ergasheva, I. Raupova, Z. Fayzieva, Z. Zokirova // EPJ Web of Conferences. – 2025. – Vol. 318. – Art. 05006.

64. Magdaleno-Adame, S. Calculation of the Remnant Magnetization and Magnetic Saturation Characteristics for Sintered NdFeB Permanent Magnets Utilizing Finite Element Transient Simulations / S. Magdaleno-Adame, G. J. Cunningham, D.

Miller, S. O'Brein // IEEE Transactions on Magnetics. – 2019. – Vol. 55. No. 12. – Art. 2101909.

65. Li, J. Diagnosis of Interturn Short Circuit Faults in PMSM: A Review of Multi-Physics Model Analysis and Machine Learning Algorithms / J. Li, Z. Nie, J. Sun, Y. Zhou, M. Cao, L. Song, S. Lu // Lecture Notes in Electrical Engineering. – 2026. – Vol. 1561 – P. 463-478.

66. Wang, Z. Phase-phase Short Circuit Fault Analysis of Permanent Magnet Synchronous Motor in Electric Vehicles / Z. Wang, J. Yu, C. Chen, Z. Guo // Energy Procedia. – 2016. – Vol. 88. – P. 915-920.

67. Chen, X. Inter-Turn Short Circuit Fault Diagnosis of PMSM / X. Chen, P. Qin, Y. Chen, J. Zhao, W. Li, Y. Mao, T. Zhao // Electronics. – 2022. – Vol. 11. No. 10. – Art. 1576.

68. Bavendiek, G. Magnetization dependent demagnetization characteristic of rare-earth permanent magnets / G. Bavendiek, J. Sabirov, F. Muller, K. Hameyer // Archives of Electrical Engineering. – 2019. – Vol. 68. No. 1. – P. 33-45.

69. Matsuura, Y. Demagnetization processes of Nd-Fe-B sintered magnets and ferrite magnets as demonstrated by soft X-ray magnetic circular dichroism microscopy / Y. Matsuura, K. Ishigami, R. Tamura, T. Nakamura // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2023. – Vol. 579. No. 7 – Art. 170854.

70. Mirzaei, M. 3D Analysis of Magnet Eddy Current Losses in High-Power Axial Flux Machines / M. Mirzaei // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. – 2025. – Vol. 61. No. 3. – P. 6647-6656.

71. Найдышева, А. А. Основные формулы для вычисления потерь в синхронном электродвигателе с постоянными магнитами / А. А. Найдышева, Е. Ю. Федоров // Технологии и техника: Пути инновационного развития. – 2023. – С. 364-366.

72. Zeaiter, A. H. Determination of electric motor losses and critical temperatures through an inverse approach / A. H. Zeaiter, E. Videcoq, M. Fenot // Electrical Engineering. – 2021. – Vol. 103. – P. 621-631.

73. Dlala, E. On the Importance of Incorporating Iron Losses in the Magnetic Field Solution of Electrical Machines / E. Dlala, A. Belahcen, A. Arkkio // IEEE Transactions on Magnetics. – 2010. – Vol. 46. No. 8. – P. 3101-3104.

74. Сафин, А. Р. Тяговые электродвигатели для электромобилей, не содержащие редкоземельные элементы / А. Р. Сафин, R. K. Behera // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2021. – Т. 13. № 1. – С. 16-36.

75. Liu, C. Quantitative comparison of low-cost electrical machines with soft magnetic composite and ferrite magnet materials / C. Liu, F. Yang, W. Zhang, Y. Wang // International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics. – 2023. – Vol. 72. No. 4. – P. 361-385.

76. Woo, J. -H. Electromagnetic Characteristic Analysis of High-Speed Motors With Rare-Earth and Ferrite Permanent Magnets Considering Current Harmonics / J. -H. Woo, T. -K. Bang, H. -K. Lee, K. -H. Kim, S. H. -Shin, J. -Y. Choi // IEEE Transactions on Magnetics. – 2021. – Vol. 57. No. 2. – Art. 8201805.

77. Niu, L. Rotor topology optimization and electromagnetic performance analysis of interior permanent magnet synchronous motors for electric vehicle applications / L. Niu, M. Zhang // The Journal of Engineering. – 2023. – Vol. 2023. – P. 1-19.

78. Rahman, A. Characteristics Analysis of Consequent-Pole Ferrite Magnet Vernier Machine Using Novel Equivalent Magnetic Circuit / A. Rahman, B. Kim // IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics. – 2021. – Vol. 10. No. 2. – P. 1823-1833.

79. Li, C. An Investigation of the Magnetic Properties and Structures of Sr-Ferrite/NdFeB Hybrid Magnets with Cold Pressing and SPS Methods / C. Li, H. Zhang, D. Guo, X. Ren, Y. Ma // Journal of Electronic Materials. – 2024. – Vol. 53. – P. 1763-1772.

80. Константинов, В. Д. Определение параметров постоянных магнитов из закритических магнитотвердых материалов / В. Д. Константинов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2005. – Т. 9. № 49. – С. 87-91.

81. Lv, Y. Investigation on Saturated Magnetization Characteristics of Anisotropic NdFeB Permanent Magnet in Post-Assembly Magnetization Application / Y. Lv, Y. Liu, Z. Tu, R. Chen, Y. Ye, L. Li // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2024. – Vol. 34. No. 5. – Art. 8800406.

82. Li, S. Electromagnetic Analysis of V-type Interior Permanent Magnet Synchronous Motor for Vehicle / S. Li, L. Zhou // Lecture Notes in Electrical Engineering. – 2023. – Vol. 1048. – P. 87-95.

83. Wang, L. Multi-Objective Optimization Design of a Segmented Asymmetric V-Type Interior Permanent Magnet Synchronous Motor / L. Wang, X. Zhang, J. Wu, M. Wang, W. Hu, H. Geng, X. Pang // IEEE Transactions on Magnetics. – 2024. – Vol. 61. No. 1. – Art. 8200312.

84. Kazemisangdehi, S. Novel Parallel Hybrid Rare-Earth and Ferrite Magnets in V-Spoke Interior PM Synchronous Machine / S. Kazemisangdehi, Z. Q. Zhu, Y. Zhou, H. Liu, L. Chen, L. Yang // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2025. – Vol. 61. No. 2 – P. 2972-2982.

85. Guo, S. Optimal Design of an Interior Permanent Magnet Synchronous Motor for Electric Vehicle Applications Using a Machine Learning-Based Surrogate Model / S. Guo, X. Su, H. Zhao // Energies. – 2024. – Vol. 17. No. 16. – Art. 3864.

