

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

На правах рукописи



Петров Тимур Игоревич

МЕТОД КОМПЛЕКСНОЙ ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ РОТОРА  
СИНХРОННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПОСТОЯННЫМИ  
МАГНИТАМИ

05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты

Диссертация  
на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

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

Казань 2021

## Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ КОНЦЕПЦИЙ СДПМ.....	10
1.1. Классификация электродвигателей.....	10
1.2. Разработка машин с постоянными магнитами.....	16
1.3. Синхронные двигатели с постоянными магнитами .....	21
1.4. Современное состояние вопросов топологической оптимизации, методов поиска и аппроксимации поля электрических машин .....	33
1.5. Постановка задачи исследования .....	52
1.6. Выводы.....	53
2. РАЗРАБОТКА МЕТОДА КОМПЛЕКСНОЙ ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ СДПМ.....	54
2.1. Введение.....	54
2.2. Создание геометрической модели и расчет электромагнитных параметров, проверка полученных значений на достоверность.....	55
2.3. Оценка перспективности топологической оптимизации и оптимизация геометрической модели для упрощения расчетов.....	75
2.4. Расчет тепловых и прочностных параметров.....	83
2.5. Представление комплексной топологической оптимизации в виде методики .....	89
2.6. Выводы.....	92
3. РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА КОМПЛЕКСНОЙ ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ СДПМ НА БАЗЕ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА .....	93
3.1. Модернизация генетического алгоритма для проведения комплексной топологической оптимизации .....	93
3.2. Топологическая оптимизация для повышения вращающего момента.....	98
3.3. Топологическая оптимизация для сохранения температурного режима в допустимом диапазоне .....	107

3.4. Топологическая оптимизация для сохранения прочностных характеристик .....	111
3.5. Результаты исследований комплексной топологической оптимизации ротора СДПМ .....	114
3.6. Выводы.....	116
4. ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МОДЕРНИЗИРОВАННОГО СДПМ И ВЕРИФИКАЦИЯ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ .....	117
4.1. План верификации имитационной модели.....	117
4.2. Проверка работоспособности исходного и модернизированного двигателя .....	118
4.3. Разработка и создание экспериментального стенда для измерений вращающего момента .....	127
4.4. Проведение экспериментов.....	142
4.5. Анализ экспериментальных данных .....	148
4.6. Выводы.....	151
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	152
ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ .....	153
СПИСОК РАБОТ АВТОРА, ОТРАЖАЮЩИХ ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ .....	155
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	157
Приложение А .....	169
Приложение Б .....	177
Приложение В.....	178

## ВВЕДЕНИЕ

### **Актуальность темы исследования и степень ее разработанности.**

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

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

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

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

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

Вопросы, связанные с моделями СДПМ, топологической оптимизацией конструкции, электромагнитными, тепловыми и прочностными расчетами, нашли решения в работах коллективов НИУ «МЭИ», НИУ «МАИ», СПбГЭТУ ЛЭТИ, НГТУ, ЧГУ, РГУПС, КАИ, КНИТУ, авторов А. Аракеляна, А. Афанасьева, Г. Соколовского, Е. Lyshevski, P. Ferraris, P. Vas, Rathnakumar, M. Aguirre, A.

Зайцева, Ф. Сарапулова, А. Глотова, Д. Корельского, Rahman M.F., Pillay P., Morimoto S. и других. В большинстве работ улучшение характеристик СДПМ достигается за счет изменения алгоритмов управления, а решений, связанных с оптимизацией конструкции недостаточно. В свою очередь, работы, связанные с топологической оптимизацией, не исследуют электрические двигатели в плане применения комплексного подхода, который позволяет выявить и проанализировать зависимости между электромагнитными, тепловыми и прочностными параметрами.

**Объект исследования:** синхронные двигатели с постоянными магнитами.

**Предмет исследования:** алгоритмы и методики проектирования и создания роторов СДПМ.

**Целью** диссертационной работы является повышение энергоэффективности синхронного двигателя путем увеличения вращающего момента с учетом ограничений на объем постоянных магнитов, максимально допустимую температуру статора СДПМ и механических напряжений в роторе СДПМ.

Для достижения поставленной цели в настоящей диссертационной работе решаются следующие **задачи**:

1) исследование и анализ основных направлений создания СДПМ, алгоритмов, методов их проектирования и оптимизации;

2) разработка алгоритма и метода КТО ротора СДПМ, включающего электромагнитный, тепловой и прочностной расчеты на основе метода конечных элементов (МКЭ);

3) программная реализация метода КТО ротора СДПМ на базе генетического алгоритма (ГА);

4) создание экспериментального СДПМ на основе метода КТО;

5) разработка испытательного стенда для проверки метода КТО СДПМ.

#### **Методология и методы исследования**

Для выполнения рассмотренных задач применялись методы теоретической электротехники и теплотехники, компьютерного моделирования электрических двигателей, оптимизационных решений.

Для компьютерного моделирования и анализа использовались программы ELCUT 5.1. Professional, для написания программного обеспечения использовались языки AutoIt, Python. Для подтверждения адекватности математических моделей использовались результаты экспериментальных исследований, проведенные на разработанном стенде. Работоспособность двигателя с заданными параметрами экспериментально подтверждена с помощью испытательного стенда.

#### **На защиту выносятся:**

1. Алгоритм преобразования геометрической модели синхронного двигателя, позволяющий значительно повысить скорость вычислений вращающего момента методом конечных элементов в процессе комплексной топологической оптимизации ротора.

2. Метод, реализующий алгоритм КТО ротора СДПМ для определения параметров двигателя, обеспечивающих повышение его энергетической эффективности и снижение себестоимости оборудования с учетом электромагнитных, тепловых процессов и расчёта прочностных характеристик.

3. Программа для проектирования СДПМ, реализующая метод КТО ротора на основе ГА.

4. Экспериментальный образец СДПМ с новым расположением магнитов в конструкции ротора, с уменьшенным объемом ПМ на 32,9%.

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

#### **Практическая значимость работы.**

1. Разработан экспериментальный образец СДПМ с новой топологией ротора.

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

Программа метода КТО и стенд для проверки эффективности модернизированных двигателей реализованы в рамках грантов РФФИ

«Комплексная топологическая оптимизация роторов синхронных электрических машин с постоянными магнитами» № 19-37-90134 и «Разработка метода проектирования и топологической оптимизации роторов синхронных двигателей с постоянными магнитами для привода станков-качалок с целью повышения энергоэффективности нефтедобычи» № 18-48-160023.

Методика топологической оптимизации конструктивных параметров ротора синхронного электрического двигателя использована при реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства на тему: «Создание серии электроприводов на базе российских высокоэффективных синхронных двигателей для станков-качалок нефти с применением беспроводных систем передачи данных и адаптивной системой управления для «умных» месторождений», в рамках Государственной программы Российской Федерации «Развитие науки и технологий» на 2013-2020 годы, утвержденными постановлением Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218, договор № ДР-936/17 от 26 октября 2017 года с участием ФГБОУ ВО «КГЭУ» и АО «ЧЭАЗ».

Разработанное математическое и программное обеспечение для реализации КТО ротора СДПМ, технология по модернизации синхронных двигателей с постоянными магнитами актуальны для проектных организаций и могут быть использованы для разработок новых двигателей. Даная технология может быть реализована в виде компьютерного приложения, которое можно интегрировать в существующие программы САПР.

**Достоверность и обоснованность результатов исследования** подтверждается корректными допущениями, принятыми в работе, применением современных методов моделирования и обработки экспериментальных данных, получением результатов, совпадающих с результатами работ других авторов по данной тематике.

**Научная новизна** диссертационной работы состоит в следующем.

1. Разработан алгоритм изменения геометрической модели СДПМ для повышения скорости проектирования, включающий в себя упрощение формы

пазов, приведение модели к отдельному сектору двигателя и минимизацию размера сетки для МКЭ.

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

3. Разработана программа, реализующая метод КТО ротора СДПМ, перебор вариантов расположения материалов в теле ротора реализован на основе ГА с циклической проверкой тепловых и прочностных параметров.

### **Соответствие паспорту специальности.**

Диссертация соответствует специальности 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты.

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

### **Внедрение результатов**

Полученные теоретические и практические результаты работы использованы:

- при разработке алгоритмов и методик комплексной топологической оптимизации роторов синхронных электрических машин с постоянными магнитами по гранту Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) № 19-37-90134, 2019 г;

- в процессе проектирования СДПМ энергетической компанией ООО

«ЭнергоГазСервис».

**Апробация работы.** Основные положения и научные результаты диссертации докладывались и обсуждались на следующих научно-технических конференциях:

Конкурс "Энергоэффективное оборудование и технологии" в рамках Татарстанского международного форума по энергоресурсоэффективности и экологии (г. Казань, 21-23 апреля, 2021); "SUSE-2021" (Kazan, Russia, 18-20 February, 2021); perspectives "SES-2020" (Russia – India, October 29-30, 2020, Saint-Petersburg, Russia); High speed turbomachines and electrical drives conference 2020 (14-15 th of May 2020, Prague, Czech Republic); «SUMMA» (г. Липецк, 2019); «SES 2019» (г. Казань, 2019); «International conference on physics and photonics processes in nano sciences 2019» (Eluru, 2019); «ISEPC 2019» (г. Санкт-Петербург, 2019); «WPEF 2018» (г. Казань, 2018); заседаниях кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» ФГБОУ ВО «КГЭУ» (2016-2021 г.г.).

**Публикации.** По теме диссертации опубликованы 21 печатная работа в журналах и сборниках, в том числе 6 статей в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 5 статей, индексируемых в международных базах данных SCOPUS или/и Web of Science, 1 свидетельство на программу для ЭВМ и 9 работ в сборниках материалов конференций.

**Личный вклад автора.** Соискателем получены основные результаты исследований, которые отражены в статьях и диссертации, под руководством д.т.н., профессора Сафина Альфреда Робертовича.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, 4-х глав, заключения, списка литературы, включающего 101-наименование и 3-х приложений. Содержит 178 страниц основного машинописного текста, 87 рисунков и 11 таблиц.

# 1. ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ КОНЦЕПЦИЙ СДПМ

## 1.1. Классификация электродвигателей

Электрические машины (ЭМ) обеспечивают движущую силу для значительной и постоянно растущей части нашей современной промышленной экономики. Диапазон размеров и типов ЭМ велик, а количество и разнообразие областей применения продолжают расширяться.

В данном разделе рассматриваются основные концепции ЭМ.

К ЭМ относятся электродвигатели (ЭД) и электрогенераторы. ЭМ представляет собой принципиально простое устройство, является преобразователем электрической энергии в механическую [1]. С годами конструкция ЭД существенно изменилась, однако основные принципы остались прежними.

Известно множество видов ЭД. ЭД можно разделить на две категории: двигатели переменного и постоянного тока [2] с множеством вариантов классификации, как показано на рисунке 1.1.

Двигатели постоянного тока (ДПТ) работают с постоянным напряжением и током на клеммах [2]. ДПТ можно подразделить на 2 группы: униполярные и коллекторные. Униполярный двигатель был первым вращающимся ЭД, разработанным Майклом Фарадеем в 1831 году. Униполярным ДПТ требуется очень низкое напряжение, но большой ток. Таким образом, чтобы уменьшить потери в меди часто применяют сверхпроводящую технологию. Коммутаторный двигатель использует коммутатор и щетки, чтобы вращающий момент на ДПТ не менялся каждый раз, когда катушка движется через плоскость, перпендикулярную магнитному полю [3].

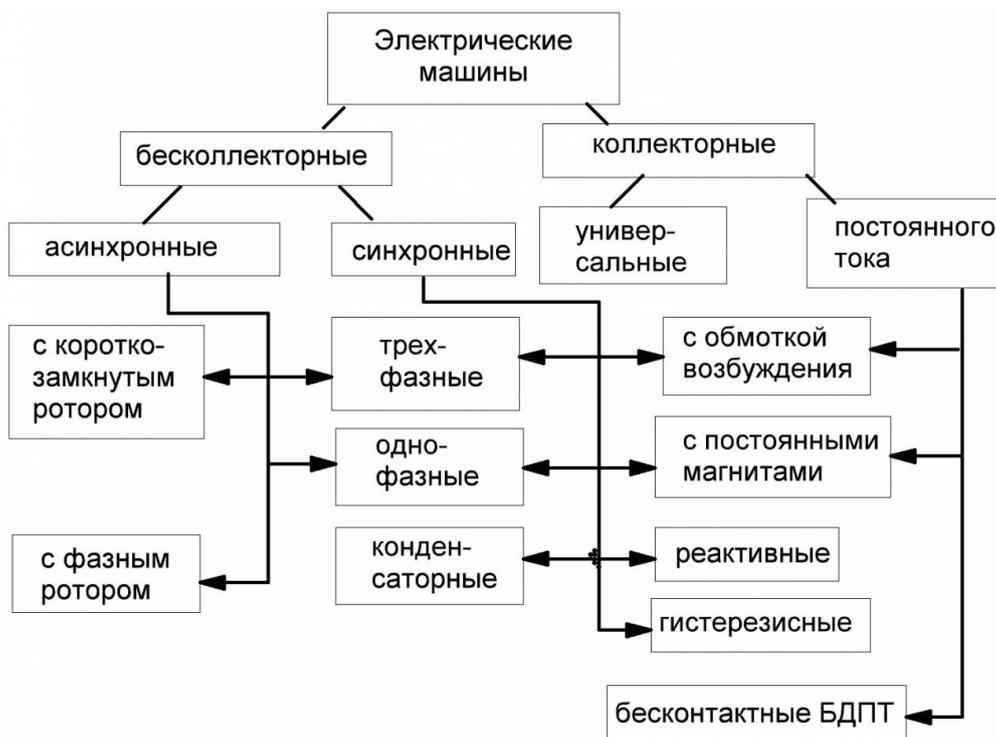


Рисунок 1.1. Классификация электродвигателей

Двигатели переменного тока, предназначенные для работы с источниками переменного тока, делятся на два класса: индукционные двигатели (асинхронные двигатели (АД) и синхронные двигатели (СД). В современной промышленности и технологии наиболее широко используются АД, поскольку они просты, прочны и обычно дешевы в производстве. Они преобладают в электроприводе (ЭП) с уровнями мощности от нескольких сотен ватт до примерно половины мегаватта, где требуемые скорости вращения не должны меняться [4]. СД имеют ряд преимуществ перед АД, например, высокий КПД. Но они не так широко используются, как АД, потому что конструкция роторов СД более сложная. Однако из-за быстрого развития силовых полупроводников все больше и больше АД заменяется синхронными.

СД можно дополнительно разделить на несколько типов: бесщеточные ДПТ, синусоидальные двигатели, включая синхронные двигатели с постоянными магнитами (СДПМ) и СД с возбужденным полем, гистерезисные двигатели, шаговые двигатели и реактивные двигатели [5].

Бесщеточные ДПТ с трапециевидной обратной ЭДС разработаны на базе щеточных ДПТ, поскольку стали доступны силовые электронные устройства, обеспечивающие электронную коммутацию вместо механической, обеспечиваемой щетками [6]. Бесщеточные двигатели постоянного тока (БДПТ), как правило, более распространены, чем синхронные двигатели переменного тока, в недорогих и маломощных ЭП из-за своей простоты, хотя их энергоэффективность ниже, чем СДПМ.

Синусоидальные СД имеют синусоидальную обратную ЭДС, поэтому их обычно называют СД переменного тока. СД переменного тока имеют синусоидально распределенные обмотки, а генерируемая противо-ЭДС в каждой обмотке якоря имеет синусоидальную форму. Эти двигатели приводятся в действие синусоидальными токами и создают постоянный крутящий момент. СД с возбужденным полем имеет обмотку в роторе, на которую подается постоянный ток для создания постоянного магнитного потока. Когда обмотка в роторе заменяется постоянным магнитом (ПМ), этот тип двигателя называется СДПМ. СДПМ имеет более высокий КПД, чем СД с возбужденным полем, поскольку отсутствие активных обмоток в роторе не приводит к потере проводимости в роторе [7].

Существуют другие типы двигателей, такие, как гибридные двигатели и двигатели с двумя выступами. Гибридный двигатель - это двигатель, который объединяет вместе два или более типов двигательных структур. Двигатель с двумя выступами - это двигатель, который имеет как ПМ, так и обмотки в статоре [8]. Он объединяет в себе достоинства как БДПТ, так и вентильного реактивного электродвигателя (ВРД): а) единая конфигурация и надежный ротор, и б) высокая эффективность благодаря ПМ.

Появление современных ПМ со значительной плотностью энергии привело к развитию машин постоянного тока с возбуждением поля ПМ в 1950-х годах.

Замена электромагнитов на ПМ устранила необходимость использования обмоток и внешнего источника энергии, поэтому появились компактные машины постоянного тока. Возбуждение ПМ также заменило возбуждение постоянного

поля СД. В конце 1950-х годов появление импульсных силовых устройств привело к разработке инверторов. Это достижение позволило заменить механический коммутатор на электронный. Были разработаны синхронные и бесщеточные машины постоянного тока с ПМ. При снятии механического коммутатора якорь машины постоянного тока может находиться на стороне статора. Это позволяет добиться лучшего охлаждения и более высоких напряжений [9].

В этой конфигурации полюса ПМ, используемые в качестве поля возбуждения, находятся на стороне ротора. С точки зрения конструкции, машины с ПМ — это внутренняя часть машин постоянного тока, в которых поле и якорь меняются местами от статора к ротору и ротора к статору соответственно.

Машины с ПМ предоставляют разработчикам приводов уникальный набор возможностей. Сочетание высокой эффективности с высокой удельной мощностью делает их широко привлекательными. Машины с ПМ — это СД без обмоток вспомогательного ротора. Поэтому для их работы необходим сопутствующий привод силовой электроники. Эти двигатели получают возбуждение поля на весь срок службы от ПМ. Отсутствие электрической схемы ротора упрощает их анализ. Поскольку на роторе нет обмоток, электрические потери в роторе минимальны [10].

СДПМ могут быть широко классифицированы в зависимости от направления потока поля как радиальное поле, в котором направление потока проходит вдоль радиуса машины; и осевое поле, в котором направление потока параллельно валу ротора. Обычно используются машины ПМ с радиальным полем, однако машины с осевым полем играют значительную роль в некоторых сферах применения из-за их более высокой плотности мощности и ускорения [11].

Магниты монтируются либо на поверхности ротора, называемые двигателями с поверхностными ПМ, либо внутри ротора, называемые двигателями с внутренним расположением постоянными магнитами (ВПМ).

ВПМ имеют улучшенные характеристики по сравнению с двигателями с поверхностными ПМ. Это связано с такими характеристиками, как более высокая

плотность крутящего момента и расширенная область ослабления магнитного потока. Эти два преимущества обусловлены их реактивным моментом и прочностью конструкции ротора. Однако конфигурация ВПМ создает значительную пульсацию крутящего момента.

В другой классификации ВПМ делятся на конструкции с внутренним ротором и внешним ротором. Если в ЭП требуется быстрое ускорение и замедление нагрузки, как в случае с сервосистемами, то отношение крутящего момента / инерции двигателя должно быть, как можно большим [12]. Поэтому СДПМ с внутренним ротором и магнитами с высокой плотностью энергии являются хорошими вариантами для подобных сфер применения. Конфигурация с внешним ротором обычно используется в ЭП, требующих постоянной скорости, таких как вентиляторы и нагнетатели. Высокая инерция внешнего ротора является преимуществом для достижения равномерной и постоянной скорости.

Свойство ПМ и выбор соответствующих материалов имеют важное значение при разработке СДПМ. Ферриты бария и стронция широко используются в качестве ПМ. Низкая стоимость и огромные запасы сырья - два основных преимущества феррита. Их легко производить, и их технологический процесс адаптирован для больших объемов, а также умеренно высоких рабочих температур. Магнит имеет практически линейную кривую размагничивания, но низкий остаточный ток. Следовательно, машина имеет большой объем, а также вес. Кобальтово-самариевый магнит состоит из железа, никеля, кобальта и редкоземельного самария. Среди его преимуществ - высокий остаточный ток, высокая плотность энергии и линейная характеристика размагничивания. Хотя этот материал довольно дорогой из-за недостаточного количества самария, рабочая температура может достигать  $-300^{\circ}\text{C}$ , а температурная стабильность находится на стабильном уровне. Магнит неодим-железо-бор (Nd-Fe-B) имеет самую высокую плотность энергии, самый высокий остаточный ток и очень значительную коэрцитивную силу [13]. Недостатки - низкая рабочая температура и подверженность окислению, если магнит не защищен покрытием. Кроме того, температурная стабильность ниже, чем у магнита CoSm. Хотя этот материал

дороже феррита, вес машины снижен за счет магнитов с более высокой плотностью энергии. В настоящее время магниты Nd-Fe-B используются в различных сферах промышленности.

## 1.2. Разработка машин с постоянными магнитами

Первые конструкции двигателей с ПМ были разработаны еще в 19 веке Дж. Генри (1831 г.), Х. Пикси (1832 г.), У. Рикти (1833 г.) [1]. Основная идея заключалась в том, чтобы обеспечить электромагнитное возбуждение ПМ, «свободным» источником магнитного поля, чтобы повысить эффективность системы.

Однако низкое качество магнитотвердого материала в то время (сталь, вольфрамовая сталь) сильно ограничивало выходную мощность машин и, следовательно, препятствовало развитию машин с ПМ. Изобретение магнитов класса Alnico в 1934 году в лаборатории Белла возродило интерес к системе возбуждения ПМ. Высокая плотность магнитного потока (рисунок 1.2) позволила использовать их в ЭМ. Однако низкая коэрцитивная сила (сопротивление размагничиванию) ограничивала их использование по сравнению с ДПТ. Появление керамики или «твердого феррита» повлекло за собой широкое использование ПМ в коммерческих и аэрокосмических областях [3]. Благодаря высокой коэрцитивной силе появилась возможность поддерживать обычный уровень реакции якоря без риска размагничивания, и многие двигатели стали разрабатываться с ферритовым возбуждением (двигатель с коллектором постоянного тока).

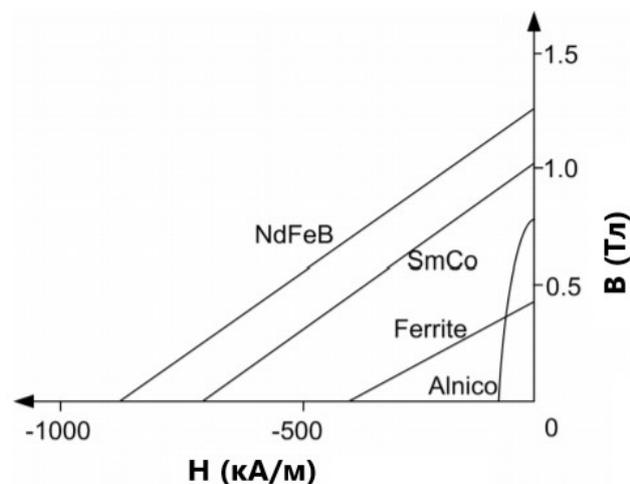


Рисунок 1.2. Плотность магнитного потока для ПМ

Наконец, разработка редкоземельных ПМ в 60-х годах позволила получить значительное преимущество системам возбуждения ПМ. Первые магниты из редкоземельных элементов - это сплав самария и кобальта (SmCo). Они обеспечивали такую же высокую плотность потока, как класса Alnico, с коэрцитивной силой даже выше, чем класс феррита, что привело к значительным уровням плотности энергии. Их единственным недостатком была относительно высокая стоимость (требовалось большое количество кобальта). Второе поколение редкоземельных ПМ из неодима, железа и бора (NdFeB), было разработано Sumitomo и General Motors в 1984 году. При гораздо меньшей стоимости по сравнению с магнитом SmCo и лучшими магнитными характеристиками, они позволили машинам с ПМ конкурировать с обычными двигателями во многих областях применения. Анализ развития плотности энергии (рисунок 1.3) современных магнитов в прошлом веке показывает возможности широкого использования машин с ПМ.

**Магнитная энергия (кДж/м<sup>3</sup>) для каждого материала**

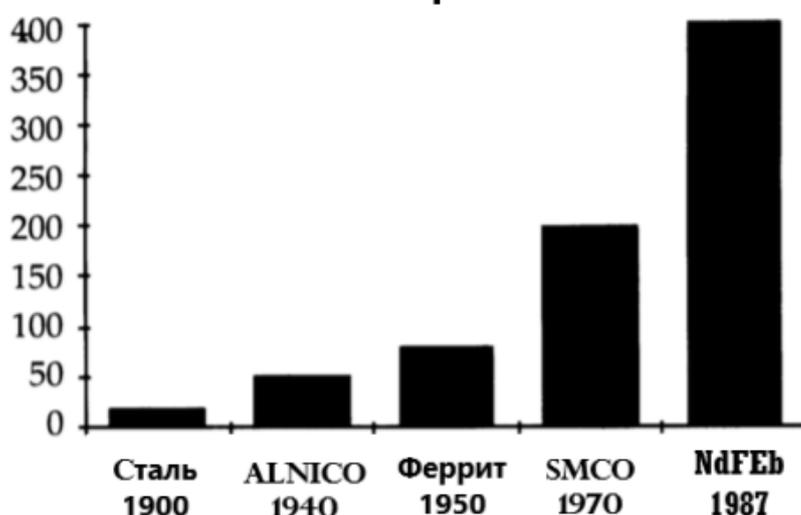


Рисунок 1.3. Развитие плотности энергии для ПМ

Использование материала ПМ в конструкции ЭМ дает следующие преимущества:

- высокий КПД - при правильной конструкции, КПД двигателя с ПМ выше, чем любого другого типа вращающихся машин. Действительно, омические потери поля постоянного тока или СД исключаются при использовании ПМ. Ток якоря ниже, чем ток возбуждения, получаемый от источника энергии индукционными и реактивными машинами. В современной промышленности, где более половины электроэнергии потребляется ЭП [4] и где экономия энергии становится обязательной, двигатели с ПМ имеют значительные преимущества:

- упрощение конструкции и обслуживания - упрощенная процедура сборки ЭМ с ПМ делает их более подходящими для автоматизированных методов сборки. Действительно, сборка обмотки возбуждения - это многоступенчатый процесс, требующий сложного оборудования, уязвимо к поломке и нуждающегося в обслуживании. Кроме того, во время этого процесса нередко возникает повреждение изоляции катушек. Стоимость сборки СДПМ ниже, чем большинства других типов двигателей (за исключением реактивного двигателя);

- затраты на техническое обслуживание также снижаются за счет использования возбуждения ПМ: устраняются щетки (для типов с БДПТ) или контактные кольца (для переменного тока). Также исключаются нарушения изоляции обмотки возбуждения, приводящие к аварийному состоянию.

Многие преимущества, упомянутые выше, не означают, однако, что СДПМ обязательно дешевле, чем их эквивалент с возбужденным полем. Действительно, цена материала ПМ может составлять значительную часть стоимости оборудования, особенно для массового производства. Поэтому преимущества высокой эффективности и низких эксплуатационных расходов должны быть сопоставлены с более высокими начальными инвестициями. По этой причине часто считалось, что СДПМ были должны использоваться только в ЭП с малой мощностью, где омические потери поля составляют большую часть общих потерь. При применениях в двигателях с большой мощностью, эффективность возбуждения электромагнитным и ПМ становится настолько близкой, что цена материала ПМ может быть неоправданно высокой.

Однако цена на редкоземельные ПМ продолжает снижаться из-за роста производства в Китае. Как прямое следствие, точка перехода, при которой возбуждение ПМ становится экономически более выгодным по сравнению с электромагнитным возбуждением в настоящее время выросла от нескольких кВт до МВт [5]. Действительно, во многих случаях возбуждение ПМ может использоваться в двигателях мощностью до нескольких МВт.

Особенностями технических характеристик СДПМ являются:

- значительная величина отношения мощности к весу из-за очень высокой плотности энергии современного материала ПМ. Другим прямым следствием устранения потерь поля является то, что практически все потери мощности находятся в статоре, откуда тепло может быть легко отведено; тогда требования к системе охлаждения снижаются. Эти причины делают двигатели с ПМ, особенно подходящими для сфер применения, где экономия места и веса являются наиболее важными характеристиками;

- высокие динамические характеристики. Во-первых - это высокий уровень магнитной индукции, получаемой от магнита. Во-вторых, это низкая инерция двигателя с ПМ, намного меньшая, чем машины с громоздким ротором с полевой фазой. Таким образом, машины с ПМ являются лучшим вариантом для сервоприводов, таких как роботы, станки, где требуется быстрый отклик привода;

- большая гибкость формы. СДПМ может иметь множество нестандартных размеров и форм. Магнит с высокой остаточной магнитной индукцией позволяет создавать машины с большим воздушным зазором. Возможны также конфигурации «статора без железа»; магнитный материал из якоря удаляется, что снижает вес. Это приводит к дополнительным свойствам, таким как более низкий крутящий момент, а также еще больше упрощает процедуру сборки.

Тем не менее, помимо дороговизны, использование ПМ накладывает несколько ограничений. Первое - это возможное размагничивание магнита. Магнит может безопасно работать в любой точке линейной части его характеристики В-Н. Однако, если плотность потока уменьшается и выходит за пределы характеристики, происходит частичное, но необратимое

размагничивание (рисунок 1.4). После воздействия большого размагничивающего поля от проводников якоря новая характеристика магнита представляет собой прямую линию, параллельную исходной, но расположенную ниже. Температура также влияет на выходной магнитный поток магнита. На этапе проектирования двигателя и инвертора магнит должен быть надлежащим образом защищен от чрезмерной реакции якоря (короткого замыкания) или высоких температур (в основном магнит NdFeB).

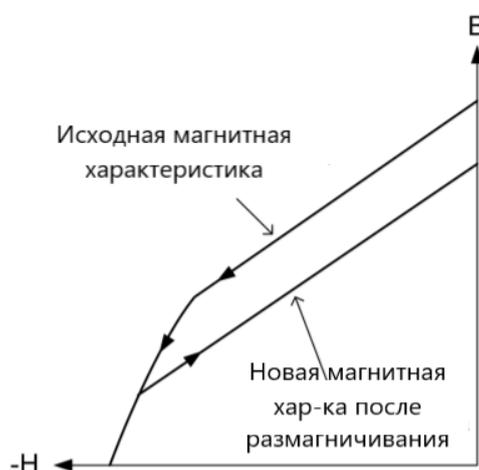


Рисунок 1.4. График размагничивания ПМ

Второе ограничение - потеря управления полем, которое требуется в ЭП с регулируемой скоростью для увеличения диапазона рабочих скоростей или, когда эффективность должна быть оптимальной для разных скоростей. В действительности, уровень магнитного потока магнита нельзя изменять, в отличие от индукционной катушки с намоткой, и, таким образом, поток в воздушном зазоре является постоянным. Этот момент, очевидно, является большим недостатком для тяговых ЭП, где требуется малый вес и меньший объем машины с ПМ. Однако, данное условие не относится к современным СДПМ. Достижения в области полупроводниковых устройств и микроконтроллеров за последние несколько десятилетий позволили реализовать контроллеры, способные управлять потоком в воздушном зазоре посредством надлежащей реакции якоря, а затем имитировать принцип управления полем. По этой причине СДПМ вызывают растущий интерес к возможному применению и в тяговых ЭП.

### 1.3. Синхронные двигатели с постоянными магнитами

СДПМ очень схожи с другими типами СД, но существенно отличаются конструкцией ротора. Ротор СДПМ имеет ПМ вместо обмоток возбуждения. Например, векторные диаграммы СДПМ и любых других СД одинаковы, за исключением того, что в СДПМ магниты создают свою собственную связь постоянного магнитного потока ( $\Psi_{PM}$ ) вместо управляемой связи магнитного потока ( $\Psi_f$ ), как в других СД [44, 45]

СДПМ классифицируются как явнополюсные и неявнополюсные. Явнополюсные СДПМ характеризуются индуктивностью по оси q ( $L_q$ ), превышающей их индуктивность по оси d ( $L_d$ ), то есть  $L_q / L_d > 1$ , тогда как неявнополюсные СДПМ характеризуются тем, что индуктивность по оси q и d-индуктивность оси почти равны, то есть  $L_q / L_d \approx 1$  [46].

Также СДПМ можно разделить на два класса в зависимости от направления потока поля следующим образом:

- СДПМ с радиальным магнитным потоком - в этом классе СДПМ силовые линии в воздушном зазоре проходят по радиусу машины, отсюда и название СДПМ с радиальным полем;

- СДПМ с осевым магнитным потоком - магнитные линии в воздушном зазоре проходят параллельно валу машины.

За последнее десятилетие все большую популярность приобрели синхронные машины с постоянными магнитами в виде зубцов (ТС СДПМ). ТС СДПМ имеет особую систему обмоток, в которой обмотки статора расположены в каждом или каждом втором зубе статора. Зубчатая катушка упрощает производственный процесс по сравнению с традиционными распределенными обмотками. Кроме того, такая система намотки содержит обмотки с очень коротким концом. Это также приводит к более короткой осевой длине машины, что, в свою очередь, снижает потери меди в статоре из-за уменьшения объема меди [47]. На рисунке 1.5. показана трехмерная модель ТС СДПМ со статором и ротором отдельно.



Рисунок 1.5. Модель ТС СДПМ с зубчатой обмоткой

СДПМ характеризуются конструкцией их ротора. Расположение магнита в роторе определяет особенности двигателя. Например, ротор с установленными на поверхности магнитами в принципе не является явным типом, поскольку относительная проницаемость магнита, например, магнита из неодима-железа-бора (NdFeB), близка к проницаемости вакуума, то есть близка к 1 (в частности, 1,04 -1,05), а ротор со встроенным ПМ без каких-либо исключений производит индуктивность квадратурной оси выше, чем индуктивность прямой оси [48].

На рисунке 1.6. показаны некоторые конструкции роторов СДПМ с различными типами размещения и расположения магнитов. Для примера, на рисунке 1.6. д) и е) представлены аксиально-раздельные роторы, в) и з) барьерные роторы.

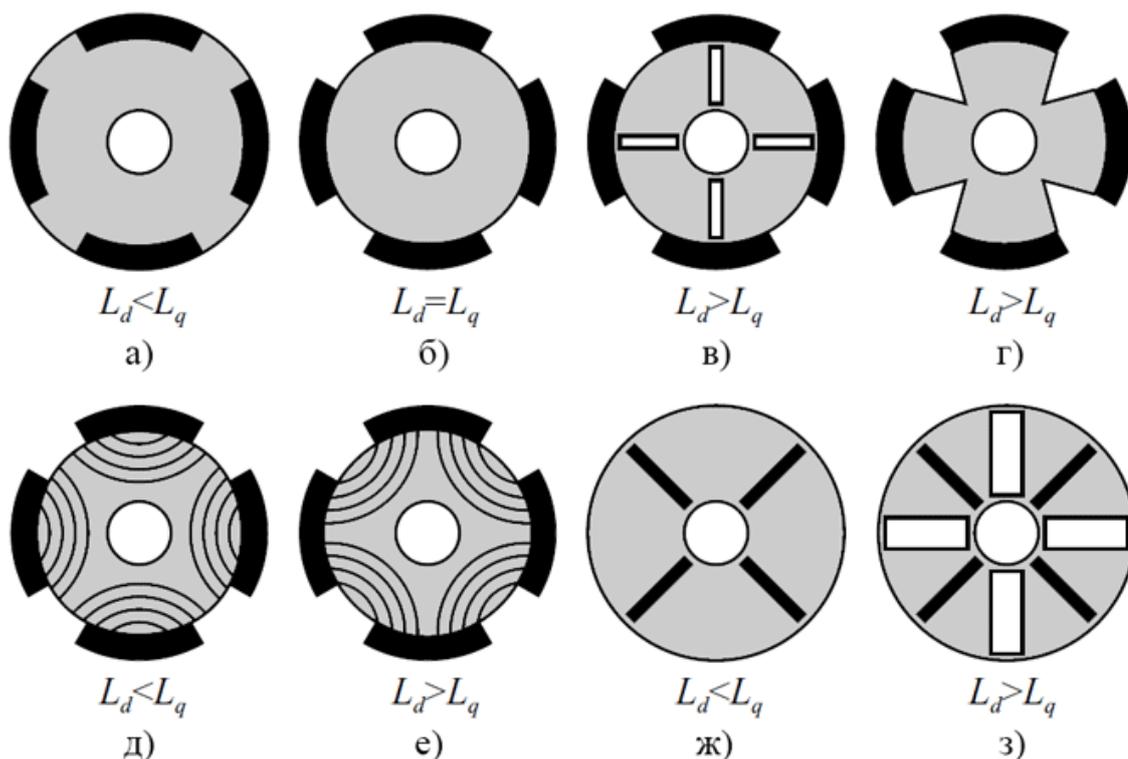


Рисунок 1.6. Типы роторов СДПМ

СДПМ с поверхностным магнитом ротора - самая распространенная конструкция для СДПМ в наши дни. В СДПМ с магнитами на поверхности ротора, магниты часто намагничиваются радиально. В таких двигателях индуктивности по осям  $d$  и  $q$  считаются равными, что фактически упрощает конструкцию СДПМ с поверхностным расположением магнитов. Кроме того, поскольку магниты прикреплены к поверхности ротора, конструкция становится проще и дешевле [49]

С другой стороны, СДПМ со встроенными магнитами могут иметь намагниченные по окружности ПМ, встроенные в глубокие пазы ротора. Такое расположение магнитов характерно для явнополюсной конструкции, что, в свою очередь, делает синхронную индуктивность по оси  $q$  больше, чем синхронную индуктивность по оси  $d$ . Если вал двигателя ферромагнитный, значительная часть магнитного потока, создаваемого ПМ, может проходить через вал [50].

Принцип работы одинаков для всех этих конфигураций; магниты должны создавать синусоидальное или квазисинусоидальное распределение потока в воздушном зазоре. Проводники синусоидально распределены вокруг статора, так

что при питании от трех синусоидальных сигналов тока они создают вращающуюся магнитодвижущую силу, которая взаимодействует с магнитным полем для создания крутящего момента; магнитное поле будет пытаться «поймать» это вращающееся поле якоря и, следовательно, привести в движение ротор. Поля магнита и якоря должны вращаться синхронно для создания постоянного крутящего момента. Таким образом, необходим датчик положения для синхронизации фазных токов с положением ротора. На практике эти формы сигналов тока могут быть получены от инвертора источника напряжения с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ), показанного на рисунке 1.7. Напряжение питания одной линии с фиксированной частотой выпрямляется в звене постоянного тока, а схема ШИМ с обратной связью по току управляет схемой переключения трех ветвей инвертора для создания желаемых форм тока.

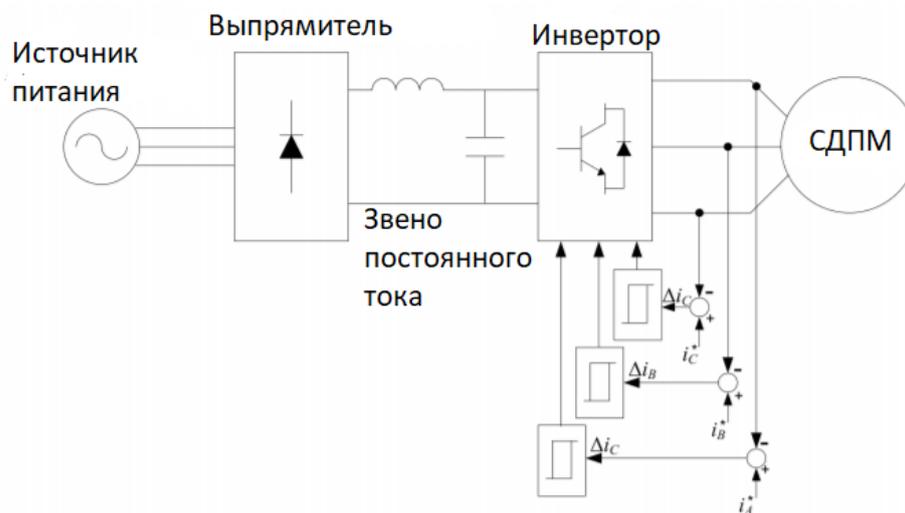


Рисунок 1.7. Схема управления СДПМ

Изучение любого электромагнитного устройства основано на уравнениях Максвелла. К сожалению, задействованные различные материалы и геометрия дополнительных частей двигателя затрудняют решение этих уравнений. Как правило, аналитическое выражение распределения потока в машине недостижимо. Другой подход, обычно используемый в анализе ЭМ - это схематическое представление. Используя соответствующие допущения (магнитная линейность, бесконечная проницаемость железа) и упрощения

(коэффициент Картера, коэффициент намотки и т.д.) с некоторыми оценками (поток утечки, коэффициент насыщения и т.д.), можно смоделировать две оси симметрии машины, прямую и квадратурную с помощью магнитных цепей как показано на рисунке 1.8.

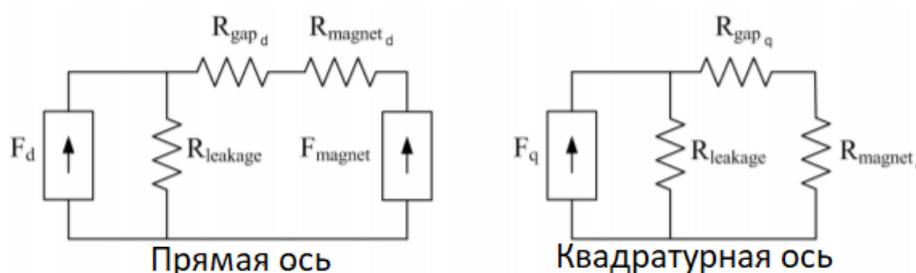


Рисунок 1.8. Модели магнитной цепи

Эти магнитные цепи имеют структуру прямой и квадратурной магнитных связей,  $\lambda_d$  и  $\lambda_q$  [51].

$$\lambda_d = \lambda_m + L_d I_d \quad (1.1)$$

где  $\lambda_m$ ,  $L_d$  и  $L_q$  - параметры двигателя, а именно потокосцепление ПМ, индуктивность прямой оси и индуктивность квадратурной оси. При угловой скорости ротора  $\Omega$  потокосцепление  $\lambda_d$  генерирует напряжение  $-\omega\lambda_d$  по оси q, где  $\omega$  - электрическая скорость, определяемая как

$$\omega = p\Omega \quad (1.2)$$

p - количество пар полюсов машины. Аналогичным образом магнитопровод  $\lambda_q$  генерирует напряжение  $\omega\lambda_q$  на прямой оси. Наконец, вся машина моделируется электрической схемой, показанной на рисунке 1.9.

