

На правах рукописи

Петров

Петров Тимур Игоревич

МЕТОД КОМПЛЕКСНОЙ ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ РОТОРА
СИНХРОННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПОСТОЯННЫМИ
МАГНИТАМИ

05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Казань – 2021

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

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Сафин Альфред Робертович

Официальные оппоненты: **Немировский Александр Емельянович**, профессор кафедры «Электрооборудование» ФГБОУ ВО «ВоГУ», д.т.н., профессор.
Табачникова Татьяна Владимировна, заведующий кафедрой «Электро- и теплоэнергетика» ГБОУ ВО «АГНИ», к.т.н., доцент.

Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения»**

Защита состоится «21» декабря 2021 г. в 11 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.082.06, созданного на базе ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», по адресу: 420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51, ауд. Д-225, тел./факс (843) 519-42-55.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, с указанием контактных данных и заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу: 420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51, КГЭУ, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.082.06.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Казанского государственного энергетического университета и на официальном сайте КГЭУ <https://kgeu.ru/Diss/Dissertant/273?idDiss=126>

Автореферат разослан «___» _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Ш.Г. Зиганшин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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, железо, воздух и т.д.) определяет характеристики электрической машины.

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

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

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

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

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

Метод топологической оптимизации конструктивных параметров ротора синхронного электрического двигателя использован 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, 2019-2021 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); "Sustainable energy and power engineering 2021" (Kazan, Russia, 18-20 February, 2021); "Sustainable energy systems: innovative perspectives" (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); «International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency» (г. Липецк, 2019); «International conference on physics and photonics processes in nano sciences 2019» (Eluru, 2019); «International Scientific Electric Power Conference» (г. Санкт-Петербург, 2019); «WPEF 2018» (г. Казань, 2018); заседаниях кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» ФГБОУ ВО «КГЭУ» (2016-2021 гг.).

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., доцента 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, 78 рисунков и 11 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, показана степень разработанности, сформулированы цель, решаемые задачи исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, методы исследования, представлены основные положения, выносимые на защиту, обоснованность и достоверность выводов и результатов, апробация, внедрение и структура работы.

В первой главе рассмотрены основные концепции создания электрических машин, их преимущества и недостатки. Проанализированы типы СДПМ, сделан вывод, что происходит переход от стандартных положений магнитов к новым топологиям с целью улучшения технических характеристик. При анализе истории развития ПМ, подтверждено, что наиболее очевидный вариант для СДПМ – магниты NdFeB, недостатки которых - высокая стоимость и риск размагничивания из-за высоких температур. Также выявлено, что в настоящее время основным вариантом улучшения технических параметров является повышение прочностных характеристик, однако отсутствуют проработанные реализации комплексных решений.

Для применения топологической оптимизации необходимо использование алгоритмов поиска. Анализ существующих методов, их преимуществ и недостатков, позволил выбрать для дальнейших исследований эволюционные алгоритмы. Можно использовать определенные случайные, умные алгоритмы поиска, такие как ГА, алгоритм пчел (АП), алгоритм мух (АМ) и алгоритм обезьян (АО) (рисунок 1).

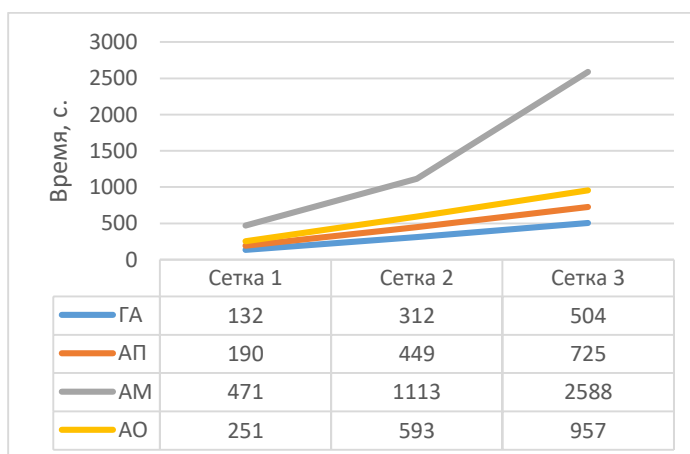


Рисунок 1. Время выполнения 4х типов эволюционных алгоритмов

Целесообразно по времени исполнения выбрать генетический алгоритм.