86. Said, B. Magnetic rotor breakage study in permanent magnet synchronous motor at COMSOL multiphysics and fault detection using machine learning / B. Said, L. Mazouz, N. T. Tayed, Y. Ozupak, A. Regaz // Studies in engineering and exact sciences. – 2024. – Vol. 5. No. 1. – P. 603-618.

87. Тинников, П. Э. Моделирование синхронного двигателя с постоянными магнитами при неисправностях в обмотках статора / П. Э. Тинников // Современная школа России. Вопросы модернизации. – 2021. – № 7-2 (37). – С. 85-88.

88. Басенко, В. Р. Создание компьютерной модели синхронного двигателя для реализации проекта «Создание серии электродвигателей с модернизированным ротором для электротранспорта малой мощности» / В. Р. Басенко, Т. И. Петров, А. Р. Ибрагимова // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2024. – Т. 26. № 2. – С. 46-54.

89. Мичурин, Р. А. Моделирование работы синхронного двигателя с постоянными магнитами в среде Simulink / Р. А. Мичурин // Электронные информационные системы. – 2017. – № 3 (14). – С. 23-32.

90. Onah, C. Modeling of an Interior Permanent Magnet Synchronous Motor with Two Independent Stator Windings using Rotor Reference Frame / C. Onah, E. S. Obe, J. U. Agber // IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering. – 2023. – Vol. 15. No. 1. – P. 20-27.

91. Vaez-Zadeh S. Enhanced Modeling of Linear Permanent-Magnet Synchronous Motors / S. Vaez-Zadeh, A. H. Isfahani // IEEE Transactions on Magnetics. – 2007. – Vol. 43. No. 1. – P. 33-39.

92. Luo, G. A Novel Nonlinear Modeling Method for Permanent-Magnet Synchronous Motors / G. Luo, R. Zhang, Z. Chen, W. Tu, S. Zhang, R. Kennel // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2016. – Vol. 63. No. 10. – P. 6490-6498.

93. Qiu, H. Research on the Mechanism of Demagnetization Limitation in Permanent Magnet Servo Motors / H. Qiu, B. Tang, Q. Duan, W. Yu, C. Yang, G. Cui // Recent Advances in Electrical & Electronic Engineering. – 2018. – Vol. 11. No. 3. – P. 310-321.

94. Жилейкин, М. М. Диагностика межвитковых коротких замыканий в фазных обмотках статора синхронных электродвигателей с постоянными магнитами / М. М. Жилейкин, А. В. Климов, Б. К. Оспанбеков, С.С. Смирнов // Известия МГТУ «МАМИ». – 2023. – Т. 17. № 4. – С. 411-422.

95. Zhu, Y. Temperature Field of Demagnetization Fault in Permanent Magnet Synchronous Generator / Y. Zhu, X. Li, M. Zhang, Z. Zhang, Z. Ren // International Journal of Heat and Technology. – 2022. – Vol. 40. No. 1 – P. 289-296.

96. Tang, X. Demagnetization study for line-start permanent magnet synchronous motor during starting process / X. Tang, X. Wang, Y. Li, Y. Yang, R. Zhang // Zhongguo Dianji Gongcheng Xuebao/Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering. – 2015. – Vol. 35. No. 4. – P. 961-970.

97. Kim, K. The Shape Design of Permanent Magnet for Permanent Magnet Synchronous Motor Considering Partial Demagnetization / K. Kim, S. -B. Lim, D. -H.

Koo, J. Lee // IEEE Transactions on Magnetics. – 2006. – Vol. 42. No. 10. – P. 3485-3487.

98. Zuo, S. Analysis of torque ripple and torsional considering Hall mounting errors in permanent magnets synchronous motors for light EVs / S. Zuo, Z. Huang // Electrical Engineering. – 2023. – Vol. 105. No. 2. – P. 1111-1123.

99. Ваганов, М. А. КПД и коэффициент мощности синхронного реактивного двигателя / М. А. Ваганов, И. И. Скобеев // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2017. – №5. – С. 44-52.

100. Ахмадалиев, У. А. Повышение коэффициента мощности электроприводов переменного тока / У. А. Ахмадалиев, М. Абдуллаев // Universum: технические науки. – 2019. – № 11 (68). – С. 86-89.

101. Gong, T. Eddy Current Losses in Superconducting Secondary of a Linear Synchronous Motor: Calculations and Measurements / T. Gong, G. Ma, R. Wang // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 2022. – Vol. 37. No. 3. – P. 1895-1906.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А. Описание программы для определение геометрических размеров ферритовых магнитов синхронных двигателей с постоянными магнитами с заменой редкоземельных магнитов

1. Программа для расчета геометрических размеров ПМ в СДПМ, устанавливаемых взамен редкоземельных ПМ.

- Программа 1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025663488 от 28 мая 2025 г. «Программа расчета геометрических размеров ферритовых магнитов на основе оптимизации ротора редкоземельных магнитов».

2. Функциональное назначение. Программа выполняет комплексную оптимизацию ферритовых магнитов в СДПМ с учетом геометрических ограничений из DXF-файлов. Оптимизируются масса и потери, параллельно рассчитываются магнитный поток и КПД. Программа автоматизирует проектирование роторов СДПМ и позволяет заменить NdFeB на ферритовые аналоги, сохранив рабочие характеристики двигателя.

3. Этапы работы программы:

3.1. Разработка геометрической модели ЭД. Необходимо создать максимально детализированную геометрическую модель ЭД в формате dxf и загрузить ее в программный комплекс COMSOL Multiphysics (рисунок А.1). Для уменьшения времени расчета достаточно будет создать четвертую часть модели ЭД.

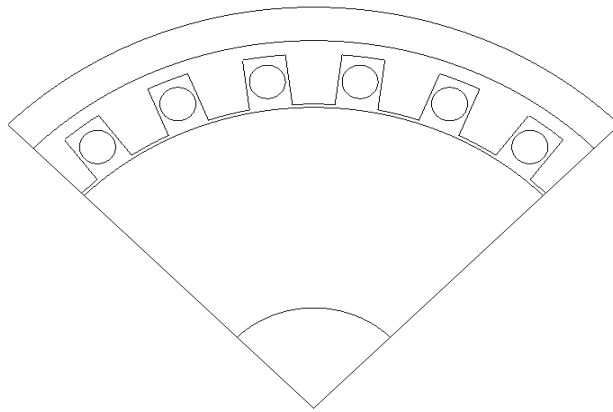


Рисунок А.1 – Пример геометрической модели СДПМ для загрузки в COMSOL Multiphysics

3.2. Конфигурация констант (рисунок А.2).

3.2.1. Параметры ГА: размер сетки – 2000 элементов, популяция – 10 особей, вероятность мутации – 1 %.

3.2.2. Физические ограничения: диапазон крутящего момента – 1-100 Н·м, температура – 60-120 °С, прочность – 100-500 МПа, стоимость – 20 тыс. – 80 тыс. рублей.