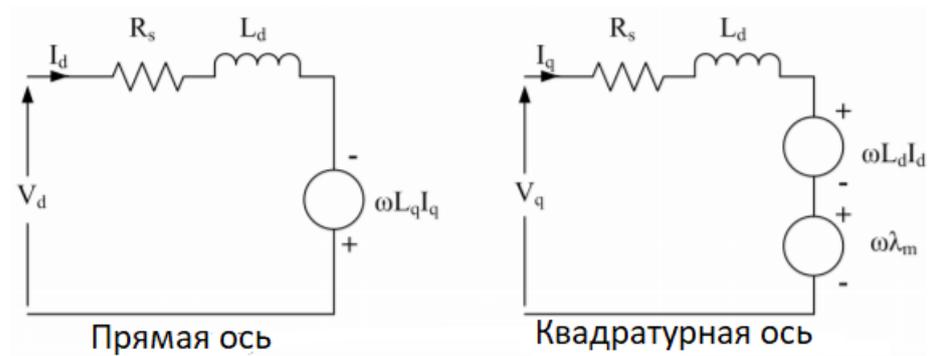


Рисунок 1.9. Электрические эквивалентные цепи

В этом случае точное моделирование параметров двигателя имеет решающее значение для получения надежных прогнозов характеристик двигателя на этапе проектирования.

Аналитические инструменты, такие как магнитное представление двигателя, являются целесообразными на начальных этапах проектирования. Они просты в применении и легко повторяются. При этом возможно использовать уравнения для определения размеров, чтобы быстро найти первые оценки проектных переменных (диаметр ротора, длина, толщина и ширина магнита) [52] для соответствия проектным спецификациям. Расчет параметров двигателя является точным для поверхностного СДПМ, когда воздушный зазор достаточно велик (без насыщения) [53].

Однако для внутренних СДПМ ситуация совершенно иная, в основном по двум причинам:

- Ротор неоднороден. Действительно, магниты и магнитные барьеры, относительная проницаемость которых близка к единице, скрыты в железном сердечнике. С точки зрения магнитного потока якоря они представляют собой дополнительный воздушный зазор, лежащий на прямой оси. Форма этого воздушного зазора делает путь потока намного более сложным, чем у внешних СДПМ. Аналитические методы используются для решения проблемы путем разделения воздушного зазора на эффективные воздушные зазоры по оси d и q с разной длиной [54], аналогичные тем, которые применяются в СД с ведомым полем. Однако эти методы не всегда приводят к достоверным результатам и не

рекомендуются при проектировании высокопроизводительных СДПМ для современных ЭП [55];

- Насыщенность, свойственная данному типу двигателя. Действительно, воздушный зазор по оси  $q$  намного меньше, чем у поверхностного СДПМ, поскольку не содержит магнитов. Как следствие, ось  $q$  легко становится насыщенной, когда весь ток статора прикладывается вдоль оси  $q$ , и  $L_q$  становится зависимым от тока. Классические аналитические инструменты не могут учесть насыщение при моделировании этих вариаций  $L_q$  поскольку в них участвуют нелинейности. Кроме того, магнитные перемычки между магнитным барьером и воздушным зазором (рисунок 1.10) должны быть насыщены, чтобы избежать магнитного короткого замыкания магнита. Оценка утечки потока через этот путь является довольно сложной задачей; при определенных условиях мост становится менее насыщенным из-за действия размагничивающего тока [56]. Это также приводит к изменению  $L_d$  и  $\lambda_m$ .

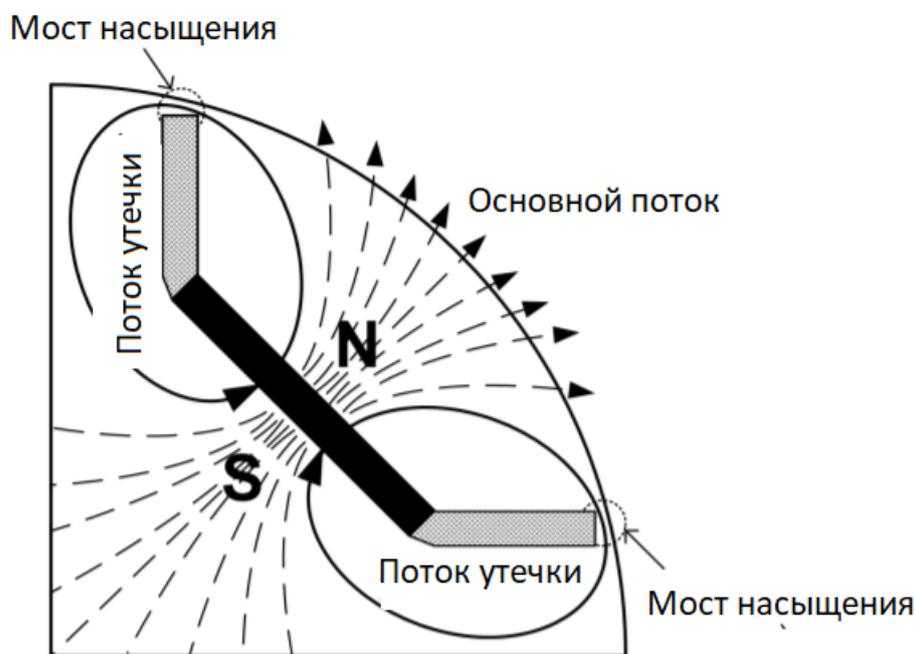


Рисунок 1.10. Распространение потока утечки ротора

Следовательно, хотя классические аналитические инструменты полезны для примерной оценки основных размеров внутренних СДПМ, они ненадежны и не

дают достоверных результатов, когда требуются точные модели параметров двигателя внутренних СДПМ.

Для аппроксимации поля внутри машины используются три распространенных метода: аналитические модели поля, эквивалентные схемы магнитных цепей (ЭСМЦ) с нелинейными элементами и метод конечных элементов (МКЭ). Доказано, что аналитические методы дают близкие к точным результатам расчета магнитных полей в воздушных зазорах и ПМ для простых геометрических фигур, таких как установка поверхностных магнитов [29, 30]. ЭСМЦ разработаны для некоторых более сложных геометрических форм [31-33], которые могут включать нелинейность магнитомягкого материала, а также эффекты движущихся частей [31]. Хотя аналитические подходы и подходы ЭСМЦ требуют меньшего объема вычислений, однако у них есть следующие недостатки:

1. Модель основана на приближении поля и не может быть подтверждена как точная для широкого диапазона входных параметров, что не позволяет получить достоверные результаты.

2. Модель не охватывает все типы геометрий и долгое моделирование необходимо повторять для каждого выбора геометрии статора/ротора.

3. Некоторые представляющие интерес эффекты, такие как зубчатый момент, пульсация крутящего момента, сложно смоделировать с помощью этого типа анализа.

4. Средняя модель магнита не дает точного предсказания размагничивания, поскольку частичное размагничивание требует знания поля внутри магнита.

Несмотря на недостатки, данные методы с уверенностью можно использовать в ситуациях, когда точность модели проверяется на широком диапазоне возможных конструкций геометрии.

Аналитические модели и модели ЭСМЦ также обычно используются для первоначального определения размеров машины.

Формулировка МКЭ объединяет любую заданную геометрию для численного решения частного случая уравнений Максвелла. Самым популярным

среди конструкторов машин является МКЭ из-за его большой гибкости при моделировании сложных форм и нелинейных материалов [57]. В отличие от аналитических инструментов, распределение поля по машине может быть получено с большой точностью. Расчет параметров двигателя с помощью этого метода показал очень точное соответствие с измерениями, и в настоящее время это хорошо зарекомендовавший себя метод для работы с внутренними СДПМ [58]. Однако, как числовой инструмент, МКЭ не обеспечивает связи между параметрами двигателя и проектными переменными. Что является главным недостатком метода, так как это по своей природе инструмент анализа, а не инструмент проектирования.

Линейная аппроксимация данного метода предполагает, что проницаемость материала постоянна. Этот метод может дать результаты, близкие к точным для геометрии поверхностных магнитов, поскольку материал сердцевины соответствует области значительно ниже точки насыщения на своей характеристике В-Н. Однако это может привести к большим неточностям в случае топологии скрытого магнита или любой топологии, которая характеризуется тонкими перемычками в геометрии ротора или статора. Следующий уровень приближения, называемый «подходом замороженных проницаемостей» [34], используется для ускорения сходимости для последовательных вычислений при различных текущих возбуждениях путем линеаризации проницаемости на основе одного нелинейного решения, найденного для первого шага. Дальнейшее исследование поставило под сомнение достоверность этой модели, поскольку она не основана на прямой физике, и при этом существует сложность экспериментальной проверки результатов [35]. Данная работа заимствует идею использования проницаемости элементов из предыдущего метода, но ограничивает ее использование только в качестве начального предположения, что приводит к более быстрой сходимости.

С целью использования МКЭ для целей проектирования Ионел и Попеску [36,37] предложили дальнейшее усовершенствование МКЭ, специально предназначенное для исследования крутящего момента, магнитного потока и

потерь в сердечнике в ЭМ. Такая модель извлекает данные трехфазного потока из небольшого количества магнитостатических симуляций для электрического угла поворота на  $60^\circ$  и собирает форму волны электрического угла на  $360^\circ$  потоков и магнитных полей с использованием преобразования «пространство-время». Крутящий момент вычисляется по магнитному потоку после выделения значимых гармоник в форме волны магнитного потока. Это означает, что пользователь может контролировать, сколько значимых гармоник следует учитывать при расчетах крутящего момента и потерь в сердечнике. Данный метод был дополнительно усовершенствован за счет отдельного учета зубцового момента [38]. Кроме того, полевые данные использовались в сочетании с приближенной моделью токов, индуцированных в ПМ, для расчета потерь на вихревые токи ПМ [39].

Модель машины на основе МКЭ не имеет сложностей, которые характерны для других методов аппроксимации. До разработки современных компьютеров данный метод считался подходящим для предпроизводственного анализа конструкции или для окончательной доработки конструкции. Для оптимизации конструкции необходимо сделать соответствующий выбор модели магнитного поля. Таким образом, многоточечная магнитостатическая модель МКЭ принята с определенными модификации для исследований в диссертационной работе.

Для работы с МКЭ необходимо выбрать программу, позволяющую рассчитывать магнитостатические, тепловые и прочностные параметры.

Известно достаточно много конечно-элементных пакетов прикладных программ (ППП), в которых расчеты магнитных систем доведены до совершенства. Для исследований использованы такие программы, как ANSYS Multiphysics, Maxwell, COMSOL Multiphysics, ELCUT [32].

Все конечно-элементные программы можно разбить на две группы: программы, специально предназначенные для расчета магнитных полей, и программы общего назначения, в которых метод конечных элементов используется для решения многих научно-технических задач. Программы первой группы (ELCUT) легки в освоении, но, как правило, предназначены для расчета

только двумерных полей, что сильно сужает круг задач, которые решаются с их помощью. Программы второй группы (ANSYS Multiphysics, Maxwell, COMSOL Multiphysics) обладают гораздо большими возможностями и сложностью, стоимость их существенно выше.

ELCUT – это комплекс программ для инженерного моделирования электромагнитных, тепловых и механических задач методом конечных элементов. Основные плюсы данного программного комплекса: дружественный пользовательский интерфейс, простота описания моделей, широкие аналитические возможности комплекса и высокая степень автоматизации всех операций. ELCUT - это полноценное Windows -приложение, которое разработано специально для этой платформы.

Сравнение возможностей ППП представлено в таблице 1.1.

Таблица 1.1. Особенности представленных ППП.

Пакет	ANSYS	Maxwell	COMSOL Multiphysics	ELCUT
Вид анализа				
Электромагнитный	+	+	+	+
Тепловой	+	-	+	+
Механический	+	-	+	+
Совмещенный	+	-	+	+
Возможность автоматизации своим инструментарием	+	+	+	+
Возможность автоматизации сторонним инструментарием	+	-	-	+

«Дружественный» интерфейс	-	-	-	+
Русификация	-	-	-	+
Стоимость мин.версии, тыс.руб.	200	200	100	50

В соответствии с показанными преимуществами - относительно низкой цене, простоте освоения и наличия всего необходимого инструментария программой для МКЭ выбран Elcut.

#### **1.4. Современное состояние вопросов топологической оптимизации, методов поиска и аппроксимации поля электрических машин**

В России активное использование методов топологической оптимизации стало внедряться относительно недавно, и используется в основном для повышения удельной прочности конструкций в аэрокосмической промышленности [6], оптимизация рабочих лопаток турбин [7] или поршней двигателей внутреннего сгорания [8]. Особенности всех этих работ является топологическая оптимизация только одного материала и максимизация только одной целевой функции (в большинстве работ русскоязычного сегмента – это повышение прочности при уменьшении веса).

В иностранных источниках информация по топологической оптимизации имеется в большом объеме, и исследуется повышение как прочностных параметров, так и значений электромагнитного и теплового поля.

В статье [9] продемонстрированы преимущества топологической оптимизации нескольких материалов по сравнению со стандартной оптимизацией (один материал). В качестве примера представлена оптимизированная конструкция автомобильного двигателя для обоих случаев оптимизации, в первом случае получается более жесткая конструкция при одинаковом весе. Отличием от проведенных в диссертации исследований является то, метод оптимизации разработан для СДПМ, и с учетом не только одного контролируемого параметра (в статье – вес), а электромагнитной, тепловой и прочностной составляющей, что позволяет получить более эффективную конструкцию двигателя.

В работе с [10] производится оптимизация конструкции ЭД постоянного тока без щеток (а именно конфигурация ротора) на основе метода конечных элементов для повышения удельной мощности за счет увеличения электромагнитного поля.

В работе [11] рассматривается двухмерная модель для определения электромагнитного поля в воздушных зазорах СДПМ, а в [12] показан метод проектирования ПМ, которые можно использовать для получения оптимальных

конструкций. В статье [13] представлен вариант топологической оптимизации за счет использования ГА, а в [14] оптимизация достигалась в результате использования МКЭ. В этих работах оптимизация необходима для повышения значений электромагнитного поля, тепловой расчет представлен в работе [15], где спроектирован СД с максимально возможным тепловым потоком. Конструкцию двигателей можно сделать более эффективной и за счет использования топологической оптимизации на основе чувствительности [16]. Для повышения производительности ГА необходимы оптимальные начальные популяции, в работе [17] показан алгоритм генерации популяции с высокими значениями исследуемых характеристик. Развитие ГА может быть и в направлении адаптивного изменения сетки во время оптимизации [18], интересным решением является использование метода последовательного линейного программирования [19]. В работе [20] показан вариант с использованием метода чувствительности ON/OFF для оптимизации конструкции ротора. В [21] представлен совокупный метод оптимизации конструкции ротора, объединяющий топологический метод оптимизации и ограничения, связанные с формой ПМ.

Следует отметить, что на данный момент отсутствуют исследования с использованием КТО СДПМ, позволяющей учесть влияние распределения материалов на электромагнитные, тепловые и прочностные характеристики машин для выбора рационального варианта конструкции.

Определение среднего крутящего момента по его мгновенным значениям может иметь определенные сложности. В [5] показано, что достаточное приближение к среднему крутящему моменту может быть получено при оценке крутящего момента только для определенных выбранных положений ротора.

$$\bar{M} = \frac{1}{4} (M_0 + M_{\frac{\pi}{12}} + M_{\frac{\pi}{6}} + M_{\frac{\pi}{4}}) \quad (1.3)$$

В данном разделе определяется задача оптимизации с переформулированием прямой задачи и соответствием подходу к оптимизации топологии на основе плотности. Цель исследования - максимизировать средний крутящий момент, вычисленный с помощью выражения 1.3.

$$(P_1): \begin{cases} \maximize \bar{M} = \frac{1}{4} (M(u_0) + M(u_{\frac{\pi}{12}}) + M(u_{\frac{\pi}{6}}) + M(u_{\frac{\pi}{4}})) \\ \text{где } u_\theta \text{ для } \theta \in \left\langle 0, \frac{\pi}{12}, \frac{\pi}{6}, \frac{\pi}{4} \right\rangle \end{cases} \quad (1.4)$$

Это достигается путем нахождения оптимального распределения материала, состоящего из ферромагнитного материала, воздуха и ПМ - с одной стороны, и оптимального направления намагничивания ПМ - с другой.

Кроме того, вводится ограничение на максимально допустимый объем ПМ.

Модель ЭМ является нелинейной, как правило, сложной и часто требует численных методов оценки. Кроме того, оценка производной по параметрам проекта может быть слишком трудоемкой, если количество переменных проекта велико или оно не определено для дискретных входных данных. В настоящее время для решения этой задачи существуют точные алгоритмы, которые основываются на полном переборе функций меньшего числа переменных. Для функций с большим числом переменных недостаточно ресурсов современных ЭВМ. В силу ограничений, накладываемых на возможности ЭВМ, данная задача не может быть решена исключительно с использованием точных алгоритмов. В таких случаях поиск на основе градиента или поиск по сетке становится невозможным из-за сложности поставленной задачи. Методами решения данного типа задач могут служить эволюционные алгоритмы (ЭА), которые представляют собой достаточно мощное средство для нахождения точных или приближенных решений различных уравнений функций оптимизации [26].

Идея использования стохастической оптимизации для ЭМ не нова [27]. Как и в случае любого оптимизационного исследования параметров проекта, постановка задачи должна быть определена разработчиком, в котором четко указаны вектор входных параметров  $X$ , цели  $O_{(X)}$ , ограничения равенства  $h_{(X)}$ , ограничения неравенства  $g_{(X)}$  и границы параметров  $X_1$  и  $X_h$ .

Найти

$$i = 1, 2, \dots, N$$

Минимизировать/максимизировать  $m = 1, 2, \dots, M$ ;

при условии

$$\begin{aligned} h_k(x) &= 0 & k &= 1, 2, \dots, K; \\ g_j(x) &\leq 0 & j &= 1, 2, \dots, J; \\ X_{L,i} &\leq X_i \leq X_{H,i} & i &= 1, 2, \dots, N. \end{aligned} \quad (1.5.)$$

В случае, если количество целей равно одному ( $M = 1$ ), оптимизатор возвращает один вектор параметров, который максимизирует / минимизирует целевую функцию. Если проблема имеет более одной цели оптимизации ( $M > 1$ ), оптимизатор возвращает не доминируемый, а оптимальный по Парето набор решений. Оптимизация с несколькими целями позволяет разработчику понять компромиссы между различными целями и сделать выбор на основе этого набора, а не назначать функцию взвешивания, не зная компромиссов. При этом пределы границ параметров обрабатываются отдельно от ограничений-неравенств, поскольку их выполнение не требует какой-либо оценки функции, поскольку они легко удовлетворяются с помощью линейного отображения.

Преимущества ЭА:

- не требуют никакой информации о поведении функции (например, дифференцируемости и непрерывности);
- разрывы, существующие на поверхности ответа, допустимы при достаточной эффективности оптимизации;
- ЭА относительно стойки к попаданию в локальные оптимумы;
- ЭА пригодны для решения крупномасштабных проблем оптимизации;
- ЭА могут быть использованы для широкого класса задач;
- ЭА просты в реализации;
- ЭА могут быть использованы в задачах с изменяющейся средой [27].

В то же время существует ряд трудностей в практическом использовании ЭА, а именно:

- с помощью ЭА проблематично найти точный глобальный оптимум;

- ЭА неэффективно применять в случае оптимизации функции, требующей большого времени на вычисление;

- ЭА непросто смоделировать для нахождения всех решений задачи;

- не для всех задач удастся найти оптимальное кодирование параметров;

- в многоэкстремальных задачах ЭА сталкивается с множеством аттракторов: на графике функции Растригина от одной переменной видно, что истинный минимум достигается при  $x = 0$ ;

- ЭА трудно применить для изолированных функций. Изолированность («поиск иголки в стоге сена») — проблема для любого метода оптимизации, поскольку функция не предоставляет информации, подсказывающей, в какой области искать максимум.

Следовательно, используются определенные случайные и умные алгоритмы поиска, такие как генетические алгоритмы (ГА) [22], алгоритм пчел [23], алгоритм мух [24] и алгоритм обезьян [25].

Для сравнения данных алгоритмов необходимо провести экспериментальные запуски расчетов несложной задачи. Эксперимент состоит в топологической оптимизации некоторого участка ротора с воздушным зазором, параметром оптимизации принято значение вращающего момента в зазоре. Расчет производится для 3 разных наборов ячеек (рисунок 1.11). Для 1-го случая - 12 ячеек, 2 – 48, 3 -192. Результаты получены расчетов получены в программе Elcut (рисунок 1.12).

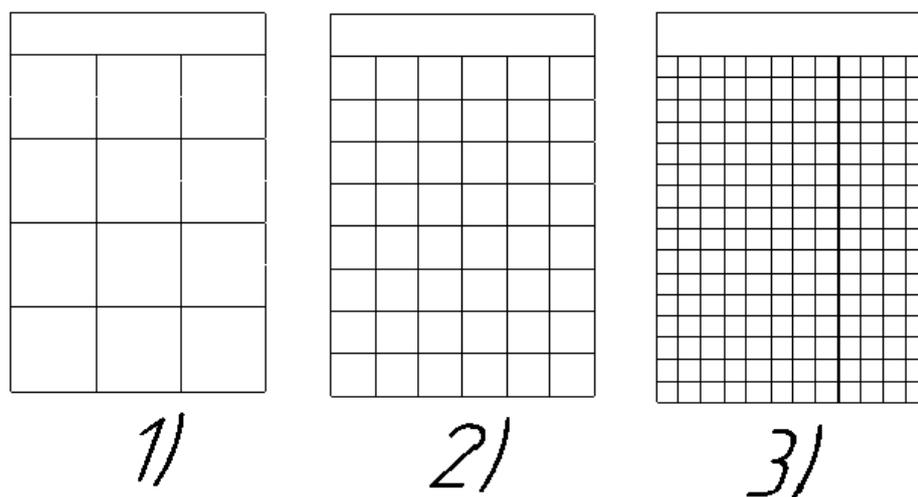


Рисунок 1.11. Участки ротора с разным количеством ячеек

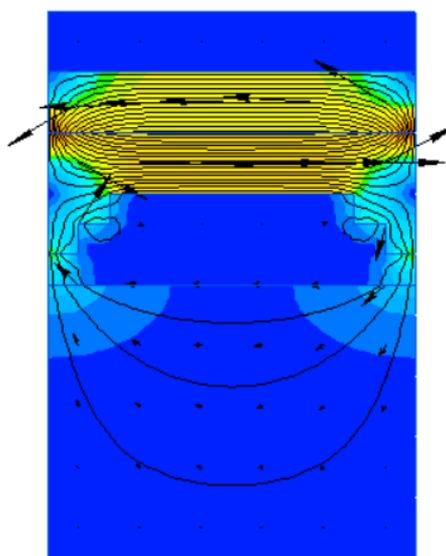


Рисунок 1.12. Пример результата электромагнитного расчета для участка ротора СДПМ

По проведенным экспериментальным запускам алгоритмов [26] получены следующие результаты — наиболее эффективными для топологической оптимизации по степени быстродействия (по достижению значения момента 16 Н·м) можно считать следующие алгоритмы:

- Генетический алгоритм. Параметры алгоритма: 100–120 итераций, 30–35 мутаций, 4 мутирующих гена, 150–160 — размер популяции, тип генерации — 1, тип кроссовера — двухточечный, равномерный закон распределения, среднее время выполнения — для 1 сетки - 132 секунд (время расчета одной операции — 1,1 с), для 2 сетки - 312 секунд (1,25 с), для 3 сетки - 504 секунд (1,4 с);

- Алгоритм пчел. Параметры алгоритма: 150–160 итераций, 150–160 пчел-скаутов, 300–320 пчел-медоносов, 75–85 лучших пчел, 4 бита расстояния рассеяния пчел, тип генерации начальной совокупности — 3, среднее время выполнения — для 1 сетки - 190 секунд, для 2 сетки - 449 секунд, для 3 сетки - 725 секунд;

- Алгоритм мух. Параметры алгоритма: число мух — 30–40, число итераций — 50–60, тип генерации начальной совокупности — 3, число шагов —

6, область видимости мухи - 3 бита, среднее время выполнения — для 1 сетки - 471 секунд, для 2 сетки - 1113 секунд, для 3 сетки - 2588 секунд;

– Алгоритм обезьян. Параметры алгоритма: число обезьян — 100–120, число итераций — 200–220, число бит для изменения — 4, число бит для «прыжка» — 7, число возможных «прыжков» - 10–12, среднее время выполнения — для 1 сетки - 251 секунд, для 2 сетки - 593 секунд, для 3 сетки - 957 секунд;

Как наиболее эффективный по времени исполнения принят ГА (рисунок 1.13.)

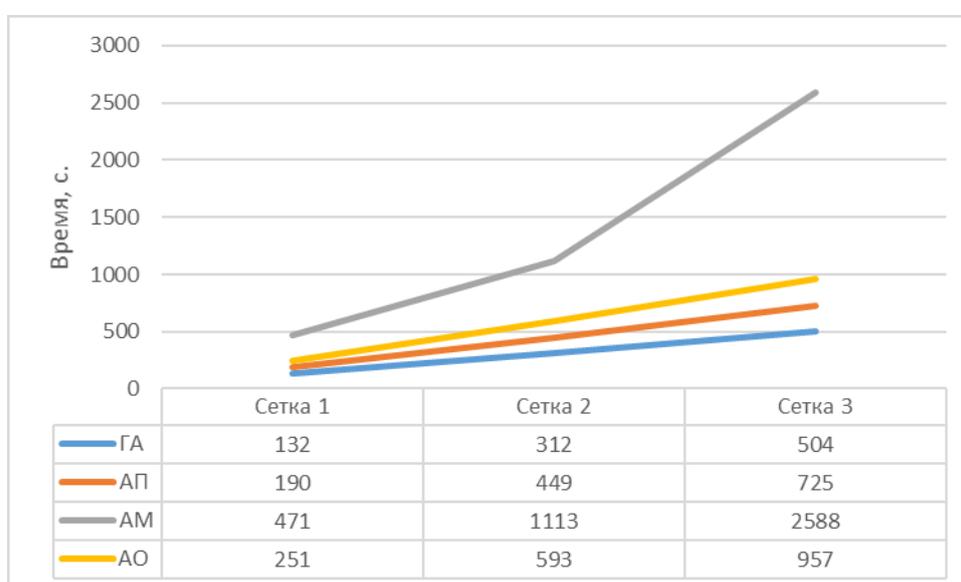


Рисунок 1.13. Время выполнения 4х типов ЭА

Важной особенностью использования методов поиска на основе популяции является гибкость при распределении вычислений [28]. Оценка пригодности индивидуумов в каждом наборе популяций является независимым вычислением и может быть назначена любому компьютеру в сети. Это не обязательно требует вычислительной среды с высокой пропускной способностью. Также не требует высокой степени надежность сети и доступность узлов. Это демонстрируется блок-схемой на рисунке 1.14., на котором показана реализация сервера оптимизации на основе ГА, адаптированного для проводимых исследований.

Однако, ГА не гарантирует обнаружения глобального решения за короткое время. ГА не гарантируют и того, что найденное решение будет оптимальным.

Тем не менее ГА применимы для поиска "достаточно хорошего" решения задачи за "достаточно короткое время". ГА представляют собой разновидность алгоритмов поиска и имеют преимущества перед другими алгоритмами при очень больших размерностях задач и отсутствии упорядоченности в исходных данных, когда альтернативой служит метод полного перебора вариантов.

Главным достоинством ГА является то, что они могут применяться для решения сложных неформализованных задач, для которых не разработано специальных методов.

Существует, по крайней мере, три класса задач, которые могут быть решены при помощи представленного алгоритма:

- задача быстрой локализации одного оптимального значения,
- задача определения нескольких (или всех) глобальных экстремумов,
- задача описания ландшафта исследуемой функции, которая может сопровождаться выделением не только глобальных, но и локальных максимумов» [28].

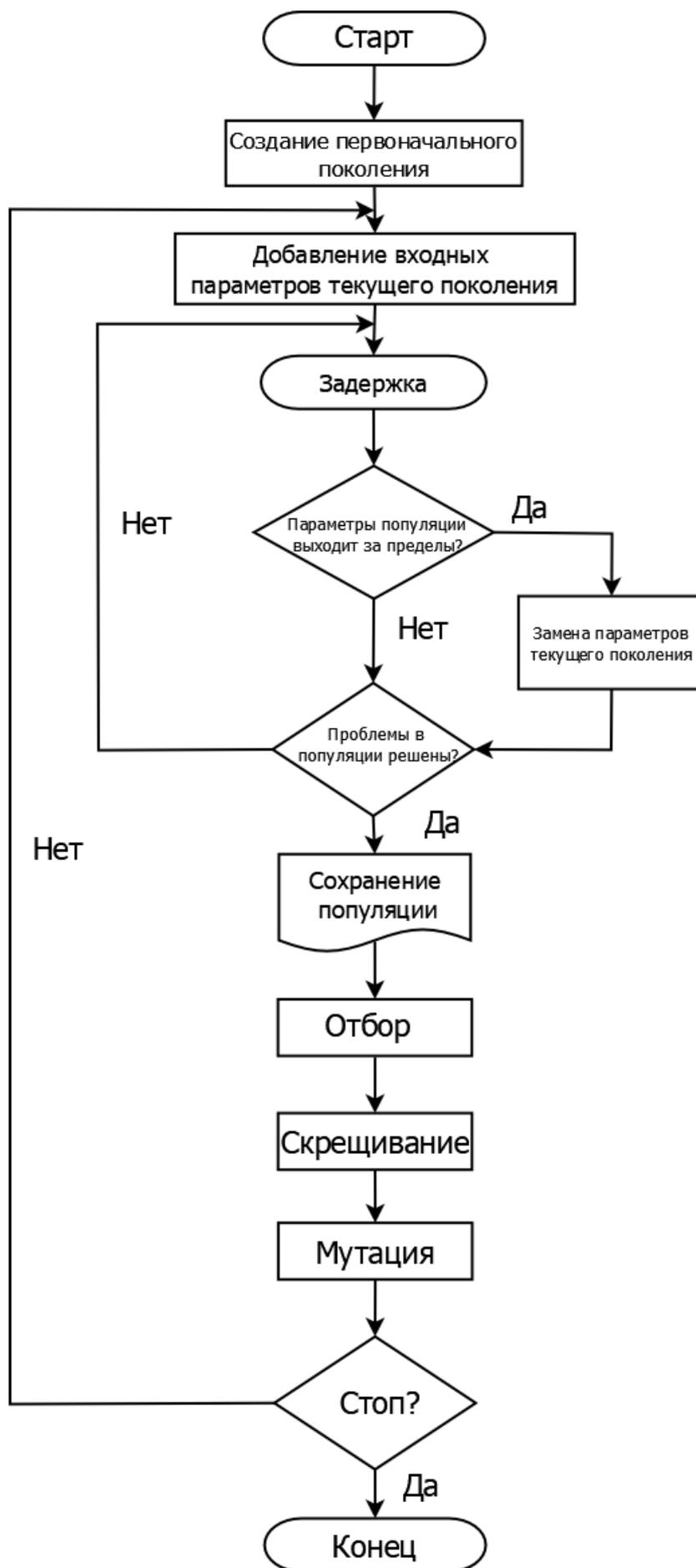


Рисунок 1.14. Алгоритм ГА

Как уже отмечалось выше, при решении оптимизационных задач в непрерывных пространствах вполне естественно представлять гены напрямую вещественными числами. В этом случае, хромосома - вектор вещественных чисел. Точность решений будет определяться исключительно разрядной сеткой той ЭВМ, на которой реализуется real-coded алгоритм. Длина хромосомы будет совпадать с длиной вектора-решения оптимизационной задачи, иначе говоря, каждый ген будет отвечать за одну переменную. Генотип объекта становится идентичным его фенотипу.

Вышесказанное определяет список основных преимуществ real-coded алгоритмов:

1. Использование непрерывных генов делает возможным поиск в больших пространствах (даже в неизвестных), что трудно получить в случае двоичных генов, когда увеличение пространства поиска сокращает точность решения при неизменной длине хромосомы;

2. Одной из важных черт непрерывных ГА является их способность к локальной настройке решений;

3. Использование непрерывных ГА для представления решений удобно, поскольку близко к постановке большинства прикладных задач. Кроме того, отсутствие операций кодирования/декодирования, которые необходимы в битовом ГА, повышает скорость работы алгоритма [39].

Для удобства ГА, представленный в работе, принят непрерывным.

Идея повторных запусков компьютеров для оптимизации электрических машин возникла более 60 лет назад [40]. В контексте современных компьютеров и развития методов стохастической оптимизации использование ГА для оптимизации электромагнитных устройств было предложено Улером и др. в 1994 г. [41]. С тех пор этот метод применялся к нескольким различным сценариям проектирования и развивался, с точки зрения принятых методов и моделей [42], а также, с точки зрения сложности целей проектирования [43]. Анализ проведенного обзора литературы, и частичный список ранее изученных типов определений проблем представлен в таблице 1.2. Цели, ограничения, входные

параметры и метод оценки, принятые для каждой проблемы, перечислены в таблице. В каждом из этих случаев авторы разработали функцию приспособленности, специфичную для решения определенной проблемы.

В одном из первых приложений ГА для оптимизации [44] авторы объединили основанную на ЭСМЦ модель для максимизации эффективности для 4-полюсного двигателя с фиксированным внешним диаметром. Расчеты параметров схемы замещения компенсируются (корректируются) на основе МКЭ для большей точности. Подобная оптимизация эффективности была выполнена для случая топологии внешнего ротора [45].

Исследование, в котором представлены различные модели и задачи проектирования, сформулированные с различными наборами целей и ограничений, опубликовано Бьянки и Болоньани [46] (проблемы 2–4 в таблице 1.2.). Авторы применили эту технику при выполнении оптимизации для двух разных типов задач: в задачах первого типа выходные данные представлены фиксированными, а целью являлось минимизировать вес БДМ, а во втором типе задач были фиксированы внешние размеры машины и выходной крутящий момент был максимизирован из-за теплового ограничения. В первой задаче авторы использовали модели на основе ЭСМЦ и МКЭ и использовали линейность электромагнитного крутящего момента с  $I_{stack}$  для достижения желаемого крутящего момента в каждом случае. Штрафные функции использовались для обработки ограничений неравенства. Позже проведено исследование оптимизации ротора [47] для максимального увеличения крутящего момента при минимизации пульсаций крутящего момента для фиксированного возбуждения статора.

Судхоф и другие авторы [48] расширили объем постановки задачи оптимизации проекта (проблема 8 в таблице 1.2.), включив почти все параметры, которые описывают геометрию машины. Это расширило пространство поиска, чтобы охватить практически все возможности алгоритма. Что, в сочетании с многоцелевым ГА, гарантировало получение действительно глобального Парето-оптимального набора. Это также означало, что конвергенция была намного сложнее - для оптимизации потребовалась популяция из 5000 хромосом более 500

поколений, чтобы сойтись в плотном и разнообразном наборе Парето с двумя целями. Подход, основанный на ЭСМЦ, оказался правильным выбором для такого масштаба возможных проектов, поскольку подход на основе МКЭ потребовал бы чрезмерно больших вычислительных операций.

Вробель и Меллор [49] усовершенствовали процесс, включив тепловую модель машины для максимизации крутящего момента двигателя с вращающимся корпусом (проблема 9 в таблице 1.2.). Эта формулировка также учитывала различные комбинации щелевых полюсов и была направлена на разработку новой конструкции обмотки для использования в исследуемой топологии двигателя.

Для более сложных геометрических форм многобарьерных роторов исследования конструкции проведены Пеллегрини [50-52] с использованием моделей на основе МКЭ. Важной особенностью этих исследований стала параметризация геометрии трехслойной формы ротора, которая наиболее подходит для одновременного достижения низкой пульсации крутящего момента и высокого передаточного числа. Более сложная цель проектирования для достижения высокого значения целевой функции изучена в [50]. Различные формулировки задач (задачи 10-13 таблицы 1.2.) оценены с использованием дополнительных вычислительных ресурсов, например, оптимизация по трем целям, в которой использовался многоточечный МКЭ, потребовала 130 часов вычислений на одном процессоре Intel Centrino T7200.

Для решения проблемы выбора ротора без увеличения количества параметров, необходимых для описания геометрии, предложен метод морфинга геометрии, объединяющий параметризацию топологий ротора вставных ПМ, V-образных ПМ и спиц-ПМ [53].

Исследование, требующее более интенсивных вычислений, выполнено в среде высокопроизводительных вычислений [54] при оптимизации веса геометрии для достижения фиксированного выходного крутящего момента. Функция пригодности использовала временный МКЭ для каждого проекта-кандидата, который требовал 25 часов для оценки 4250 проектов-кандидатов, которые были сгенерированы механизмом оптимизации, работающим на

популяции 85, более 50 поколений против 29 дней для выполнения того же количества оценок на один компьютерный узел. Очевидно, что время вычислений в вычислительной среде меньше, однако сокращение времени не обратно пропорционально количеству ядер или размеру совокупности из-за недостаточного использования ресурсов. Важный вывод, сделанный авторами, - это потенциал ресурсов среды высокопроизводительных вычислений для объединения электромагнитного, теплового и структурного мультифизического анализа для оптимизации конструкции.

Оптимизация конструкции для операции ослабления поля представляет собой более сложную задачу оптимизации, поскольку рабочие точки могут быть не полностью определены и могут зависеть от параметров самой машины. Этот тип конструкции изучен Паразилити в [43]. Базовая или номинальная скорость машины указывается в постановке задачи, тогда как максимальная скорость зависит от способности машины ослаблять поле. Три цели оптимизации: крутящий момент при номинальной скорости, крутящий момент при максимальной скорости при ослаблении поля и вес машины. Для улучшения конвергенции авторы объединяют три цели в один термин, чтобы преобразовать проблему в единую цель и предложить использовать модифицированную версию. Эта формулировка проектной задачи также использует практически все проектные переменные, необходимые для описания конструкции (включая плотность тока косвенно, путем изменения количества проводников), и сходится к одной конструкции для единственной цели оптимизации после оценки 13000 возможных проектов с критерием остановки, основанным на улучшении по сравнению с предыдущим оптимальным дизайном. Вычислительные ресурсы и необходимое время не приводятся.

Обзор проблем оптимизации показывает разнообразие моделей, методов, приближений и формулировок задач. Проведенные проектные исследования в диссертационной работе демонстрируют способность стохастической оптимизации решать различные оптимизационные задачи. В качестве следующего логического шага к автоматизации проектирования предлагается структура,

которая может сплестать сеть общих уравнений, новых методов и моделей, лежащих в основе различных типов задач проектирования СД

Таблица 1.2. Изложение рассмотренных задач оптимизации конструкции

№	Тип машины	Модель расчета	Количество полюсов	Расчетные параметры	Цель	Ограничения и обработка ограничений
1	Внутренний ротор с блоками вставных магнитов	ЭСМЦ	4	Кол-во пазов статора; внешний радиус ротора; осевая длина статора, включая концевые обмотки и концевые соединения; глубина паза; магнитная фракция	Повысить КПД при увеличении крутящего момента и механической скорости вращения ротора	Внешний радиус ротора; плотность тока < магнитная индукция в пазах
2	Поверхностные магниты на внутреннем роторе	ЭСМЦ	2-8	Плотность потока; ширина паза	Минимизировать вес ПМ	КПД > 90%; температура обмотки < 80С
3	Поверхностные магниты на внутреннем роторе	Статичный МКЭ	8	Внутренний радиус статора; ширина зубца; глубина паза; магнитная фракция	Минимизировать вес ПМ	Момент > 200 Н·м; Температура обмотки < 105 С; Минимальная

						магнитная индукция в воздушном зазоре > 0,4 Тл
4	Поверхностные магниты на внутреннем роторе	Статичный МКЭ	8	Внутренний радиус статора; ширина зубца; глубина паза; магнитная фракция.	Максимизировать вращающий момент	Температура обмотки < 105 С; Минимальная магнитная индукция в воздушном зазоре > 0,4 Тл
5	Поверхностные магниты на внешнем роторе	ЭСМЦ	4	Внутренний радиус статора; ширина зубца; количество витков на катушку	Повысить КПД при увеличении крутящего момента и механической скорости вращения ротора	Внешний радиус ротора; плотность тока < магнитная индукция в пазах
6	Внутренний ротор с блоками вставных	ЭСМЦ	4	Внешний радиус ротора; осевая длина статора, включая концевые обмотки и концевые соединения;	Повысить КПД при увеличении крутящего момента и механической	Фазный ток = постоянный; плотность магнитного потока <

	магнитов			магнитная фракция; количество витков на катушку	скорости вращения ротора	максимальная индукция в зубцах
7	Машина с внутренними барьерными ПМ	Статичный МКЭ	4	5 геометрических параметров ротора	Крутящий момент, пульсация крутящего момента	Фиксированная геометрия статора, Фиксированная плотность тока
8	Поверхностные магниты на внутреннем роторе	ЭСМЦ	4	17 параметров геометрии, выбора материала	Объем, потери в меди при фиксированном крутящем моменте	Плотность магнитного потока <максимальная индукция в зубцах; фиксированная потеря проводимости
9	Трехслойный ротор машины с внутренним ПМ	Многоточечный МКЭ	4	6 геометрических параметров, необходимых для задания геометрии ротора	Крутящий момент; пульсация крутящего момента	Фиксированная геометрия статора

10	Намотанный ротор	ЭСМЦ	4	15 геометрических параметров ( прямые, и преобразованные)	Вес, потери	Фиксированная плотность тока
11	Поверхностные магниты	Переходной МКЭ	10	6 закодированных параметров статора и ротора	Вес	Фиксированный внешний радиус статора; фиксированная z-осевая составляющая плотности тока проводника
12	V-образные магниты	МКЭ	10	8 закодированных параметров статора и ротора	КПД при номинальной стоимости материалов	Пульсация крутящего момента <5%; фиксированный внешний радиус статора; фиксированная z-осевая

						составляющая плотности тока проводника
13	U-образная однослойная машина с внутренними ПМ	Магнитоста- тический МКЭ	6	18 геометрических переменных (статор и ротор)	Крутящий момент при ослаблении поля и вес объединены в одну цель	КПД>90%

## 1.5. Постановка задачи исследования

СДПМ являются более энергоэффективными, чем АД, однако они имеют большую стоимость, в том числе из-за высокой стоимости ПМ.