Для аппроксимации используется три основных метода, из которых рассмотрены метод эквивалентных схем магнитных цепей и МКЭ, представлены варианты оптимизации конструкции на базе обоих методов, установлено, что оптимальным является применение МКЭ.

В этом разделе определена задача оптимизации и переформулирована прямая задача, чтобы она соответствовала оптимизации топологии на основе плотности тока. Цель исследования - максимизировать средний крутящий момент.

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

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, введено ограничение на максимально допустимый объем ПМ.

Во второй главе разработан метод КТО СДПМ.

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

Проведен электромагнитный расчет СДПМ в программе Elcut (рисунок 2), проверена достоверность полученной модели путем сравнения с экспериментальными данными.

Задачи магнитостатики могут быть решены в линейной и нелинейной постановках.

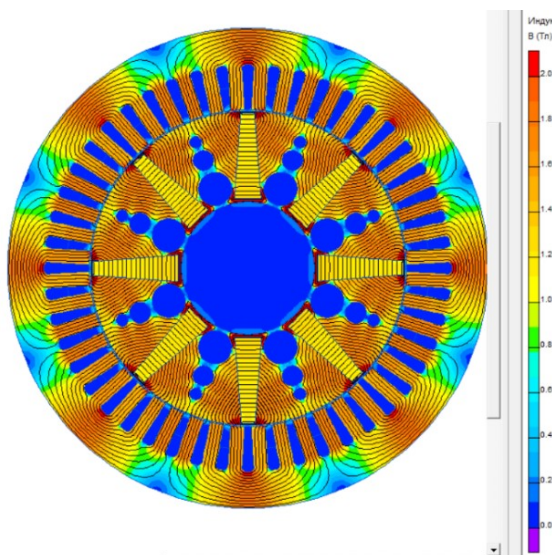


Рисунок 2. Пример графического представления результата электромагнитных расчетов в Elcut

В случае плоскопараллельных задач уравнение можно представить в следующем виде:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu_y} \frac{\partial A}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu_x} \frac{\partial A}{\partial x} \right) = -j + \left(\frac{\partial H_{cy}}{\partial x} - \frac{\partial H_{cx}}{\partial y} \right) \quad (2)$$

Для данных результатов электромагнитного расчета среднеквадратичное значение момента составляет 156,82 Н·м, отклонение от испытаний составляет 0,36 %, что является допустимыми значениями (рисунок 3).

Проведен электромагнитный расчет СДПМ с новым расположением магнитов - V-образными магнитами (расположение принято примерным), момент составил 163,6 Нм, можно сделать вывод о целесообразности проведения топологической оптимизации. Оценено время решения расчета электромагнитных параметров для одного случая, время решения составило 150 с. для следующей конфигурации ПК – процессор Intel(R) Core(TM) i3 7020U, RAM 6 Гб. Для модели конечное число узлов сетки составило 125351.



Рисунок 3. График изменения момента для моделируемого СДПМ

При КТО необходимо для решения уравнения целевой функции рассчитать 4 значения хромосом, учитывая, что помимо решения внешней итерации необходимо задавать значения генов в виде материалов ротора и получать значения из интегрального калькулятора Elcut. С учетом возможности многопоточных расчетов (8 потоков) получаем расчет в 11,5 дней.

Существует возможность снизить время расчетов и количество исходных ячеек для модели 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. (рисунок 4). Данное решение позволит снизить время КТО в 3,5 раза (для нашего случая до 3 дней)

При решении тепловых задач используется уравнение теплопроводности:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) = -q - c\rho \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3)$$

Для расчета прочностных параметров поле перемещений возможно определить заданным числом компонентов вектора перемещений δ (в нашем случае в каждой точке два компонента).