3.2.3. Тип материалов: 10 вариантов (0 – сталь, 1-4 – неодимовые магниты разных направленностей, 5-8 – ферритовые магниты разных направленностей, 9 – воздух).

3.2.4. Весовые коэффициенты: для крутящего момента – 0,4, для стоимости – 0,4, для температуры – 0,1, для прочности – 0,1.

```

MIN_TORQUE = 1
MAX_TORQUE = 100
MIN_TEMP = 60
MAX_TEMP = 120
MIN_STRENGTH = 100
MAX_STRENGTH = 500
MIN_COST = 20000
MAX_COST = 80000
NEO_PRICE = 5000 # руб/кг
FERRITE_PRICE = 250 # руб/кг
NEO_DENSITY = 7500 # кг/м³
FERRITE_DENSITY = 4800 # кг/м³
CELL_VOLUME = 1e-5 # м³ (объем одного элемента сетки)

# Типы материалов
STEEL = 0
NEO_N = 1 # Неодимовый магнит (север)
NEO_S = 2 # Неодимовый магнит (юг)
NEO_W = 3 # Неодимовый магнит (запад)
NEO_E = 4 # Неодимовый магнит (восток)
FERRITE_N = 5 # Ферритовый магнит (север)
FERRITE_S = 6 # Ферритовый магнит (юг)
FERRITE_W = 7 # Ферритовый магнит (запад)
FERRITE_E = 8 # Ферритовый магнит (восток)
AIR = 9

```

Рисунок А.2 – Ввод констант в программу

3.3. Проведение ГА (рисунок А.3).

3.3.1. Инициализация популяции (создание случайных особей).

3.3.2. Оценка пригодности. Для каждой особи вычисляется целевая функция с весовыми коэффициентами, затем параметры нормализуются.

3.3.3. Селекция: турнирный отбор, четыре особи.

3.3.4. Скрещивание: двухточечный кроссовер.

3.3.5. Мутация – с вероятностью 1 % случайным образом.

3.3.6. Элитизм – две лучшие особи переходят в следующее поколение без изменений.

3.3.7. Критерий остановки: стагнация (за 5 поколений не происходит улучшения популяции).

```
# ===== ГЕНЕТИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ =====
def calculate_fitness(characteristics: Dict[str, float]) -> float:
    """Расчет целевой функции на основе характеристик"""
    # Нормализация характеристик
    F1 = (characteristics['torque'] - MIN_TORQUE) / (MAX_TORQUE - MIN_TORQUE)
    F2 = 1 - (characteristics['temperature'] - MIN_TEMP) / (MAX_TEMP - MIN_TEMP)
    F3 = (characteristics['strength'] - MIN_STRENGTH) / (MAX_STRENGTH - MIN_STRENGTH)
    F4 = (characteristics['cost'] - MIN_COST) / (MAX_COST - MIN_COST)
    # Целевая функция
    fitness = (ALPHA * F1 +
               BETA * F2 +
               GAMMA * F3 -
               DELTA * F4)
    return fitness
class GeneticOptimizer:
    def __init__(self, comsol_simulator: COMSOLSimulator):
        self.simulator = comsol_simulator
        self.population = []
        self.fitness_history = []
        self.best_individual = None
        self.best_fitness = -np.inf
        self.best_characteristics = None
        self.stagnation_counter = 0
    def create_individual(self) -> np.ndarray:
        """Создание случайной особи"""
        return np.random.randint(0, 10, GRID_SIZE)
    def create_population(self) -> List[np.ndarray]:
        """Инициализация начальной популяции"""
        return [self.create_individual() for _ in range(POPULATION_SIZE)]
    def evaluate_population(self):
```

Рисунок А.3 – Генетический алгоритм

3.4. Для устранения «шумов» в полученной оптимизированной конструкции ротора СДПМ необходимо применить алгоритм «очистки» (рисунок А.4).

```
# Правило 1: Заполнение внутренних полостей (AIR)
for i in range(40):
    for j in range(50):
        if not visited[i, j] and cleaned[i, j] == AIR:
            # Поиск связной области воздуха
            region = []
            queue = deque([(i, j)])
            local_visited = np.zeros((40, 50), dtype=bool)
            local_visited[i, j] = True

            while queue:
                x, y = queue.popleft()
                region.append((x, y))

                # Если область слишком большая, прерываем поиск
                if len(region) > 3:
                    break

                for dx, dy in directions:
                    nx, ny = x + dx, y + dy
                    if (0 <= nx < 40 and 0 <= ny < 50 and
                        not local_visited[nx, ny] and
                        cleaned[nx, ny] == AIR):
                        local_visited[nx, ny] = True
                        queue.append((nx, ny))

# Правило 2: Удаление изолированных включений
for i in range(40):
    for j in range(50):
        if not visited[i, j] and cleaned[i, j] != AIR:
            current_material = cleaned[i, j]

            # Поиск связной области
            region = []
            queue = deque([(i, j)])
            local_visited = np.zeros((40, 50), dtype=bool)
            local_visited[i, j] = True

            while queue:
                # Обработка только малых областей (1-3 ячейки)
                if 1 <= len(region) <= 3:
                    # Собираем материалы границы
                    border_materials = []
                    for (x, y) in region:
                        for dx, dy in directions:
                            nx, ny = x + dx, y + dy
                            if (0 <= nx < 40 and 0 <= ny < 50 and
                                cleaned[nx, ny] != current_material and
                                not local_visited[nx, ny]):
                                border_materials.append(cleaned[nx, ny])
```

Рисунок А.4 – Алгоритм «очистки»

Алгоритм «очистки» включает два этапа

3.4.1. Первый – устранение воздушных полостей (пустот). Первый этап «очистки» убирает воздушные включения внутри сплошных материалов ротора. Работа начинается с того, что алгоритм поочередно просматривает все ячейки расчетной сетки. При обнаружении на сетке элемента «воздух» (9 - воздух)

алгоритм запускает анализ связанной области. Основу анализа составляет поиск в ширину (BFS, Breadth First Search). Этот алгоритм обходит соседние ячейки уровня за уровнем, сначала все ближайшие, затем – следующий слой. С помощью метода поиска в ширину исследуется 8 возможных направлений (включая диагональные) для выявления всех смежных элементов. Данный подход гарантирует обнаружение даже сложных конфигураций воздушных полостей. Ключевым условием является то, что алгоритм намеренно игнорирует связанные области воздуха размером которых превышает 3 элемента. Затем происходит тщательный анализ границ ячейки с воздухом. Алгоритм просматривает все ячейки на границе с воздушной полостью и определяет, из каких материалов они состоят. Замена срабатывает только в одном случае, если все граничные ячейки – из одного и того же материала. Если все элементы границы принадлежат одному материалу (и это не воздух), происходит замена всех элементов данной связанной воздушной полости на этот материал.

