

На правах рукописи



Сафин Альфред Робертович

**МЕТОДЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И СОЗДАНИЕ
СИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН С ПОСТОЯННЫМИ
МАГНИТАМИ В СОСТАВЕ ГЕНЕРИРУЮЩИХ И ПРИВОДНЫХ
КОМПЛЕКСОВ**

05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Казань – 2019

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

Научный консультант: доктор технических наук, профессор
Ившин Игорь Владимирович

Официальные оппоненты: **Макаров Валерий Геннадьевич**
доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», заведующий кафедрой электропривода и электротехники

Колпахчян Павел Григорьевич
доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения», заведующий кафедрой электрических машин и аппаратов

Шевченко Александр Федорович
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет», заведующий кафедрой электромеханики

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва

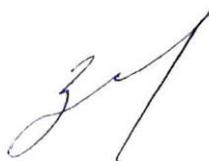
Защита состоится 21 апреля 2020 года в 14 ч 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.082.06, созданного на базе ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», по адресу: 420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51, ауд. Д-225, тел./факс (843) 519-42-55.

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=103>

Автореферат разослан «___» _____ 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Ш.Г. Зиганшин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности.

Синхронные электрические машины с постоянными магнитами (СЭМПМ) находят все большее применение в различных технических комплексах.

Синхронные электрические двигатели с постоянными магнитами (СЭДПМ) используются в областях, где традиционно применялись двигатели постоянного тока (ДПТ) или асинхронные двигатели (АД), таких, как привод циркулярных насосов, привод компрессоров в холодильной технике, в системах вентиляции, в буровых установках, в станках-качалках добычи нефти. Причинами этого являются существующая тенденция к уменьшению стоимости магнитных материалов (внедрением сплавов редкоземельных металлов), а также совершенствование аппаратной базы управления. Появление соответствующей преобразовательной и цифровой вычислительной техники позволяет применять СЭДПМ как альтернативу ДПТ в регулируемом электроприводе. Существенный толчок дало внедрение преобразователей на транзисторах с изолированным затвором *IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)* и использование принципов широтно-импульсной модуляции.

В дополнение к высокой энергоэффективности современные СЭДПМ имеют более компактную конструкцию. Структура СЭДПМ делает их значительно меньше и легче, чем аналогичные асинхронные двигатели. Габариты СЭДПМ соответствуют типоразмеру, который меньше на два стандартных размера, что создает возможность для более компактной конструкции машины.

Большой вклад в развитие теории, разработку методов и алгоритмов проектирования синхронных электрических машин с постоянными магнитами внесли коллективы НИУ «МЭИ», НИУ «МАИ», СПбГЭТУ ЛЭТИ, НГТУ, ЧГУ, РГУПС, КАИ, КНИТУ и ряд других организаций, известные отечественные и зарубежные ученые А. К. Аракелян, А. А. Афанасьев, А.Ф. Шевченко, А.В. Иванов-Смоленский, Ф.М. Юферов, И.Л. Осин, П.Г. Колпахчян, М.Я. Хитерер, И.Е. Овчинников, А.И. Москвитин, М.М. Соколов, Л.К. Сорокин, Е.В. Козаченко, И.В. Черных, Ф.Н. Сарапулов, Р.Т. Шрейнер, Л.В. Клименко, Ю.Ф. Антонов, А.А. Зайцев, Е.В. Сергеенкова, F. Milanese, N. Bianchi, S. Bolognani, H. Polinder, J.F. Gieras и многие их коллеги.

Однако большинство методов, рассмотренных в работах вышеперечисленных авторов, ограничено проектированием СЭМПМ без учета их работы в составе генерирующих и приводных комплексов и влияния динамических и тепловых процессов, не рассмотрены методы топологической оптимизации индукторов и роторов СЭМПМ, позволяющие определить новые конструктивные решения для создания энергоэффективных синхронных электрических машин с постоянными

магнитами.