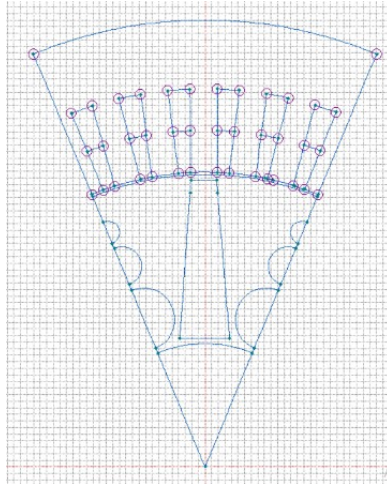


Рисунок 4. Пример конечного сектора СДПМ для КТО

Для плоских задач:

$$\{\delta\} = \begin{Bmatrix} \delta_x \\ \delta_y \end{Bmatrix} \quad (4)$$

На основе результатов, полученных в ходе работы, можно привести следующие основные этапы метода КТО:

- оценка перспективности КТО для данного СДПМ;
- оценка времени решения одной задачи электромагнитного расчета для СДПМ, при превышении определенного значения, необходимо проводить оптимизацию геометрической модели;
- проведение топологической оптимизации для целевой функции расчета вращающего момента;
- проверка модели, полученной 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;
- проверка модели, полученной 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.

Третья глава посвящена практической реализации метода КТО на базе ГА на примере двигателя VM1418 ZXF.

На первом этапе определены необходимые изменения в стандартный генетический алгоритм с целью проведения КТО СДПМ. При этом первым дополнением является четкий фактор завершения ГА - наибольший крутящий момент обнаруживается на одной хромосоме, а не на популяции или паре хромосом (рисунок 5). Второе дополнение - это мера количества определенного материала в каждой хромосоме, а именно ПМ, что необходимо для уменьшения объема дорогостоящего материала.

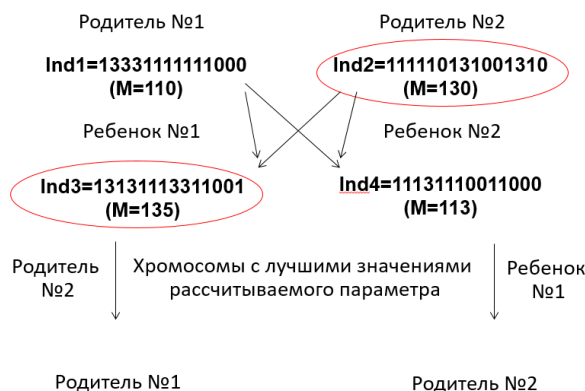


Рисунок 5. Пример одного итерационного шага ГА

Использован метод по выбору исходных параметров для КТО, построена геометрическая модель, произведена верификация. При этом изменение геометрической модели СДПМ позволяет уменьшить скорость расчета.

Для реализации разработана программа «Программа топологической оптимизации ротора синхронной машины» на языке Python, предназначенная 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), который определяется по формуле:

$$fitness = \frac{T_{ave}}{k V_{pm} / V_{rotor} + 1} \quad (5)$$

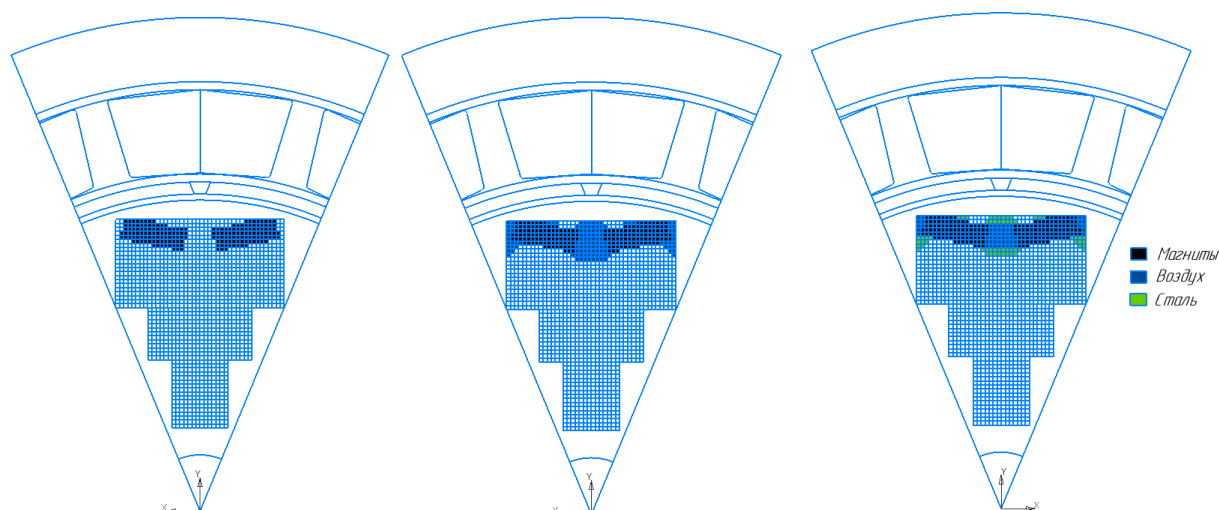


Рисунок 6. Графические результаты электромагнитной, тепловой и прочностной оптимизации

Исходные параметры вводятся посредством среды программирования - среда программирования *Spyder (Python 3.8.)*. Результаты вычислений выводятся в текстовый файл формата «.txt», данные вычислений можно представить в виде топологий ротора (рисунок 6).

Полный алгоритм КТО на базе ГА для ротора СДПМ представлен на рисунке 7.

В ходе комплексной топологической оптимизации получена следующая топология, представленная на рисунке 8. В исходном СДПМ объем ПМ составляет 12758,4 мм³, для СДПМ - 11520 мм³. Уменьшение объема ПМ - 9,7 %.