Необходимо уменьшить используемый объем ПМ, сохранив или увеличив высокое значение энергоэффективности. Для решения данной задачи возможно использование КТО, в нашем случае, переход от стандартных положений магнитов (поверхностное или внутренне расположение) к новым топологиям роторов СДПМ.

Точное расположения магнитов определяется методом поиска, обычный поиск требует большого количества времени вычислений, поэтому для исследований выбран ГА. Для решения целевой функции выбран МКЭ, и программа Elcut.

## 1.6. Выводы

1. Проанализированы основные концепции разработки конструкции ЭМ, их преимущества и недостатки.

2. Исследованы основные типы СДПМ и выявлено, что рациональным является переход от стандартных положений магнитов к новым топологиям с целью повышения характеристик.

3. Установлено, что наиболее целесообразный состав ПМ для СДПМ – магниты NdFeB, недостатками которых являются высокая стоимость и риск размагничивания из-за высоких температур.

4. Представлены основные области применения топологической оптимизации, как в России, так и за рубежом, и выявлено, что основным направлением исследований является повышение прочностных характеристик, т.к. отсутствуют проработанные реализации комплексных решений.

5. Для реализации топологической оптимизации необходимо использование алгоритмов поиска, исследованы существующие методы поиска, их преимущества и недостатки, и выбран ГА.

6. При работе с ГА необходимо решение уравнения целевой функции, что является главным недостатком реализации для СДПМ, так как решение не может быть представлено аналитически, необходимо аппроксимировать поле внутри машины.

7. Для аппроксимации используется три основных метода, из которых проанализированы методы ЭСМЦ и МКЭ, представлены варианты оптимизации конструкции СДПМ на базе данных методов и для дальнейших исследований выбран метод МКЭ.

## **2. РАЗРАБОТКА МЕТОДА КОМПЛЕКСНОЙ ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ СДПМ**

### **2.1. Введение**

Цель данного раздела разработать метод КТО для ротора СДПМ. Для достижения данной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Подготовить исходные данные для КТО. Необходима максимально точная геометрическая модель в 2D, параметры ЭД и необходимое ПО.

2. Провести электромагнитный расчет СДПМ в программе Elcut, проверить достоверность полученной модели, посредством сравнения с экспериментальными данными.

3. Провести электромагнитный расчет СДПМ с новым расположением магнитов - V-образными магнитами (расположение ПМ принять примерным), оценить полученные значения с точки зрения перспективности результатов.

4. При положительности результатов 2 и 3 пунктов, необходимо оценить время решения расчета электромагнитных параметров для одного случая.

5. Оптимизировать геометрическую модель СДПМ под задачи КТО.

6. Провести тепловые и прочностные расчеты.

## 2.2. Создание геометрической модели и расчет электромагнитных параметров, проверка полученных значений на достоверность

Для оптимизации был выбран двигатель 11ДВМ160 (вентильный двигатель), далее именуемый «двигатель» (общий вид двигателя показан на рисунке 2.1).

Двигатель относится к изделиям общего назначения, как непрерывного, так и циклического действия, не подлежат ремонту. Двигатель рассчитан на работу со специальным полупроводниковым преобразователем (ЭП).

Эта машина имеет следующие характеристики:

- частота вращения вала 750 об / мин;
- напряжение в звене постоянного тока электропривода 520 В;
- без датчика положения ротора, климатическое исполнение В2;
- номинальная мощность 15 кВт;
- длительно допустимый ток двигателя в момент нагрузки на вал - 40 А;
- одно допустимый момент нагрузки на вал при частоте вращения 100 Н·м;
- рабочая температура окружающей среды от минус 60 до плюс 50;
- относительная влажность окружающей среды 80% при температуре плюс 27;
- степень защиты двигателя IP55.

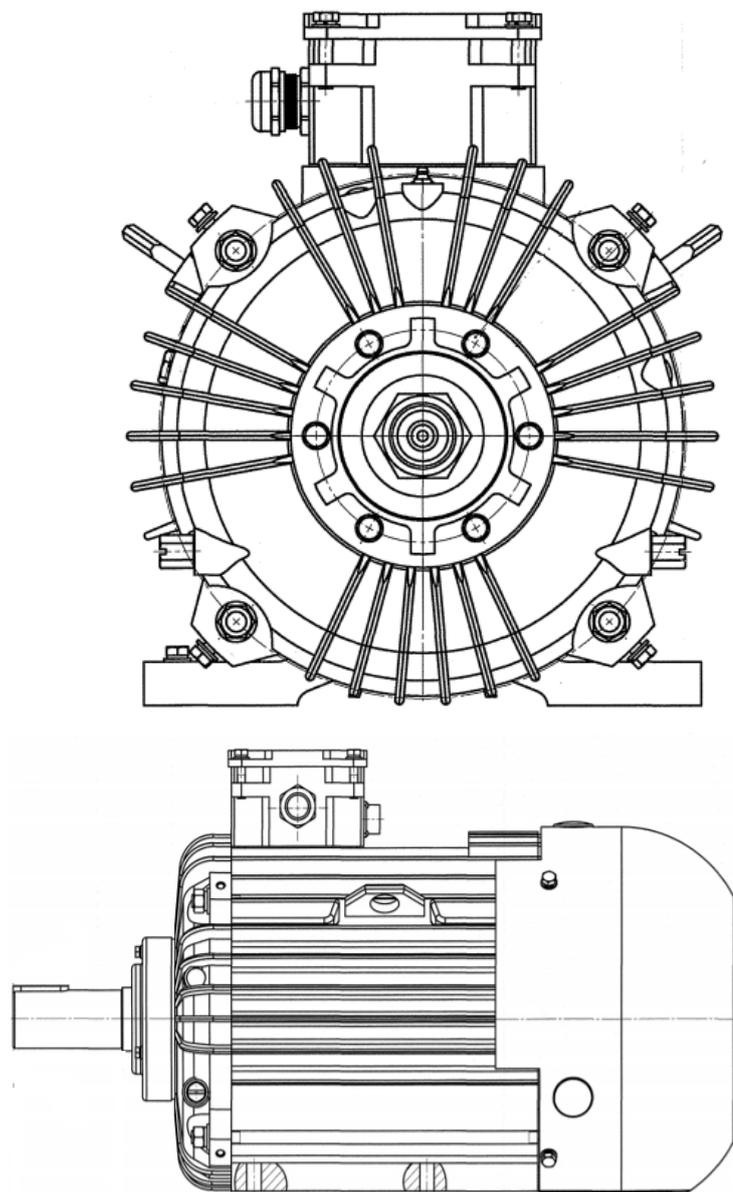


Рисунок 2.1. Общий вид двигателя 11ДВМ160

Данный СДПМ выполнен с внутренними расположениями магнитов внутри тела ротора, 8 магнитов, геометрические размеры представлены на рисунке 2.2.

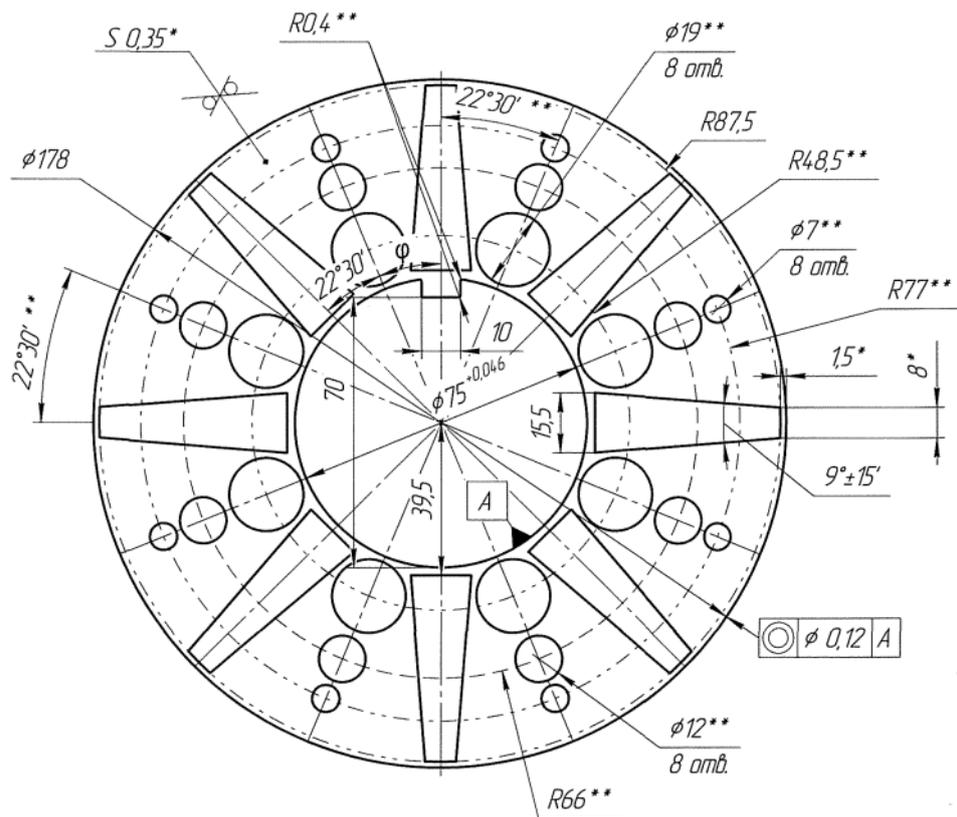


Рисунок 2.2. Геометрические параметры листа ротора СДПМ

Для расчета целевой функции необходимо проверить оптимизацию, мы будем использовать программу ELCUT. ELCUT — это современная программа для инженерного моделирования электромагнитных, термических и механических проблем МКЭ, которая подходит для расчета крутящего момента.

Рассмотрим характеристики, свойства и особенности комплекса программ Elcut, который широко применяется для инженерного моделирования электромагнитных, тепловых и механических задач в работе инженеров самых различных специальностей.

Пакет Elcut развивается на протяжении 20 лет, и начало ему было положено еще при разработке компонентов внутризаводской системы САПР.

Это единственная русскоязычная программа в классе коммерческих программ конечно-элементного моделирования (МКЭ (FEA)) в области квазистационарных электромагнитных задач. В результате получаемые результаты являются достаточно точными и весьма наглядными.

Аппарат Elcut для решения задач магнитостатики.

Задачи магнитостатики могут быть решены в линейной и нелинейной постановках. Для решения задач электромагнитного расчета СДПМ принимаем допущение, что вектор  $B$  находится в плоскости  $x_y$  или  $z_r$ , а векторы тока и потенциала перпендикулярны к этой плоскости [59].

В случае плоскопараллельных задач уравнение можно представить в следующем виде:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{\mu_y} \frac{\partial A}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{1}{\mu_x} \frac{\partial A}{\partial x} \right) = -j + \left( \frac{\partial H_{cy}}{\partial x} - \frac{\partial H_{cx}}{\partial y} \right) \quad (2.1.)$$

при осесимметричном случае:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r\mu_z} \frac{\partial (rA)}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{1}{\mu_r} \frac{\partial A}{\partial z} \right) = -j + \left( \frac{\partial H_{cr}}{\partial z} - \frac{\partial H_{cz}}{\partial r} \right) \quad (2.2.)$$

где  $\mu_x, \mu_y, \mu_z, \mu_r$  - компоненты тензора магнитной проницаемости;

$H_{cx}, H_{cy}, H_{cz}, H_{cr}$  - составляющие коэрцитивной силы

Все эти величины постоянны величины для каждого отдельного элемента.

Замечание. В нелинейной постановке свойства материалов считаются изотропными ( $\mu_x = \mu_y$  или  $\mu_z = \mu_r$ ) и задаются зависимостью В-Н, представленной кубическим сплайном [60].

Плотность тока можно определить по следующему отношению:

$$j = \frac{n \cdot I}{S} \quad (2.3.)$$

где  $n$  - количество витков катушки,

$I$  – значение полного тока,

$S$  - площадь поперечного сечения.

Для работ с ПМ необходимо значение магнитной проницаемости магнитов, которое рассчитывается по следующему определению:

$$B = \mu(B) \cdot (H + H_c); \quad \mu(B) = \frac{B}{H + H_c} \quad (2.4.)$$

При использовании формулы 2.4. и при условии, что рабочие значения ПМ определяются в области меньших значений коэрцитивных сил [61], а не магнитной индукции, то необходимо использовать соответствующую величину:

$$H_c = \frac{1}{\mu(B_r)} B_r \quad (2.5.)$$

где  $B_r$  – значение остаточной индукции ПМ.

Локальные величины:

- Векторный магнитный потенциал  $A$  (функция потока  $\Gamma A$  в осесимметричном случае);

- Вектор магнитной индукции  $B = \text{rot } A$ , для плоско-параллельного поля:

$$B_x = \frac{\partial A}{\partial y}, \quad B_y = \frac{\partial A}{\partial x} \quad (2.6.)$$

для осесимметричного поля:

$$B_z = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial(rA)}{\partial r}, \quad B_r = -\frac{\partial A}{\partial z} \quad (2.7.)$$

- Вектор напряженности магнитного поля:

$$H = \frac{1}{\mu} B \quad (2.8.)$$

где  $\mu$  - тензор магнитной проницаемости.

Интегральные величины:

- Суммарная магнитная сила, действующая на тела, заключенные в заданном объеме:

$$F = \frac{1}{2} \oint_S (H(n \cdot B) + B(n \cdot H) - n(H \cdot B)) ds \quad (2.9.)$$

где интегрирование ведется по поверхности окружающей заданный объем, а  $n$  - единичный вектор внешней нормали к поверхности;

- Суммарный момент магнитных сил, действующих на тела, заключенные в заданном объеме:

$$T = \frac{1}{2} \oint_S ([r \times H](n \cdot B) + [r \times B](n \cdot H) - [r \times n](H \cdot B)) ds \quad (2.10.)$$

где  $r$  - радиус-вектор точки интегрирования.

Момент вычисляется относительно начала координат, момент относительно произвольной точки может быть получен добавлением векторного произведения  $F \times r$ , где  $F$  - это полная сила, а  $r$  - радиус-вектор точки.

- Энергия магнитного поля в линейном случае:

$$W = \frac{1}{2} \int_V (H \cdot B) dv \quad (2.11.)$$

- Энергия магнитного поля в нелинейном случае:

$$W = \int \left( \int_0^B H(B) dB \right) dv \quad (2.12.)$$

- Потокосцепление на один виток обмотки в плоскопараллельном случае:

$$\Psi = \frac{\oint (A ds)}{s} \quad (2.13.)$$

- Потокосцепление на один виток обмотки в осесимметричном случае:

$$\Psi = \frac{2\pi \oint (rA) ds}{s} \quad (2.14.)$$

Для интегрирования выбирается поперечное сечение обмотки, электропроводность материала может зависеть от температуры. Формула задает зависимость температуры от координат.

Изменения модели после испытаний и предстоящих изменений конструкции двигателя 15 кВт.

Данные по обмотке представлены на рисунке 2.3.

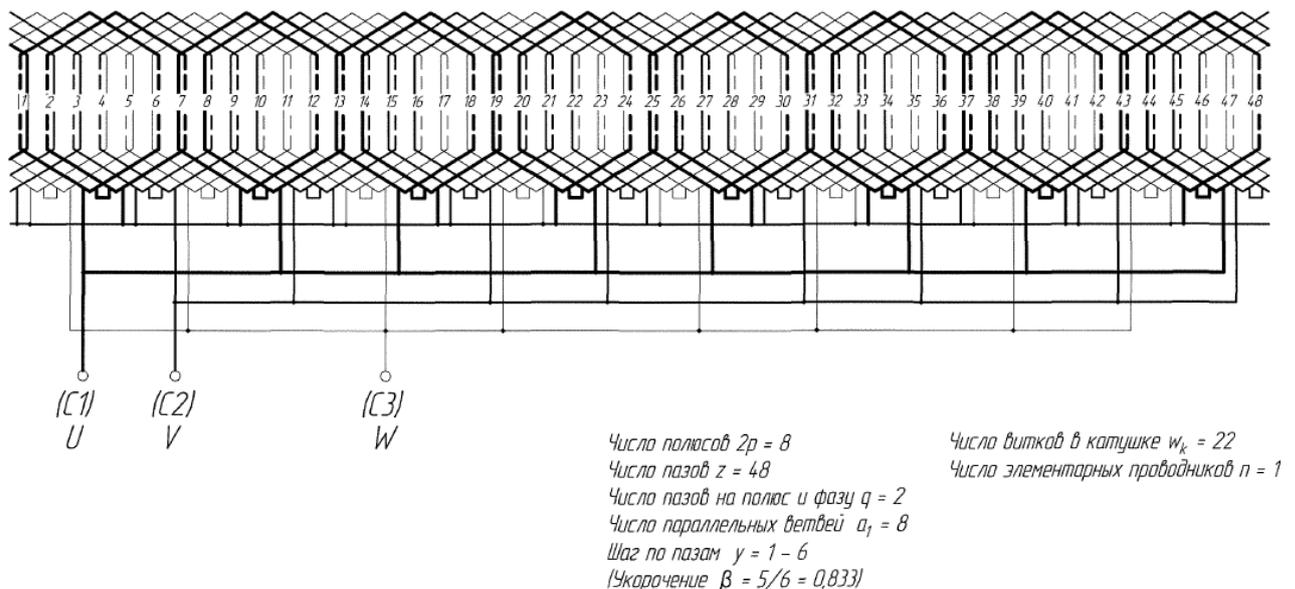


Рисунок 2.3. Схема электрических соединений двигателя 15 кВт

На основе рисунка обмоток двигателя, мы получаем следующее расположение фаз в пазах обмотки.

Таблица 2.1. Расположение фаз в пазах двигателя 15 кВт

Паз	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Верх	A+	A-	B-	B+	C+	C-	A-	A+	B+	B-	C-	C+
Низ	A+	B+	B-	C-	C+	A+	A-	B-	B+	C+	C-	A-

Дальнейшее расположение в пазах будет повторяться по аналогичному принципу [62].

Для работы в программе Elcut необходимо:

1. Чертеж разреза двигателя (в .dxf формате, нами использовалась программа Компас). Здесь представлен статор, ротор, 48 пазов, 8 магнитов. Размеры соответствует реальным значениям (рисунок 2.4). Отличия от стандартной модели состоит в том, что добавлены воздушные отверстия в теле ротора [63], и пазы разделены на две области, так как используется двойная обмотка.

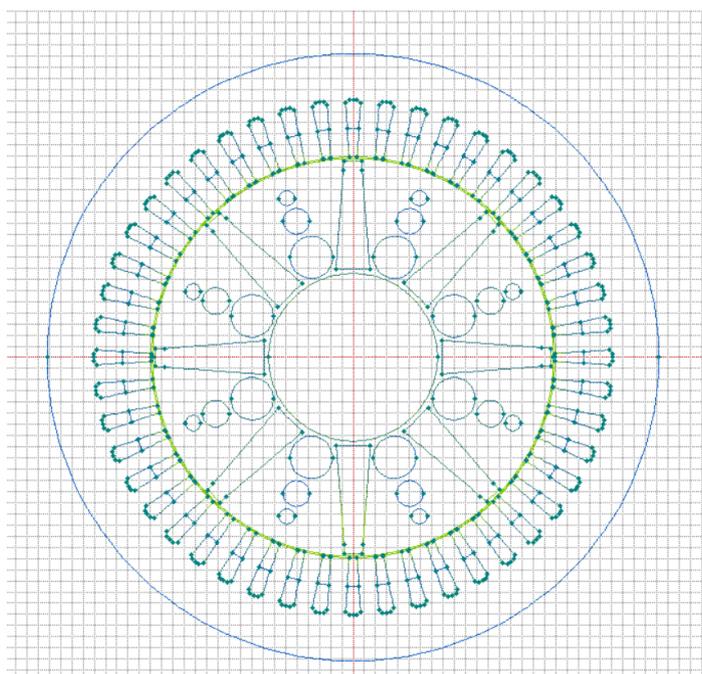


Рисунок 2.4. Геометрическая модель СВЭД 15 кВт

2. Необходимо правильно задать свойства материала. Материал надо будет задать для следующих элементов: пазы A+,A-,B+,B-,C+,C-, воздушный зазор, сталь ротора, сталь статора, вал, воздух между магнитами, 8 видов магнитов.

Рассмотрим каждый из элементов отдельно:

- Пазы A+,A-,B+,B-,C+,C-. Магнитная проницаемость по оси x,y будет составлять 1. Плотность тока будет рассчитывать как отношение тока к сечению обмотки. Например, в пазу A+ она составила  $1350000 \text{ A/m}^2$  (будет меняться в зависимости от рабочего тока)

- Воздушный зазор, воздух между магнитами. Магнитная проницаемость по оси x,y будет составлять 1, все остальные параметры равны 0.

- Сталь статора, сталь ротора, вал. Магнитная проницаемость будет задаваться кривой (рисунок 2.5).

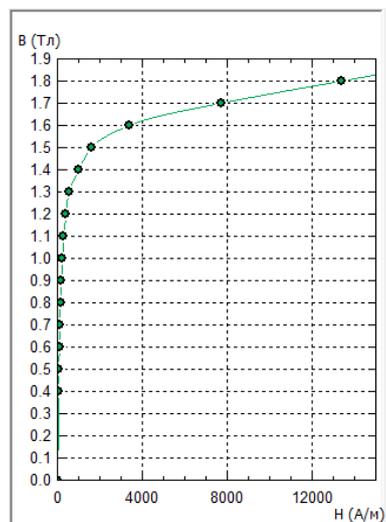


Рисунок 2.5. Кривая магнитной проницаемости стали ротора СДПМ

- 8 видов магнитов. Магнитная проницаемость по оси x,y будет составлять 1,03. Коэрцитивная сила магнитов будет составлять  $1000000 \text{ A/m}$  (мы берем материал неодим). Разница у них будет в направлении коэрцитивной силы.

Результаты моделирования представлены на рисунке 2.6.

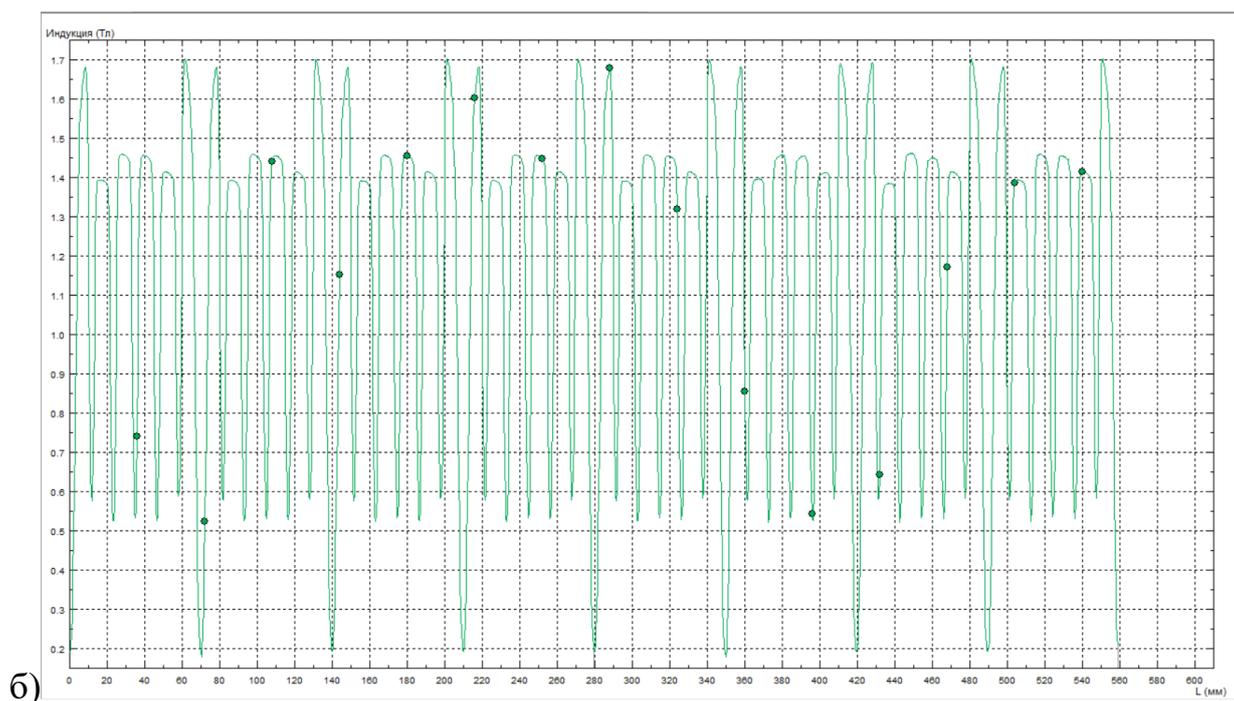
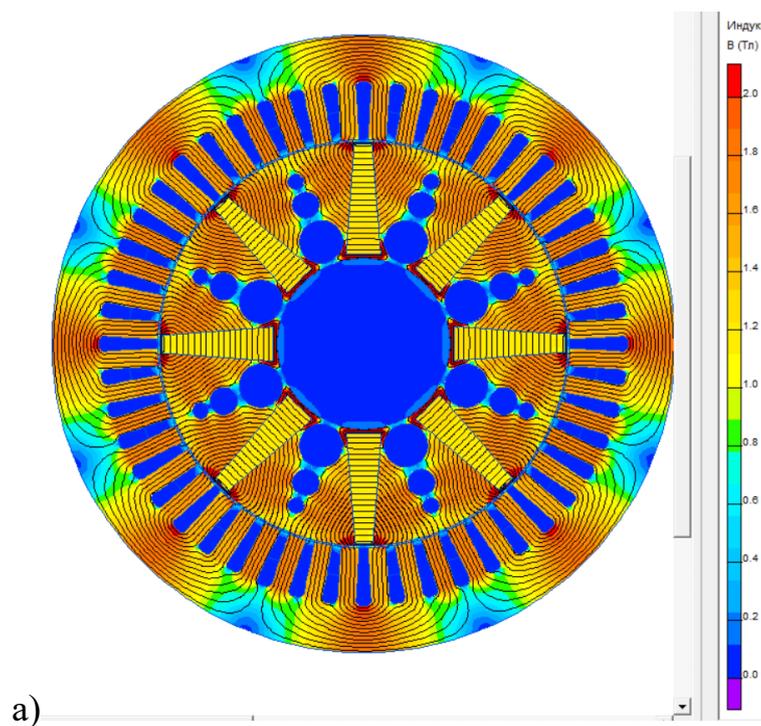


Рисунок 2.6. а) Расположение векторов магнитной индукции СДПМ

б) График изменения магнитной индукции

После того как мы задали все параметры материалов всех элементов, то мы можем провести расчет магнитостатики для данной конструкции. Первым пунктом идет построение сетки конечных элементов, далее расчет методом

Ньютона-Рафсона, причем решение линейно задачи на каждой итерации этого метода осуществляется по изложенной ранее схеме [64-68].

В литературе этот процесс иногда называется Н-метод или Н-refinement.

Для верификации модели необходимо обратиться к экспериментальным данным, полученным в ходе работа по реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства на тему: «Создание серии электроприводов на базе российских высокоэффективных синхронных двигателей для станков-качалок нефти с применением беспроводных систем передачи данных и адаптивной системой управления для «умных» месторождений», в рамках Государственной программы Российской Федерации «Развитие науки и технологий» на 2013-2020 годы, утвержденными постановлением Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218, договор № ДР-936/17 от 26 октября 2017 года с участием ФГБОУ ВО «КГЭУ» и АО «ЧЭАЗ».

В процессе экспериментальных запусков макетного двигателя, образец не подтверждает мощность в 15 кВт при значении тока в 40 А. У опытного двигателя, на частоте питания 50 Гц при скорости 1000 об/мин, при повышении значения тока с 28,5А до 49 А, выходная мощность увеличилась с 5,2 кВт до 10,8 кВт.

Установленный факт однозначно соответствует теории электромагнитного преобразования энергии в СДПМ, из которой известно, что электромагнитный момент двигателя  $M_d$  определяется выражением вида [69]:

$$M_d = \frac{3}{2} C_d \times i_{1q} \quad (2.15.)$$

где

$$C_d = p_n \times \psi_f \quad (2.16.)$$

$$\psi_f = \Phi \times w \quad (2.17.)$$

Принятые обозначения:

$C_d$  - коэффициент пропорциональности между электромагнитным моментом  $M_d$  и проекцией  $i_{1q}$ , обобщенного вектора тока статора на ортогональную ось прямоугольной системы координат d -q;

$p_n$  – число пар полюсов;

$\Psi_f$  - вектор составляющей потокосцепления статора от потока  $\Phi$  ПМ;

$w$  - число витков обмотки статора.

Отрицательный эффект при повышении значения номинального тока для экспериментального образца – необходимость в изменении конструктивной части частотно-регулируемого привода (ЧРП) [70-72]. При этом также необходимо повысить сечение проводников, значение которых определится на этапе тепловых расчетов.

Предложение заключается не в изменении конструктивной части ЧРП, а в понижении тока до 45 А, таким образом изменение составляет

$$57 - 45 = 12 \text{ А} \quad \text{или} \quad \frac{12}{57} \times 100\% = 21\%$$

С другой стороны, сохранение заявленной мощности 15кВт означает сохранение на валу неизменного момента 192 Н·м. Следовательно, при требуемом значении тока 45А необходимо увеличить значение коэффициента  $C_d$  на 21%. Но это возможно сделать без изменения основного потока ПМ ротора только путем увеличения числа витков обмотки на 21%, что в пересчете на коэффициент заполнения паза не превысит допускаемого значения 0,72-0,74. Это подтверждает упрощенный расчет для провода ПЭТ 155 – 1,18, используемого в опытном образце (см. рисунок 2.7.), и для геометрических размеров паза (Паз 160LB6). Геометрию паза можно с избытком аппроксимировать равносторонней трапецией с нижним основанием 6,6мм и верхним основанием 3мм и высотой 25,3мм, таким образом площадь «в свету» составит  $(6,6+3)/2 * 25,3 = 121,44 \text{ мм}^2$ . Медный проводник имеет диаметр 1,18+/-0,012мм и толщину лаковой изоляции 0,05мм, что прибавляет к диаметру провода еще 1мм, тогда площадь поперечного сечения провода можно с запасом определить как площадь описанного квадрата со стороной 1,28мм, что составит  $1,64 \text{ мм}^2$ . Таким образом, для полного заполнения паза необходимо  $121,44/1,64 = 74$  проводника.

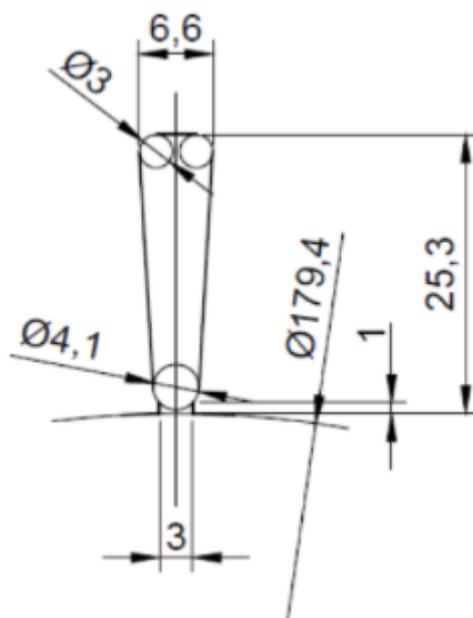


Рисунок 2.7. Геометрические размеры паза 160LB6

Исходя из конструкторской документации в одной катушке обмотки содержится 36 витков (двухслойная обмотка в пазе), таким образом для повышения количества проводников в пазе на 21%, необходимо дополнительно использовать 8 витков. Для проверки запаса межфазной изоляции и наличия места для клиньев, которые необходимы для фиксации катушки в пазе, рассчитаем процент от полного заполнения паза  $44/74=0,59$ , что является допустимым значением.

Для верификации корректирующих расчетов при помощи сертифицированного программного обеспечения следует производить сравнение этих расчетов с результатами экспериментальных исследований опытных изделий на стенде ЧЭАЗ на основе двух экспериментов (1. Определение ЭДС на номинальной скорости; 2. Определение номинального тока при остальных номинальных параметрах) [73].

Порядок расчетов может быть следующий:

- результаты испытаний макетного образца СВЭД-15 кВт, 750 об/мин, 50 Гц по п.а) от 27.02.2020г. показали, что ЭДС вращения  $E = 165,6$  В.

Из теории электрических машин известна зависимость ЭДС вращения от угловой скорости вращения вала двигателя:

$$E = C_d \times \omega \quad (2.18.)$$

Откуда  $C_d = \frac{E}{\omega}$ . Подставляя значения  $E=165,6$  В и  $\omega = 78,5$  рад/с, получим

$$C_d = 2,11.$$

Результаты испытаний СВЭД под нагрузкой при питании от ПЧ-15кВт

Таблица 2.2. Испытания макетного образца СВЭД -15 кВт под нагрузкой при питании от ПЧ-15 кВт, частота 50Гц, 750 об/мин (от 27.02.2020г.)

№п.п.	$f$ , Гц	$n$ , об/мин	$M_{\text{нагр}}$ , %	$M_{\text{дат.мом}}$ Н·м	$P_2$ ,кВт	$I_{\text{СВЭД}}$ ,А	$\text{Cos}\varphi$ СВЭД/ПЧ	Примечания Т°,С и проч.
1	50	750	15%	81	6,3	24	-	-
2	50	750	20%	106	8,3	31	-	-
3	50	750	22,8%	121	9,5	36	-	-
4	50	750	24,8%	130,7	10,3	39	-	-
5	50	750	26,5%	139,4	10,9	42	-	-
6	50	750	28,2%	147,7	11,6	45	0,99/-	$P_1=12,2$ ; кпд=0,95
7	50	750	30,2%	157,4	12,36	48	0,99/-	$P_1=13,02$ ; кпд=0,95

Из формулы для электромагнитного момента следует:

$$C_d = \frac{2M_d}{3 \cdot i_{1q}} \quad (2.19.)$$

Чтобы использовать экспериментальные данные, необходимо учитывать следующие соотношения:

$$M_d = \frac{M_{\text{ДМ}}}{\eta}; \quad i_{1q} = \sqrt{2} \cdot I_{\text{СВЭД}} \quad (2.20.)$$

Тогда получим выражение для расчета  $C_d$  :

$$C_d = \frac{2M_d}{3 \cdot \eta \cdot \sqrt{2} \cdot I_{\text{СВЭД}}} \quad (2.21.)$$

Для предельных значений тока нагрузки (опыты по п.6 и п.7 табл.2.2.) значения  $C_d$  следующие:

$$\text{п.6: } C_d = \frac{2M_d}{3 \cdot \eta \cdot \sqrt{2} \cdot I_{\text{СВЭД}}} = \frac{0,498 \cdot M_{\text{ДМ}}}{I_{\text{СВЭД}}} = \frac{0,498 \cdot 147,7}{45} = 1,635$$

$$\text{п.7: } C_d = \frac{2M_d}{3 \cdot \eta \cdot \sqrt{2} \cdot I_{\text{СВЭД}}} = \frac{0,498 \cdot M_{\text{ДМ}}}{I_{\text{СВЭД}}} = \frac{0,498 \cdot 157,4}{47} = 1,668$$

Таблица 2.3. Испытания макетного образца СВЭД -15 кВт под нагрузкой при питании от ПЧ-55 кВт, частота 50Гц,75Гц, 100 Гц; 750 об/мин, 1000 об/мин, 1500 об/мин

№п.п.	$f$ , Гц	$n$ , об/мин	$M_{\text{нагр}}$ , %	$M_{\text{дат.мом}}$ Н·м	$P_2$ , кВт	$I_{\text{СВЭД}}$ , А	$\cos\phi$ СВЭД/ ПЧ	Примечания Т°,С и проч.
1	50	750	-	192	15,04	57	0,98/-	-
2	75	1000	-	192	20	57	-/-	-
3	100	1500	-	192	30,4	59,5	0,99/0,87	$\eta = 0,95$

Для предельных значений тока нагрузки (опыты по п.1, п.2 и п.3 Табл.2.3.) значения  $C_d$  следующие:

$$\text{п.1: } C_d = \frac{2M_d}{3 \cdot \eta \cdot \sqrt{2} \cdot I_{\text{СВЭД}}} = \frac{0,498 \cdot M_{\text{ДМ}}}{I_{\text{СВЭД}}} = \frac{0,498 \cdot 192}{57} = 1,677$$

$$\text{п.2: } C_d = \frac{2M_d}{3 \cdot \eta \cdot \sqrt{2} \cdot I_{\text{СВЭД}}} = \frac{0,498 \cdot M_{\text{ДМ}}}{I_{\text{СВЭД}}} = \frac{0,498 \cdot 192}{57} = 1,677$$

$$\text{п.3: } C_d = \frac{2M_d}{3 \cdot \eta \cdot \sqrt{2} \cdot I_{\text{СВЭД}}} = \frac{0,498 \cdot M_{\text{ДМ}}}{I_{\text{СВЭД}}} = \frac{0,498 \cdot 192}{59,5} = 1,607$$

Теперь из таблицы 2.1. возьмем результаты опыта №7, а именно ток 48А, момент будет составлять 156,8269 Н·м (плотность тока составит 1,66 А/мм<sup>2</sup>). В

Labelmover проведем 18 расчетов (шаги по 5 градусов), мы получили следующие результаты, представленные в таблице 2.4.

Таблица 2.4. Результаты расчета для опыта №7 таблицы 2.2

Шаг	Момент, Н·м
0	18,435
1	49,712
1_2	-61,193
1_3	10,195
1_4	87,987
1_5	-230,86
1_6	-13,336
1_7	229,74
1_8	-305,98
1_9	-12,183
1_10	305,64
1_11	-226,37
1_12	-4,932
1_13	248,5
1_14	-46,019
1_15	6,1493
1_16	133,86
1_17	42,027

Рассмотрим работу Labelmover.

ELCUT LabelMover - это простая программа, позволяющая решать задачи параметрического и вариационного анализа. LabelMover сгенерирует последовательность задач, решит их и покажет результаты в виде таблицы или графика.

Информацию о параметрах LabelMover (об изменениях, которые мы задали, результатах, которые необходимо показывать в таблице и т.д.) можно сохранить в файле, и впоследствии снова открыть.

LabelMover работает со всеми типами задач, поддерживаемыми системой ELCUT. В частности, LabelMover поддерживает работу с связанными задачами.

Алгоритм работы:

- Нажмите «Исходная задача» и выберите задачу, которую вы хотите исследовать.

- Нажмите «Задать значения» и задайте интересующие вас характеристики решения.

- Нажмите «Записать шаги» и задайте последовательность изменений геометрии или физических свойств задачи.

- Нажмите «Получить результаты» LabelMover решит описанную вами последовательность задач и покажет результаты в виде таблицы или графика.

На первом этапе выбираем реализованную модель двигателя в Elcut.

На втором этапе задаем значения для составного контура (в него включаем ротор, магниты, вал, и воздушные отверстия ротора), как это реализовано представлено на рисунке 2.8.

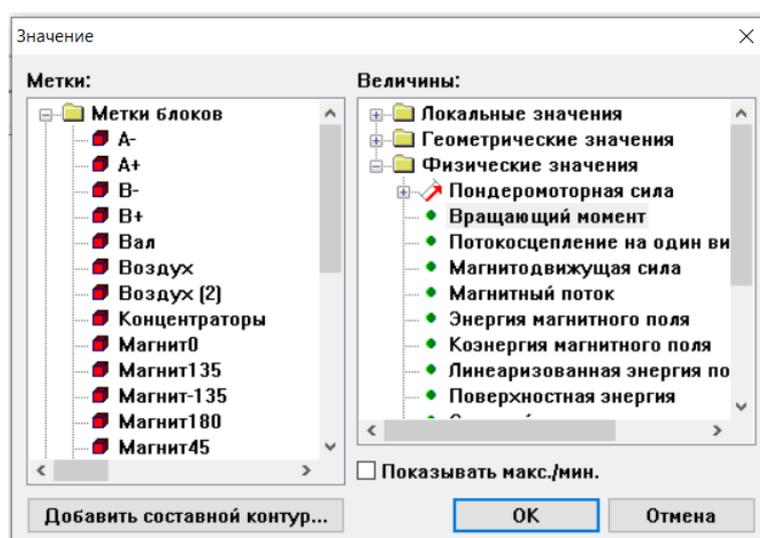


Рисунок 2.8. Окно выбора контура и рассчитываемой величины

На третьем этапе задаем параметры шага (в нашем случае вращение статора на 5 градусов). Вращение статора, а не ротора, связано с техническими ограничениями, и упрощение расчета в данном случае. Выбор параметров представлен на рисунке 2.9.