За счет высокого коэффициента мощности и КПД СЭДПМ, снижаются потери в системе электроснабжения, растет КПД всей системы по сравнению с применением асинхронных двигателей. Использование СЭДПМ вместо асинхронных двигателей, например, для привода станков-качалок позволит повысить энергоэффективность нефтедобычи.

СЭМПМ применяются в составе генераторных комплексов малой энергетики.

На сегодняшний день подавляющая часть электрической энергии в Российской Федерации вырабатывается на крупных электростанциях и распространяется по электрическим сетям общего пользования. Тем не менее, по разным оценкам, 60 –70% территории России не охвачены централизованным электроснабжением. На этой территории проживает более 20 млн. человек и жизнедеятельность людей обеспечивается главным образом средствами малой энергетики.

Энергетическая стратегия России на период до 2030 года определила развитие малой энергетики в качестве одного из ключевых направлений развития энергетического сектора. В стране уже сегодня функционируют порядка 50 тысяч объектов малой распределенной генерации. Однако в ближайшие 7 –10 лет должна быть поставлена задача в несколько раз увеличить их суммарную установленную мощность, которая в настоящее время составляет 12 ГВт, и увеличить на них производство электроэнергии (сейчас – 24 млрд.кВт·ч) с целью еще более надежного электроснабжения потребителей (по официальным данным МинЭнерго России).

Основные направления совершенствования роторов и индукторов СЭМПМ связаны с повышением магнитных свойств и характеристик постоянных магнитов, обеспечением стабильности свойств и характеристик в условиях повышенных температур и механических нагрузок, совершенствованием конструкций и технологий их изготовления.

Широкое применение получают мобильные и стационарные энергоустановки малой энергетики (мощностью до 100 кВт) на базе двигателей внутреннего сгорания, производящие электроэнергию для сверхмалых одиночных потребителей, а также используемых в качестве источников энергии в гибридном автотранспорте.

В качестве электромеханического преобразователя энергии в таких энергоустановках рационально использовать синхронную электрическую машину возвратно-поступательного действия с постоянными магнитами (ЭМВПД с ПМ), построенными по модульному принципу. Это позволит масштабировать энергоустановку по мощности для конкретной задачи.

Работа электрической машины совместно в одном корпусе с свободно-поршневым двигателем внутреннего сгорания (СПДВС) накладывает особые ограничения по температуре, которая может достигать 150°C. Электромагнитное управление ходом индуктора электрической машины и контроль положения индуктора позволяют упростить конструкцию свободно-поршневого двигателя и улучшить массогабаритные показатели энергоустановки в целом.

Предлагаемая тема является не достаточно изученной в ключе совместного использования электрической машины возвратно-поступательного действия и свободно-поршневого двигателя внутреннего сгорания.

В работе предлагается современный метод проектирования и оптимизации СЭМПМ с использованием генетического алгоритма.

Разработан алгоритм анализа, многокритериальной и топологической оптимизации роторов и индукторов СЭМПМ. Предполагается, что ротор и индуктор с постоянными магнитами должен иметь несложную конструкцию для простоты изготовления и повышенный вращающий момент или линейную силу по сравнению с базовым образцом.

Проектирование электрической машины, как эвристический процесс, не гарантирует нахождение лучшего решения. Необходимы методы, дополняющие опыт и интуицию проектировщика, для нахождения оптимального (рационального) решения. Топологическая оптимизация на данный момент выполняется с помощью метода конечных элементов (МКЭ) для снижения массы и улучшения жесткостных характеристик конструкций. Предлагаемый метод позволяет перенести топологическую оптимизацию на электромагнитные процессы в СЭМПМ для определения направления намагниченности постоянных магнитов, размеров пазов статора и постоянных магнитов с целью повышения КПД и надежности электрической машины при заданных массо-габаритных показателях.

Таким образом, развитие методических решений проектирования, оптимизация конструктивных параметров и разработка энергоэффективных СЭМПМ в составе генерирующих и приводных комплексов, является важной научной задачей.

Объект исследования: синхронные электрические машины с постоянными магнитами.

Предмет исследования: методы расчета параметров синхронных электрических машин с постоянными магнитами в составе генерирующих и приводных комплексов.