3.4.2. Второй этап «очистки» удаляет небольшие связанные области из одного материала, полностью окруженные другими материалами. Алгоритм сканирует все невоздушные ячейки сетки ротора. Если ячейка содержит магнитный материал, то запускается поиск связанной области из того же материала.

Применение двух этих этапов «очистки» дает результат, недостижимый для каждого по отдельности.

3.5. Получение результатов.

Приложение Б. Технические характеристики преобразователя интерфейса

Таблица Б.1 – Технические характеристики преобразователи интерфейса ZET 7172-M и ZET 7172-S.

Параметр	Значение	
	ZET 7172-M	ZET 7172-S
Преобразователь интерфейса	Радиоканал → CAN	CAN → Радиоканал
Интерфейс передачи данных по радиоканалу	ZigBee	ZigBee
Протокол обмена по радиоканалу	IEEE 802.15.4	IEEE 802.15.4
Радиодиапазон, ГГц	2,4	2,4
Максимальная частота передачи данных, Гц	600	600
Радиус действия (при прямой видимости), м	10	10
Тип встроенного первичного преобразователя	-	Трехосевой акселерометр
Измеряемый параметр	-	Линейное ускорение
Частотный диапазон измерения линейного ускорения, Гц	-	400
Интерфейс подключения к цифровым датчикам	CAN 2.0	CAN 2.0
Диапазон напряжения питания, В	9...24	9...24
Потребляемая мощность, Вт	1	1
Габаритные размеры, мм	87x50x24	87x50x24

Приложение В. Технические характеристики автономного регистра

Таблица В.1 – Технические характеристики автономного регистратора ZET 7173

Параметр	Значение
Файловая система	FAT32
Формат внешней памяти	microSD и microSDCH
Максимальный объем внешней памяти, Гб	32
Максимальная суммарная частота регистрации данных, Гц	10000
Интерфейс подключения к цифровым датчикам	CAN 2.0
Интерфейс подключения к ПК	USB
Скорость чтения данных с внешней памяти на ПК, Мбайт/с	не менее 10
Диапазон напряжения питания, В	9...24
Потребляемая мощность, Вт	1,6
Габаритные размеры, мм	87x50x24
Масса, г	55

Приложение Г. Метрологические характеристики цифрового преобразователя

Таблица Г.1 – Метрологические характеристики цифрового преобразователя
ZET 7111

Параметр	Значение
Измеряемая величина	Деформация, микронапряжение (механическое напряжение), крутящий момент, сила
Диапазон измерений электрических напряжений	От минус 7 до плюс 7 мВ/В
Диапазон для синфазного сигнала	От 0 до 4,5 В
Порог чувствительности (минимальное значение, на которое различаются две последовательно измеренные величины)	0,0001 мВ/В
Абсолютная погрешность измерения (от верхнего предела диапазона измерений)	0,05 %
Относительная погрешность измерения (от измеряемой величины)	0,05 %
Дополнительная погрешность измерения (от измерения температуры)	0,05 %/10 °С
Дополнительная погрешность измерения (временной дрейф нуля)	0,05 %/10 мин

Окончание таблицы Г.1

Параметр	Значение
Диагностика параметров	Контроль питания, контроль качества данных, контроль целостности моста или полумоста, калибровка измерительной части

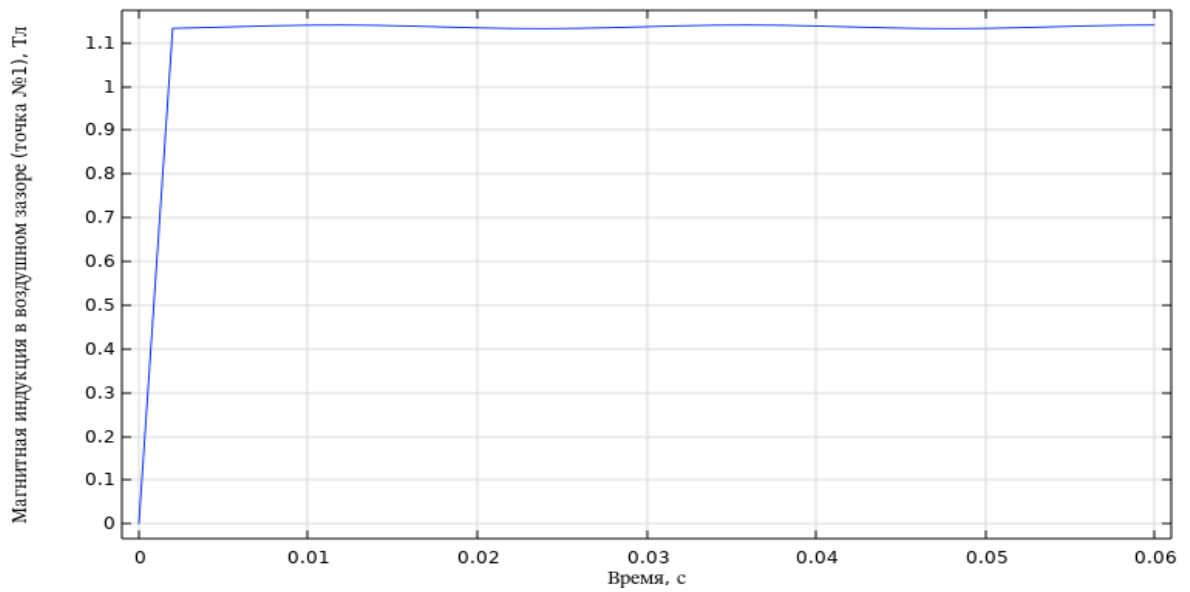
Приложение Д. Графики магнитной индукции в воздушном зазоре