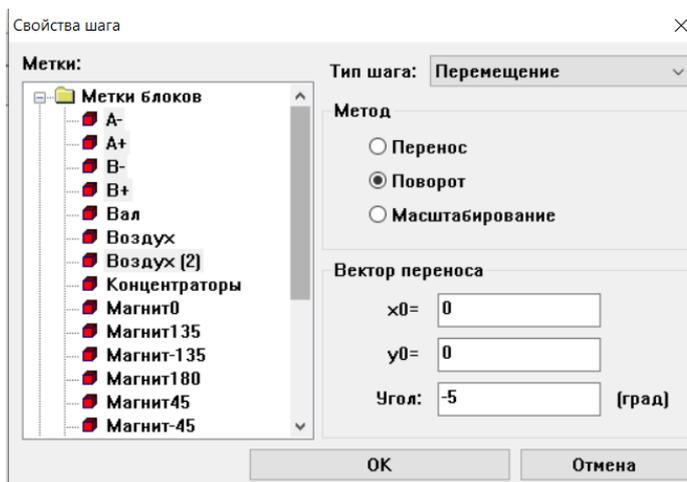


Рисунок 2.9. Окно выбора метки блоков и тип шага

На четвертом этапе уже получаем результаты вращения в виде таблицы или графика.

Для этих результатов среднеквадратичное значение момента мы получаем 156,8269 Н·м, отклонение от испытаний составляет 0,36 %, что является допустимым результатом. График изменения представлен на рисунке 2.10.



Рисунок 2.10. График изменения момента при 18 шагах (опыт №7 таблицы 2.2.)

Теперь из таблицы 2.2. возьмем результаты опыта №6, а именно ток 45А, момент будет составлять 147,7 Н·м (плотность тока составит 1,56 А/мм<sup>2</sup>). В Labelmover проведем 18 расчетов (шаги по 5 градусов), мы получили следующие результаты, представленные в таблице 2.5.

Таблица 2.5. Результаты расчета для опыта №6 таблицы 2.3

Шаг	Момент, Н·м
0	18,36
1	57,12
1_2	-65,69
1_3	9,82
1_4	92,65
1_5	-224,65
1_6	-12,87
1_7	225,88
1_8	-294,10
1_9	-10,68
1_10	296,38
1_11	-220,35
1_12	-4,17
1_13	242,83
1_14	-51,65
1_15	5,56
1_16	135,83
1_17	31,07

Для этих результатов среднеквадратичное значение момента мы получаем 149,09 Н·м, отклонение от испытаний составляет 0,93%, что является допустимым результатом. График изменения представлен на рисунке 2.11.

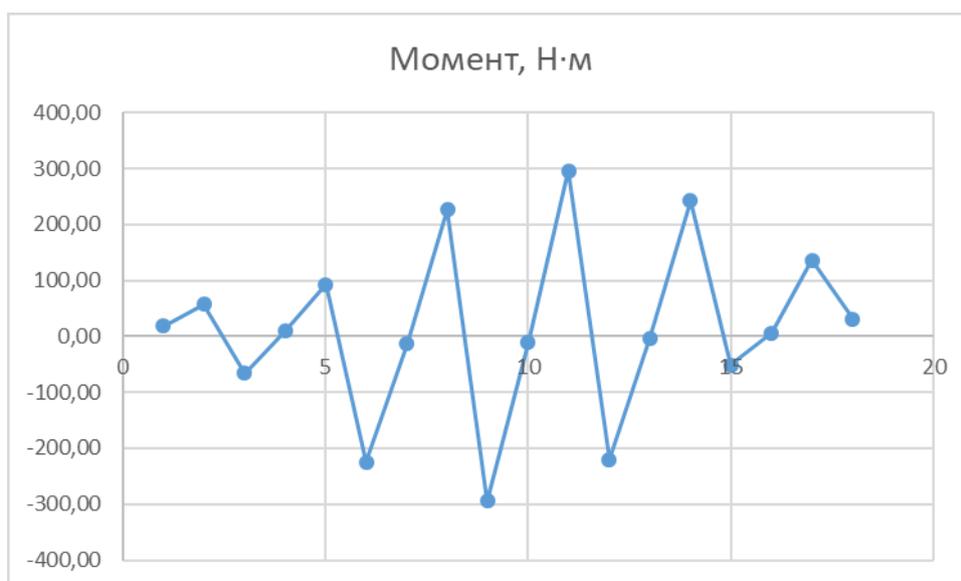


Рисунок 2.11. Изменение момента при 18 шагах (опыт №6 таблицы 2.2)

Теперь перейдем к изменению конструкции, а именно увеличение витков обмотки.

Теперь из таблицы 2.3. возьмем результаты опыта №1, а именно ток 57 А, момент будет составлять 192 Н·м (плотность тока составит 1,99 А/мм<sup>2</sup>). В Labelmover проведем 18 расчетов (шаги по 5 градусов), мы получили следующие результаты, представленные в таблице 2.6.

Таблица 2.6. Результаты расчета для опыта №1 таблицы 2.3.

Шаг	Момент, Н·м
0	12,81
1	24,80
1_2	-79,62
1_3	-6,49
1_4	98,29
1_5	-292,99
1_6	-23,10
1_7	269,94

1_8	-393,62
1_9	-13,00
1_10	349,42
1_11	-291,14
1_12	-23,78
1_13	299,83
1_14	-62,08
1_15	-2,71
1_16	140,13
1_17	46,04

Для этих результатов среднеквадратичное значение момента мы получаем 190,62 Н·м, отклонение от испытаний составляет 0,71%, что является допустимым результатом. График изменения представлен на рисунке 2.12.

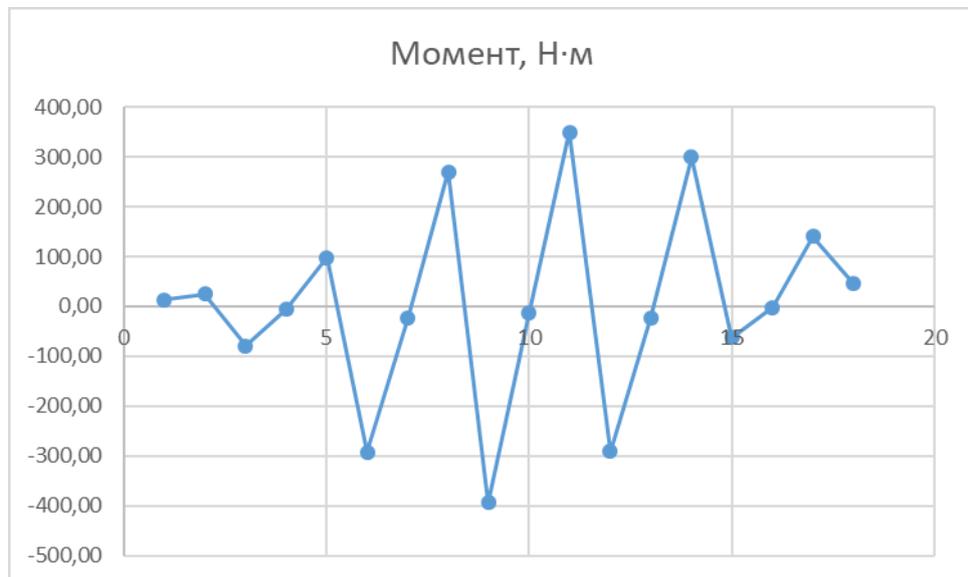


Рисунок 2.12. График изменения момента при 18 шагах (опыт №1 таблицы 2.3.)

### 2.3. Оценка перспективности топологической оптимизации и оптимизация геометрической модели для упрощения расчетов

Для оценки перспективности КТО необходимо предварительно оценить значения вращающего момента для СДПМ. С этой целью изменяется стандартное положение магнитов на V- или W-образные магниты, с сохранением объемов ПМ. В нашем случае, расположили магниты как на рисунке 2.13.

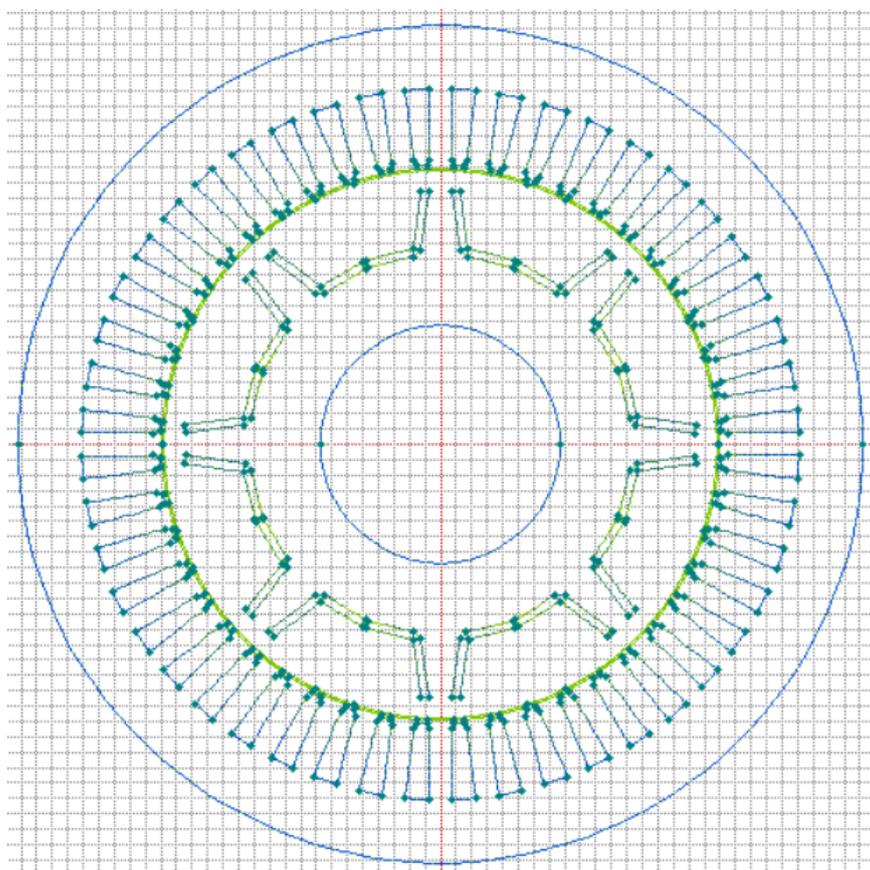


Рисунок 2.13. Один из примерных вариантов реализации КТО для СДПМ

Для представленной модели СДПМ проведем 18 расчетов (шаги по 5 градусам) и получили следующие результаты, представленные в таблице 2.7, момент составил 163,6 Н·м, что больше стандартного значения на 3,8%. Предварительно можно говорить о целесообразности проведения КТО.

Таблица 2.7. Результаты расчета для опыта №7 таблицы 2.2

Шаг	Момент, Н·м
0	18,435
1	49,712
1_2	-61,193
1_3	10,195
1_4	87,987
1_5	-230,86
1_6	-13,336
1_7	229,74
1_8	-305,98
1_9	-12,183
1_10	305,64
1_11	-226,37
1_12	-4,932
1_13	248,5
1_14	-46,019
1_15	6,1493
1_16	133,86
1_17	42,027

Теперь необходимо определиться с временем решения электромагнитных параметров для полной модели СДПМ, с целью оптимизации времени расчетов КТО. Для этого необходимо определить количество узлов сетки для модели и время расчета [74].

Для модели, представленной на рисунке 2.4., количество узлов сетки составляет 125351 узлов сетки (рисунок 2.14)

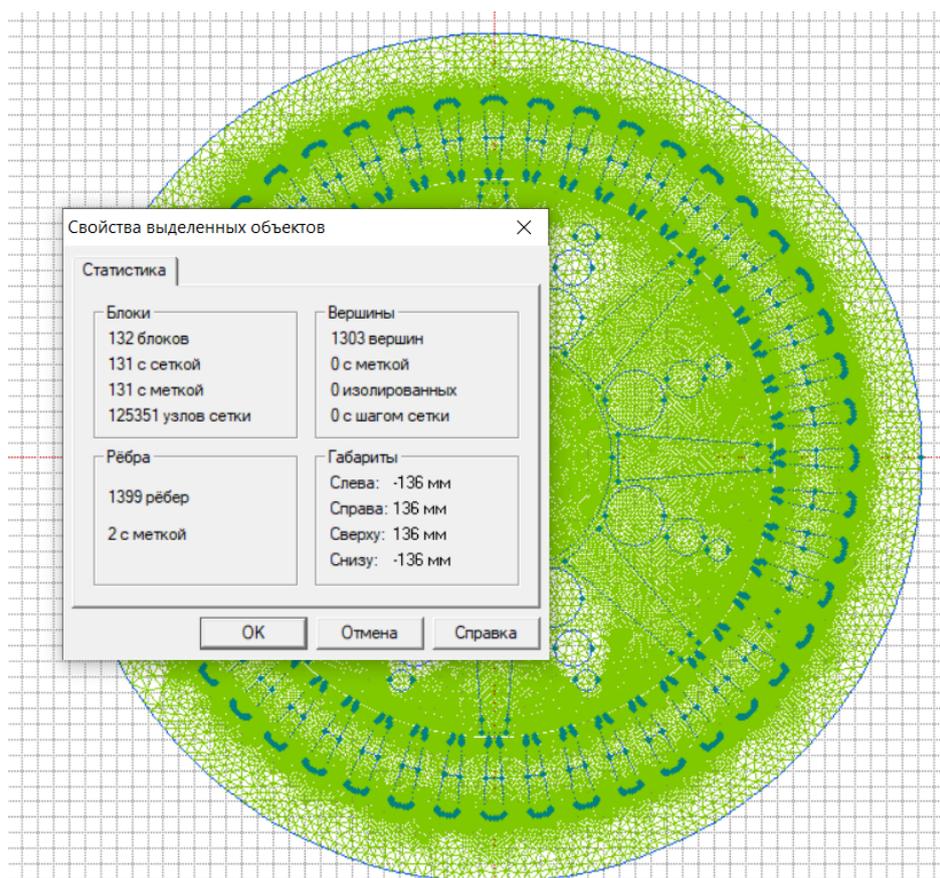


Рисунок 2.14. Свойства модели для расчета МКЭ СДПМ

Время решения внешней итерации (методом Ньютона) составило 80 секунд.

При КТО необходимо для решения целевой функции рассчитать 4 значения хромосом, учитывая, что помимо решения внешней итерации, надо задавать значения генов в виде материалов ротора, и получать значения из интегрального калькулятора Elcut, и получаем решение равное 150 секундам для одной хромосомы, для нахождения значения среднеквадратичного момента вращения необходимо рассчитать 19 вращений. Таким образом для одной популяции у нас будет затрачиваться 3,16 часа.

Таких решений необходимо минимум, при хорошей изначальной популяции, около 700 популяций, т.е. минимум 92 дня. И надо учитывать, что желательно провести несколько КТО, для достоверности расчетов. Даже с учетом возможности многопоточных расчетов (8 потоков) получаем расчет КТО в 11,5 дней для следующей конфигурации ПК – процессор Intel(R) Core(TM) i3-7020U (2.30МГц), RAM 6 ГБ (2133 МГц), NVIDIA GeForce 940MX 2 ГБ.

Приходим к выводу, что необходимо снизить время расчетов и количество исходных ячеек для материалов ротора СДПМ, решением может стать модификация геометрической модели, которая включает в себя уменьшение модели до определенного сектора, упрощение геометрических форм элементов СДПМ и ручная настройка сетки в Elcut.

Модификация модели СД будет выглядеть следующим образом:

1. Изменить конструкцию пазов. Перейдем от сложной конструкции пазов к самой простой по геометрии (рисунок 2.15). За счет данного упрощения мы получаем уменьшение количества ячеек до 54629 (рисунок 2.16) и время расчета до 120 сек. для одной хромосомы. Среднеквадратичное значение момента составляет 160,652 Н·м (2,3% отклонения от стандартной конструкции).

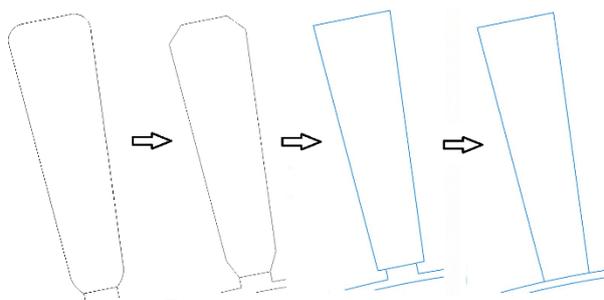


Рисунок 2.15. Пример изменения формы паза статора СДПМ

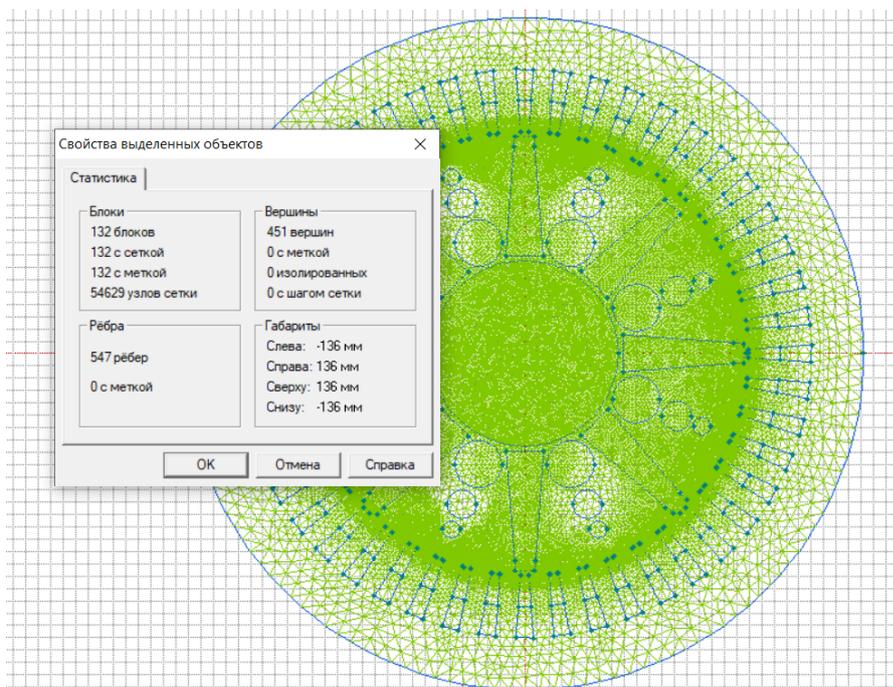


Рисунок 2.16. Результаты изменения количества ячеек при упрощении формы паза

2. В программе ELCUT наиболее точный крутящий момент вычисляется с использованием шага автоматической выборки сетки, и, таким образом, для двигателя количество элементов сетки может составлять более 100000, что мы и видим в первоначальном расчете. Поэтому считается возможным сделать сетку с ручным шагом выборки.

Важно уточнить, что во время оптимизации мы будем сравнивать конкретную конструкцию и конструкцию после оптимизации; поэтому нам не важна точность полученного крутящего момента, но важно увеличение его значения [75-77].

Для геометрии, представленной на рисунке 2.16., изменим сетку на статоре, как наименее сложной и важной для расчетов. За счет данного упрощения мы получаем уменьшение количества ячеек до 7458 (рисунок 2.17) и время расчета до 102 сек. для одной хромосомы. Среднеквадратичное значение момента составляет 163,782 Н·м (4,43% отклонения от стандартной конструкции).

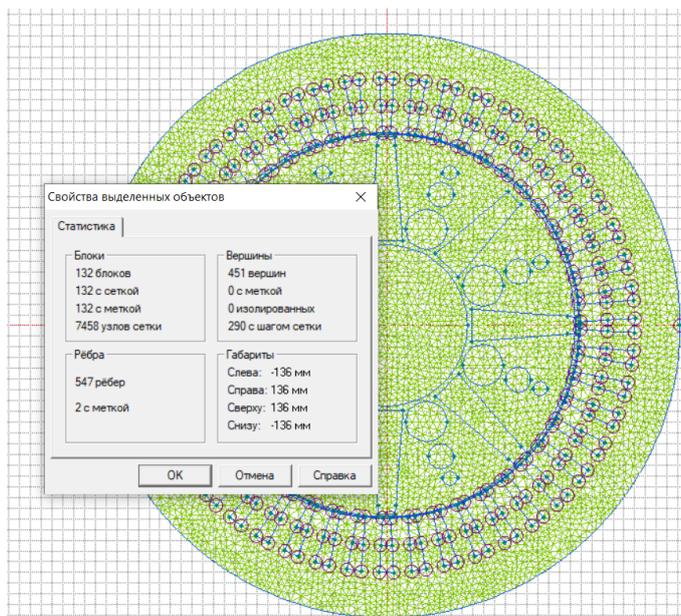


Рисунок 2.17. Результаты изменений сетки с автоматической на ручной выбор

3. Учитывая симметрию двигателя, можно взять половину двигателя и проверить, изменяется ли средняя индукция по объему в расположении между пазом и магнитом. Для модели (рисунок 2.17) она составляет 3,8433 Тл (рисунок 2.18) Возьмем двигатель в формате 180 градусов (рисунок 2.19), для нее индукция составит 4,0692 Тл (5,8% отклонение от стандартной конструкции).

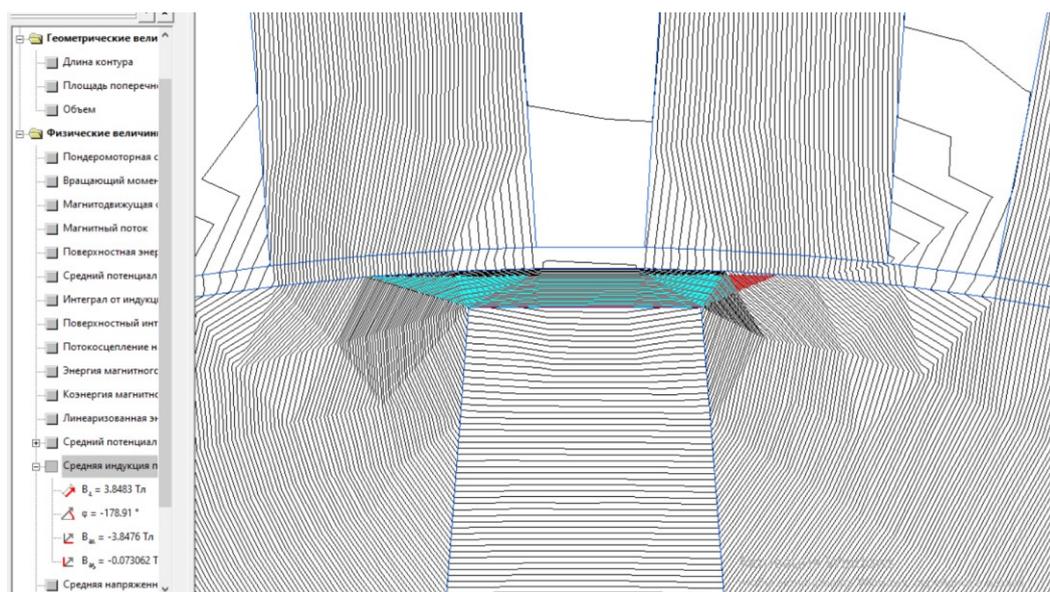


Рисунок 2.18. Результаты расчета индукции для двигателя формата 180 градусов

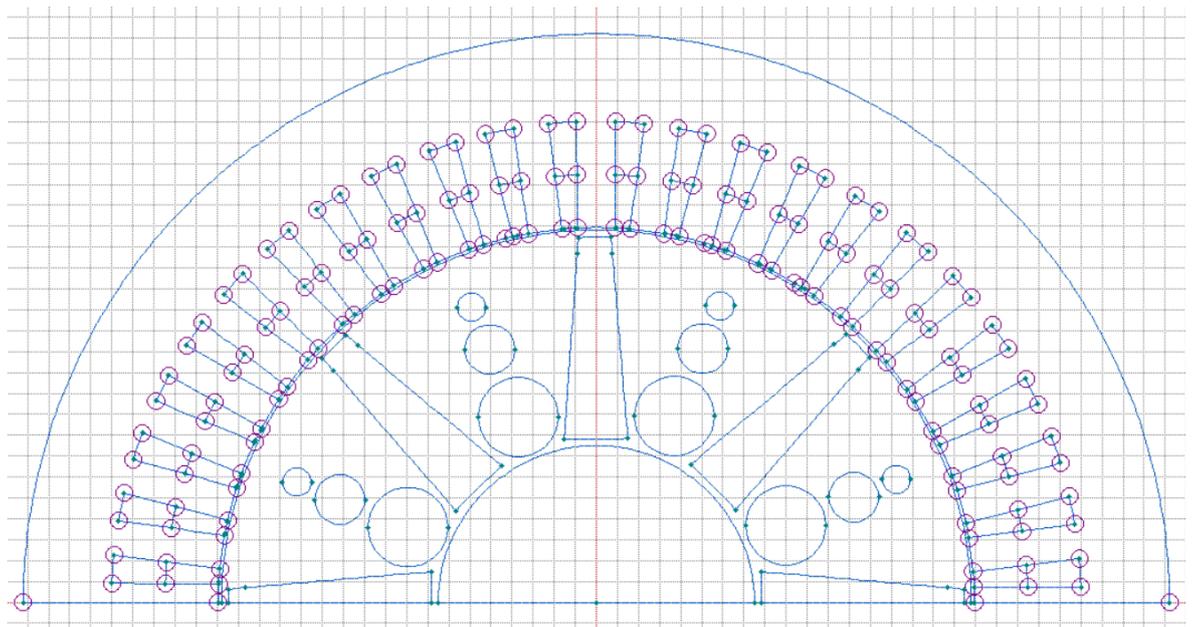


Рисунок 2.19. Геометрическая модель двигателя в формате 180 градусов

Возьмем двигатель в формате 90 градусов, для нее индукция составит 3,7385 Тл (2,7% отклонение от стандартной конструкции). Возьмем двигатель в формате 45 градусов, для нее индукция составит 4,0355 Тл (2,7% отклонение от стандартной конструкции). Таким образом для расчета выбираем сектор в 45 градусов с сеткой 1.5. (рисунок 2.20)

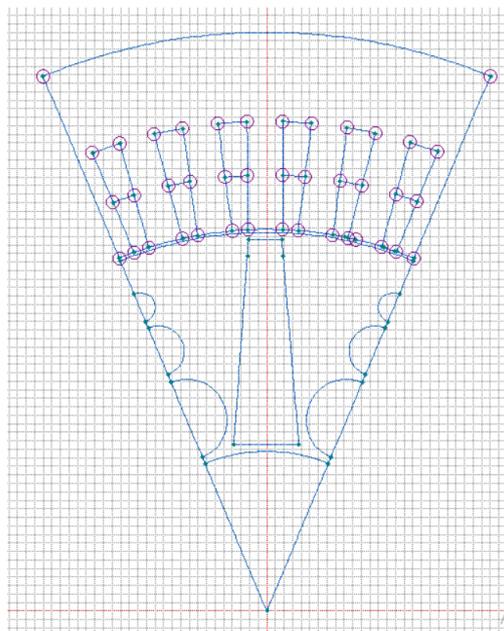


Рисунок 2.20. Конечный сектор для проведения КТО

Для данного сектора получаем следующие время решения.

Время решения внешней итерации (методом Ньютона) составило 30 секунд, и получаем решение равное 60 секундам для одной хромосомы. Таким образом для одной популяции у нас будет затрачиваться 1,2 часа. Для данного сектора достаточно около 500 популяций, т.е. минимум 25 дней, с учетом возможности многопоточных расчетов (8 потоков) получаем, что решение позволит снизить время КТО в 3,5 раза (для нашего случая до 3 дней).

## 2.4. Расчет тепловых и прочностных параметров

Необходимо модель, полученную в ходе электромагнитных расчетов, проверить на тепловые и прочностные параметры. Данные задачи решаются также при помощи Elcut.

ELCUT позволяет решать задачи теплопередачи (стационарные и нестационарные) в линейной и нелинейной постановках.

При решении тепловых задач используется уравнение теплопроводности в одном из видов:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x}(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y}) &= -q - c\rho \frac{\partial T}{\partial t} \text{ - в плоском случае;} \\ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\lambda_r r \frac{\partial T}{\partial r}) + \frac{\partial}{\partial z}(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z}) &= -q - c\rho \frac{\partial T}{\partial t} \text{ - в осесимметричном случае;} \quad (2.22.) \\ \frac{\partial}{\partial x}(\lambda \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\lambda \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\lambda \frac{\partial T}{\partial z}) &= -q \text{ - в трехмерном случае.} \end{aligned}$$

где:

T - температура;

t - время;

$\lambda_{x(y,z,t)}$  - компоненты тензора теплопроводности (в линейной постановке);

$\lambda(T)$  - теплопроводность, как функция температуры, представленная кубическим сплайном (анизотропия не поддерживается в нелинейной постановке);

q - удельная мощность тепловыделения, в линейной постановке - константа, в нелинейной постановке - задаваемая кубическим сплайном функция температуры;

c(T) - удельная теплоемкость, в линейной постановке - константа, в нелинейной постановке - задаваемая кубическим сплайном функция температуры;

$\rho$  - плотность.

В стационарной задаче последнее слагаемое в правой части уравнений равно нулю.

Все параметры уравнений в линейной постановке постоянны в пределах каждого блока модели [78-80].

Источники тепла.

ELCUT позволяет задать источники тепла в блоках, рёбрах или отдельных вершинах модели.

Вычисляемые физические величины.

Локальные величины:

- Температура  $T$ ;

- Вектор плотности теплового потока  $F_x = -\lambda \text{grad } T$

$$F_x = -\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x}, \quad F_y = -\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \text{ — в плоском случае} \quad (2.23.)$$

$$F_z = -\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z}, \quad F_r = -\lambda_r \frac{\partial T}{\partial r} \text{ — в осесимметричном случае} \quad (2.24.)$$

Интегральные величины:

- Поток тепла через заданную поверхность

$$\Phi = \int_s (F \cdot n) ds \quad (2.25.)$$

где  $n$  - единичный вектор нормали к поверхности.

Данные уравнения получают в результате обработки экспериментальных данных по теплоотдаче.

Значение коэффициента теплоотдачи при нагреве и охлаждении газов при давлении, близком к атмосферному, в условиях естественной конвекции составляют от 10 до 15 Вт/(м<sup>2</sup>·К), при вынужденной конвекции – до 60 Вт/(м<sup>2</sup> ·К).

Для нашей модели получаем следующие тепловые параметры (рисунок 2.21) Температура не превышает допустимые пределы [80].

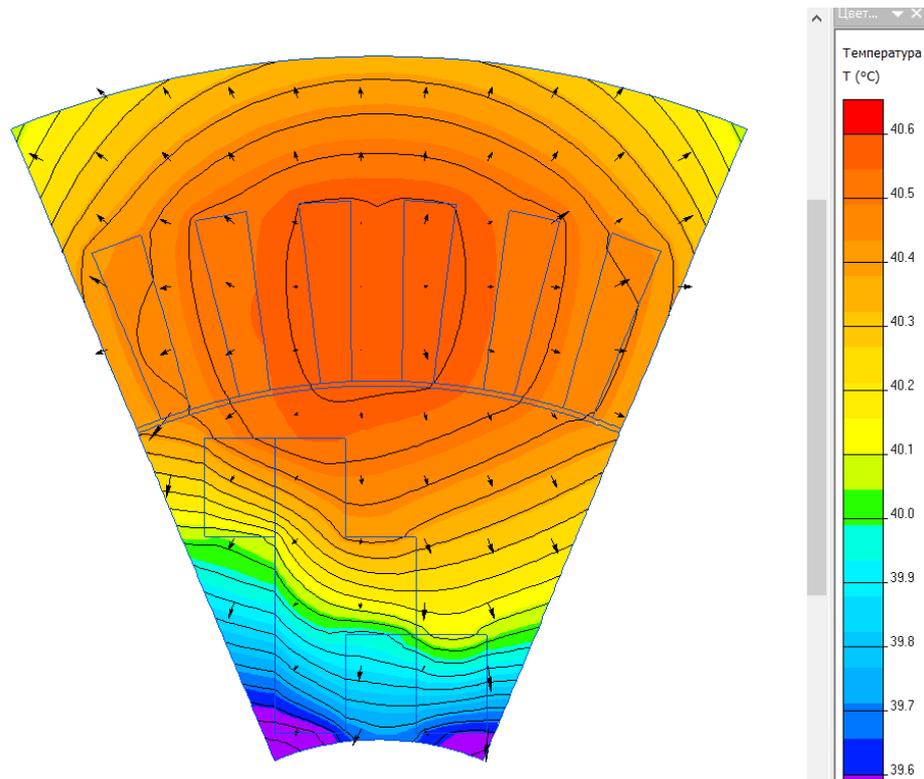


Рисунок 2.21. Представление результатов тепловых расчетов

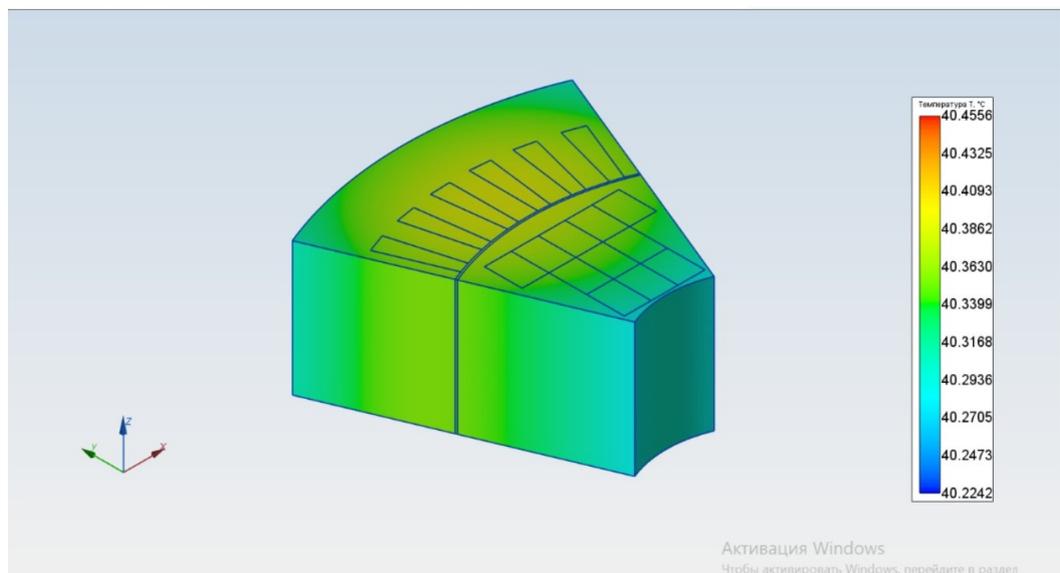


Рисунок 2.22. 3D- представление результатов тепловых расчетов

Для расчета прочностных параметров используем следующие положения.

Поле перемещений возможно определить определенным числом компонентов вектора перемещений  $\delta$  (в нашем случае в каждой точке два компонента) [81].

Для плоских задач:

$$\{\delta\} = \begin{Bmatrix} \delta_x \\ \delta_y \end{Bmatrix} \quad (2.26.)$$

– в осесимметричных задачах:

$$\{\delta\} = \begin{Bmatrix} \delta_z \\ \delta_r \end{Bmatrix} \quad (2.27.)$$

Деформация связана с перемещением соотношением:

$$\{\varepsilon\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial \delta_x}{\partial x} \\ \frac{\partial \delta_y}{\partial y} \\ \frac{\partial \delta_x}{\partial y} + \frac{\partial \delta_y}{\partial x} \end{Bmatrix} \quad (2.28.)$$

Соответствующее ей напряжение выражается как:

$$\{\sigma\} = \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} \quad (2.29.)$$

В осесимметричном случае радиальное перемещение приводит к деформации  $\varepsilon_\theta$ , в направлении, перпендикулярном плоскости модели, поэтому выражение для полной деформации имеет вид:

$$\{\varepsilon\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_z \\ \varepsilon_r \\ \varepsilon_\theta \\ \gamma_{rz} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial \delta_z}{\partial z} \\ \frac{\partial \delta_r}{\partial r} \\ \frac{\delta_r}{r} \\ \frac{\partial \delta_z}{\partial r} + \frac{\partial \delta_r}{\partial z} \end{Bmatrix} \quad (2.30.)$$

Соответствующие компоненты напряжений:

$$\{\sigma\} = \begin{Bmatrix} \sigma_z \\ \sigma_r \\ \sigma_\theta \\ \tau_{rz} \end{Bmatrix} \quad (2.31.)$$

ELCUT позволяет учитывать сосредоточенные, поверхностные и объемные силы, действующие на модель.

При анализе результатов решения задач теории упругости, ELCUT позволяет оперировать со следующими локальными и интегральными физическими величинами:

Локальные величины:

- Модуль вектора перемещения  $\delta = \sqrt{\delta_x^2 + \delta_y^2}$ , или  $\delta = \sqrt{\delta_z^2 + \delta_r^2}$ ;
- Максимальное и минимальное главные напряжения в плоскости модели  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$ ;
- Нормальные и касательные напряжения по координатным осям  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  и  $\tau_{xy}$  ( $\sigma_z$ ,  $\sigma_r$  и  $\tau_{rz}$  в осесимметричном случае);
- Нормальное напряжение в направлении, перпендикулярном к плоскости модели ( $\sigma_z$  - для плоских задач,  $\sigma_\theta$  - в осесимметричном случае) [82].

В задачах плоско-напряженного состояния эта величина равна нулю по определению;

- Критерий прочности фон Мизеса (потенциальная энергия формоизменения);
- Критерий прочности Треска (максимальное сдвиговое напряжение);
- Критерий прочности Мора-Кулона (модификация критерия Треска, учитывающая разное сопротивление материала растяжению и сжатию) [83-85].

Для нашей модели получаем следующие прочностные параметры (Рисунок 2.23.) Перемещение элементов не превышает допустимые пределы.

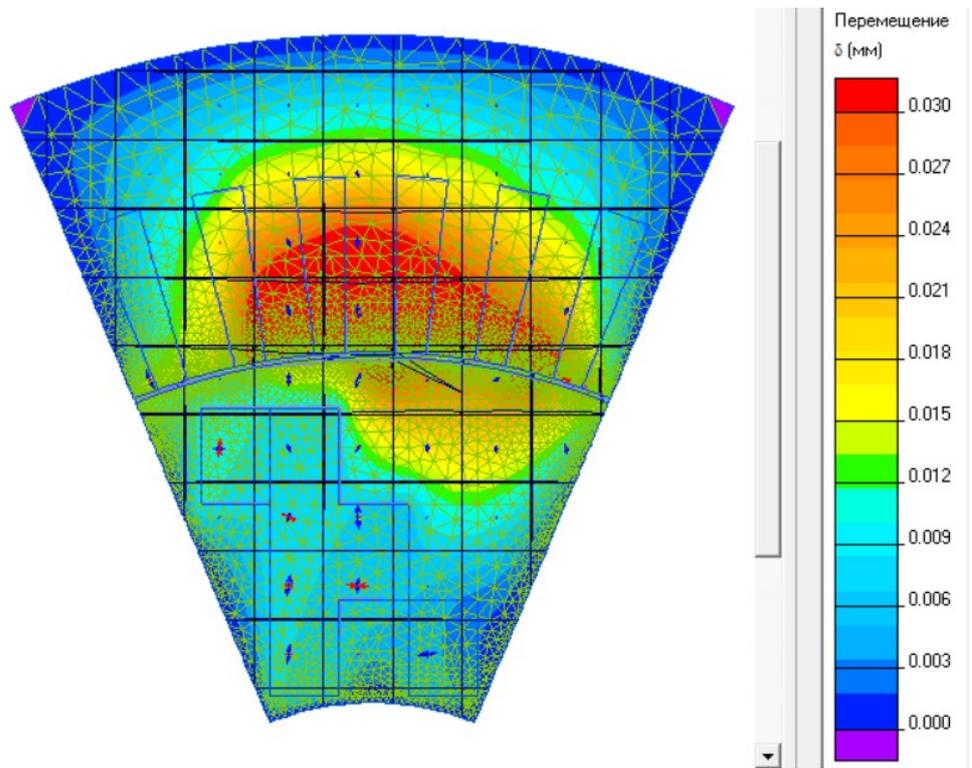


Рисунок 2.23. Представление результатов прочностных расчетов

## 2.5. Представление комплексной топологической оптимизации в виде методики

На основе результатов, полученных в ходе работы, можно привести следующие этапы методики:

- выбрать какие необходимы исходные данные СДПМ для КТО;
- создать геометрическую модель СДПМ;
- рассчитать электромагнитные параметры;
- проверить исходные данные на достоверность;
- оценить перспективность КТО для данного СДПМ;
- оценить время решения одной задачи электромагнитного расчета для СДПМ, при превышении определенного значения, необходимо проводить оптимизацию геометрической модели;
- определить возможные решения для оптимизации геометрической модели;
- привести конечную геометрическую модель к виду, который необходим для реализации КТО;
- определить возможные виды реализации ГА;
- провести топологическую оптимизацию для целевой функции расчета вращающего момента;
- проверить модель, полученную в ходе топологической оптимизации для целевой функции расчета вращающего момента, на значения температур, если они не соответствуют нормативным значениям, то провести топологическую оптимизацию для целевой функции расчета температуры;
- проверить модель, полученную в ходе топологической оптимизации для целевой функции расчета вращающего момента и температуры, на значения перемещений элементов СДПМ, если они не соответствуют нормативным значениям, то провести топологическую оптимизацию для целевой функции расчета перемещений элементов СДПМ;

- проверить модель, полученную в ходе топологической оптимизации для целевой функции расчета вращающего момента, температуры и перемещений элементов СДПМ, на исходный параметр оптимизации.