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

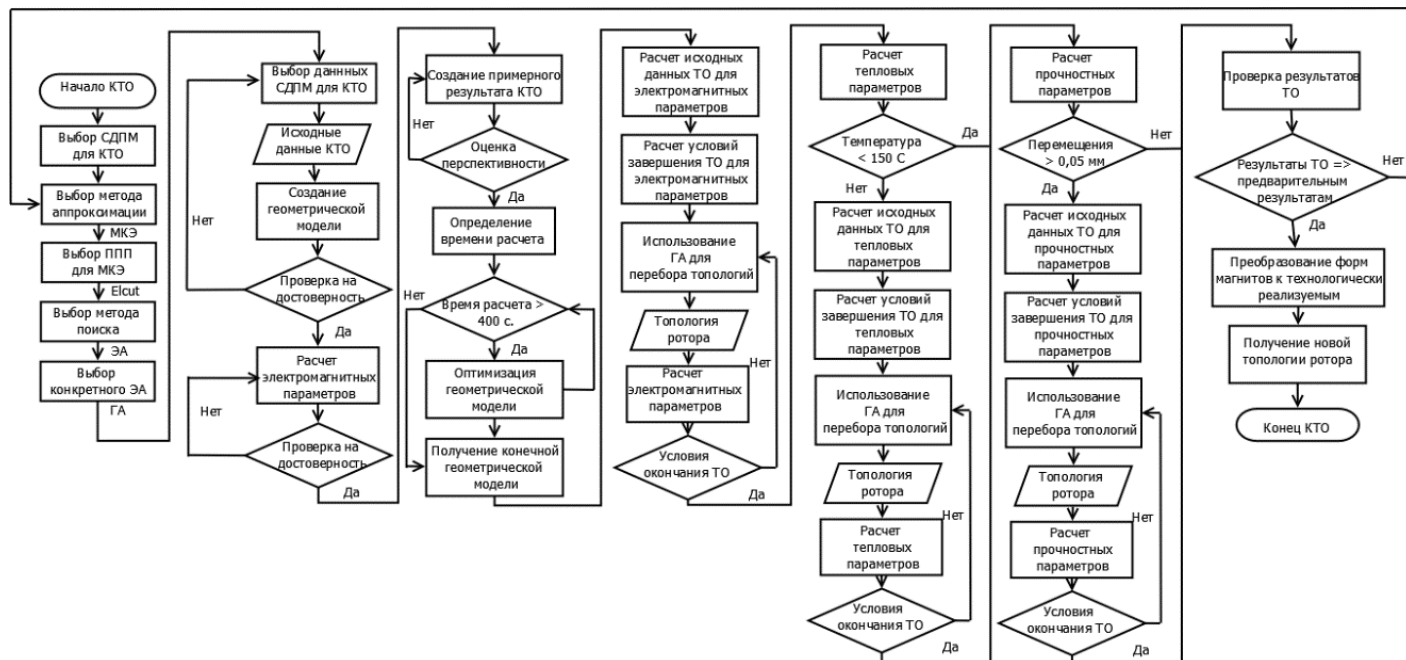


Рисунок 7. Алгоритм КТО ротора СДПМ

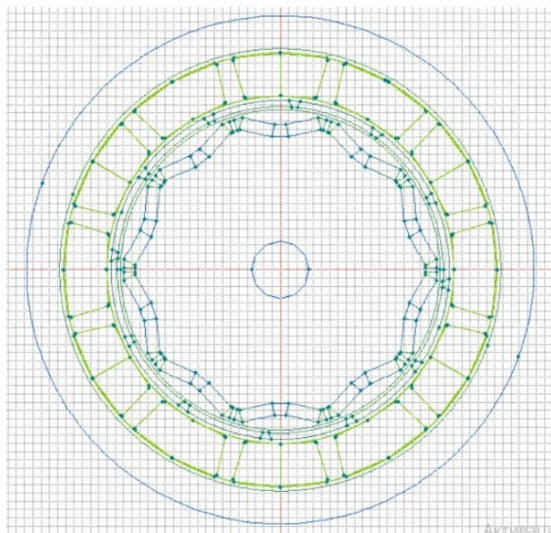


Рисунок 8. Топология ротора, полученная после КТО

Четвертая глава посвящена физическому моделированию модернизированного СДПМ и верификации имитационной модели.

Для подтверждения практической реализации КТО ротора СДПМ решены следующие задачи:

1. Проверка работоспособности исследуемых двигателей ВМ1418 ZXF, определение параметров тока.

2. Модернизация ротора одного из двигателей ВМ1418 ZXF по результатам КТО (рисунок 9).

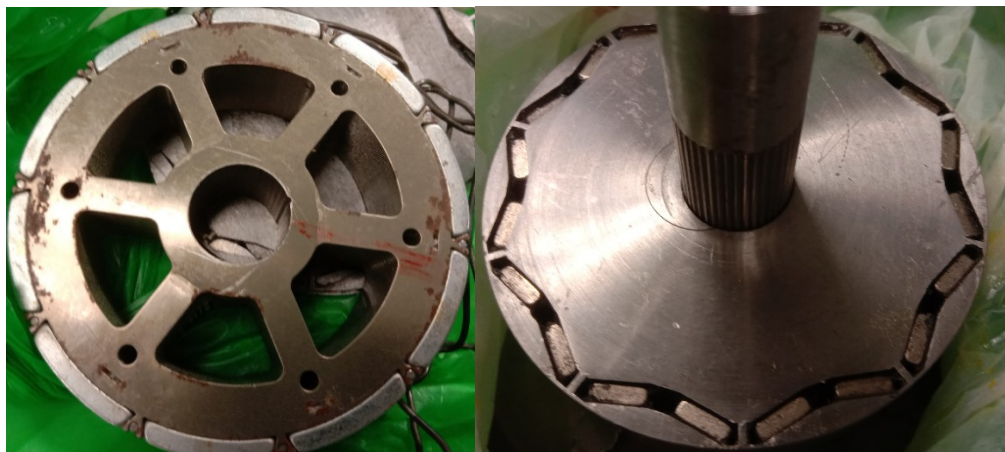


Рисунок 9. Ротор исходного и модернизированного СДПМ

3. Проверка работоспособности модернизированного двигателя ВМ1418 ZXF, определение параметров тока.