Рисунок Д.1 – Магнитная индукция в воздушном зазоре (в точке №1) исходный
ЭД

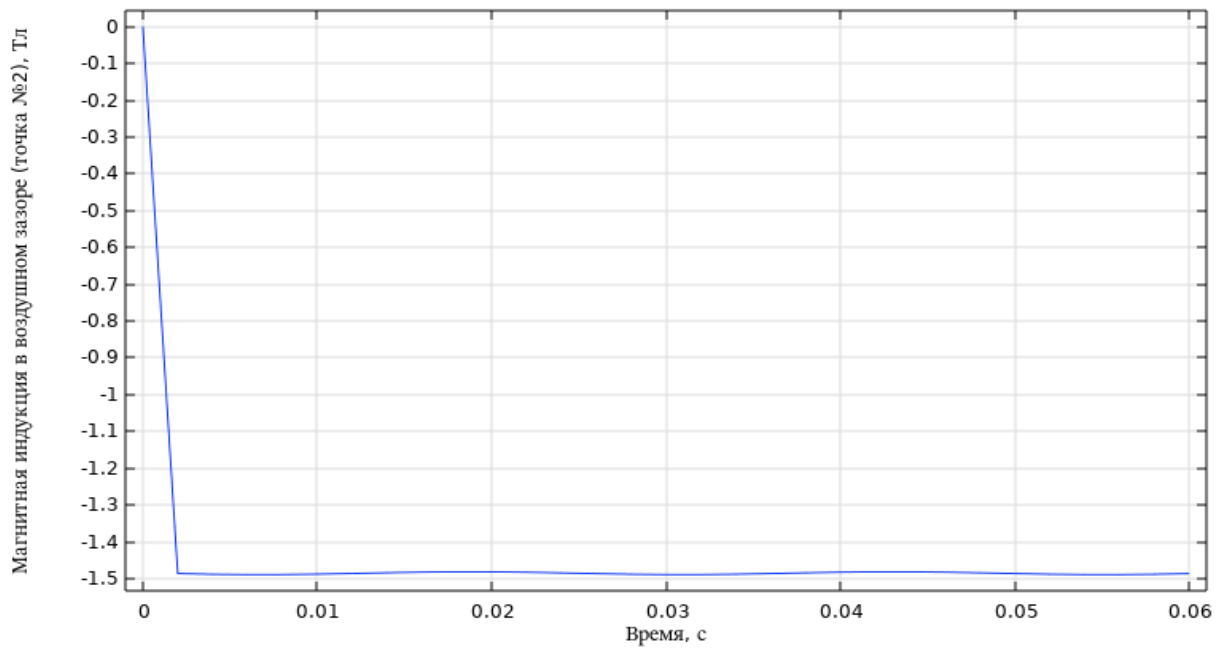


Рисунок Д.2 – Магнитная индукция в воздушном зазоре (в точке №2) исходный
ЭД

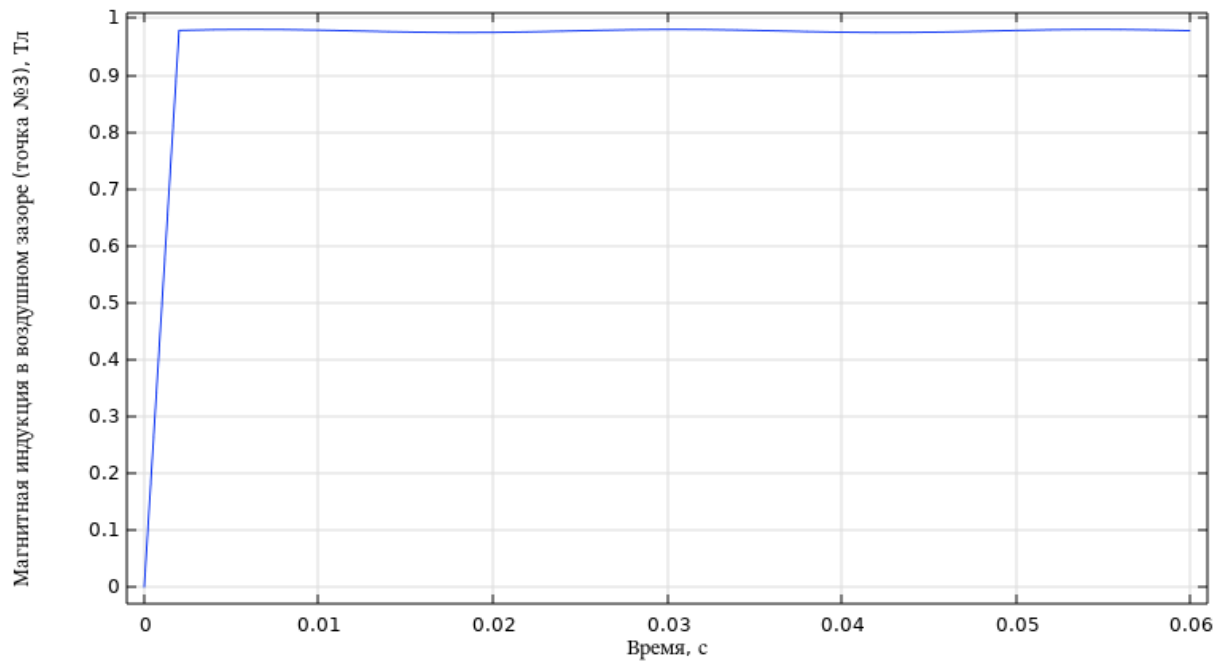


Рисунок Д.3 – Магнитная индукция в воздушном зазоре (в точке №3) исходный
ЭД

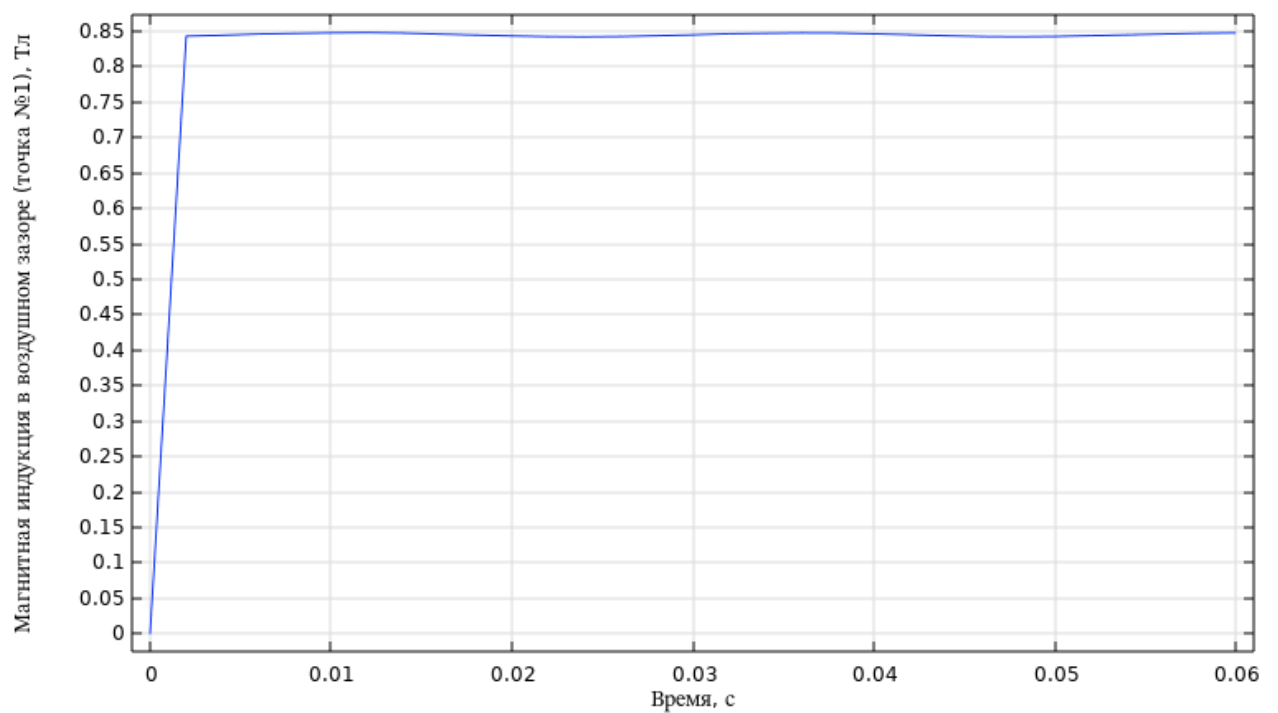


Рисунок Д.4 – Магнитная индукция в воздушном зазоре (в точке №1)