Данный алгоритм можно представить в виде следующей блок-схемы (рисунок 2.24)

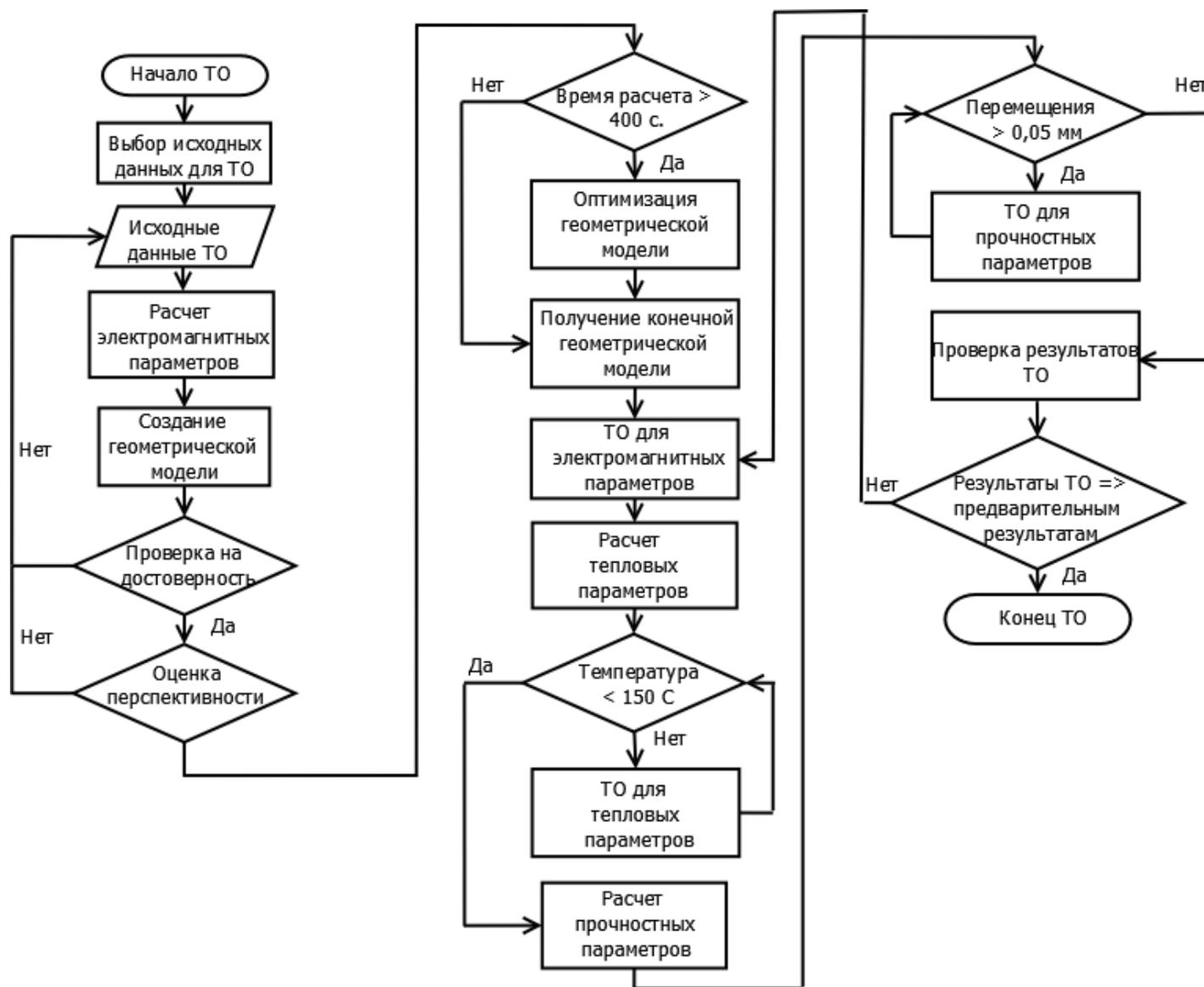


Рисунок 2.24. Алгоритм КТО для ротора СДПМ

## 2.6. Выводы

1. Подготовлены исходные данные для КТО (максимально точная геометрическая модель в 2D, параметры двигателя и необходимое программное обеспечение).

2. Проведен электромагнитный расчет СДПМ в программе Elcut, проверена достоверность полученной модели, посредством сравнения с экспериментальными данными.

Для этих результатов электромагнитного расчета среднеквадратичное значение момента составляет 156,8269 Н·м, отклонение от испытаний составляет 0,36 %, что является допустимым результатом.

3. Проведен электромагнитный расчет СДПМ с новым расположением магнитов - V-образными магнитами (расположение ПМ принять примерным), момент составил 163,6 Н·м, что больше стандартного значения на 3,8%. Предварительно можно говорить о целесообразности проведения КТО.

4. Оценено время решения расчета электромагнитных параметров для одного случая. Время решения внешней итерации (методом Ньютона) составило 150 секунд для одного узла сетки.

5. Приходим к выводу, что необходимо снизить время расчетов и количество исходных ячеек для материалов ротора СДПМ, решением может стать модификация геометрической модели, которая включает в себя уменьшение модели до определенного сектора, упрощение геометрических форм элементов СДПМ и ручная настройка сетки в Elcut. В ходе упрощений выбираем сектор в 45 градусов с сеткой 1.5.

6. Произведен расчет тепловых и прочностных параметров, и на основании вышеперечисленного разработана методика КТО для роторов СДПМ.

### **3. РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА КОМПЛЕКСНОЙ ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ СДПМ НА БАЗЕ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА**

#### **3.1. Модернизация генетического алгоритма для проведения комплексной топологической оптимизации**

Традиционная пошаговая процедура проектирования электромагнитного устройства с помощью прототипирования или САПР на практике представляет собой процесс проб и ошибок. Конечный результат может оказаться неоптимальным решением, поскольку процедура сильно зависит от опыта инженера-проектировщика. В последние годы появилась концепция автоматизированного оптимального проектирования, поскольку оптимизация устройств приобретает все большее значение в промышленности; такой алгоритм заменяет разработчика, чтобы выполнить задачу быстрее и эффективнее [86]. Такие инструменты предоставляет численная оптимизация. Алгоритмы можно разделить на две основные категории: традиционные детерминированные алгоритмы, в которых поиск оптимума основан на заранее определенной схеме, и более современные стохастические алгоритмы, в которых характер случайности играет важную роль в поиске.

Стохастические методы, такие как моделирование отжига и ГА, напротив, представляют собой методы глобального поиска, не требующие информации о производных; вместо этого в процессе поиска пространства решений вводится случайный поиск. Однако, в этом случае процесс сходимости решений идет медленнее, так как требуется много оценок функции стоимости. Это является существенным недостатком, если определение оценок занимает много времени, как правило, при использовании МКЭ. Например, ГА, использованные Бьянки [87] для оптимизации формы ротора, потребовали 4000 вычислений МКЭ, что занимало несколько дней вычислений. Методы прямого поиска, когда такие алгоритмы работают непосредственно с оптимизируемой функцией неприемлемы, если оценка выполняется медленно. Методы косвенного поиска- альтернативные

методы, в которых алгоритм оптимизации применяется к приближению функции сходимости. Данное приближение имеет существенное преимущество, заключающееся в том, что при этом оценка выполняется намного быстрее, чем оценка исходной функции, поскольку она выражается как аналитическая функция переменных оптимизации. Метод поверхности отклика оказывается эффективным инструментом для взаимодействия ГА с конечным элементом, имея несколько меньшую точность в моделировании МКЭ для гораздо более быстрого процесса оптимизации. Действительно, МКЭ не используется для оценки функции стоимости, что привело бы к высоким вычислительным затратам; при этом он используется для построения моделей, которые удобны для быстрой оценки данной функции. Таким образом, большое количество оценок функции затрат, необходимых в процедуре ГА, не является сложностью. Фактически, модели устраняют основные недостатки ГА и время оптимизации резко сокращается.

Данный метод разработан Джоном Холландом в 60-х и 70-х годах прошлого века и популяризирован одним из его учеников Дэвидом Голдбергом в 1989 году, который применил его для решения сложной задачи в диссертации [88]. ГА работают с популяциями кандидатов решений или индивидуумами в соответствии с механизмом естественного отбора [89]. Каждая особь является точкой отбора проб в пространстве поиска. Выбираются наиболее приспособленные особи, к которым стохастические генетические операторы при создании новых точек выборки для следующего поколения. Последовательные поколения имеют более оптимальные значения, приближающие к эффективному решению задачи. Данный инструмент оптимизации находится между полным случайным поиском и детерминированным поиском; часть выборки вносит смещение в случайный поиск, чтобы заставить его сходиться к области оптимального решения [90].

На практике индивиды кодируются в строку битов, которую можно рассматривать как хромосому. Это двоичное кодирование означает, что каждая переменная, ген в хромосоме, дискретизируется, поэтому пространство поиска сводится к конечному числу возможных решений. Таким образом, необходимо убедиться, что дискретизация обеспечивает достаточное разрешение, чтобы

можно было настроить целевую функцию с желаемым уровнем точности. В противном случае возможно, что оптимальное решение не будет найдено [91].

Конструкция ротора приведена в виде последовательности чисел, в которой каждое число представляет определенный материал (воздух, сталь, магниты с разным направлением коэрцитивной силы и т.д.).

Например, на рисунке 3.1. показана часть ротора с поверхностным расположением магнитов, где цифра 3 - ПМ, 1 - сталь, 0 - воздух.

### ТОПОЛОГИЯ №1

1	3	3	3	1
1	1	1	1	1
1	0	0	0	1

**Ind1=13331111111000 (M=110)**

Рисунок 3.1. Пример представления топологии ротора СДПМ

Данную последовательность можно рассматривать как хромосому, ГА - это процесс поиска лучшей хромосомы для конкретной целевой функции, в нашем случае определения крутящего момента.

Для реализации ГА необходимо использовать следующую последовательность методов.

1. Случайный выбор первых хромосом (родителей). Число может быть различным, но обязательным условием является четность. Для примера представлены два родителя.

2. Происходит скрещивание двух хромосом (родителей) между собой и получение еще двух хромосом (детей).

3. По рассчитанному значению крутящего момента ( $M$ ) для всех 4 хромосом выбираются два наибольших значения. Эти 2 хромосомы становятся следующими родителями.

4. ГА продолжается до тех пор, пока не будут достигнуты определенные результаты выполнения работ (достижение искомого значения целевой функции, количество циклов ГА и т.д.)

Пример ГА показан на рисунке 3.2. В этом случае хромосомы для следующего поколения были родительским № 2 и дочерним № 1.

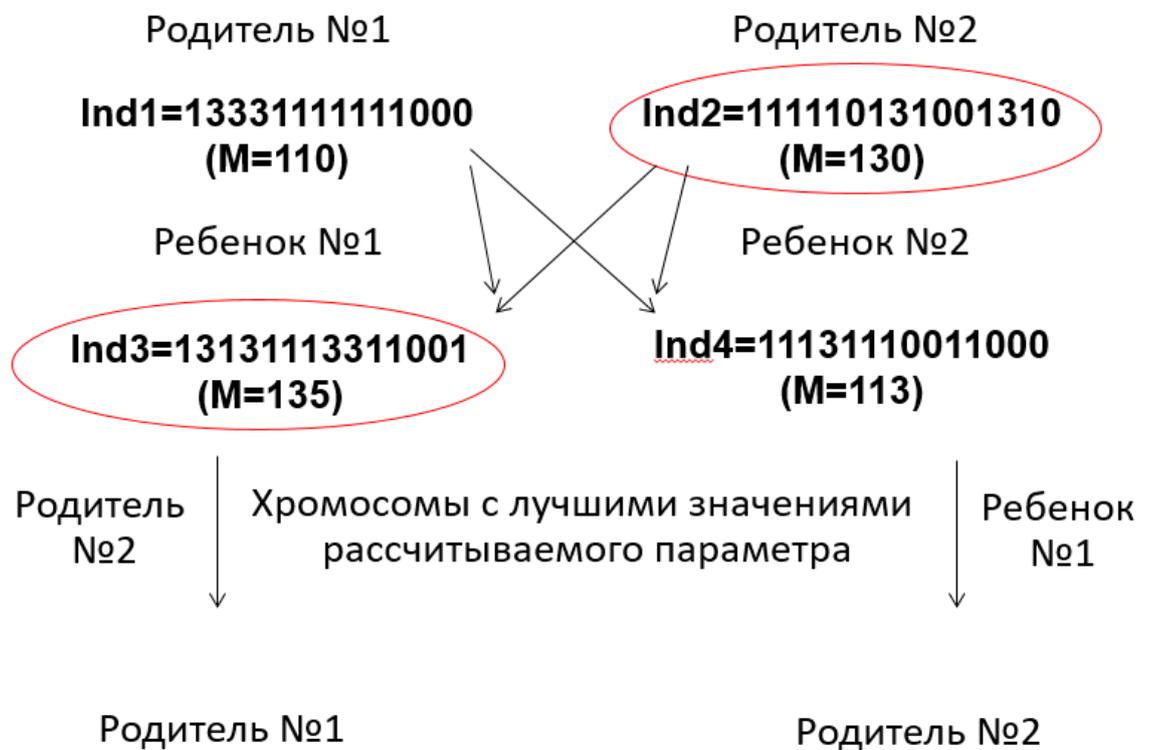


Рисунок 3.2. Пример ГА

Представлен стандартный алгоритм ГА, но для использования при КТО необходимо его модернизировать.

Наиболее очевидным дополнением является четкий фактор завершения ГА - наибольший крутящий момент обнаруживается на одной хромосоме, а не на популяции или паре хромосом.

Второе дополнение -это искомое количество определенного материала в каждой хромосоме, а именно ПМ, что необходимо для уменьшения объема дорогостоящего материала.

Также важно отметить, что целевая функция для определения крутящего момента не является аналитической; ее решение требует использования метода конечных элементов.

Другие функции должны быть выражены в виде подклассов описанного выше алгоритма.

1.1. Если родителей больше двух, то необходимо осуществить подбор наиболее подходящих хромосом для дальнейшей трансформации.

Выбор может быть реализован в виде случайного отбора или отбора наиболее подходящих хромосом, чтобы лучшая хромосома постоянно попадала в пару для спаривания, возможно введение метода элитарности. Однако следует учитывать, что элитарность может привести к попаданию в зону локального максимума, а это приведет к ошибочному результату. Чтобы решить эту проблему, необходимо ввести условие определенного числа повторений элитной хромосомы.

2.1. Спаривание необходимо проводить методом разделения по двум точкам, чтобы добиться наибольшего разнообразия хромосом.

Особенности термических и прочностных расчетов заключаются в том, что в хромосомах гены с материальными магнитами не участвуют в изменениях. Идея состоит в обеспечении необходимой температуры двигателя через отверстия в корпусе ротора, то есть за счет замены материала стали на воздух. При этом для расчетов на прочность алгоритм обратный, т.е. необходимо увеличить прочность станка, заменив материал воздух на сталь. Поэтому важно установить правильное максимальное значение целевой функции.

### 3.2. Топологическая оптимизация для повышения вращающего момента

Для проведения КТО приобретены СДПМ мощностью VM1418 ZXF (рисунок 3.3) со следующими параметрами:

- 350 Вт, 48 В;
- КПД >75%;
- 40X40X30 см, 12.0 кг.;
- номинальная частота вращения: 450 об/мин;
- номинальная вращающий момент: 7 Н·м.
- номинальный ток загрузки 9,4 А.

Данный двигатель используется в электротранспорте небольшой мощности (электроциклы, грузовые скутеры и т.д.)



Рис 3.3. Двигатель VM1418 ZXF

Ротор данного двигателя имеет поверхностное расположение магнитов (рисунок 3.4)



Рисунок 3.4. Ротор с поверхностным расположением магнитов

Все геометрические параметры измерены и сверены с данными производителя и построена геометрическая модель (рисунок 3.5)

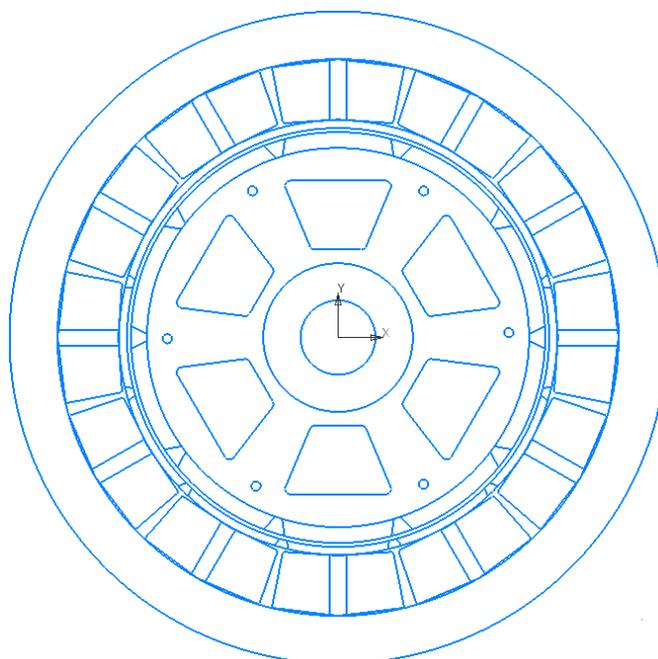


Рисунок 3.5. Геометрическая модель BM1418 ZXF

Геометрическая модель загружается в Elcut для проведения электромагнитных расчетов (рисунок 3.6), для полной нагрузки момент равен 7,27 Н·м, отклонение от значения производителя составило 3,8%. Отклонение в пределах нормы, геометрическую модель можно считать верифицированной. Расчётные данные для 45% (200 об/мин) от номинальной частоты вращения- момент составил 3,69 Н·м; для 25% (110 об/мин) от номинальной частоты вращения, момент составил 1,89 Н·м.

Время расчёта для одной модели составило 110 с., количество узлов сетки равно 928385 элементам (рисунок 3.7). Время расчета полной итерации одного шага ГА составляет 150 с., время проведения полной КТО при наименьшей популяции и многопоточном расчете составит 12 дней, следовательно, модель необходимо упрощать.

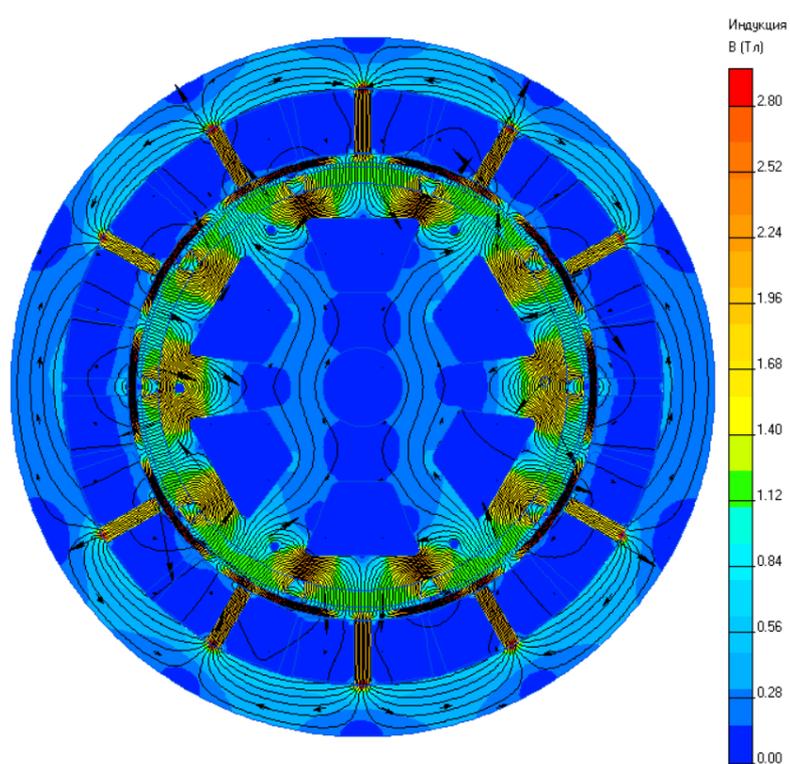


Рисунок 3.6. Результаты электромагнитных расчетов VM1418 ZXF

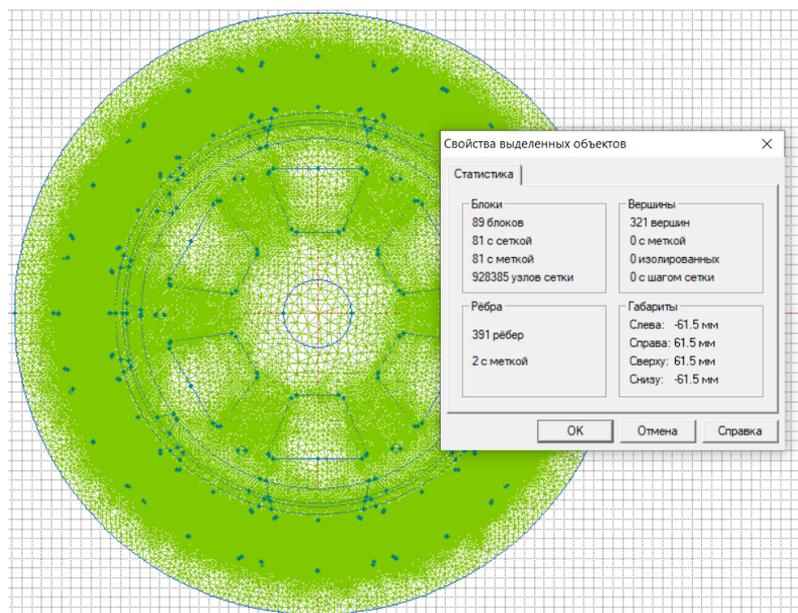


Рисунок 3.7. Модель для электромагнитных расчетов VM1418 ZXF

По методике для упрощения необходимо рассматривать наименьший сектор для расчета. Упростив геометрию элементов, необходимо провести расчет при наименьшем значении сетки, при котором можно добиться адекватного значения параметров. После выполнения всех операций получен конечный сектор СДПМ для расчета (рисунок 3.8), Время расчёта для одной модели составило 50 с., количество узлов сетки равно 1500 элементов, время расчета полной итерации одного шага ГА составляет 80 с., время проведения полной КТО составит 4,5 дней.

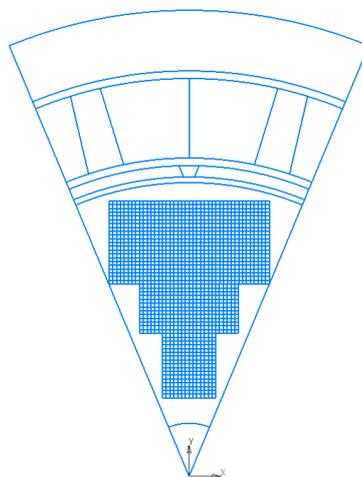


Рисунок 3.8. Конечный сектор для проведения КТО ротора VM1418 ZXF

Для данного сектора проведем КТО для вращающего момента на базе ГА:

1. Создание начальной популяции. Создается рандомно 4 хромосомы, в каждой создается 1500 генов, с 5 типами значений (0 –сталь, 4 –магниты разных направленностей).

2. Расчет целевой функции. В Elcut используется модель, в каждой из ячеек задан материал из гена. Расчет производился для трех значений расположений пазов в СДПМ.

3. Выбор особей для скрещивания.

Функция выбора содержит совокупность возможных решений и их значения пригодности (поколение) и выводит хромосомы, которые собираются перейти к следующему поколению. Элитарность может быть введена в ГА, который автоматически выберет лучшую хромосому в популяции, поэтому не теряется лучшее решение. Существует несколько методов выбора, которые можно использовать. Методы выбора, приведенные в работе, следующие.

- Выбор колеса рулетки: в выборе колеса рулетки у каждой хромосомы есть шанс быть выбранной. Вероятность выбора индивидуума зависит от его пригодности. У более подходящих хромосом более высокий шанс быть выбранными.

Функция выбора колеса рулетки принимает кумулятивные суммы и случайно сгенерированное значение для процесса выбора, и возвращает номер выбранной хромосомы. Посредством вычисления кумулятивных сумм каждый индивид имеет уникальное значение от 0 до 1. Чтобы выбрать хромосомы, число от 0 до 1 генерируется случайным образом и выбирается хромосома, близкая к случайно сгенерированному числу.

- Выбор наиболее подходящей половины: по этому методу выбирается наиболее подходящая половина возможных решений для перехода к следующему поколению.

- Случайный выбор: по данному методу хромосомы отбираются случайным образом.

4. Скрещивание.

В коде Python две отобранных родительских особи создают двух потомков. Есть два метода спаривания, которые можно использовать следующим образом.

- Отдельная точка: по данному методу гены после одной точки заменяются генами другого родителя, чтобы создать двух потомков.

- Два момента: по данному методу гены между двумя точками заменяются генами другого родителя, чтобы создать двух потомков.

## 5. Мутация.

Последняя генетическая операция - случайные мутации. Случайные мутации происходят у отобранных особей и их потомков, чтобы улучшить разнообразие следующего поколения. Если в ГА есть элитарность, элитный индивид не проходит случайных мутаций, поэтому не теряется лучшее решение. Исследуем два метода мутации.

- Метод Гаусса: по данному методу ген, проходящий мутацию, заменяется числом, которое генерируется в соответствии с распределением Гаусса вокруг исходного гена.

- Метод сброса: по данному методу исходный ген заменяется случайно сгенерированным геном.

## 6. Создание следующего поколения.

Следующее поколение создается с использованием вышеописанных генетических операций. Элитарность может быть введена в ГА при создании следующего поколения.

После создания поколения критерии завершения используются для определения того, должен ли ГА создать новое поколение или он должен остановиться. Различные критерии завершения могут использоваться одновременно, и, если ГА удовлетворяет одному из критериев, алгоритм останавливается. Рассмотрим четыре критерия прекращения.

- Максимальный фитнес: такой критерий прекращения проверяет, удовлетворяет ли самый подходящий человек в текущем поколении требуемым критериям. Используя данный метод, можно получить желаемые результаты. Как

показывает рисунок 3.9, максимальный предел пригодности может быть определен с учетом некоторых локальных минимумов.

- Максимальный средний фитнес: если требуется набор решений, следует проверить средние значения людей в текущих поколениях, чтобы определить, удовлетворяет ли текущее поколение используемым критериям.

- Максимальное количество поколений: возможно ограничить максимальное количество поколений, созданных ГА.

- Максимальный аналогичный номер фитнеса: благодаря элитарности лучшая особь в поколении переходит к следующему поколению, не мутируя. Эта особь может быть лучшей в следующем поколении. Возможно ограничение числа повторений лучшей особи, чтобы не попасть в локальный минимум.

Данный алгоритм реализован в Python, пример которого представлен на рисунке 3.9.

Реализация алгоритма.

1. Создание хромосом для начальной популяции – `def individual`. Создаются 4 случайных хромосомы, не повторяющие друг друга, и содержащие определенный набор материалов (удобно задание объема ПМ или стали).

2. Формирование из хромосом первого этапа начальной популяции – `def population`.

3. Решение уравнения целевой функции посредством программы Elcut при применении МКЭ - `def fitness_calculation`. Открывается заранее подготовленный сектор СДПМ, из значений хромосом рассчитывается для данной топологии ротора значение вращающего момента для 4х состояний статора. Далее определяется для полученных результатов среднее квадратичное значение, что является решением целевой функции.

4. Выбор особей для скрещивания – `def selection`. В коде возможен выбор из трех вариантов реализации этапа: колесо рулетки, лучшая половина, рандом. Для данного КТО использовано колесо рулетки из-за малого количества хромосом.

```

#Начальная популяция
def individual(number_of_genes, upper_limit, lower_limit):
    individual=[round(rnd()*(upper_limit-lower_limit)
                    +lower_limit) for x in range(number_of_genes)]

    i=0
    y=0
    for i in range(10):
        if individual[i]==0:
            y=y+1
    while y<5: #кол-во мин. блоков стали
        individual=[round(rnd()*(upper_limit-lower_limit)
                        +lower_limit) for x in range(number_of_genes)]
        y=0
        for i in range(10):
            if individual[i]==0:
                y=y+1
    return individual

#популяция
def population(number_of_individuals,
               number_of_genes, upper_limit, lower_limit):
    return [individual(number_of_genes, upper_limit, lower_limit)
            for x in range(number_of_individuals)]

#целевая функция Elcut
def fitness_calculation(individual):
    i=0
    fitness_value1=0
    fitness_value2=0
    fitness_value3=0
    autoit.run("C:\Program Files (x86)\TOR Coop\ELCUT 5.1\Professional Edition\Elcut.exe")
    autoit.win_wait("Elcut",5);
    autoit.mouse_click("Left", 242, 87,1)
    autoit.mouse_click("Left", 38, 45,2)
    time.sleep(1.5)
    autoit.send(" 0");
    autoit.win_wait("Open",20);
    autoit.mouse_click("Left", 1020, 589,1)
    autoit.mouse_click("Left", 124, 127,2)
    time.sleep(1.5)
    while i < 11:

```

Рисунок 3.9. Пример кода для реализации КТО

5. Скрещивание выбранных особей – def mating. В коде возможен выбор из двух вариантов реализации этапа: разделение по одной точке и по двум точкам. Для данного КТО было использовано разделение по одной точке из-за большого количества и значений генов.

6. Случайная мутация случайно выбранной особи – def mutation. Реализована посредством рандомной замены значения генов случайно выбранной хромосомы.

7. Создание следующей популяции – def next\_generation. На данном этапе введен выбор элитарной особи, когда хромосома с наибольшим значение целевой функции переходит обязательно в следующее поколение.

8. Проверка на окончание ГА – def fitness\_similarity\_check. В коде возможен выбор из двух вариантов реализации этапа: окончание при превышении максимального значения целевой функции и при превышении повторений

элитарной хромосомы. Для данного КТО использовано окончание ГА при превышении повторений элитарной хромосомы (данный вариант используется при желании проектировщика получить максимальное значение вращающего момента или минимального количества ПМ).

По результатам запуска трех ГА получена следующая конструкция при КТО по вращающему моменту (рисунок 3.10)

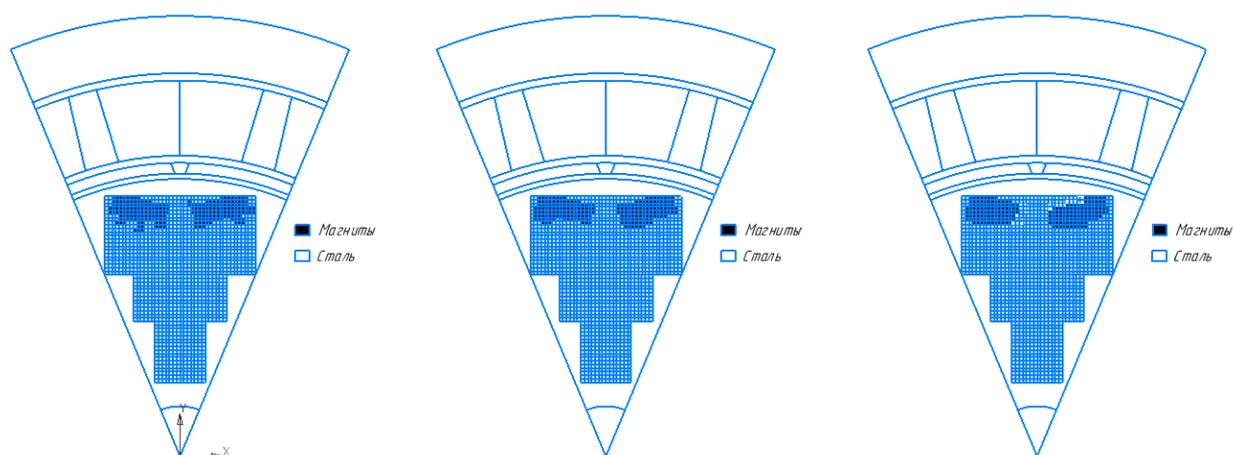


Рисунок 3.10. Итоговые топологии ротора КТО по вращающему моменту

### **3.3. Топологическая оптимизация для сохранения температурного режима в допустимом диапазоне**

Важным этапом поверочных расчетов электрической машины с ПМ является тепловой расчет. Точный расчет температуры частей машины, охлаждаемых потоками вязкого хладагента, требует расчета системы уравнений Навье Стокса в трехмерной постановке. Подобные расчеты являются сложными, затратными и очень длительными. В настоящей работе тепловой расчет выполнен в среде Elcut методом полевого моделирования стационарного температурного поля. Создана тепловая симметричная модель СДПМ [92].

Тепловой расчет ЭМ вследствие сложности картины тепловых потоков производится при ряде допущений. При выборе допущений учитывается, что методика расчета, во-первых, по точности результатов должна удовлетворять практическим целям и, во-вторых, не должна требовать несоразмерно трудоемкой расчетной работы. Кроме того, степень точности даже самого точного с математической стороны расчета не превышает достигнутой при определении коэффициентов, входящих в расчетные формулы. При исследовании физического процесса рассеяния тепла с поверхности и влияния вентиляции на коэффициент теплоотдачи выявлено, что вместо истинных, реальных зависимостей, определяемых из опыта со схематизированными образцами частей машины, обычно используются упрощенные зависимости, обладающие степенью точности, равной примерно 5 % относительно истинных величин тех или иных физических зависимостей. Точные методики теплового расчета ЭМ часто базируются на решениях дифференциальных уравнений теплопроводности в тех случаях, когда важно получить картину непрерывного распределения температуры в пространстве или во времени. В других случаях на основе упрощенных уравнений используют эквивалентные электрические схемы для стационарных задач и представления об однородных телах для задач нестационарных. Существуют синтетические методы, учитывающие особенности строгих и упрощенных решений [93].

Решение трехмерного поля, подчиняющегося рассмотренному выше дифференциальному уравнению с частными производными, представляет значительные трудности принципиального характера. По этой причине большинство применяемых в настоящее время методов теплового расчета ЭМ основаны на тех или иных упрощающих предпосылках. Наиболее важной из них является сведение реального трехмерного процесса теплопроводности к условному одномерному процессу и поиски на этой основе решений, которые по возможности близко соответствовали бы реальной картине распределения температуры.

Поле температуры в СДПМ авторами исследовано МКЭ. Расчет проводился с использованием двумерного анализа. В основе теплового анализа применяется уравнение теплового баланса в соответствии с принципом сохранения энергии.

Постановка задачи: стационарный тепловой анализ при неизменных граничных условиях. При этом в качестве вида теплопередачи рассматривается теплопроводность — способность материала передавать тепловой поток, возникающий из-за разности температур на противоположных поверхностях.

Геометрия машины получена в результате оптимизации с помощью предшествующего тепловому анализу уточненного электромагнитного расчета. В качестве свойств материалов заданы коэффициенты теплопроводности.

Кроме свойств материалов заданы граничные условия — температура снаружи двигателя, которая принимается равной стандартному значению — 25°C. Температура снаружи считается неизменной. Тепло от наружной поверхности отводится в окружающую среду, где температура ниже.

Машина исследуется в поперечном сечении. Теплопередачей от активных частей машины к корпусу и в окружающую среду пренебрегалось. Задача заключается в определении температуры внутри машины в предположении, что все тепло, выделенное в активных частях, распределяется внутри машины, а наружная поверхность обменивается теплом с окружающей средой с коэффициентом теплообмена 10,2 Вт/(м<sup>2</sup>·град). При этом устанавливается тепловое равновесие (стационарный тепловой анализ).

Поскольку анализ стационарный вращение ротора не учитывается. В действительности же вращение ротора приводит к более быстрому установлению теплового равновесия, но на значение температуры внутри машины практически не влияет. В качестве исходных данных заданы значения удельной мощности потерь в обмотках статора (электрические потери) и в стали (потери на гистерезис и вихревые токи), расчет которых приведен ниже.

Расчет поля температуры при максимальном моменте производится в следующем порядке.

Удельная мощность потерь в меди

$$P_{уд.меди} = \frac{P_{эл}}{V_{меди}} = 16 \cdot 10^6 \quad (3.1.)$$

Потери в стали определяются следующим образом. Как известно, в оптимально спроектированной машине потери в меди равны потерям в стали. Но поскольку в данном случае машина работает при несинусоидальном питании, то значение потерь в стали меньше потерь в меди.

Принимаем ориентировочно, что потери в стали составляют 30 % потерь в меди [93].

Отличия алгоритма топологической оптимизации по температурному режиму от оптимизации по вращающему момент следующие.

1. Начальная популяция — последняя популяция из предыдущего расчета.
2. Критерий завершения может быть достигнут при первом расчете целевой функции.
3. При итерации оптимизации больше одного шага добавляется дополнительный материал – воздух.

Данный алгоритм реализован в программе Python и получены следующие параметры конструкции (рисунок 3.11)

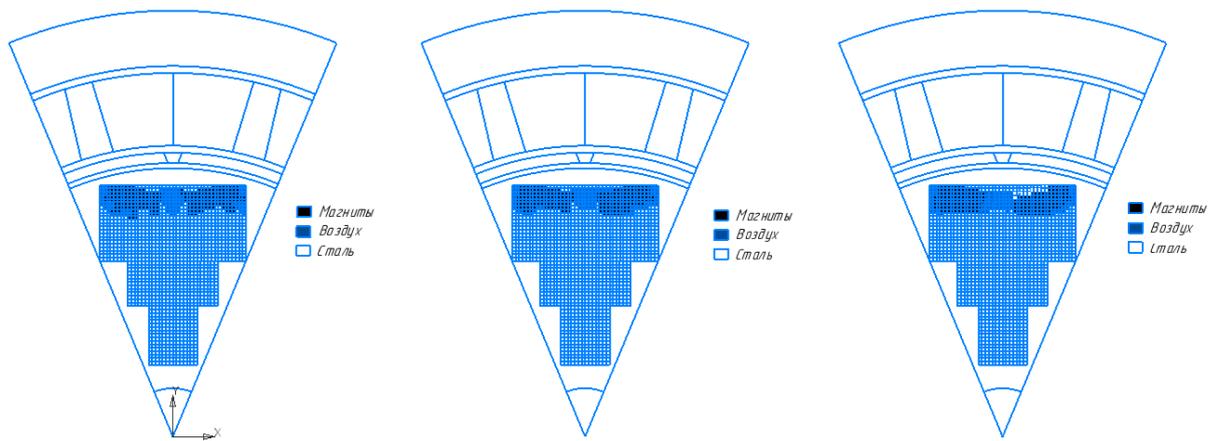


Рисунок 3.11. Итоговые топологии ротора при КТО по температурному режиму

### 3.4. Топологическая оптимизация для сохранения прочностных характеристик

Часто перед проектировщиками стоят следующие задачи:

1) улучшить существующую конструкцию с использованием принципиально новых идей;

2) спроектировать новую деталь, которую необходимо вместить в ограниченное пространство, сделать легкой и долговечной, а у специалиста есть лишь общее представление о том, как данная деталь должна выглядеть. Довольно часто детали проектируются путем улучшения уже существующих. В таком случае размеры и прочие исходные данные можно использовать в качестве параметров и провести параметрическую оптимизацию. Но есть альтернативный подход, который не основывается на предыдущих разработках, заключающийся в том, чтобы начать процесс исследования с массива материала и позволить алгоритму оптимизации определить форму и размеры проектируемого объекта. Задача КТО в классической постановке — нахождение оптимального с точки зрения жесткости распределения материала в заданной области при заданных нагрузках [94].

Рассмотрим значение проектных ограничений. В постановке задачи топологической оптимизации имеется одно ограничение - на объём материала. При этом требования, например, по прочности во внимание не принимаются. Однако сведения о напряжениях в конечных элементах с плотностью, близкой к единице, являются достоверными. Ввиду этого представляется целесообразным проведение параметрического исследования решения путём варьирования объёмной доли. Опыт показывает - можно подобрать такое количество материала, чтобы уровень напряжений в целом по конструкции «вышел» на приемлемые значения. В этом случае концептуальное представление детали, выраженное в виде распределения плотности, будет искомой отправной точкой для её дальнейшей конструкторской проработки.

Более строгий подход состоит во введении ограничений на напряжения в математическую постановку задачи. Данное направление является перспективным, но требует решения ряда дополнительных вопросов (адекватная оценка уровня напряжений в элементах с промежуточной плотностью, одновременный учёт большого количества факторов), которые, вероятно, будут исследованы в будущем [95].

Эти вопросы могут быть сформулированы математически в виде задачи оптимизации, которая может быть решена при определенных допущениях.

Представим, что имеется есть кронштейн, который одним концом жестко заделан в стену, а другой конец тяжело нагружен. Можно ли спроектировать для него такую форму, которая минимизирует запасенную в нем упругую энергию (меру его жесткости), и при этом потратить минимум материала? Топологическая оптимизация дает ответ на этот и подобные вопросы. Топологическая оптимизация тесно связана с оптимальным проектированием механических систем. При оптимальном проектировании механических систем целевой функцией может быть не только масса, или объем материала системы, но и ее жесткость или собственная частота, критическая сила или функция, определяющая условие разрушения, или какая-либо другая важная характеристика системы.

Большую роль в задачах оптимального проектирования играют те или иные ограничения, накладываемые на переменные задачи. Эти ограничения могут формулироваться с помощью целевой функции другой задачи и наоборот. На систему могут быть наложены ограничения геометрического типа.

Существуют следующие отличия алгоритма топологической оптимизации по прочностному режиму от оптимизации по вращающему моменту.

1. Начальная популяция — последняя популяция из предыдущего расчета.
2. Критерий завершения может быть достигнут при первом расчете целевой функции.
3. При итерации оптимизации более одного шага добавляется замена материала воздух на материал сталь.