4. Разработка и создание экспериментального стенда для измерений вращающего момента с возможностью задания нагрузки.

5. Проведение экспериментов для исследуемых двигателей ВМ1418 ZXF.

6. Экспериментальное подтверждение (опровержение) эффективности КТО.

Стенд (рисунок 10) выполнен при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-37-90134, создан в ФГБОУ ВО «КГЭУ», лаборатория кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».



Рисунок 10. Стенд для измерения вращающего момента и частоты вращения

Структурная схема стенда, представленная на рисунке 11, включает 4 основных блока.

Все результаты экспериментов представлены в таблице 1. Результаты экспериментов подтверждают данные сохранения вращающего момента при наличии нагрузки модернизированного СДПМ. Отличия значений среднеквадратичного момента менее 5% при уменьшении объема ПМ на 32,9%.

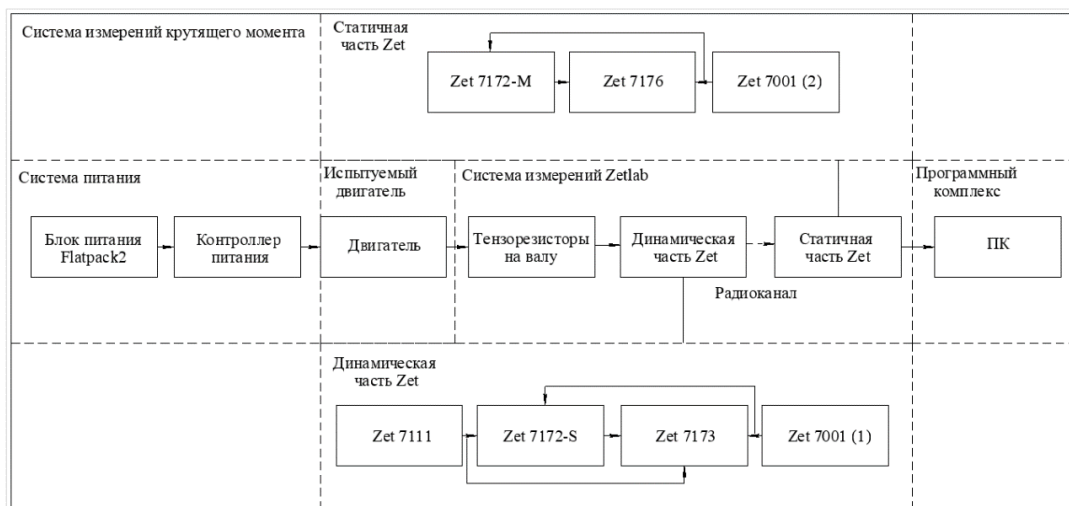


Рисунок 11. Структурная схема стенда

Таблица 1. 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	91,5	94,8	1,81	2,82	86,5	96
Опыт №3 (без нагр.)	3,18	4,38	190,8	192,4	3,31	3,55	184,84	198
Опыт №4 (с нагр.)	3,88	5,81	191	192	4,01	4,99	192	198

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

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.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

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

1. 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.

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

3. 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.

Статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК по другим группам научных специальностей:

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

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

6. 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.

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

7. 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.

8. 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.

9. 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.

10. 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.

11. 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.

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ:

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

Подписано в печать 12.10.2021. Форм. бум. 60x84 1/16.
Бумага офсетная. Печать ризографическая.
Усл. печ. л. 1. Тираж 100. Заказ № 1210/2.

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