экспериментальный ЭД с комбинацией ферритовых и неодимовых магнитов

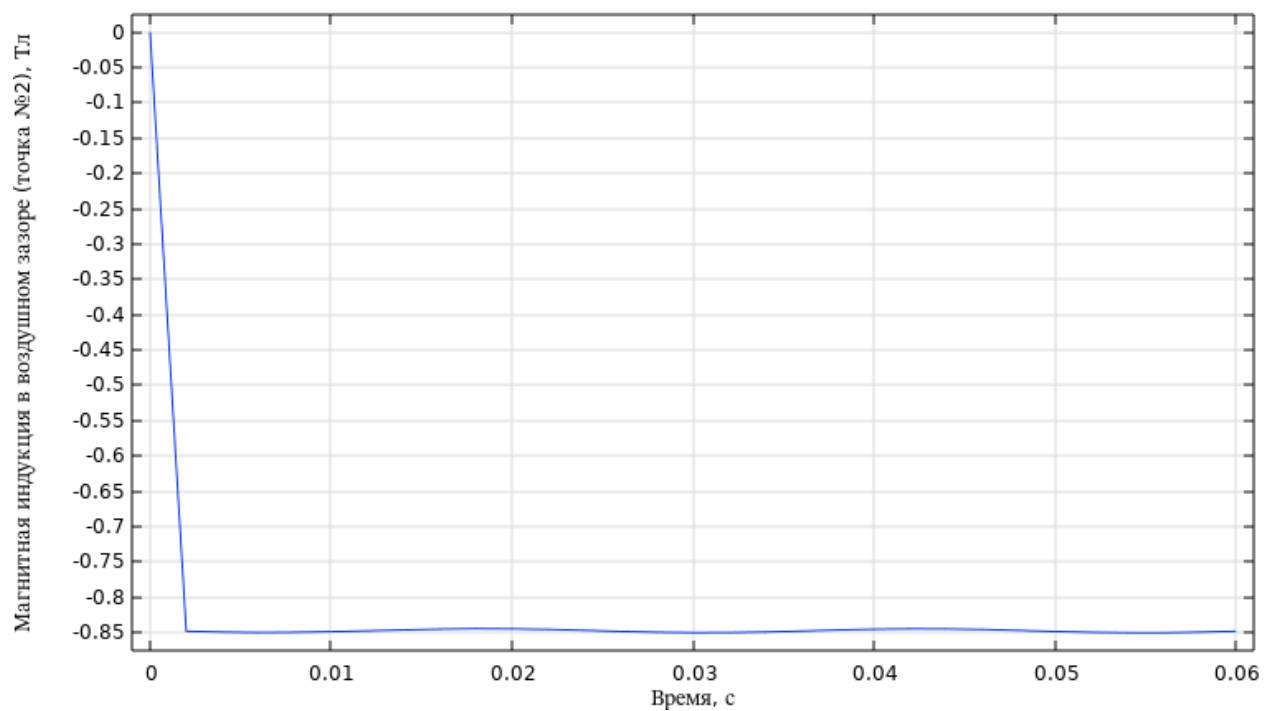


Рисунок Д.5 – Магнитная индукция в воздушном зазоре (в точке №2)
экспериментальный ЭД с комбинацией ферритовых и неодимовых магнитов

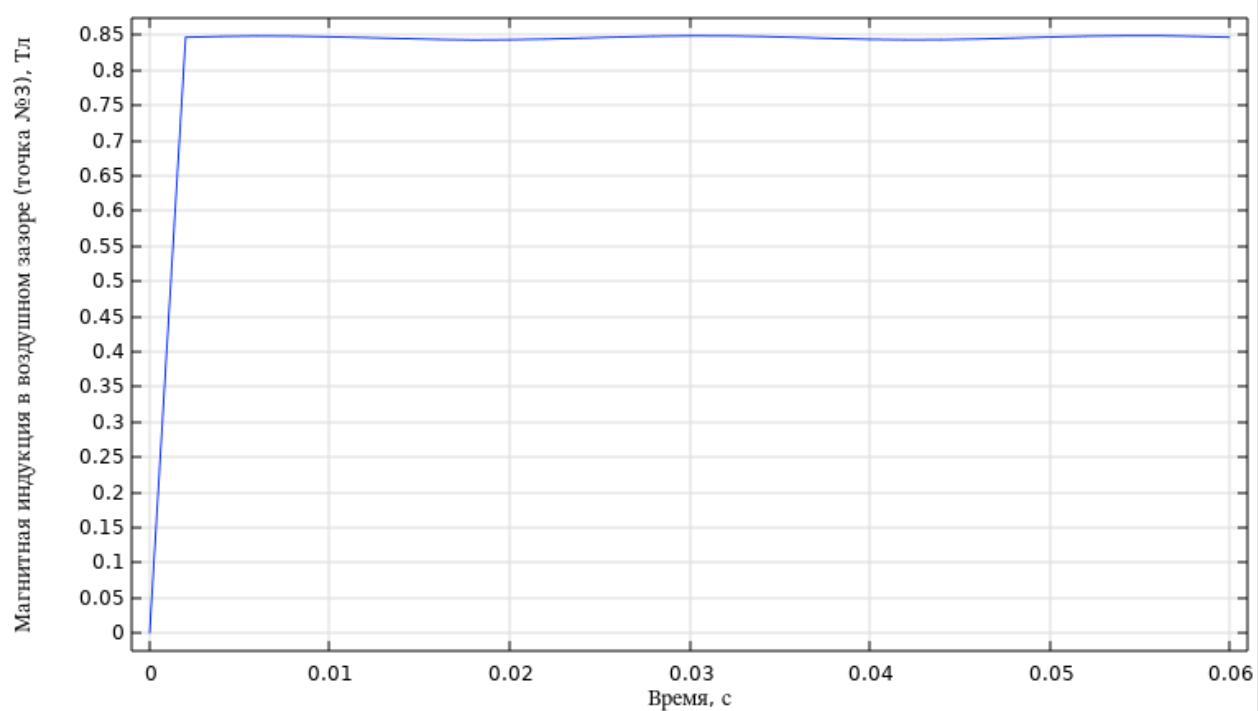


Рисунок Д.6 – Магнитная индукция в воздушном зазоре (в точке №3)
экспериментальный ЭД с комбинацией ферритовых и неодимовых магнитов