Данный алгоритм реализован в программе Python и получены следующие параметры конструкции (рисунок 3.12)

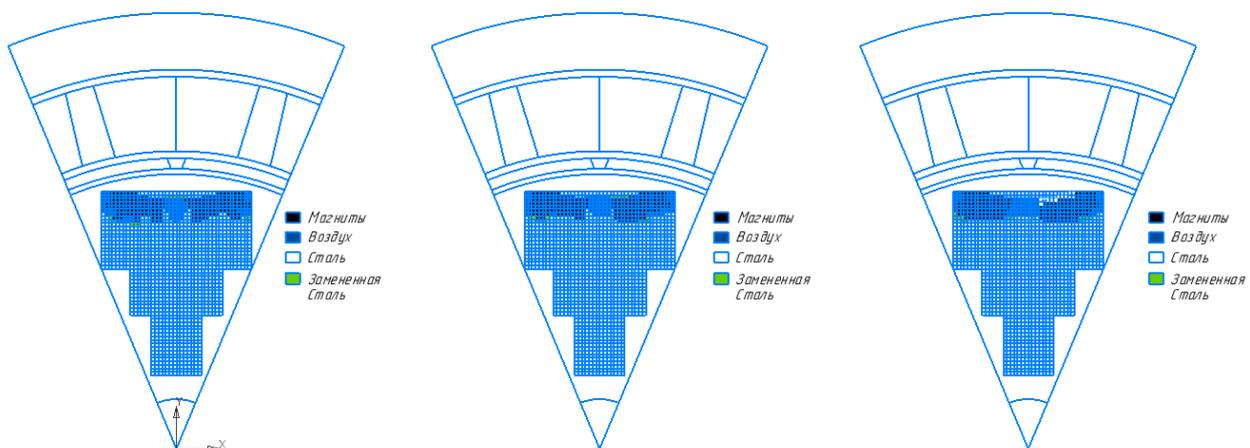


Рисунок 3.12. Итоги топологической оптимизации по прочностному режиму

### 3.5. Результаты исследований комплексной топологической оптимизации ротора СДПМ

При переходе от сектора к полной структуре двигателя, получена следующая конструкция ротора СДПМ (рисунок 3.13).

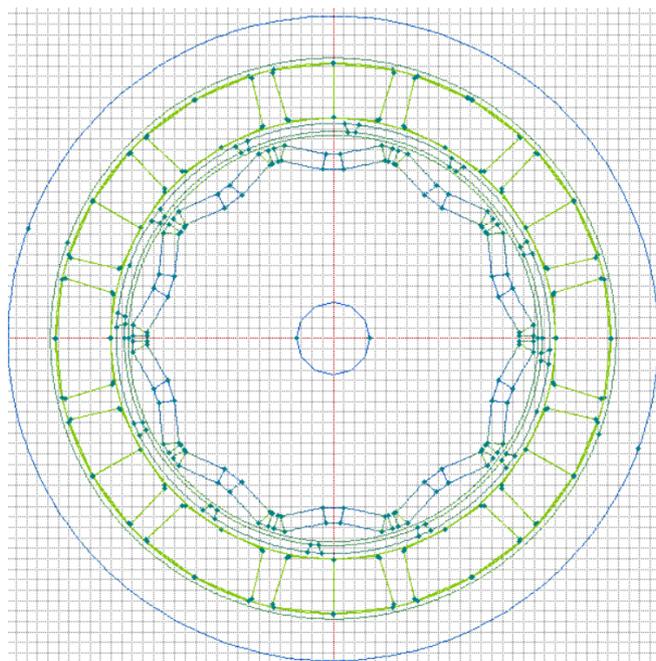


Рисунок 3.13. Результат КТО для ротора СДПМ

В исходном СДПМ магниты (10 штук) можно представить в виде двух трапеций площадью  $53,16 \text{ мм}^2$ , высота магнитов составляет 24 мм, объем ПМ составит  $12758,4 \text{ мм}^3$ .

Для СДПМ после оптимизации магниты (20 штук) в виде простых прямоугольников со сторонами 8 и 3 мм, высота магнитов составляет 24 мм, и объем ПМ составит  $11520 \text{ мм}^3$ . Снижение объема ПМ составило 9,7 %.

Момент для модернизированного СДПМ составил 7,96 Н·м, увеличение вращающего момента составило 9,5 %.

Таким образом, практическую реализацию КТО для ротора СДПМ можно представить в виде алгоритма на рисунке 3.14.

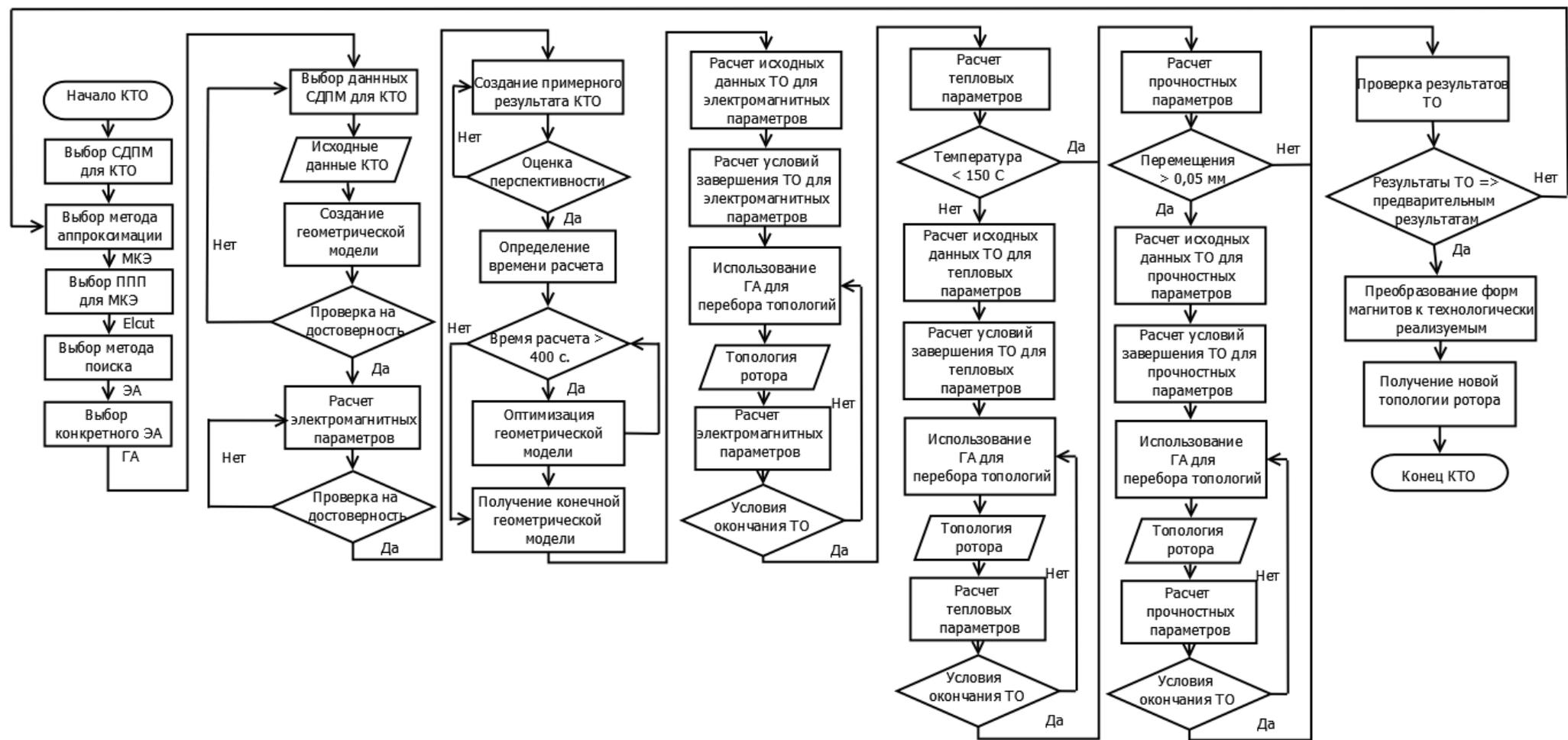


Рисунок 3.14. Алгоритм практической реализации КТО для ротора СДПМ

### 3.6. Выводы

1. Определены требуемые изменения в стандартный ГА для проведения КТО ротора СДПМ.

2. С помощью методики выбора исходных параметров для оптимизации построена геометрическая модель, проведена верификация, и в результате изменения геометрической модели СДПМ уменьшено время расчета.

3. Разработана и реализована программа для проведения оптимизации по вращающему моменту с циклами последующей проверки по температуре (в случае отрицательного результата проводится оптимизация по температуре) и прочностным параметрам (в случае отрицательного результата проводится оптимизация по перемещениям элементов).

4. Получена новая конструкция СДПМ с улучшенными техническими характеристиками - значение момента увеличилось на 9,5%, объем ПМ уменьшился на 9,7%.

## **4. ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МОДЕРНИЗИРОВАННОГО СДПМ И ВЕРИФИКАЦИЯ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ**

### **4.1. План верификации имитационной модели**

Для подтверждения практической реализации КТО для СДПМ необходимо решить следующие задачи.

1. Проверить работоспособность двух исследуемых ЭД ВМ1418 ZXF, определить параметры тока.

2. Модернизировать один из ЭД ВМ1418 ZXF по результатам КТО.

3. Проверить работоспособность модернизированного ЭД ВМ1418 ZXF, определить параметры тока.

4. Разработать и изготовить экспериментальный стенд для измерений вращающего момента с возможностью задания нагрузки.

5. Провести эксперименты по исследованию параметров для ЭД ВМ1418 ZXF.

6. Исследовать и проанализировать полученную информацию и экспериментально подтвердить (опровергнуть) эффективность метода КТО.

## 4.2. Проверка работоспособности исходного и модернизированного двигателя

Для подтверждения работоспособности VM1418 ZXF и определения параметров тока необходимо использовать систему питания, в которую входит контроллер для управления СДПМ и система питания Flatpack2 (рисунок 4.1).



Рисунок 4.1. Схема системы питания СДПМ

Контроллер для управления ЭД (рисунок 4.2) питается от источника постоянного тока 48В (как правило, от АКБ), сам ЭД питается от трёхфазного переменного тока.

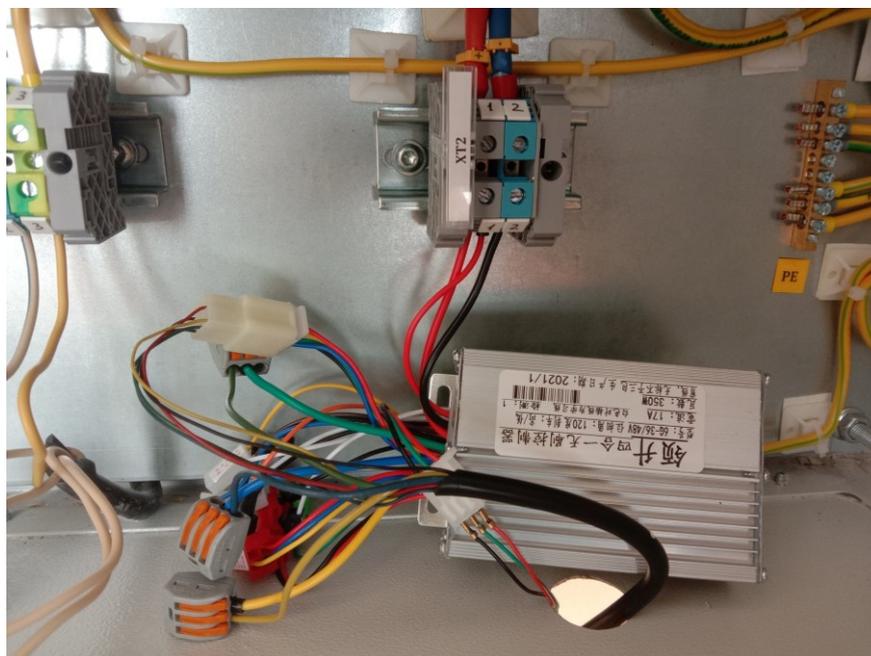


Рисунок 4.2. Контроллер питания для СДПМ

Параметры контроллера:

1. Мощность - 350 Вт.

2. КПД – 95%.
3. Степень защиты IP - 54.
4. Вес - 0,25 кг.
5. Номинальный ток – 9,5 А.
6. Габаритные размеры (ДхВхШ) – 150х45х80 мм.

Основная задача данного элемента – обеспечить на электромотор энергией, получаемой от аккумуляторной батареи. Ток, протекающий по обмоткам статора, создает магнитное поле, взаимодействующее с ПМ ротора СД, и ЭД начинает вращаться. Контроллер также регулирует частоту вращения [96].

Для управления СДПМ необходима ручка газа (рисунок 4.3), которая используется для управления СДПМ. К данной ручке подводится напряжение 5 В, в корпусе расположены датчики Холла. При изменении поворота ручки газа, т.е. изменении расположения магнита по отношению к датчику, выдается напряжение 0-4,8 В. При помощи контроллера происходит изменение скорости и момента, а также включение/отключение питания.



Рисунок 4.3. Ручка газа для контроллера СДПМ

Для подсоединения ручки газа к контроллеру СДПМ используются разъемы. Как правило, в контроллере для этого используется микроразъем с 6

гнездами. Аналогичный микроразъем имеется на ручке, оборудованной индикатором питания, а также указателем степени заряда АКБ.

Контроллер выполняет следующие функции:

- регулирование скорости вращения ротора СДПМ;
- защита СДПМ от токовой перегрузки (отключение при превышении температуры, которое контролируется термодатчиком);
- управление значением крутящего момента;
- возможность плавного торможения, в случае, когда импульсы резко изменяют продолжительность;
- защита источника питания от перенапряжений (происходит проверка значения U АКБ, и при ненормированном значении отключает СДПМ).

Для защиты контроллера от влияния окружающей среды имеются в пластиковых боковых крышках резиновые уплотнители. Все провода из контроллера продеты через специальную пластиковую гребенку и залиты водонепроницаемым компаундом.

Подключение контроллера.

1. Толстые красный и черный - к аккумулятору (напряжение питания от 10 до 30 В).
2. Толстые синий, желтый, зеленый - фазные провода к электромотору.
3. Тонкие красный, черный, синий, желтый, зеленый - к датчикам Холла в электромоторе.
4. Тонкие красный, зеленый, черный - к рукоятке (или к педали) управления мощностью.

Бесколлекторный контроллер собран на высококачественных китайских транзисторах с ультранизким сопротивлением, специально разработанных для применения в контроллерах для СДПМ. При работе с СДПМ существует необходимость в передаче высоких значений тока, быстрой скорости переключения и точности включения/отключения затворов, поэтому целесообразно использовать управление затворами по значениям напряжения, а не тока. При этом оптимальным является использование полевых (MOSFET)

транзисторов (рисунок 4.4), в данном контроллере используются RU-6888S-R [97].

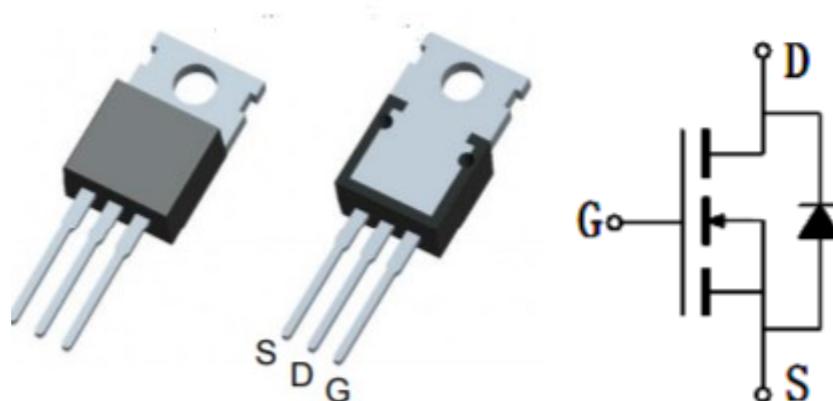


Рисунок 4.4. Транзисторы RU-6888S-R

Основные характеристики транзисторов RU-6888S-R.

1. Мощность рассеивания – 120 Вт.
2. Допустимое  $U$  сток-исток – 68 В.
3. Допустимое  $U$  затвор-исток – 68 В.
4.  $U$  включения – 4 В.

Н-Мост состоит из трёх пар транзисторов, каждый из парных транзисторов присоединяется к определенной фазе обмотки статора СДПМ и подает отрицательный или положительный ток. Верхние ключи – транзисторы, которые включают положительные фазы, нижние – отрицательные фазы.

При каждом шаге происходит включение двух транзисторов: один верхний, другой нижний следующей фазы. В результате ток проходит от одной фазы к другой и приводит ЭД в движение [98].

Для исключения вероятности возникновения коротких замыканий необходима высокая скорость переключения транзисторов, также это приводит к уменьшению потерь на тепловыделение ключей моста.

Заключительным этапом для пуска ЭД является обеспечение управления затворами ключей моста, при этом необходимо:

- считать показания датчиков Холла;

- определить, в каком положении какую пару ключей включать;
- передать сигналы на соответствующие затворы транзисторов.

Контроллер питается от постоянного напряжения, следовательно, необходим источник питания. В нашем случае это система питания Flatpack2, компания Eltek (рисунок 4.5). Основными элементами данной системы являются выпрямители и блок управления Smartpack.



Рисунок 4.5. Блок питания Flatpack2

Контроллер Smartpack - блок контроля и управления, представляющий собой наиболее важный центр управления энергетической установкой постоянного тока. Работа с системой производится при помощи трех кнопок и жидкокристаллического дисплея, расположенных на внешней панели. Данная панель является основным интерфейсом между оператором и системой. Возможно также управлять системой локально, используя ПК, на котором установлено приложение PowerSuite компании EltekValere, или дистанционно при помощи модема, сетей Ethernet и интернет. Для связи с локальным ПК, адаптерами выхода в интернет и SNMP (упрощенный протокол управления сетью) устройство использует порты USB или RS-232.

Основные характеристики устройства:

- жидкокристаллический дисплей и кнопки на передней панели для обслуживания на месте без использования ПК;

- интерфейс USB - или RS-232 для подключения к локальному ПК или для удаленного контроля и управления при использовании модема, Ethernet, интернета или SNMP;

- 6 программируемых пользователем релейных выходов для стандартного дистанционного управления;

- 6 программируемых пользователем входов для контроля стороннего локального оборудования;

- зарядка с автоматической компенсацией температуры для продления срока службы;

- коммуникационное программное обеспечение для ПК на базе Windows.

Контроллеры Smartpack осуществляют связь между выпрямителями, подключенными к шине CAN системы питания постоянного тока Smartpack, а также между другими блоками управления системы, обеспечивая, тем самым, гибкость при расширении функциональных возможностей системы и увеличивая количество точек измерения. Компоненты системы могут быть настроены и модернизированы в соответствии с любыми индивидуальными требованиями к системе питания.

Flatpack2 48/2000 представляет собой выпрямительный модуль, предназначенный как для самостоятельной работы, так и для работы при параллельном подключении в стоечных системах электропитания постоянного тока вместе с блоком контроля и управления Smartpack.

Система питания Flatpack2 может использоваться для ЭД мощностью от 0,3 до 100 кВт за счет больших значений плотности тока и вариативности интерфейса.

Flatpack2 48/3000 является оптимальной системой питания с выпрямлением однофазного тока, высоким значением КПД и передовыми резонансными технологиями.

Подтверждением работы ЭД является вращение их вала и наличие тока, отличающегося от 0 А, данное значение будет отображаться на дисплее Flatpack2 (рисунок 4.6)

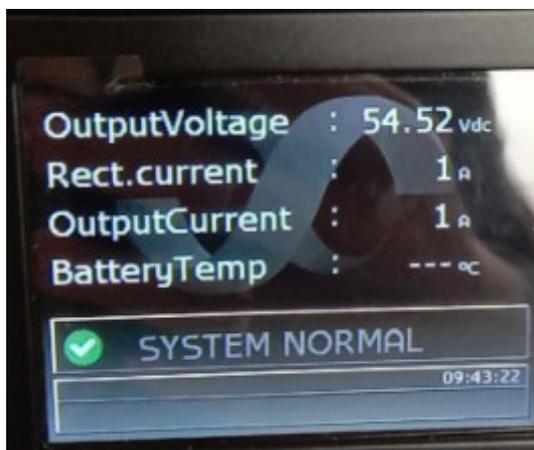


Рисунок 4.6. Дисплей системы Flatpack2

Исследуемые ЭД проверены, вал вращается, значение тока при максимальном моменте составило 2А.

Далее необходимо модернизировать один из ЭД.

Новая топология ротора СДПМ получена с помощью метода КТО. Для создания нового ротора изготовлены заготовки из листов электротехнической стали в количестве 48 штук (рисунок 4.7) для создания требуемой толщины ротора.



Рисунок 4.7. Заготовки для создания ротора модернизированного СДПМ

Далее устанавливаются ПМ в определенном порядке. Магниты выбраны неодимовые в виде пластин 20x8x3 мм., N35. Высота магнитов принята меньше рассчитанной, при этом являясь наиболее оптимальной.

Следовательно, существует отклонение от точного изготовления ротора по результатам КТО. Однако, если сохраняется значение момента при меньшем объеме ПМ, это также является практическим подтверждением полученных при оптимизации результатов.

В исходном СДПМ магниты (10 штук) представлены в виде двух трапеций площадью 53,16 мм<sup>2</sup>, высота магнитов составляет 24 мм, объем ПМ составляет 12758,4 мм<sup>3</sup>.

Для модернизированного СДПМ магниты (20 штук) представлены в виде прямоугольников со сторонами 8 и 3 мм, высота магнитов составляет 20 мм, объем ПМ составляет 9600 мм<sup>3</sup>. Уменьшение объема ПМ составило 32,9 %.

Заготовки отпрессованы с установкой постоянных магнитов, с чередованием полярности. Изготовленный ротор насажен на вал исходного ЭД (рисунок 4.8) и собран модернизированный ЭД (рисунок 4.9).

Модернизированный ЭД также проверен на вращение вала, значение тока при максимальном моменте составило 2А.

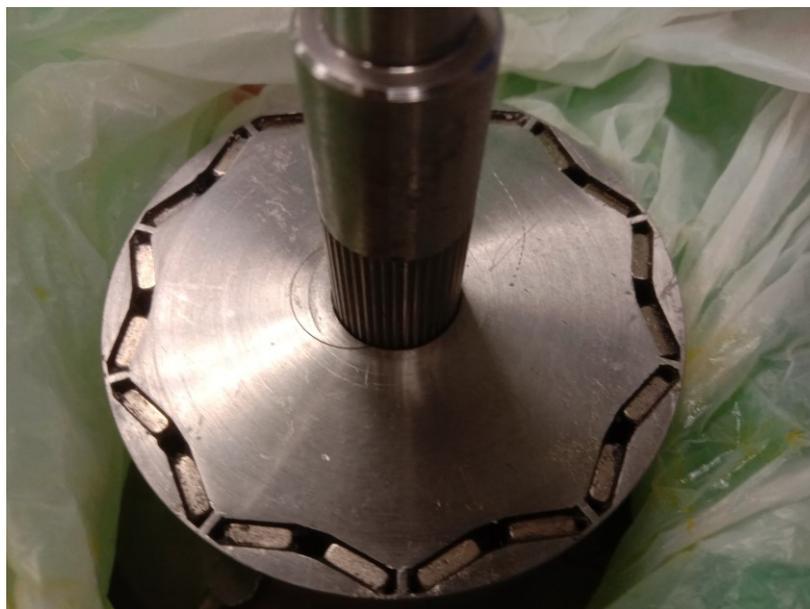


Рисунок 4.8. Модернизированный ротор СДПМ

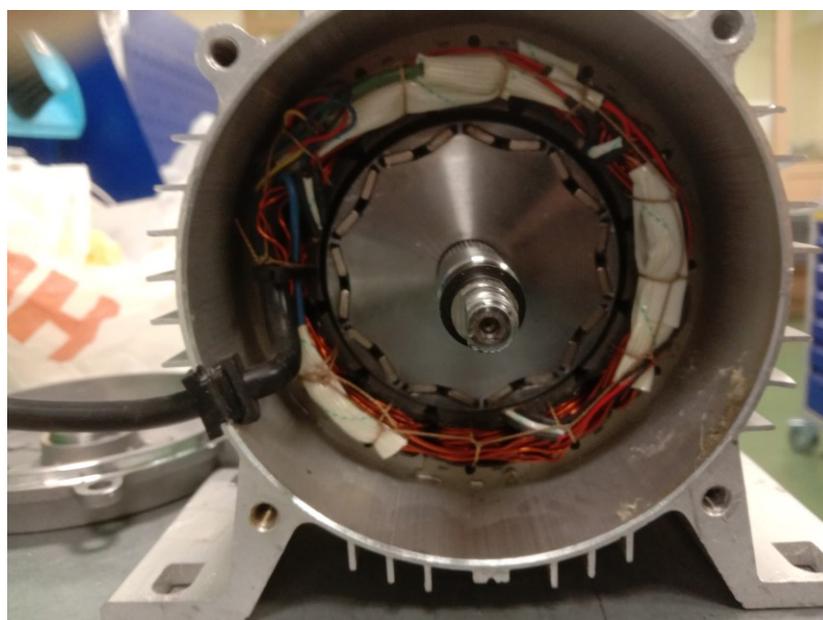


Рисунок 4.9. Модернизированный ротор в сборке со статором СДПМ

### **4.3. Разработка и создание экспериментального стенда для измерений вращающего момента**

Стенд выполнен при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-37-90134.

Целью создания стенда является определение изменения вращающего момента и частоты вращения для стандартного и модернизированного ЭД.

Стенд служит для выполнения следующих задач.

1. Проверка работоспособности СДПМ.
2. Измерение тока.
3. Измерение вращающего момента.
4. Наличие и возможность изменения нагрузки.

Стенд создан в ФГБОУ ВО «КГЭУ», измерения проведены в лаборатории кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».

Структурная схема стенда, включающая в себя 4 основных блока:

- система питания;
  - испытуемый ЭД;
  - система измерений Zetlab (из 2х подсистем);
  - программный комплекс,
- представлена на рисунке 4.10.



Рисунок 4.10. Структурная схема стенда

Особенности системы питания и испытуемого ЭД изложены выше, поэтому исследуем особенности системы измерений и программного комплекса.

Система измерений Zetlab в исходном виде представлена на рисунке 4.11.



Рисунок 4.11. Система измерений Zetlab

Измеряющим компонентом стенда являются тензорезисторы, которые формируют тензометрические мостовые схемы.

Тензорезисторы — датчики, устанавливаемые для замера напряжения в металлических конструкциях, и представляют собой стандартный проводник определенной формы, который закрепляется непосредственно на валу ЭД. Так как известной величиной является исходное сопротивление резистора в стандартном состоянии, деформацию вала можно вычислить по изменению значения сопротивления [99].

Рассмотрим цилиндрический проводник (провод), который растягивается с силой  $F$ . Объем провода  $v$  остается постоянным, при этом сечение уменьшается, а длина увеличивается. Выражение для расчета сопротивления проводника

$$R = \rho \frac{l^2}{v} \quad (4.1.)$$

где  $\rho$  — значение удельного сопротивления соответствующего элемента.

Изменение сопротивления относительно увеличения длины проводника определяется после дифференцирования (4.1)

$$\frac{dR}{dl} = 2 \frac{\rho}{v} l \quad (4.2.)$$

Изменение сопротивления (чувствительность) зависит также от сечения проводника, при уменьшении последнего и удлинении проводника повышается чувствительность. Относительное изменение чувствительности проводника можно представить в виде

$$\frac{dR}{R} = S_k e \quad (4.3.)$$

где  $S_k$  — коэффициент чувствительности тензорезисторов. Если проводник выполнен из металла, то коэффициент принимает значения более 37, для полупроводниковых материалов -19-210.

Применяемые тензорезисторы серии 2ФКП-400 (рисунок 4.12), включают в себя из следующие элементы: чувствительный элемент, подложка и 2 вывода. Тензодатчики 2ФКП — фольговая решетка из константанта, одноосевые датчики с медными выводами.

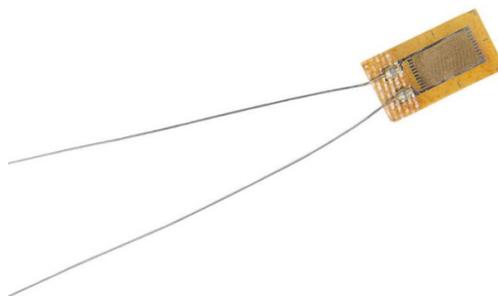


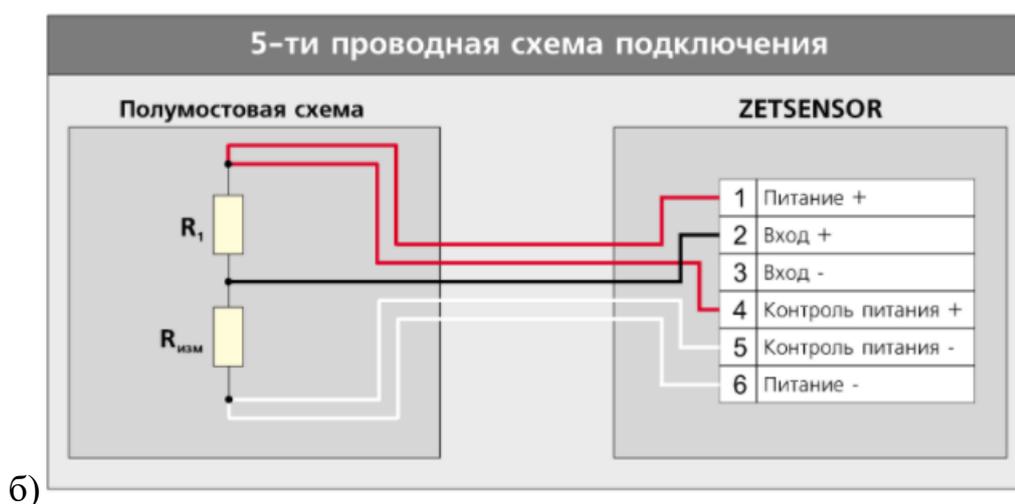
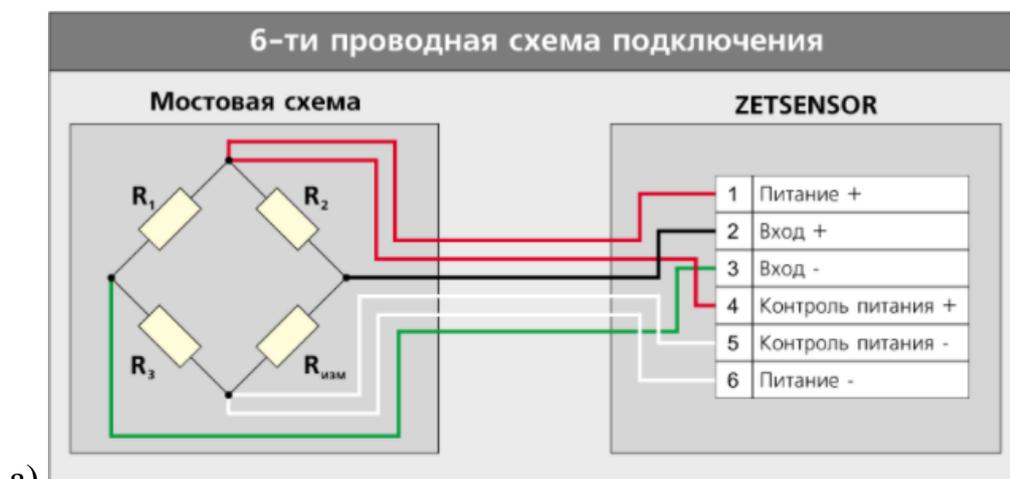
Рисунок 4.12. Тензорезисторы 2ФКП-400.

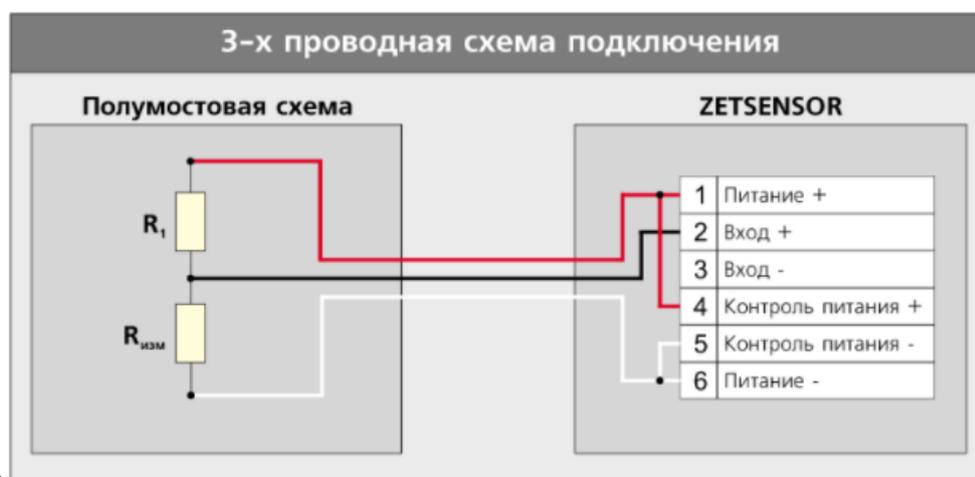
Для подключения тензорезисторов используется три схемы.

1. Мостовая с 6-ти проводной схемой подключения (рисунок 4.13.а), напряжение, подведенное на тензорезисторы контролируется, измеряется отношение напряжений.

2. Полумостовая с 5-ти проводной схемой подключения (рисунок 4.13.б), напряжение, подведенное на тензорезисторы также контролируется, измеряется отношение напряжений.

3. Полумостовая с 3-х проводной схемой подключения (рисунок 4.13.в), измеряется отношение подводимых напряжений.





в)

Рисунок 4.13. Мостовые схемы подключений тензорезисторов

В качестве  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  как правило, применяются резисторы, которые используются для измерения значений сопротивлений и устанавливаются на валу в поперечном направлении, которое не подвержено деформации. Применение данных резисторов обусловлено относительно большим значением температурного коэффициента тензодатчика, что дает возможность упростить тепловую компенсацию мостовой схемы подключения [100]. Для этого необходимо использовать 6-проводную схему измерения. Одна пара проводов служит для питания моста, вторая - для измерения подаваемого напряжения, третья — для измерения разности потенциалов в мостовой схеме.

Выходной сигнал определяется

$$V_1/V_2 = \frac{R_{изм}}{R_2 + R_{изм}} - \frac{R_3}{R_1 + R_3} \quad (4.4.)$$

Если  $R_1 = R_2 = R_3 = R$ , то

$$V_1/V_2 = \frac{1}{2} \frac{R_{изм} - R}{R + R_{изм}} \quad (4.5.)$$

Для полумостовой схемы

$$V_1/V_2 = \frac{R_{изм}}{R + R_{изм}} \quad (4.6.)$$

Для стенда выбрана полумостовая схема с 3-х проводной схемой подключения тензорезисторов (рисунок 4.14), так как содержит наименьшее количество тензорезисторов и проводов, что является важным условием при ограниченной площади вала, исследуемого ЭД (рисунок 4.15).



Рисунок 4.14. Полумостовая схема с 3-х проводной схемой подключения тензорезисторов



Рисунок 4.15. Установка тензорезисторов на валу ЭД

Для проверки работоспособности тензомоста необходимо убедиться в исправности каждого тензорезистора и в корректности схемы запитана.

#### 1. Проверка без нагружения.

Для того чтобы удостовериться в работоспособности тензомоста необходимо проверить сопротивления элементов схемы.

Исследуем в качестве примера следующие параметры: сопротивление резисторов R1, R2 составляет 400 Ом.

При этом должны быть соблюдены следующие соотношения.

- Сопротивление диагоналей (т.е. сопротивление между точками 1 и 3) должно составлять 400 Ом.

- Сопротивление сторон (т.е. сопротивление между парами точек 1–2, 2–3, должно составлять 300 Ом, т.е. 3/4 от 400 Ом.

#### 2. Проверка с нагружением.

Далее схему необходимо запитать от цифрового датчика ZET 7111/ZET 7110 постоянным напряжением U, В.

- Измеренное напряжение питания между точками «Питание+» и «Питание–» должно составлять U, В.

- Измеренное напряжение между точками «Вход+» и «Питание–» должно составлять  $0,5 \times U$ , В.

- Измеренное напряжение между точками «Вход–» и «Питание–» должно составлять  $0,5 \times U$ , В.

Данная проверка параметров подтвердила выполнение необходимых соотношений.

Тензорезисторы подключаются к цифровому тензодатчику ZET711.

Датчики ZET711 (рисунок 4.16) необходимы для определения значений веса, деформации, вращающего момента и т.п. Для обеспечения работы данных датчиков требуется подключение тензодатчиков.

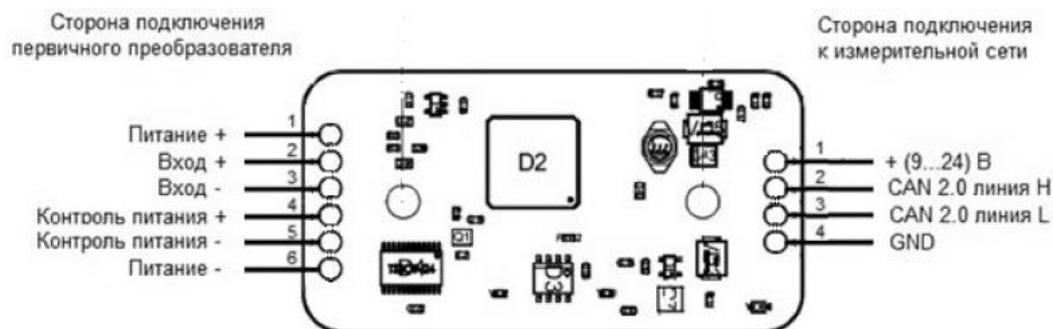


Рисунок 4.16. Обозначения контактов ZET 7111

Тензорезисторы прикрепляются на валу СДПМ и подключаются к датчику, в котором происходит преобразование данных с резисторов в необходимые значения, в нашем случае изменение сопротивления.

Конфигурирование цифрового датчика модели ZET 7110 с внешними тензорезисторами, подключенными по полумостовой схеме с 3-х проводной схемой подключения тензорезисторов для измерения крутящего момента на стальном валу сплошного сечения диаметром 0,021 м.

Необходимо определить расчетное значение чувствительности  $S_r$  в следующем порядке.

1. Выбираем формулу для расчета  $S_r$  для вала сплошного сечения

$$S_r = \frac{S \cdot E \cdot \pi \cdot D^3}{(1000 \cdot 16 \cdot (1 + \nu))} \quad (4.7.)$$

2. Формулу для расчета  $S$  выбираем в соответствии с применяемой схемой включения тензорезисторов

$$S = \frac{4}{(2 \cdot K)} \quad (4.8.)$$

3. Подставляем в формулу значение чувствительности тензорезисторов  $K$  по паспортным данным на партию тензорезисторов (в данном примере использованы тензорезисторы со значениями чувствительности  $K=1.9$ )

$$S = \frac{4}{(2 \cdot 1,9)} = 1.05$$

4. Подставляем в формулу для вычисления  $S_r$  рассчитанное значение  $S=1.05$ , значение модуля упругости для материала вала  $E=210 \cdot 10^9$  Па, значение диаметра вала  $D=0.021$  м, значение коэффициента Пуассона для стали  $\nu=0.28$ . В результате для данного примера получено расчетное значение чувствительности

$$S_r = \frac{1,05 \cdot 210 \cdot 10^9 \cdot 3,14 \cdot 0,021^3}{(1000 \cdot 16 \cdot (1 + 0,28))} = 313,08$$

- Во вкладке «Тензорезистор» в поле «Чувствительность ( $S_r$ )» вносим вычисленное расчетное значение чувствительности  $S_r$  (для данного примера значение 313,08).

Данные с датчиков ZET 7110 передаются в преобразователи интерфейса ZET 7172-M и ZET 7172-S, предназначены для организации беспроводного доступа к фрагменту измерительной линии с использованием радиоканала.

Главной сферой использования преобразователей интерфейса ZET 7172-M, а также ZET 7172-S, является изучение перемещающихся и крутящихся элементов, в случаях, когда передача данных по физическим проводникам невозможна. Критический радиус воздействия радиоканала, при непосредственной фиксации, равен 10 м.

Функционирование радиоканала гарантируется только при одновременной работе преобразователей интерфейса ZET 7172-M и также ZET 7172-S.

Конвертер интерфейса ZET 7172-S оборудован интегрированным преобразователем-трехосевым акселерометром, что дает возможность использовать преобразователи интерфейса ZET 7172-M, а также ZET 7172-S для замера вибраций, не используя подсоединения наружных преобразователей.

Основные технические характеристики преобразователей интерфейса ZET 7172-M и ZET 7172-S представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1. Технические характеристики ZET 7172-M и ZET 7172-S.

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

Информация с цифрового тензодатчика также передается в автономный регистратор ZET 7173, предназначенный для записи данных, поступающих от цифровых датчиков. Регистратор подключается к существующей измерительной сети по интерфейсу CAN 2.0. Запись сигналов начинается автоматически.

Все сведения, получаемые от тензодатчиков и преобразователей интерфейсов, вносятся в наружную карту памяти стандарта microSD.

В случае, когда непрерывное подсоединение измеряющей части стенда к компьютеру по каналам Ethernet (возможно USB, GSM) невозможно, регистратор способен представлять все функции главного регистрирующего элемента. Если же присоединение к компьютеру существует, регистратор (или ряд регистраторов) возможно применять с целью дополнительной фиксации в журнал сигналов для резервирования в случаях отключения связи.