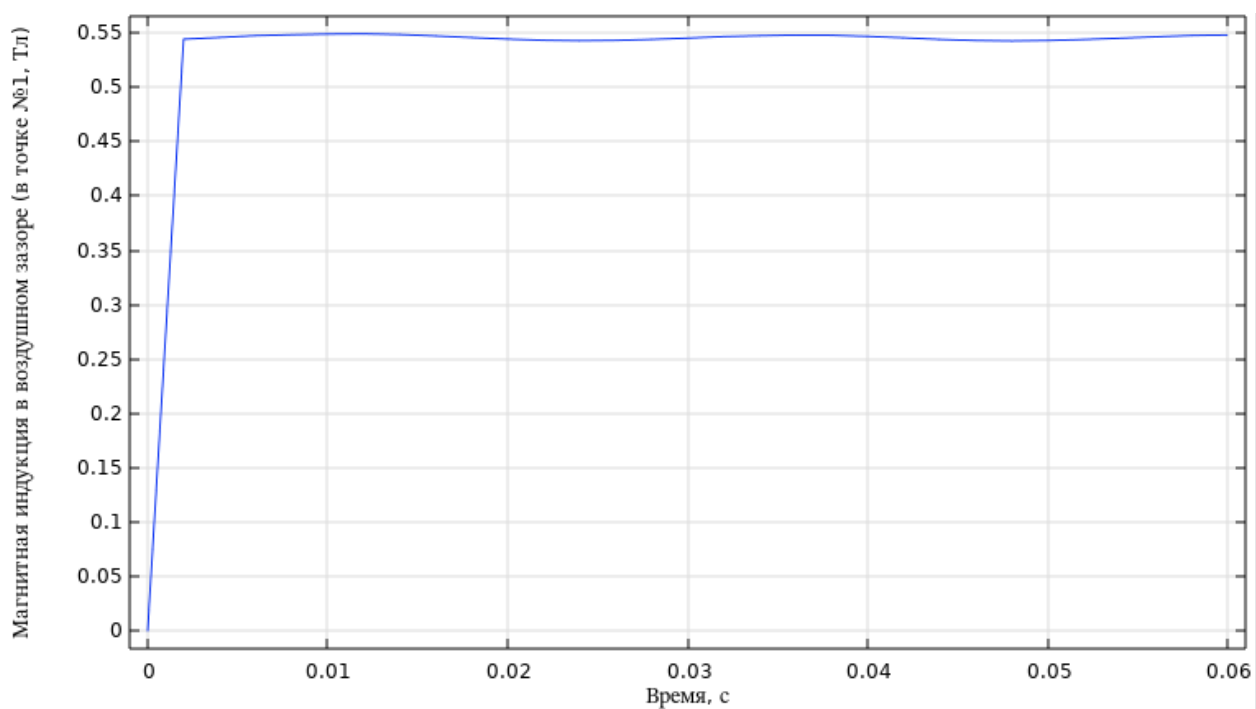


Рисунок Д.7 – Магнитная индукция в воздушном зазоре (в точке №1)
экспериментальный ЭД с ферритовыми магнитами

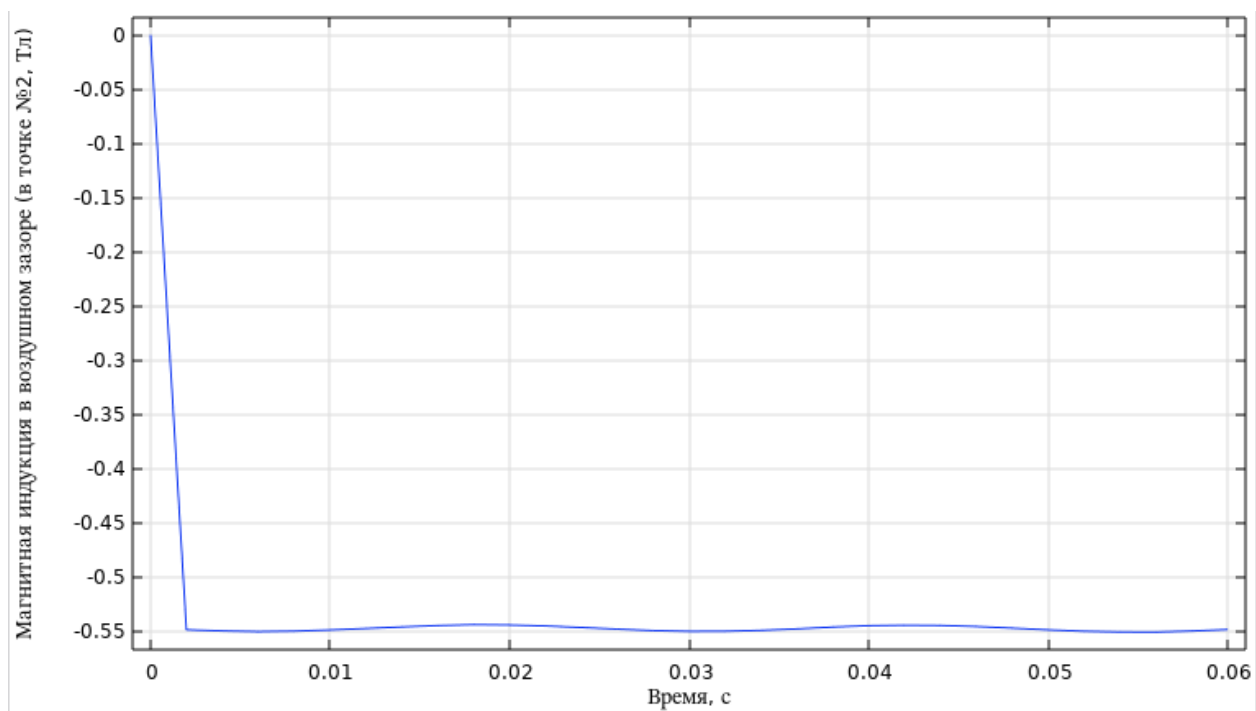


Рисунок Д.8 – Магнитная индукция в воздушном зазоре (в точке №2)
экспериментальный ЭД с ферритовыми магнитами

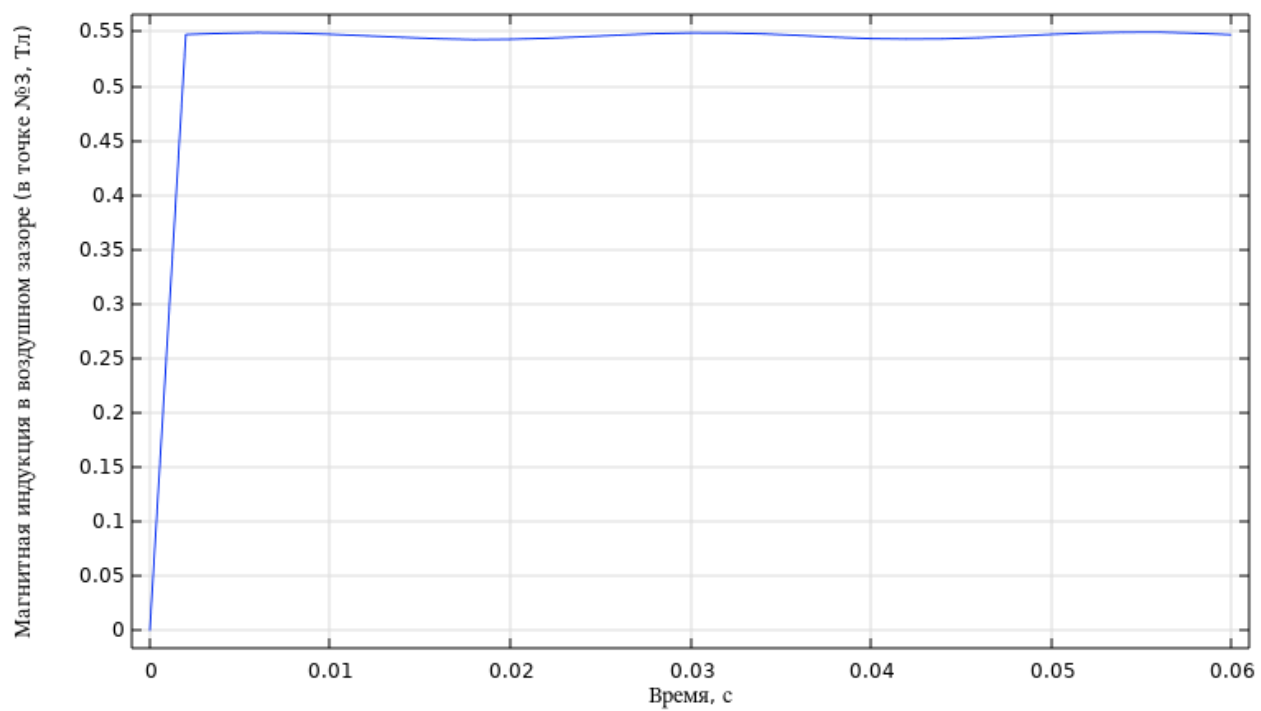


Рисунок Д.9 – Магнитная индукция в воздушном зазоре (в точке №3)
экспериментальный ЭД с ферритовыми магнитами

Приложение Е. Свидетельство о государственной регистрации программы
для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2025663488

**«Программа расчета геометрических размеров
ферритовых магнитов на основе оптимизации
конструкции ротора редкоземельных магнитов»**

Правообладатель: **ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ "КАЗАНСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ"
(RU)**

Авторы: **Сафин Альфред Робертович (RU), Майоров Андрей
Александрович (RU), Петров Тимур Игоревич (RU), Кадырматов
Юлиан Ряшитович (RU)**

Заявка № **2025618077**

Дата поступления **10 апреля 2025 г.**

Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ **28 мая 2025 г.**



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

документ подписан электронной подписью
Сертификат 0692e5b06300c5b4f2401670c0ca2026
Владелец: **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 10.07.2024 по 03.10.2025

Ю.С. Зубов

Приложение Ж. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО
о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2025690865

**Программа топологической оптимизации ротора
синхронного электродвигателя с ферритовыми и
неодимовыми магнитами на базе генетического алгоритма
поиска**

Правообладатель: **ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ "КАЗАНСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ"
(RU)**

Авторы: **Сафин Альфред Робертович (RU), Майоров Андрей
Александрович (RU), Петров Тимур Игоревич (RU), Кадырматов
Юлиан Ряшитович (RU)**

Заявка № **2025689741**
Дата поступления **29 октября 2025 г.**
Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ **11 ноября 2025 г.**



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

документ подписан электронной подписью
Сертификат 00a570e4f7aadd8b531b4b8818a75f29506
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 04.01.2025 по 28.11.2026

Ю.С. Зубов

Приложение И. Акт о практическом использовании результатов диссертации

АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«ТАТЭЛЕКТРОМОНТАЖ»
(АО «ТАТЭМ»)



АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
ТАТЭЛЕКТРОМОНТАЖ



«ТАТЭЛЕКТРОМОНТАЖ»
АКЦИОНЕРЛЫК ҖӘМҖИЯТЕ

ул. Аларатского, 50А, оф. 201, Казань, а/я 27, Республика Татарстан, 420132, Тел/факс: (843) 237-70-03, E-mail: info@tatem.ru; http://www.tatem.ru ИНН 1657002006, ОКПО 01404892, ОГРН 102160314220

Исх. №П125-26 от 30.09.2026г.
На _____ от 2026г.

АКТ

внедрения результатов научных исследований

«Синхронный электродвигатель с комбинацией неодимовых и ферритовых магнитов в роторе для электротранспорта с целью снижения стоимости магнитной системы»

Результаты научных разработок Майорова А.А. использованы и внедрены в процесс проектирования Управления проектирования АО «Татэлектромонтаж».

Объектами реализации являются:

1. Численная модель синхронного электродвигателя с постоянными магнитами (СДПМ), реализованная в программном комплексе COMSOL Multiphysics и учитывающая взаимосвязанные электромагнитные, тепловые и механические процессы.

2. Методика топологической оптимизации ротора СДПМ с комбинированной магнитной системой на основе генетического алгоритма, обеспечивающая максимизацию крутящего момента с учетом распределения материалов (феррит, неодим, сталь, воздух).

3. Программный комплекс для топологической оптимизации ротора СДПМ, включающий алгоритм расчета геометрических параметров (длины, ширины, глубины) ферритовых магнитов при частичной замене неодимовых магнитов.

Практическая значимость внедрения заключается в сокращении сроков проектирования и снижении материалоемкости магнитной системы СДПМ.

Начальник Управления проектирования

Халтурин В.А.

Исп. отд. проектирования
Тел/факс. (843) 237- 70- 14
tem_proekt@mail.ru