Независимый регистратор не замещает функции преобразователя интерфейса (ZET 7172). Преобразователь ZET 7172 необходим для функционирования всей системы ZET, в том числе настройки конфигурации динамической и статичной части стенда, т.е. и самого регистратора.

Однако, получить доступ ко сохраненным данным посредством ZET 7173 CAN невозможно. Причина заключается в том, что у данного элемента сравнительно невысокая быстрота передачи сведений по CAN, если сравнивать с USB, либо непосредственным подсоединением карты-памяти.

Последний элемент динамической части ZET (рисунок 4.17) – соединитель ZET 7001, который служит для осуществления питания системы от АКБ.



Рисунок 4.17. Динамическая часть ZET

Статичная часть ZET (рисунок 4.18) начинается с ранее описанного ZET 7172-М, который по радиоканалу принимает сигналы от динамической части.



Рисунок 4.18. Статичная часть ZET

Преобразователи интерфейса ZET 7176 предназначены для подключения измерительных сетей на базе цифровых датчиков с интерфейсом CAN к компьютеру по сети Ethernet.

Пропускная способность сетей Ethernet позволяет без задержек исполнять команды и передавать большие объемы данных.

В комплексе ZETLAB используются драйверы для обновлений элементов ZET 7176.

Сервер данных ZETLAB в автоматическом режиме устанавливает все элементы на канале связи CAN, устанавливает названия измерительных каналов, единицы измерений, верхний и нижний предел допустимых параметров и осуществляется постоянная обработка данных измерительного канала и формирование непрерывного синхронизированного потока.

При наличии неизвестного элемента, ZET 7176, программный комплекс ZETLAB, включает все каналы в процесс работы. Таким способом можно управлять всей цепочкой ZET, не прекращая процедуру деятельности по иным каналам. При этом система допускает замену компонентов.

Для включения в работу элемент ZET 7176 необходимо подсоединить к местной сети посредством Ethernet, либо непосредственно к ПК, обязательным условием является подача питания (напряжение должно составлять 8-24 В)

На ПК должны быть установлены ОС Windows и программный комплекс ZETLAB, также следует подсоединить к ПК ZETKEY.

Далее переходим к программному комплексу, который запускается на ПК (рисунок 4.19).



Рисунок 4.19. Подключение программного комплекса

ПО ZETLAB предназначено для обработки сигналов, регистрируемых измерительным оборудованием ZET с различных первичных преобразователей (датчиков).

#### 4.4. Проведение экспериментов

До начала проведения экспериментов необходимо настроить конфигурацию всех элементов ZET. Проведем конфигурирование на примере цифрового тензодатчика ZET 7111, которое осуществляется во вкладке «Настройки» меню «Свойства» (рисунок 4.20).

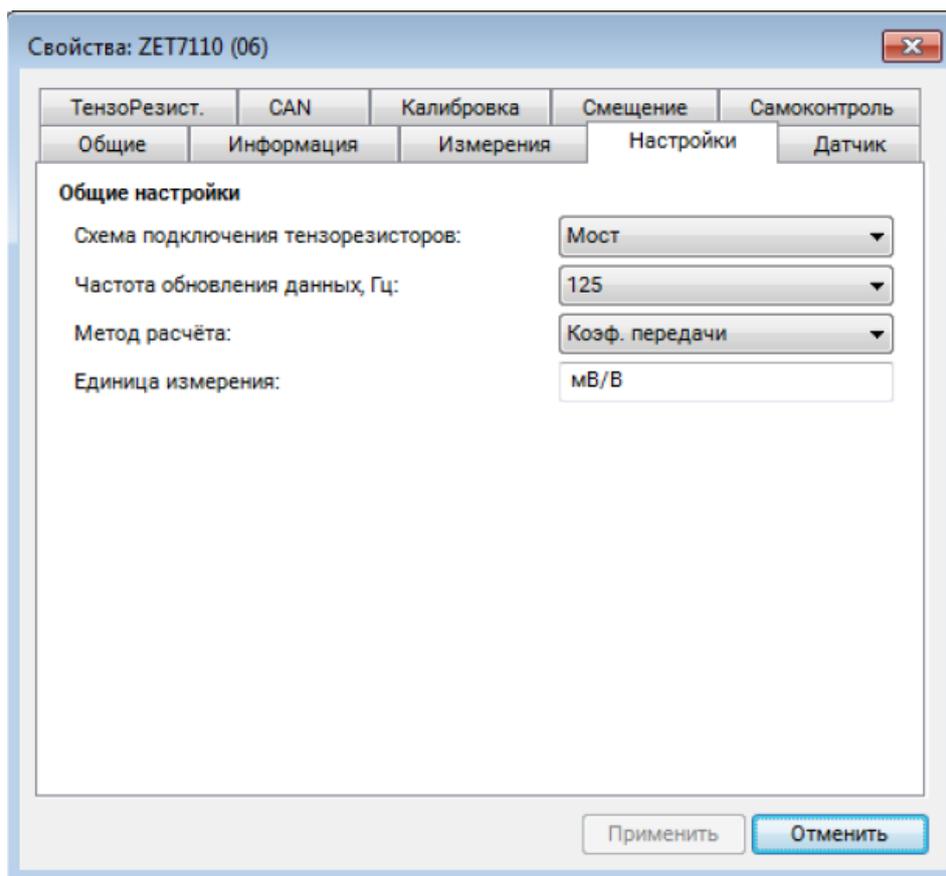


Рисунок 4.20. Окно настроек тензодатчика

Настройка ZET 7111 осуществляется следующим образом.

1. Схему подключения выбрать полумостовую, в соответствии с ранее выбранной схемой подключения тензорезисторов.
2. В поле «Частота обновления данных» выбрать необходимую частоту дискретизации цифрового тензодатчика.
3. В поле «Метод расчета» установить значение «Коеф. передачи».
4. Единицей измерения оставить исходные данные.

Также необходимо отключить статусы активности для вкладок «датчики и тензорезисторы».

Конфигурация остальных элементов настраивается аналогично.

Проект ZetView «Измерение крутящего момента» необходим для получения значений вращающего момента, который состоит из основного окна и настроек.

Страница «Настройки» (рисунок 4.21) предназначена для заполнения полей параметров измерений, которые используются для расчета коэффициента чувствительности.

Параметры измерений	
Тип вала:	Сплошной
Диаметр вала (	0.0210
Материал:	Сталь
Коэффициент Пуассона	0.28
Модуль Юнга (E), М	210000
Тип схемы:	Полумост
Чувствительность тензорезистора (K)	1.90
Исправочный коэффициент (K S)	1.000
Расчетный коэффициент чувствитель	314.022

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

Рисунок 4.21. Окно параметров измерений для определения вращающего момента

В качестве значения параметра «Тип вала» доступно для выбора:

- сплошной;
- полый.

Параметр «диаметр вала» должен иметь ненулевое значение при любом варианте типа вала. Также отдельно для полого вала следует установить значение внутреннего диаметра.

В качестве значения параметра «Материал» доступно для выбора:

- алюминий;
- стекло;
- медь;
- сталь;
- бетон.

Страница «Измерение крутящего момента» (рисунок 4.22) предназначена для выбора каналов измерения, управления процессом измерений, отображения графической информации и сохранения графиков.

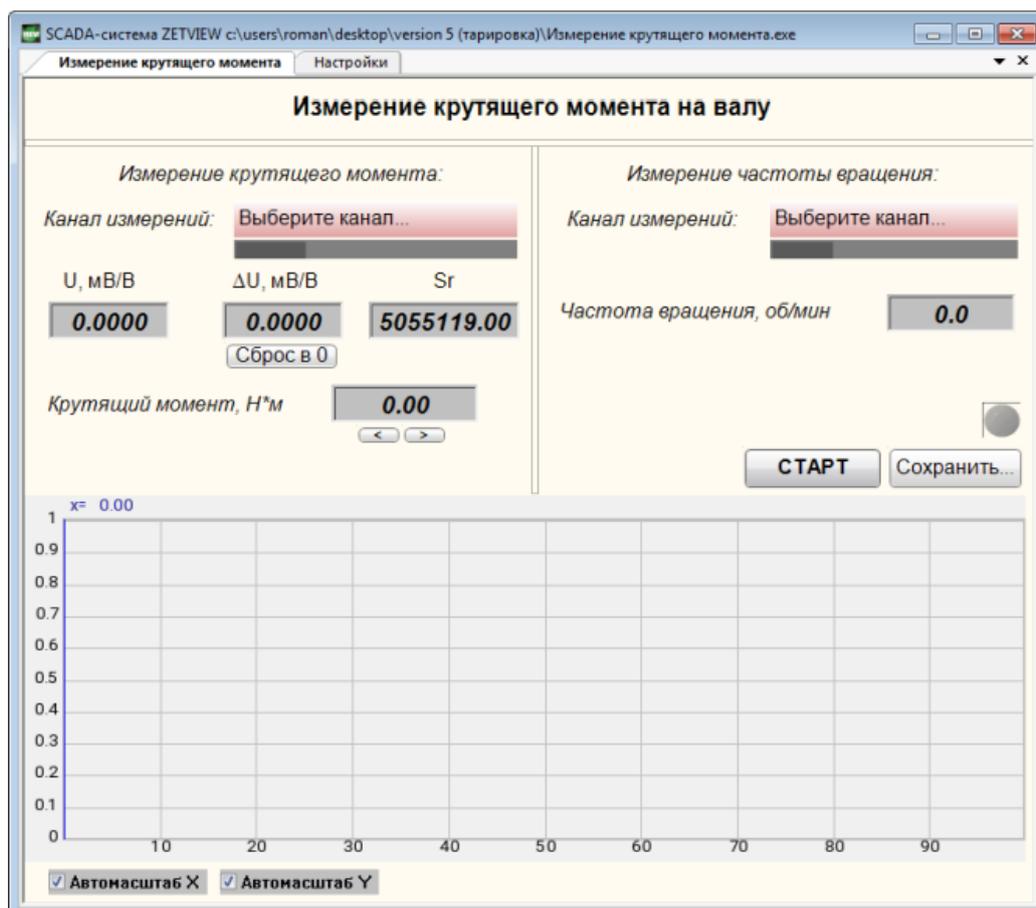


Рисунок 4.22. Окно программы «Измерение крутящего момента»

Область «Измерение крутящего момента» отвечает за измерение крутящего момента при помощи цифрового тензодатчика ZET 7111/ZET 7110. Для выбора каналов необходимо выбрать соответствующие каналы датчиков из списка подключенных устройств.

Индикаторы «U, мВ/В» и « $\Delta U$ , мВ/В» показывают значения действующего напряжения и разности напряжений.

Кнопка «Сброс в 0» обнуляет значение индикатора « $\Delta U$ , мВ/В».

Индикатор «Частота вращения» отображает текущее измеренное значение частоты вращения вала.

При активации кнопки «Старт» начинается процесс сохранения сигналов по выбранным каналам, данные сигналы записываются в пути программы «Пути конфигурации пользователя». Программа «Пути конфигурации пользователя» расположена в главном меню панели ZETLAB. Для просмотра зарегистрированного сигнала следует открыть файл с расширением «.ana» программы «Галерея сигналов» из меню «Отображение» панели ZETLAB.

Для проведения измерений необходимо следующее.

1. Запустить программное обеспечение «Измерение крутящего момента». На вкладке «Настройки» заполнить параметры измерений. На вкладке «Измерение крутящего момента» выбрать каналы для измерения крутящего момента и частоты вращения вала.

2. Убедиться, что значение индикатора «U» находится в диапазоне  $\pm 2$  мВ/В. Если значение индикатора превышает границы диапазона  $\pm 2$  мВ/В, следует провести диагностику работоспособности тензомоста.

3. Обнулить значения индикатора « $\Delta U$ , мВ/В» нажатием на кнопку «Сброс в 0».

4. Для начала измерений нажать кнопку «СТАРТ» (рисунок 4.23).

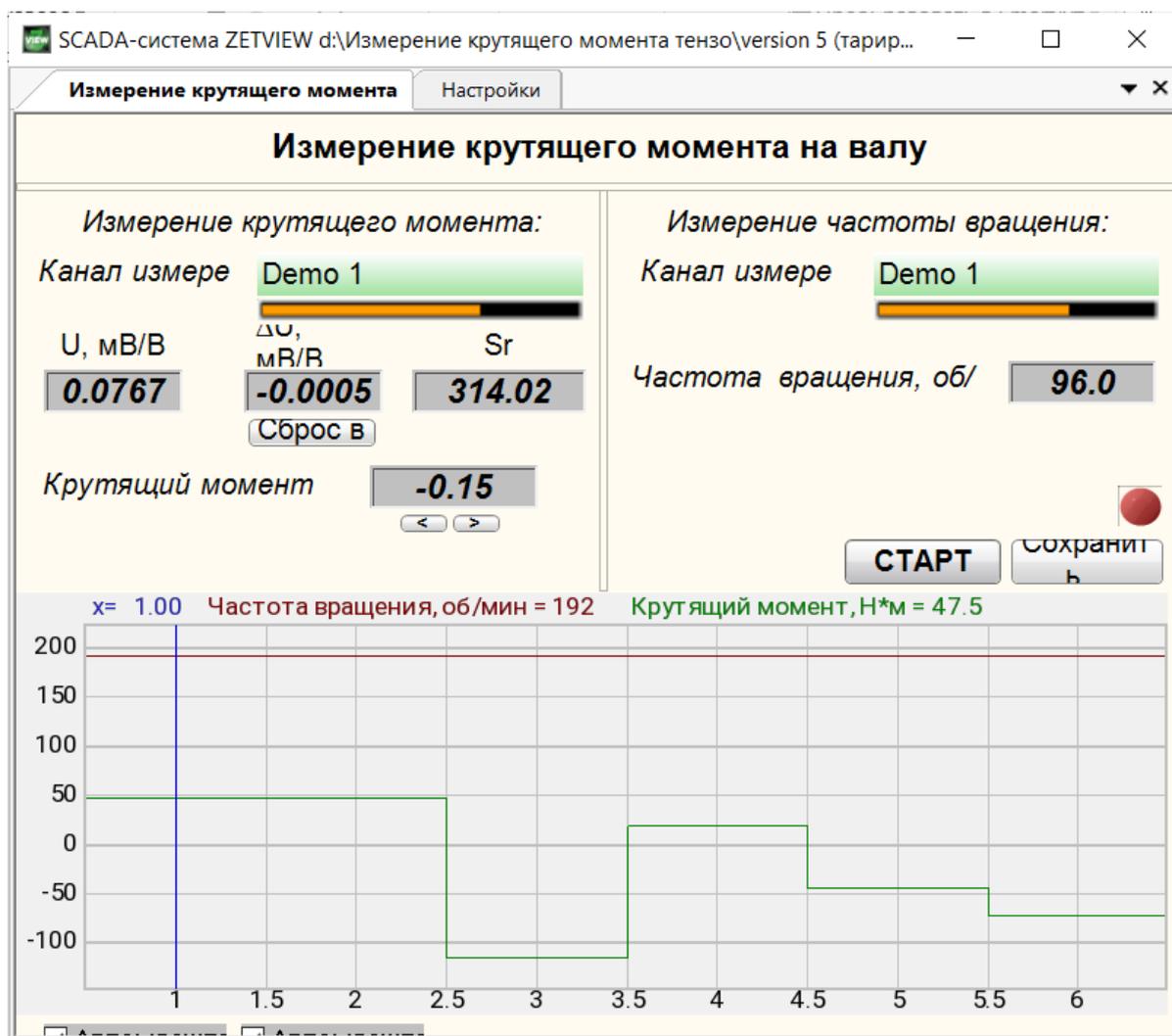


Рисунок 4.23. Окно программы при проведении измерений крутящего момента

При проведении экспериментов стенд для уменьшения вибрации дополнительно закреплен, к концу дополнительного вала установлен специальный элемент, который позволяет посредством трения изменять нагрузку на вал (рисунок 4.24).

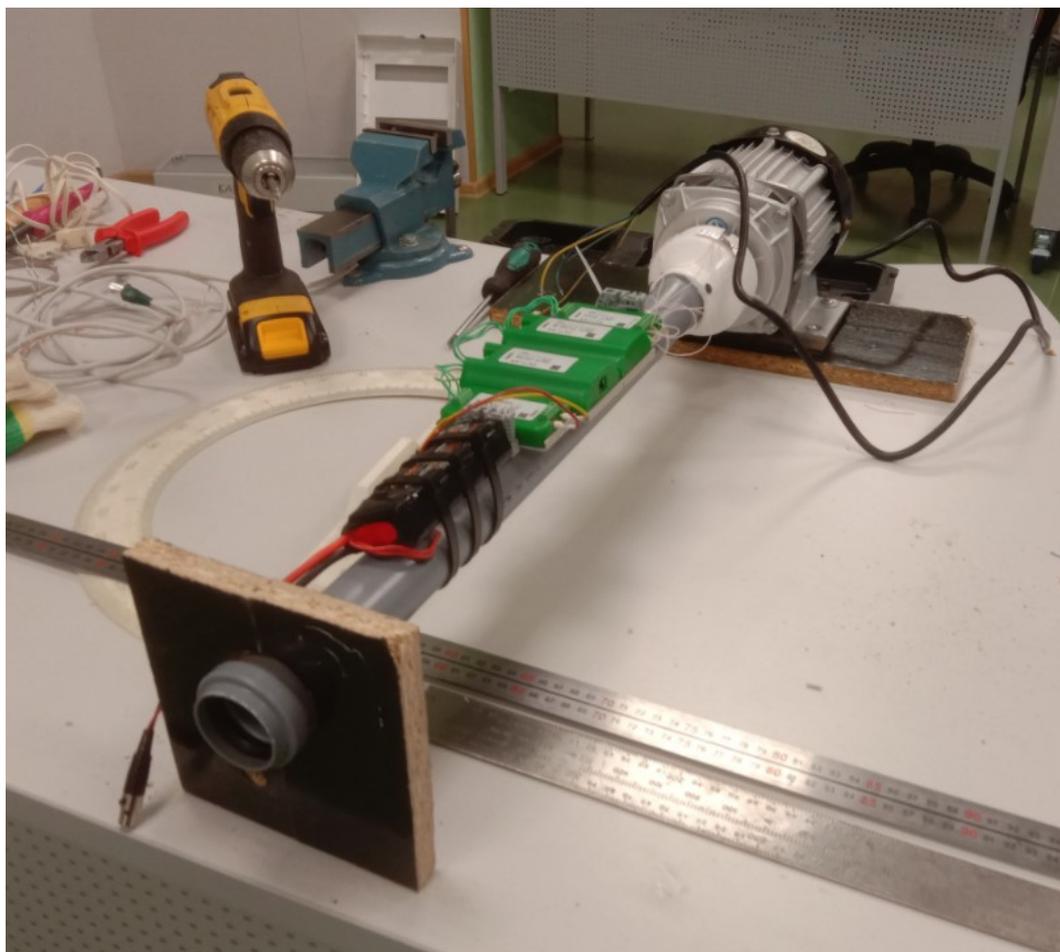


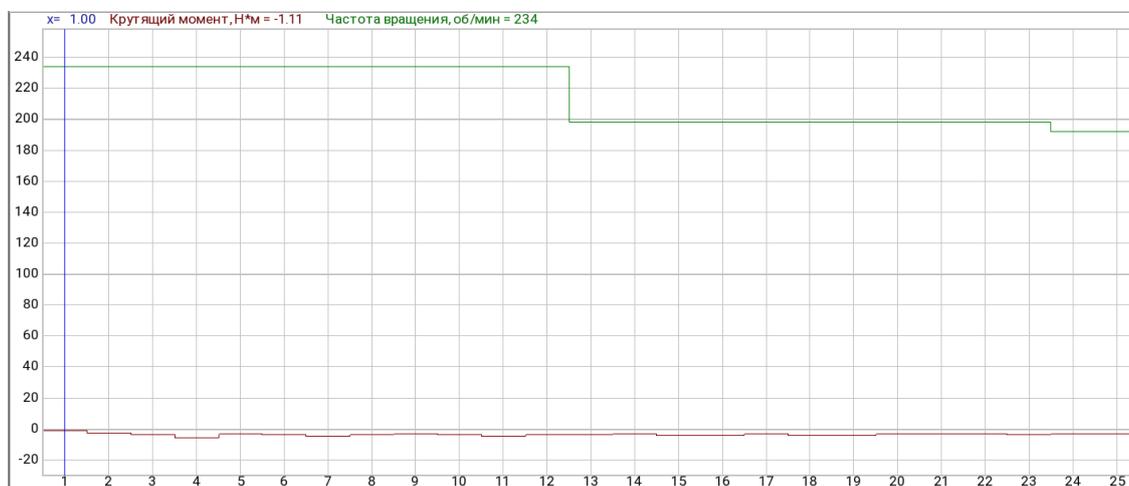
Рисунок 4.24. Модернизированное крепление для ЭД

## 4.5. Анализ экспериментальных данных

Эксперименты проведены для ЭД поочередно, с различными нагрузками, с анализом полученных значений момента. Для уточнения результатов расчета использованы среднеквадратичные значения [101].

Результаты обработаны на ПК с использованием специализированного программного обеспечения.

Результаты экспериментов представляются в следующем виде (рисунок 4.25)



	X	Y1	Y2
	x	Крутящий момент	Частота вращения
По всем данным			
Мин. значение	1.000000	-5.811890	192.000000
Макс. значение	25.000000	-1.114990	234.000000
Ср. арифм. значение	13.000000	-3.622036	214.800003
Ср. кв. значение	14.866069	3.720474	215.596298
Ср. кв. отклонение	7.359801	0.867697	18.894444
Основная частота	0.020000	0.240000	0.020000
По видимой части			
Мин. значение	1.000000	-5.811890	198.000000
Макс. значение	23.000000	-1.114990	234.000000
Ср. арифм. значение	12.000000	-3.654256	216.782608
Ср. кв. значение	13.711309	3.758080	217.527206
Ср. кв. отклонение	6.782330	0.896972	18.387140
Основная частота	0.021739	0.239130	0.021739

Рисунок 4.25. Представление результатов экспериментов

Сравнение характеристик ЭД проведено при одинаковых значениях линейной скорости и частоты вращения, при этом сравнение значений вращающего момента можно считать достоверным. Все результаты экспериментов представлены в таблице 4.2.

Результаты экспериментов показывают, что вращающий момент при наличии нагрузки на модернизированном СДПМ сохраняется (рисунок 4.26). Отличия значений среднеквадратичного момента составляют для опыта 1 – 3,53%, для 2 – 3,86%, для 3 – 3,9%, для 4 – 3,24%.

Различие значений среднеквадратичного момента составляет меньше 5% при уменьшении объема ПМ на 32,9%.

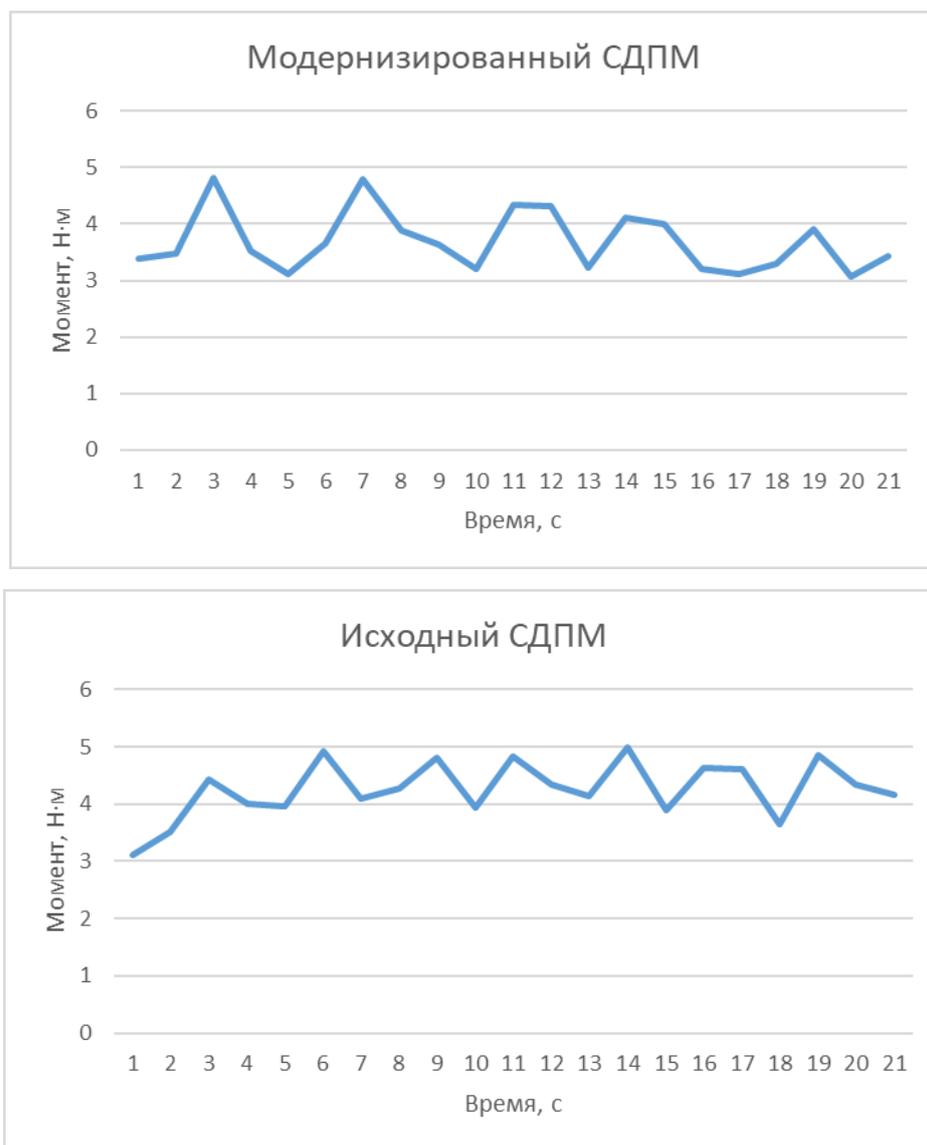


Рисунок 4.26. Графики изменения момента при 192 и 191 об/мин

Таблица 4.2. Сравнение исходного и модернизированного СДПМ

	Исходный СДПМ				Модернизированный СДПМ			
	$M_{\text{ср.кв.}}$ Н·м	$M_{\text{макс}}$ Н·м	$\omega_{\text{ср.кв.}}$ об/мин	$\omega_{\text{макс}}$ об/мин	$M_{\text{ср.кв.}}$ Н·м	$M_{\text{макс}}$ Н·м	$\omega_{\text{ср.кв.}}$ об/мин	$\omega_{\text{макс}}$ об/мин
Опыт №1 (без нагр.)	1,09	1,79	97,22	106,5	1,13	2,42	87,15	96
Опыт №2 (с нагр.)	1,74	2,49	86,5	96	1,81	2,82	91,5	94,8
Опыт №3 (без нагр.)	3,18	4,38	184,84	198	3,31	3,55	190,8	192,4
Опыт №4 (с нагр.)	3,88	5,81	192	198	4,01	4,99	191	192

#### 4.6. Выводы

1. Составлен алгоритм практической реализации метода КТО ротора СДПМ.

2. Проведена проверка работоспособности ЭД, которые работают от источника питания Flatpack2 и контроллера питания. При этом при изменении напряжения от ручки газа изменяется частота вращения ротора.

3. Проведена модернизация СДПМ по результатам КТО, с учетом отклонений геометрических размеров ротора от расчетных значений. Снижение объема ПМ составило 32,9 %.

4. Разработан и изготовлен стенд для определения изменения вращающего момента и частоты вращения ротора, включающий в себя 4 основных блока: системы питания; испытуемого ЭД; системы измерений Zetlab (из 2х подсистем); программного комплекса.

5. Результаты экспериментов доказали возможность соблюдения условия сохранения вращающего момента при наличии нагрузки на модернизированном СДПМ.

Отличие значений среднеквадратичного момента составляет менее 5%, при уменьшении объема ПМ на 32,9%.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

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

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

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

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

6. Для подтверждения КТО ротора СДПМ изготовлен модернизированный двигатель, и стенд для испытаний, что позволило верифицировать разработанную модель. При этом отклонение расчетных и экспериментальных данных составило не более 5 %.

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

## ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ

ЭМ	– электрическая машина
ЭД	– электродвигатель
КТО	– комплексная топологическая оптимизация
ГА	– генетический алгоритм
ДПТ	– двигатель постоянного тока
АД	– асинхронный двигатель
СД	– синхронный двигатель
КПД	– коэффициент полезного действия
СДПМ	синхронный двигатель с постоянными магнитами
БДПТ	– бесщеточный двигатель постоянного тока
ВРД	– вентильный реактивный электродвигатель
ЭП	– электропривод
ПМ	– постоянный магнит
ВПМ	– двигателями с внутренним расположением постоянными магнитами
ТС СДПМ	– синхронные машины с постоянными магнитами в виде зубцов
ШИМ	– широтно-импульсная модуляция
ЭДС	– электродвижущая сила
ЭСМЦ	– эквивалентные схемы магнитных цепей
МКЭ	– метод конечных элементов
ППП	– пакет прикладных программ
ЭВМ	– электронно-вычислительная машина
ЭА	– эволюционный алгоритм
САПР	– система автоматизированного проектирования

ПО	– программное обеспечение
ЧРП	– частотно-регулируемый привод
ПЧ	– преобразователь частоты
СВЭД	– синхронный вентильный электрический двигатель
АКБ	– аккумуляторная батарея
ПК	– персональный компьютер
АКБ	– аккумуляторная батарея
ПК	– персональный компьютер
USB	– Universal Serial Bus – универсальная последовательная шина
CAN	– Controller Area Network – сеть контроллеров
ОС	– операционная система
GSM	– Global System for Mobile Communications – глобальный стандарт цифровой мобильной сотовой связи

## СПИСОК РАБОТ АВТОРА, ОТРАЖАЮЩИХ ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

A1. Сафин, А. Р. Разработка метода топологической оптимизации электрических машин на основе генетического алгоритма / А.Р. Сафин, Р.Р. Хуснутдинов, А.М. Копылов, В.В. Максимов, А.Н. Цветков, Р.Р. Гибадуллин, Т.И. Петров // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2018. – № 4 (40). – С. 77 – 85.

A2. Ившин И.В. Разработка и реализация испытательного стенда для исследования характеристик синхронного электродвигателя / И.В. Ившин, А.Р. Сафин, Т.И. Петров, А.Н. Цветков, В.Ю. Корнилов, А.И. Мухаметшин // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2018. – № 3 (39). – С. 45-55.

A3. Петров, Т.И. Модель системы управления станком-качалкой на основе синхронных двигателей с бездатчиковым методом / Т.И. Петров, А.Р. Сафин, И.В. Ившин, А.Н. Цветков, В.Ю. Корнилов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2018. – Т. 20. № 7-8. – С. 107-116.

A4. Safin, A.R. Topological optimization of the rotors of permanent magnet synchronous motors / A.R. Safin, T.I. Petrov // E3S Web of Conferences. – 2020. – Vol. 220. – paper № 01040.

A5. Petrov, T.I. Changing the design of a synchronous motor after testing / T. I. Petrov, V.Yu. Kornilov, A.R. Safin, N.E. Kuvshinov, A.N. Tsvetkov, R.R. Gibadullin // E3S Web of Conferences. – 2020. – Vol. 220. – paper № 01030.

A6. Petrov, T.I. Modification of the synchronous motor model for topological optimization / T.I. Petrov, A.R. Safin // E3S Web of Conferences. – 2020. – Vol. 178. – paper № 01016.

A7. Petrov, T.I. Theoretical aspects of optimization synchronous machine rotors / T.I. Petrov, A.R. Safin // E3S Web of Conferences. – 2020. – Vol. 178. – paper № 01049.

А8. Цветков А.Н. Разработка стенда для исследования электроприводов станков-качалок / А.Н. Цветков, В.Ю. Корнилов, А.Р. Сафин, Н.Е. Кувшинов, Т.И. Петров, Р.Р. Гибадуллин // Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. – 2020. – Т. 23. № 4. – С. 364-375.

А9. Петров Т.И. Модификация генетического алгоритма для комплексной топологической оптимизации ротора синхронных двигателей / Т.И. Петров // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2021. – Т. 23. № 3. – С. 70-79.

А10. Петров Т.И. Разработка и реализация стенда для подтверждения эффективности топологической оптимизации ротора синхронных двигателей с постоянными магнитами / Т.И. Петров, А.Р. Сафин // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2021. - №2 (50) – С. 109-117.

А11. Petrov, T.I. Modification Genetic Algorithm for Topological Optimization the Rotor of Synchronous Motors / T.I. Petrov, A.R. Safin // In: Vankov Y. (eds) Proceedings of ICEPP 2021. ICEPP 2021. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 190. Springer, Cham. pp 151-156.

А12. Свидетельство № 2019610240 Рос. Федерация. Программа для топологической оптимизации ротора синхронной машины / А.Р. Сафин, А.М. Копылов, А.Н. Цветков, Р.Р. Гибадуллин, Р.Р. Хуснутдинов, В.В. Максимов, Т.И. Петров. - № 2019610240; заявл.18.12.2018; опубл. 09.01.2019

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gieras, J.F. Permanent Magnet Motor Technology, Design and Application / J.F. Gieras, M. Wing // Marcel Dekker Inc. – 1997.
2. Gillon, F. Screening and Response surface method applied to the numerical optimization of electromagnetic devices / F. Gillon, P. Brochet // IEEE Trans. Mag. – 2004. - Vol. 36, no.4.
3. Петров, Т.И. Модель системы управления станком-качалкой на основе синхронных двигателей с бездатчиковым методом / Т.И. Петров, А.Р. Сафин, И.В. Ившин, А.Н. Цветков, В.Ю. Корнилов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2018. – Т. 20. № 7-8. – С. 107.
4. Петров, Т. И. Аналитический обзор работ по оптимизации конструкции синхронных двигателей / Т. И. Петров, А. Р. Холикова, А. Р. Сафин // Энергия молодежи для нефтегазовой индустрии: Материалы IV Международной научно-практической конференции молодых ученых, Альметьевск, 16–18 октября 2019 года. – Альметьевск: Альметьевский государственный нефтяной институт. - 2019. – С. 418.
5. Levran, A. Design of polyphase motor with PM excitation / A. Levran, E.Levi // IEEE Transactions on Magnetics. – 1985. - Vol. MAG-20, No.3.
6. Башин, К.А. Методы топологической оптимизации конструкций, применяющиеся в аэрокосмической отрасли / К.А. Башин, Р.А. Торсунов, С.В. Семенов // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. - 2017. - №4 (51).
7. Васильев, Б. Е. Анализ возможности применения топологической оптимизации при проектировании неохлаждаемых рабочих лопаток турбин / Б.Е. Васильев, Л.А. Магеррамова // Вестник СГАУ. - 2015. - №3-1.
8. Мягков, Л.Л. Топологическая оптимизация поршня высокофорсированного дизеля / Л.Л. Мягков, С.М. Сивачев, Е.Е. Стрижов, С.П. Чирский // Двигателестроение. — 2018. — № 2. — С. 3.

9. Li, C., Kim, I.Y. Multi-material topology optimization for automotive design problems / C. Li, I.Y. Kim // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering. – 2018. - 232 (14). – P.1950.
10. Shenoy, K.L. Design topology and electromagnetic field analysis of Permanent Magnet Brushless DC motor for electric scooter application (2016) / K. L. Shenoy, M.S. Kumar // International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques, ICEEOT. – 2016. - P.1541.
11. Zhu, Z.Q. Prediction of open-circuit air gap field distribution in brushless machines having an inset permanent magnet rotor topology / Z. Q. Zhu, D. Howe, Z. P. Xia // IEEE Trans. Magn. – 1994. - vol.30, no.1. - P.98.
12. Dyck, D.N. Automated design of magnetic devices by optimizing material distribution / D. N. Dyck, D. A. Lowther // IEEE Trans. Magn. – 1996. - vol.32, no.3. - P.1188.
13. Im, C.H. Hybrid genetic algorithm for electromagnetic topology optimization / C. H. Im, H. K. Jun, Y. J. Kim //IEEE Trans. Magn. – 2003. - vol.39, no.5. - P.2163.
14. Wang, S. Topology optimization of electromagnetic systems considering magnetization direction / S. Wang, D. Youn, H. Moon, J. Kang // IEEE Trans. Magn. – 2005. - vol.41, no.5. - P. 1808.
15. Shim, H. Topology optimization of magneto thermal systems considering eddy current as Joule heat / H. Shim, S. Wang, and K. Hameyer // IEEE Trans. Magn. – 2007. - vol.43, no.4. - P.1617.
16. Kim, D.H. The implications of the use of composite material in electromagnetic device topology and shape optimization / D. H. Kim, J. K. Sykulski, and D. A. Lowther // IEEE Trans. Magn. – 2009. - vol.45, no.3. - P.1154.
17. Choi J.S. Structural topology optimization of magnetic actuators using Genetic algorithms and ON/OFF sensitivity / J. S. Choi, J. Yoo // IEEE Trans. Magn. – 2009. - vol.45, no.5. - P.2276.

18. Labbe, T. Convexity-oriented mapping method for the topology optimization of electromagnetic devices composed of iron and coils / T. Labbe, B. Dehez // IEEE Trans. Magn. – 2010. - vol.46, no.5. - P.1177.
19. Lee, J. Structural topology optimization of electrical machinery to maximize stiffness with body force distribution / J. Lee, N. Kikuchi // IEEE Trans. Magn. – 2010. - vol.46, no.10. - P.3790
20. Takahashi, N. Examination of optimal design of IPM motor using ON/OFF method / N. Takahashi, T. Yamada, D. Miyagi // IEEE Trans. Magn. – 2010. - vol.46, no.8. - P.3149.
21. Ishikawa, T. Optimization of rotor topology in PM synchronous motors by Genetic algorithm considering cluster of materials and cleaning procedure / T. Ishikawa, K. Nakayama, N. Kurita, F. P. Dawson // IEEE Trans. on Magnetics. – 2014. - vol. 50, no. 2. - paper no. 7015704.
22. Петров, Т. И. Топологическая оптимизация параметров синхронных электрических машин с постоянными магнитами в составе приводных комплексов / Т. И. Петров // Тинчуринские чтения: Материалы XIV Международной молодежной научной конференции. В 3-х томах, Казань, 23–26 апреля 2019 года / Под общей редакцией Э.Ю. Абдуллазянова. – Казань: Казанский государственный энергетический университет. - 2019. – С. 241.
23. Price, K.V. Differential evolution: a practical approach to global optimization / K. V. Price, R. M. Storn, J. A. Lampinen // Berlin; New York: Springer. - 2005.
24. Петров, Т. И. Синхронные двигатели в нефтяной промышленности / А. Р. Сафин, А. Н. Цветков, И. В. Ившин // Достижения, проблемы и перспективы развития нефтегазовой отрасли: Материалы Международной научно-практической конференции, Альметьевск, 14–17 ноября 2018 года. – Альметьевск: Альметьевский государственный нефтяной институт. - 2018. – С. 469.
25. Eberhart, R. A new optimizer using particle swarm theory / R. Eberhart and J. Kennedy // in Micro Machine and Human Science, Proceedings of the Sixth International Symposium on, Nagoya, Japan. – 1995. - P. 39.

26. Ильин, Б. П. Эволюционные алгоритмы в задаче минимизации булевых функций / Б. П. Ильин // Известия Иркутского государственного университета. Серия: Математика. - 2011. - №4.
27. Панченко Т.В. Генетические алгоритмы: учебно-методическое пособие / под ред. Ю.Ю. Тарасевича. - Астрахань, Издательский дом "Астраханский университет", 2007.
28. Сочнев, А.Н. Распределение ресурсов производственной системы с использованием сетей Петри и генетического алгоритма / А.Н. Сочнев // УБС. 2012. №39.
29. Jiabin, W. Optimal torque control of fault-tolerant permanent magnet brushless machines / W. Jiabin, K. Atallah, D. Howe // IEEE Transactions on Magnetics. – 2003. - vol, 39. - P.2962.
30. Петров, Т. И. Разработка метода проектирования синхронных двигателей с постоянными магнитами для привода станков-качалок / Т. И. Петров // XII Ежегодная научная сессия аспирантов и молодых ученых: Материалы межрегиональной научной конференции. В 2-х томах, Вологда, 19–23 ноября 2018 года. – Вологда: Вологодский государственный университет. - 2018. – С.100.
31. Lubin, T. 2-D Exact Analytical Model for Surface Mounted Permanent-Magnet Motors With Semi-Closed Slots / T. Lubin, S. Mezani, and A. Rezzoug // Magnetics, IEEE Transactions on. – 2011. - vol. 47. - P. 479.
32. Bash, M. L. Incorporating Motion in Mesh Based Magnetic Equivalent Circuits / M. L. Bash, J. M. Williams, S. D. Pekarek // Energy Conversion, IEEE Transactions on. – 2010. - vol. 25. - P. 329.
33. Беззубцева, М.М. Аналитический обзор пакетов прикладных программ для моделирования энергетических процессов потребительских энергосистем АПК / М.М. Беззубцева, В.С. Волков // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2015. – № 6-2. – С. 191-195.
34. Lovelace, E. C. A saturating lumped parameter model for an interior PM synchronous machine / E. C. Lovelace, T. M. Jahns, J. H. Lang // in Electric Machines and Drives. International Conference IEMD '99, Seattle, WA. – 1999. - P.553.

35. Bianchi, N. Magnetic models of saturated interior permanent magnet motors based on finite element analysis / N. Bianchi, S. Bolognani // in Industry Applications Conference. Thirty-Third IAS Annual Meeting. The 1998 IEEE, St. Louis, Missouri USA. – 1998. - vol.1. - P.27.
36. Walker, J.A. Flux-linkage calculation in permanent-magnet motors using the frozen permeabilities method / J. A. Walker, D. G. Dorrell, C. Cossar // Magnetics, IEEE Transactions on. – 2005. - vol. 41. - P.3946.
37. Ionel, D.M. Finite-Element Surrogate Model for Electric Machines With Revolving Field: Application to IPM Motors / D. M. Ionel, M. Popescu // Industry Applications, IEEE Transactions on. – 2010. - vol. 46. - P.2424.
38. Petrov, T.I. Modification Genetic Algorithm for Topological Optimization the Rotor of Synchronous Motors / T.I. Petrov, A.R. Safin // In: Vankov Y. (eds) Proceedings of ICEPP 2021. Lecture Notes in Civil Engineering. – 2011. vol 190. - P.151.
39. Herrera, F., Lozano M., Verdegay J.L. Tackling real-coded Genetic algorithms: operators and tools for the behaviour analysis / F. Herrera, M.Lozano, J.L. Verdegay // Artificial Intelligence Review, Vol. 12, No. 4, 1998. – P. 265-319.
40. Свидетельство № 2019610240 Рос. Федерация. Программа для топологической оптимизации ротора синхронной машины / А.Р. Сафин, А.М. Копылов, А.Н. Цветков, Р.Р. Гибадуллин, Р.Р. Хуснутдинов, В.В. Максимов, Т.И. Петров. - № 2019610240; заявл.18.12.2018; опубли. 09.01.2019. – 1 с.
41. Петров, Т. И. Топологическая оптимизация синхронных двигателей / Т. И. Петров, А. Р. Холикова // Электромеханотроника и управление: Пятнадцатая Всероссийская (седьмая международная) научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых "Энергия-2020": Материалы конференции. В 6 томах, Иваново. - 2020. – С. 19.
42. Uler, G. F. Utilizing genetic algorithms for the optimal design of electromagnetic devices / G. F. Uler, O. A. Mohammed, K. Chang-seop // Magnetics, IEEE Transactions on. – 1994. - vol. 30. - P. 4296.

43. Петров, Т. И. Обзор станций управления электроприводом станков-качалок нефти / Д. В. Пономарева, А. Р. Сафин, Т. И. Петров // Диспетчеризация и управление в электроэнергетике: XIV Всероссийская открытая молодежная научно-практическая конференция, Казань, 06–08 ноября 2019 года. – Казань: Казанский государственный энергетический университет. - 2019. – С.152.
44. Parasiliti, F. Finite-Element-Based Multiobjective Design Optimization Procedure of Interior Permanent Magnet Synchronous Motors for Wide Constant-Power Region Operation / F. Parasiliti, M. Villani, S. Lucidi, F. Rinaldi // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2012. - vol. 59. - P.2503.
45. Dong-Joon, S. Efficiency optimization of interior permanent magnet synchronous motor using genetic algorithms / S. Dong-Joon, C. Dong-Hyeok, C. Jang-Sung, J. Hyun-Kyo, C. Tae-Kyoung // Magnetics, IEEE Transactions on. – 1997. - vol. 33. - P.1880.
46. Liang-Yi, H. Efficiency optimization of brushless permanent magnet motors using penalty genetic algorithms / H. Liang-Yi, T. Mi-Ching, H. Chien-Chin // in Electric Machines and Drives Conference. IEEE International, Madison, WI. – 2003. - P. 365.
47. Bianchi, N. FEM analysis and optimisation design of an IPM synchronous motor / N. Bianchi, A. Canova // in Power Electronics, Machines and Drives. International Conference on (Conf. Publ. No. 487), Bath, UK. – 2002. - P. 49.
48. Sudhoff, S.D. Genetic Algorithm Based Design of a Permanent Magnet Synchronous Machine / S. D. Sudhoff, J. Cale, B. Cassimere, M. Swinney // in Electric Machines and Drives. IEEE International Conference on, San Antonio, TX. – 2005. - P. 1011.
49. Wrobel, R. Design Considerations of a Direct Drive Brushless Machine With Concentrated Windings / R. Wrobel, P. H. Mellor // Energy Conversion, IEEE Transactions on. – 2008. - vol. 23. - P.1.
50. Pellegrino, G. FEA-based multi-objective optimization of IPM motor design including rotor losses / G. Pellegrino, F. Cupertino // in Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), IEEE, Atlanta, GA. – 2010. - P.3659.

51. Pellegrino, G. Barriers shapes and minimum set of rotor parameters in the automated design of Synchronous Reluctance machines / G. Pellegrino, F. Cupertino, C. Gerada // in Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), IEEE International, Chicago, IL. – 2013. - P.1204.
52. Pellegrino, G. Automatic Design of Synchronous Reluctance Motors focusing on Barrier Shape Optimization / G. Pellegrino, F. Cupertino, C. Gerada // Industry Applications, IEEE Transactions on. – 2014. - vol. PP. - P.1.
53. Peng, Z. Morphing parametric modeling and design optimization of spoke and V-type permanent magnet machines by combined design of experiments and differential evolution algorithms / Z. Peng, D. M. Ionel, N. A. O. Demerdash // in Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), IEEE, Denver, CO. – 2013. - P.5056.
54. Jiang, W. Y. Machine Design Optimization Based on Finite Element Analysis in a High-Throughput Computing Environment / W. Y. Jiang, T. M. Jahns, T. A. Lipo, W. Taylor, Y. Suzuki // IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). – 2012. - P.869.
55. Petrov, T.I. Changing the design of a synchronous motor after testing / T. I. Petrov, V.Yu. Kornilov, A.R. Safin, N.E. Kuvshinov, A.N. Tsvetkov, R.R. Gibadullin // E3S Web of Conferences. – 2020. – Vol. 220. – paper № 01030.
56. Petrov, T.I. Theoretical aspects of optimization synchronous machine rotors / T.I. Petrov, A.R. Safin // E3S Web of Conferences. – 2020. – Vol. 178. – paper № 01049.
57. Zhao, W. Optimal design of a novel asymmetrical rotor structure to obtain torque and efficiency improvement in surface inset pm motors / W. Zhao, T. Lipo, B. Kwon // IEEE Transactions on Magnetics. – 2015. - vol. 51, no. 3. - P.1.
58. Maroufian, S. S. PM assisted synchronous reluctance machine design using AlNiCo magnets / S. S. Maroufian, P. Pillay // In 2017 IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC), pages 1–6, Miami, FL, USA. – 2017. – 5. – P.1.

59. Lazarov, B.S. Filters in topology optimization based on Helmholtz-type differential equations / B. S. Lazarov, O. Sigmund // *Int. J. Numer. Meth. Engng.* – 2011. - 86(6). –P.765.
60. Akiki, P. Axial ferritemagnet-assisted synchronous reluctance motor / P. Akiki, M. Hage-Hassan, M. Bensetti, J.-C. Vannier, D. Prieto, M. McClelland // *In 2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM).* – 2018. – P.583.
61. Amstutz, S. Topological derivative for the nonlinear magnetostatic problem / S. Amstutz, P. Gangl // *Electron. Trans. Numer. Anal.* – 2019. – 51. – P.169.
62. Amstutz, S. A consistent relaxation of optimal design problems for coupling shape and topological derivatives / S. Amstutz, C. Dapogny, À. Ferrer // *Numerische Mathematik.* - 2018. - 140(1). – P.35.
63. Garcke, H. Numerical Approximation of Phase Field Based Shape and Topology Optimization for Fluids / H. Garcke, C. Hecht, M. Hinze, C. Kahle // *SIAM J. Sci. Comput.* – 2015.- 37(4). P.1846.
64. Choi, J.S. Optimal design method for magnetization directions of a permanent magnet array / J. S. Choi, J. Yoo // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials.* – 2010. - 322(15). – P.2145.
65. Guo, F. Multimaterial Magneto-Structural Topology Optimization of Wound Field Synchronous Machine Rotors / F. Guo, M. Salameh, M. Krishnamurthy, I. P. Brown // *IEEE Transactions on Industry Applications.* – 2020. - 56(4). – P.3656.
66. Choi, J. S. Optimization of Magnetization Directions in a 3-D Magnetic Structure / J. S. Choi, J. Yoo, S. Nishiwaki, K. Izui // *IEEE Transactions on Magnetics.* – 2010. - 46(6). – P.1603.
67. Lee, J. Simultaneous Design Optimization of Permanent Magnet, Coils, and Ferromagnetic Material in Actuators / J. Lee, E. M. Dede, T. Nomura // *IEEE Transactions on Magnetics.* – 2011. - 47(12). – P.4712.
68. Nunes, A. S. Modeling of the magnetic behavior of permanent magnets including ageing effects / A. S. Nunes, L. Daniel, M. Hage-Hassan, M. Domenjoud // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials.* – 2020. – 512. – paper № 166930.

69. Risticvic, M. Design of an interior permanent magnet synchronous motor supported by the topology optimization algorithm / M. Risticvic, D. Iles, A. Moeckel // In 2016 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM). – 2016. – 6. – P.221.

70. Ferreira, M.V. Analysis of 65 kVA high efficiency synchronous generator using finite element Method / M.V. Ferreira, da Luz, E. Deschamps, F. Runcos, S.L. Nau // Proc. of the XII Int. Sym. on Electromagnetic Fields in Mechatronics Electrical and Electronic Engineering (ISEF). - 2005.

71. Петров, Т. И. Проектирование роторов синхронных двигателей с постоянными магнитами / А. Р. Сафин, И. В. Ившин, Е. И. Грачева, Т. И. Петров // Вестник ПИТТУ имени академика М.С. Осими. – 2019. – № 3(12). – С. 25.

72. Vagati, A. Design criteria of high performance synchronous reluctance motors / A. Vagati, G. Franceschini, I Morongiu, G.P. Troglia // Ind. Appl. Annual Meet. – 1992. - vol. 1. - P. 66.

73. Zhao, W. Material-efficiency magnet shape for torque pulsation minimization in synchronous permanent motors / W. Zhao, T. A Lipo, B. Kwon // IEEE Trans. On Industrial Electronics. – 2014. - vol. 61, no. 10. - P.5579.

74. Muteba, M. Torque Ripple Minimization in Synchronous Reluctance Motor Using a Sinusoidal Rotor Lamination Shape / M. Muteba, B. Twala, D. Nicolae // Proc. of the Int. Conf. on Elect. Machines ICEM. – 2016. – P.4.

75. Kamper, M.J. Direct finite element design optimization of the cage-less reluctance synchronous machine / M. J Kamper, F. S. Van der Merwe, S. Williamson // IEEE Trans. on Energy Con. – 1996. - vol. 11, no. 3. - P.547.

76. Bianchi, N. Design Analysis and Control of Interior Permanent Magnet Synchronous Machines / N. Bianchi, S. Bolognani, A Consoli, T. M. Jahns, R. D. Lorenz, E. C. Lovelace // Proceeding of International Conference on Electrical Machines ICEM. -2000.

77. Steentjes, S. Permanent magnet eddy-current losses in 2-D FEM simulations of electrical machines / S. Steentjes, S. Boehmer, K. Hameyer // IEEE Transactions on Magnetics. – 2015. - vol. 51, no. 3. - P.1.

78. Dranca, M. Design and optimization of an axial-flux permanent magnet synchronous machine for railway traction application / M. Dranca, M. Chirca, A. Breban, M. Fartan // 8th International Conference on Modern Power Systems (MPS). – 2019. - P.1.
79. Yang, Y. Driving-scenario oriented design of an axial-flux permanent-magnet synchronous motor for a pedal electric cycle / Y. Yang, F. Ding // IET Electric Power Applications. – 2015. - vol. 9, no. 6. - P.420.
80. Петров, Т. И. Сравнение различных типов электроприводов для станков-качалок нефти / Т. И. Петров // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Тезисы докладов, Москва. - 2018. – С.437.
81. Wang, Y. Development of a high-performance axial flux PM machine with SMC cores for electric vehicle application / Y. Wang, J. Lu, C. Liu, G. Lei, Y. Guo, J. Zhu // IEEE Transactions on Magnetics. – 2019. - vol. 55, no. 7. - P.1.
82. Zhang, Y. Analysis and design of ironless axial flux permanent magnet synchronous motor / Y. Zhang, N. Liu, S. Guo, J. Tong, Q. Zhou // 10th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics (IHMSC). – 2018. - P.170.
83. Deng, W. Electromagnetic Vibration and Noise of the Permanent-Magnet Synchronous Motors for Electric Vehicles: An Overview / W. Deng, S. Zuo // IEEE Transactions on Transportation Electrification. – 2019. - vol. 5, no. 1. - P.59.
84. Neethu, S. Design analysis and optimization of high speed axial flux permanent magnet synchronous motor for centrifuge application / S. Neethu, B. G. Fernandes // IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC). – 2017. - P. 1.
85. Aydin, M. Design and validation of a 24-pole coreless axial flux permanent magnet motor for a solar powered vehicle / M. Aydin, M. Gulec, Y. Demir, B. Akyuz, E. Yolacan // XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM). – 2016. - P. 1493.

86. Ou, J. Experimental and theoretical research on cogging torque of PM synchronous motors considering manufacturing tolerances / J. Ou, Y. Z. Liu, R. H. Qu, M. Doppelbauer // IEEE Trans. Ind. Electron. – 2018. - vol. 65, no. 5. - P. 3772.
87. Wu, L. J. Zhu. A hybrid field model for open-circuit field prediction in surface-mounted PM machines considering saturation / L. J. Wu, Z. K. Li, X. Y. Huang, Y. L. Zhong, Y. T. Fang, Z. Q. Zhu // IEEE Trans. Magn. – 2018. - vol. 54, no. 6. - P.1.
88. Petrov, T.I. Topological optimization of the rotors of permanent magnet synchronous motors / A.R. Safin, T.I. Petrov // E3S Web of Conferences. – 2020. – Vol. 220. – paper № 01040.
89. Petrov, T.I. Modification of the synchronous motor model for topological optimization / T.I. Petrov, A.R. Safin // E3S Web of Conferences. – 2020. – Vol. 178. – paper № 01016.
90. Петров Т.И. Модификация генетического алгоритма для комплексной топологической оптимизации ротора синхронных двигателей / Т.И. Петров // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2021. – Т. 23. № 3. – С. 70.
91. Chen, Z. F. Modeling and analyzing of surface-mounted permanent-magnet synchronous machines with optimized magnetic pole shape / Z. F. Chen, C. L. Xia, Q. Geng, Y. Yan // IEEE Trans. Magn. – 2014. - vol. 50, no. 11. - P.1.
92. Караулов, В.Н. Методика проектирования обращенного двигателя с постоянными магнитами привода лебедки / В.Н. Караулов, М.В. Сахаров // Вестник ИГЭУ. 2019. №2.
93. Акимов Сергей Сергеевич. Создание уточненной методики теплового расчета бесконтактного двигателя с возбуждением от постоянных магнитов: диссертация ... кандидата Технические науки: 05.09.01 / Акимов Сергей Сергеевич; [Место защиты: ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»], 2017.
94. Махмутов, Р. Г. Топологическая оптимизация рычага в ANSYS Mechanical / Р. Г. Махмутов, Г. Г. Кутлугаллямов // Молодой ученый. — 2019. — № 52 (290). — С. 49-54.

95. Кишов Е.А. Топологическая оптимизация силовых конструкций методом выпуклой линеаризации / Е.А. Кишов, В.А. Комаров // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2018. №1.

96. Петров, Т. И. Топологическая оптимизация вращающихся машин / Т. И. Петров, А. Р. Холикова, А. Р. Сафин // Диспетчеризация и управление в электроэнергетике: XIV Всероссийская открытая молодежная научно-практическая конференция, Казань. - 2019. – С. 149.

97. Li, Y. X. Superposition method for cogging torque prediction in permanent magnet machines with rotor eccentricity / Y. X. Li, Q. F. Lu, Z. Q. Zhu, D. Wu, G. J. Li // IEEE Trans. Magn. – 2016. - vol. 52, no. 6. - P.1.

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

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

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

101. Петров, Т.И. Разработка и реализация стенда для подтверждения эффективности топологической оптимизации ротора синхронных двигателей с постоянными магнитами / Т.И. Петров, А.Р. Сафин // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2021. - №2 (50) – С. 109.

## Приложение А

Описание программы для комплексной топологической оптимизации конструкции синхронного двигателя с постоянными магнитами

### 1. Программа для оптимизации конструктивных параметров СДПМ

– Программа 1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019610240 от 09 января 2019 г. «Программа топологической оптимизации ротора синхронной машины».

2. Аппаратное и программное обеспечение, которое используется для проведения топологической оптимизации ротора СДПМ.

Тип ЭВМ: x86, x64 – совместимые платформы.

Для выполнения программ для оптимизации ротора СДПМ необходимо следующее системное программное обеспечение:

- 1) операционная система Windows 10 или выше;
- 2) среда программирования Spyder (Python 3.8.);
- 3) компьютерная программа Elcut.

### 3. Функциональное назначение

а) Программа «Программа топологической оптимизации ротора синхронной машины» предназначена для топологической оптимизации расположения материалов в теле ротора, используемый метод поиска – ГА с одинарной мутацией, для последовательного расчета электромагнитных, тепловых и прочностных параметров при заданном объеме наиболее дорогого материала (ПМ). Электромагнитные расчеты необходимы для оптимизации вращающего момента в зависимости от расположения магнитов, тепловые – проверка на превышение максимально допустимой температуры, прочностные – проверка на максимально возможную деформацию стали ротора. И в конце необходима проверка полученной топологии для полной модели СДПМ.

### 4. Этапы функционирования программы для КТО ротора СДПМ:

1) выполнение геометрической модели в Elcut, расчет и выбор параметров для элементов модели, упрощение модели двигателя до минимально возможного сектора, подготовка трех моделей для электромагнитного расчета (с рассчитанным шагом), расчет объема минимально возможного материала для оптимизации;

2) ввод данных в программу;

3) получение результатов.

5. Работа над исходными данными.

1) Необходимо создать максимально точную геометрическую модель и загрузить в формате dxf в программу Elcut (рисунок А.1).

2) Рассчитать и определить параметры, необходимые для расчета электромагнитных, тепловых и прочностных параметров.

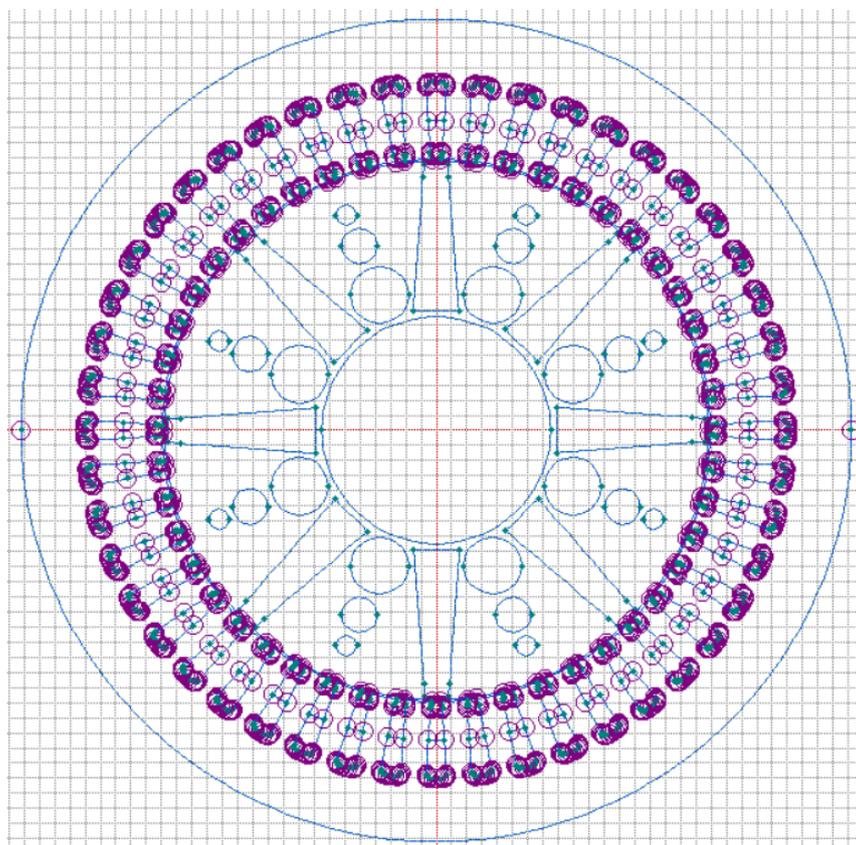


Рисунок А.1 – Пример геометрической модели СДПМ в Elcut

3) Упрощение конструкции до минимально возможной.

- уменьшение рассчитываемого объема двигателя до сектора (угол и шаг рассчитываются на базе геометрической модели).

- упрощение геометрических форм элементов двигателя.

Таким образом наиболее оптимальный вариант представления исходных данных для реализации КТО является следующее представление (Рисунок А.2).

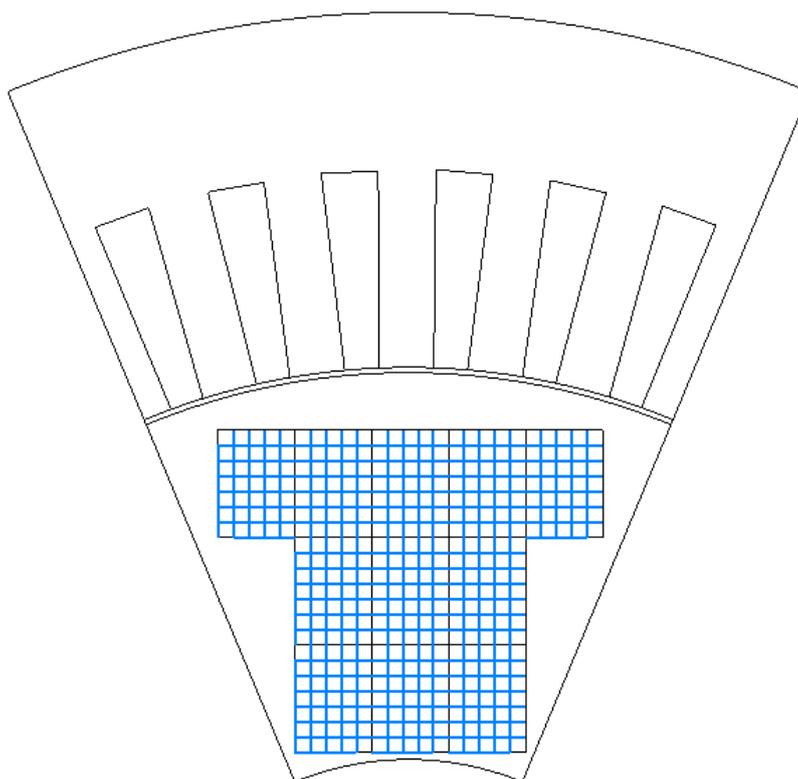


Рисунок А.2 – Оптимальный пример представления геометрической модели для КТО ротора СДПМ

4) Подготовка еще двух аналогичных вариантов с изменением фаз в пазах с шагом, рассчитанным на предыдущем этапе.

5) Чтобы ограничить объем ПМ и приобрести структуру для наибольшего крутящего момента, необходимо определить объем ПМ из функции пригодности (целевой функции):

$$fitness = \frac{T_{ave}}{k V_{pm} / V_{rotor} + 1}$$

где  $T_{ave}$  - крутящий момент;

$V_{pm}$  - объем ПМ;

$V_{rotor}$  - объем ротора.

6. Для работы программы необходимо ввести следующие данные:

1) минимальное количество блоков стали (рассчитывается исходя из объема ПМ, рисунок А.3).

```
        y=y+1
while y<5: #кол-во мин. блоков стали
    individual=[round(rnd()*(upper_limit-lower_limit)
                    +lower_limit) for x in range(number_of_genes)]
```

Рисунок А.3 – Блок программы ввода количества блоков стали

2) параметры популяции задаются в виде массива из 4 значений (рисунок А.4).

```
#популяция
def population(number_of_individuals,
               number_of_genes, upper_limit, lower_limit):
    return [individual(number_of_genes, upper_limit, lower_limit)
            for x in range(number_of_individuals)]
```

Рисунок А.4 – Блок программы ввода параметров популяции

где `number_of_individuals` – количество хромосом;

`number_of_genes` – количество генов, в каждой из хромосом;

`upper_limit` и `lower_limit` – верхний и нижний предел гена в количественном значении.

К примеру, `pop = population(4,330,4,0)` – 4 хромосомы, каждая из которых состоит из 330 генов, значения в генах могут принимать 6 значений (каждое значение – определенный материал)

3) необходимо задать условия окончания ГА, в нашем случае возможно два варианта.

- при достижении целевой функции определенного значения. Можно использовать при возможности рассчитать точное верхнее значение момента для новой топологии двигателя.

- при повторе максимального значения момента определенного количества раз. Данное число возможно определить при проведении ГА на небольшом количестве ячеек, с целью определения результата, при котором значение функции не попадает в локальный максимум (рисунок А.5).

Исходные параметры вводятся посредством среды программирования среда программирования *Spyder (Python 3.8.)*.

```
finish = False
while finish == False:
    if max(fitness_max) > 800:
        break
    if max(fitness_avg) > 800:
        break
    if fitness_similarity_check(fitness_max, 15) == True:
        break
    gen.append(next_generation(gen[-1],1,0))
    fitness_avg = np.append(fitness_avg, sum(
        gen[-1]['Fitness']/len(gen[-1]['Fitness']))
    fitness_max = np.append(fitness_max, max(gen[-1]['Fitness']))
    res = open(Result_file, 'a')
    res.write('\n'+str(gen[-1])+'\n')
    res.close()
```

Рисунок А.5 – Блок программы ввода условий окончания ГА

#### 7. Представление результатов вычислений.

Результаты вычислений выводятся в текстовый файл формата «.txt» (рисунок А.6).

```

[{'Individuals': [[0, 0, 4, 2, 2, 2, 3, 0, 2, 4, 1], [1, 1, 4, 3, 3, 4, 3, 3, 2, 1, 2], [0, 4, 1, 2, 2, 3, 2, 1, 1, 1, 1], [2, 2, 1, 2, 4, 1, 0, 1, 0, 1, 1]], 'Fitness': [72.73009464222267, 132.4462154989715, 190.26472785744252, 263.1729469379404]}]
[{'Individuals': [[2, 0, 0, 0, 1, 4, 0, 2, 3, 0, 1], [0, 0, 2, 1, 3, 0, 0, 4, 3, 0, 3], [1, 1, 0, 2, 0, 0, 0, 2, 0, 3, 3], [0, 0, 1, 3, 0, 3, 2, 0, 1, 0, 0]], 'Fitness': [47.867873708086655, 60.67673909058286, 121.53737422428269, 183.43572898066142]}]
{'Individuals': [[4, 0, 0, 0, 4, 3, 2, 0, 1, 0, 0], [0, 3, 0, 0, 1, 0, 0, 4, 3, 0, 3], [1, 1, 0, 0, 4, 0, 0, 4, 3, 0, 3], [0, 0, 1, 3, 0, 3, 2, 0, 1, 0, 0]], 'Fitness': [22.34576768279249, 47.19463246316612, 122.66621376727987, 183.43572898066142]}]
{'Individuals': [[4, 0, 0, 0, 2, 3, 2, 0, 1, 0, 0], [0, 0, 0, 2, 3, 3, 2, 0, 1, 0, 0], [0, 2, 3, 0, 0, 3, 2, 0, 1, 0, 0], [0, 0, 1, 3, 0, 3, 2, 0, 1, 0, 0]], 'Fitness': [19.638397762207248, 69.5221787153807, 73.09582751429797, 183.43572898066142]}]
{'Individuals': [[2, 0, 0, 0, 0, 3, 2, 0, 1, 0, 0], [2, 0, 0, 3, 0, 3, 2, 0, 1, 0, 0], [0, 0, 1, 3, 0, 3, 2, 0, 1, 0, 0], [0, 0, 0, 1, 3, 3, 2, 0, 1, 0, 0]], 'Fitness': [13.686976778431873, 114.90720894124384, 183.43572898066142, 196.82902902434554]}]
{'Individuals': [[1, 0, 0, 0, 4, 3, 2, 0, 1, 0, 0], [2, 4, 0, 0, 0, 3, 2, 0, 1, 0, 0], [0, 1, 0, 2, 0, 3, 2, 0, 1, 0, 0], [0, 0, 0, 1, 3, 3, 2, 0, 1, 0, 0]], 'Fitness': [20.6801031589948, 54.5557818506282, 79.36833961557551, 196.82902902434554]}]
{'Individuals': [[4, 0, 0, 2, 0, 3, 2, 0, 1, 0, 0], [0, 3, 2, 0, 0, 3, 2, 0, 1, 0, 0], [3, 0, 0, 3, 0, 3, 2, 0, 1, 0, 0], [0, 0, 0, 1, 3, 3, 2, 0, 1, 0, 0]], 'Fitness': [44.459719597256424, 48.225166320777646, 135.95710107726381, 196.82902902434554]}]
{'Individuals': [[0, 2, 0, 0, 2, 3, 2, 0, 1, 0, 0], [1, 0, 3, 0, 0, 3, 2, 0, 1, 0, 0], [0, 0, 1, 1, 0, 3, 2, 0, 1, 0, 0], [0, 0, 0, 1, 3, 3, 2, 0, 1, 0, 0]], 'Fitness': [14.094916341243982, 92.8529303073773, 187.07930582153298, 196.82902902434554]}]
{'Individuals': [[2, 0, 0, 0, 1, 3, 2, 0, 1, 0, 0], [0, 3, 4, 0, 0, 3, 2, 0, 1, 0, 0], [3, 0, 4, 0, 0, 3, 2, 0, 1, 0, 0], [0, 0, 0, 1, 3, 3, 2, 0, 1, 0, 0]], 'Fitness': [37.37200378179723, 68.68284599034415, 81.50869074317576, 196.82902902434554]}]
{'Individuals': [[0, 3, 0, 0, 2, 3, 2, 0, 1, 0, 0], [0, 0, 2, 1, 0, 3, 2, 0, 1, 0, 0], [0, 1, 3, 0, 0, 3, 2, 0, 1, 0, 0], [0, 0, 0, 1, 3, 3, 2, 0, 1, 0, 0]], 'Fitness': [50.14645218424397, 96.36216408252082, 122.0519015282706, 196.82902902434554]}]
{'Individuals': [[3, 0, 0, 4, 0, 3, 2, 0, 1, 0, 0], [0, 0, 0, 1, 3, 3, 2, 0, 1, 0, 0], [0, 0, 0, 1, 3, 3, 2, 0, 1, 0, 0], [0, 0, 0, 1, 3, 3, 2, 0, 1, 0, 0]], 'Fitness': [78.15156215116028, 196.82902902434554, 196.82902902434554, 196.82902902434554]}]
{'Individuals': [[0, 0, 2, 0, 0, 3, 2, 0, 1, 0, 0], [4, 0, 0, 2, 0, 3, 2, 0, 1, 0, 0], [0, 0, 4, 2, 0, 3, 2, 0, 1, 0, 0], [0, 0, 0, 1, 3, 3, 2, 0, 1, 0, 0]], 'Fitness': [24.358434541926815, 44.459719597256424, 52.687759489277965, 196.82902902434554]}]
{'Individuals': [[1, 0, 2, 0, 0, 3, 2, 0, 1, 0, 0], [0, 4, 0, 0, 4, 3, 2, 0, 1, 0, 0], [0, 2, 0, 1, 0, 3, 2, 0, 1, 0, 0], [0, 0, 0, 1, 3, 3, 2, 0, 1, 0, 0]], 'Fitness': [25.311394008759507, 33.1762967593833, 141.53680322328418, 196.82902902434554]}]

```

Рисунок А.6 – Пример полученных значений хромосом и вращающего момента СДПМ

Выходные данные в графическом виде можно увидеть в программе Elcut, для каждого из 3 этапов расчета соответствующие изображения, 3 для электромагнитного расчета (рисунок А.7), и 2 для теплового (рисунок А.8) и прочностного (рисунок А.9) соответственно.

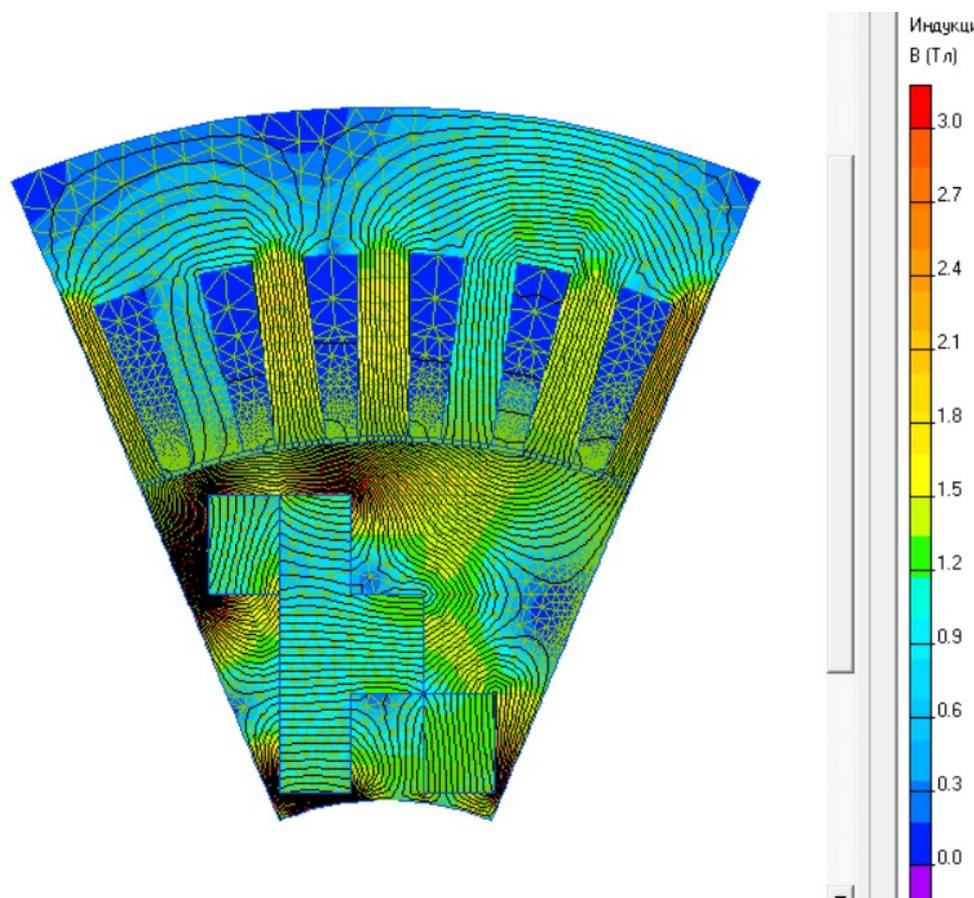


Рисунок А.7 – Пример результата электромагнитных расчетов в Elcut

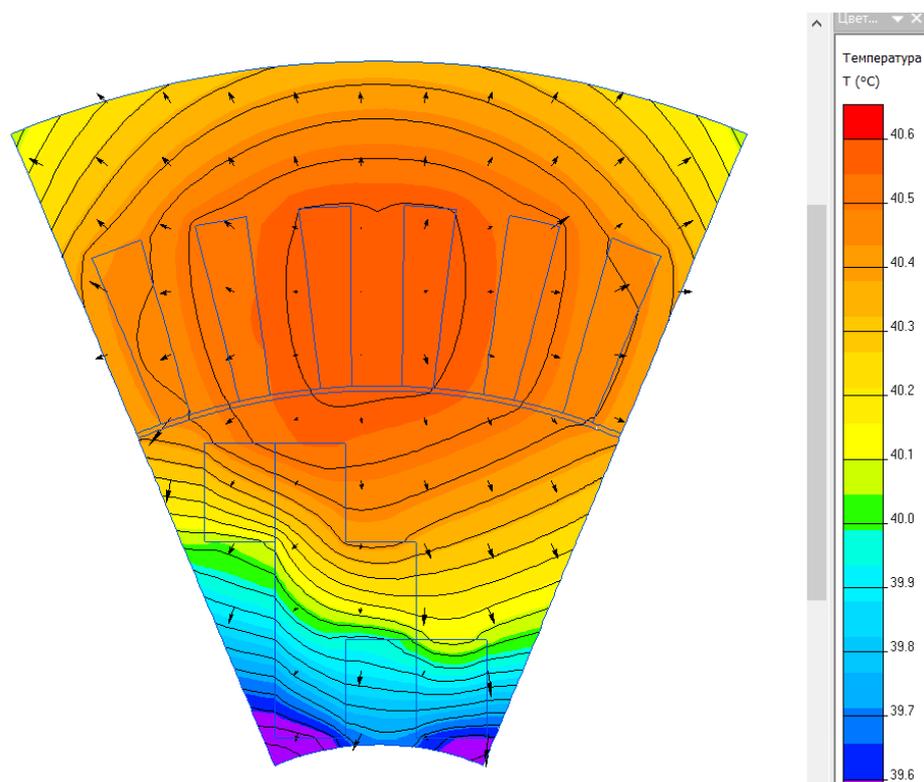


Рисунок А.8 – Пример результата тепловых расчетов в Elcut

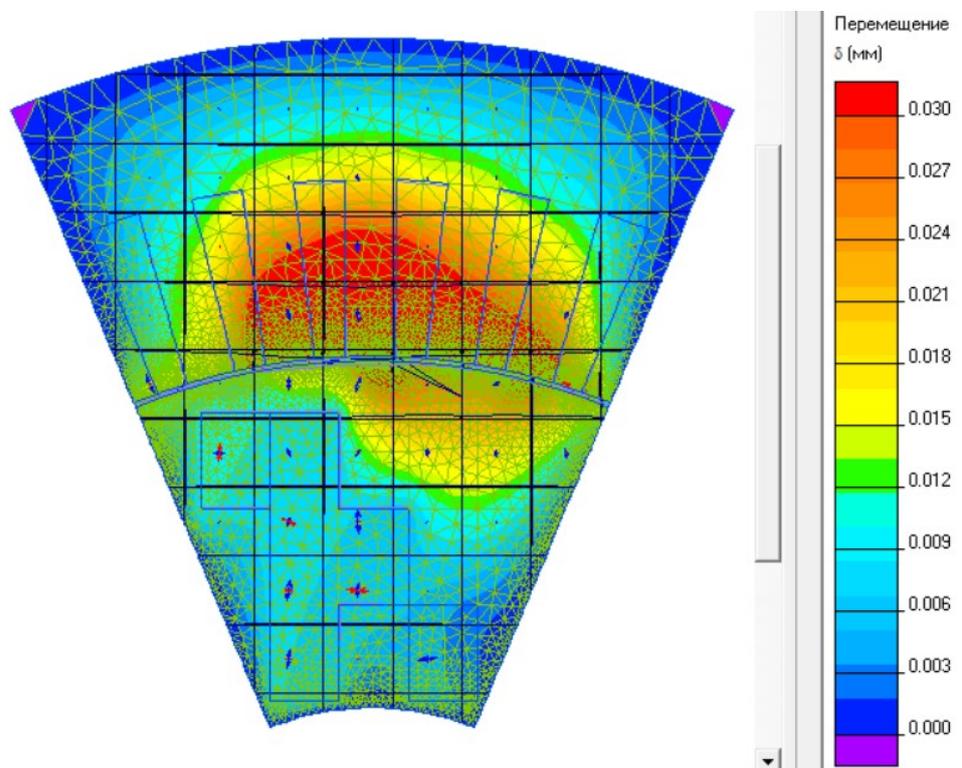


Рисунок А.9 – Пример результата прочностных расчетов в Elcut

## Приложение Б

### Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



**СВИДЕТЕЛЬСТВО**  
о государственной регистрации программы для ЭВМ  
**№ 2019610240**

**«Программа для топологической оптимизации ротора синхронной машины»**

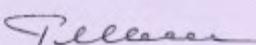
Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет» (ФГБОУ ВО «КГЭУ») (RU)*

Авторы: *Сафин Альфред Робертович (RU), Копылов Андрей Михайлович (RU), Цветков Алексей Николаевич (RU), Гибадуллин Рамил Рифатович (RU), Хуснутдинов Рустем Рауфович (RU), Максимов Виктор Владимирович (RU), Петров Тимур Игоревич (RU)*

Заявка № **2018664764**  
Дата поступления **18 декабря 2018 г.**  
Дата государственной регистрации  
в Реестре программ для ЭВМ **09 января 2019 г.**



Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

 **Г.П. Ильин**

## Приложение В

### Акт о практическом использовании результатов диссертации

#### ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ “ЭнергоГазСервис”

ИНН/КПП 1659047820/166001001,  
Юр. адрес: РТ, г.Казань, ул. Пр.Победы, д.206, БЦ «Визит», оф. 301, 307  
тел./факс: (843) 202-32-62, 202-32-63, +7 9172 803 722

#### АКТ

##### внедрения результатов научных исследований

«Метод комплексной топологической оптимизации и создания синхронных электрических двигателей с постоянными магнитами с целью повышения энергетической эффективности»

Результаты научных разработок Петрова Т.И. использованы и внедрены в процесс проектирования ООО «ЭнергоГазСервис».

Объектами реализации являются:

1. Математическая модель синхронного электрического двигателя с постоянными магнитами (СДПМ), учитывающая электромагнитные, тепловые и прочностные параметры.
2. Методика комплексной топологической оптимизации на основе генетического алгоритма для изменения конструкции ротора СДПМ.
3. Программный комплекс для топологической оптимизации на основе генетического алгоритма для изменения конструкции ротора СДПМ.

Результаты внедрения научных исследований показывают эффективность использования разработанного программного комплекса и методики топологической оптимизации конструкции ротора СДПМ.

Директор  
ООО «ЭнергоГазСервис»



Галиуллин Д.А.