Целью диссертационной работы является создание энергоэффективных синхронных электрических машин с постоянными магнитами, предназначенных для

генерации электрической энергии в составе автономных энергоустановок и привода различных механизмов.

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

- 1) исследование и анализ основных направлений создания, алгоритмов, методов проектирования и оптимизации синхронных электрических машин с постоянными магнитами в составе генерирующих и приводных комплексов;
- 2) разработка математических моделей термодинамических, электромеханических процессов в генерирующих и приводных комплексах, включающих в себя проектируемые параметры СЭМПМ.
- 3) разработка методов и алгоритмов для оптимизации конструкции статора, ротора, индуктора и элементов магнитной цепи СЭМПМ с целью повышения энергетических характеристик электрической машины и, соответственно, генераторных и приводных комплексов в целом;
- 4) разработка комплекса программ для моделирования и оптимизации конструктивных параметров элементов СЭМПМ в составе генерирующих и приводных комплексов, учитывающих взаимное влияние кинематических, динамических, энергетических и тепловых характеристик СЭМПМ, что позволяет осуществить подробную параметризацию геометрии СЭМПМ для проработки различных конфигураций электрической машины;
- 5) создание конструкции СЭМПМ с повышенными энергетическими характеристиками с учетом влияния динамических и тепловых процессов на основе разработанных алгоритмов и программ;
- 6) разработка экспериментального стенда для проведения исследований кинематических, динамических, энергетических и тепловых характеристик СЭМПМ.

Методология и методы исследования. Для решения поставленных задач использовались методы теории электротехники, теории электрических машин, теории теплотехники, теории оптимизации. Исследования проводились с использованием сред математического моделирования *Matlab 2010*, *Comsol Multiphysics*, *Elcut*. Для проверки корректности математических моделей использовались экспериментальные исследования на испытательном стенде.

На защиту выносятся.

1. Математическая модель генерирующего комплекса с СПДВС на базе синхронной ЭМВПД с ПМ, позволяющая детально провести выбор и оптимизацию ширины воздушного зазора, ширины и высоты паза статора, ширины зубца статора,

ширины ярма статора, ширины ярма индуктора, высоты магнита электрической машины возвратно-поступательного действия.

2. Математическая модель приводного комплекса штанговой скважинной насосной установки (ШСНУ) на базе синхронного электрического двигателя с встроенными постоянными магнитами, позволяющая провести выбор и оптимизацию размеров магнитов по заданному значению магнитного потока и заданным размерам ротора и статора двигателя, а также определить магнитный поток при известной конструкции ротора и статора.

3. Программный комплекс, реализующий алгоритмы расчета термодинамических процессов в СПДВС, электромеханических процессов в синхронной ЭМВПД с ПМ, тепловых процессов в синхронной ЭМВПД с ПМ, а также позволяющий производить прочностные расчеты конструкции синхронной ЭМВПД с ПМ и оптимизацию конструктивных параметров генерирующего комплекса с СПДВС на базе синхронной ЭМВПД с ПМ.

4. Методики оптимизации конструктивных размеров статора и индуктора синхронной ЭМВПД с ПМ по критерию максимума электромагнитной силы и максимальной генерируемой мощности.

5. Методика многокритериальной оптимизации конструктивных параметров ротора синхронного электрического двигателя с встроенными постоянными магнитами по критерию максимизации номинального момента M_n и минимизации массы магнитов $m_{ПМ}$ для уменьшения стоимости электрической машины.

6. Новый метод топологической оптимизации СЭМППМ с целью получения максимально возможной электромагнитной силы или электромагнитного момента, на основе рационального распределения материалов в индукторах и роторах СЭМППМ с использованием генетического алгоритма, а также повышения технологичности их изготовления путем объединения однотипных материалов по кластерам и внедрения процедуры «очистки» для получения однородной структуры кластеров.

7. Экспериментальный образец синхронной электрической машины возвратно-поступательного действия мощностью 3-11 кВт, с температурным рабочим диапазоном от 0 °С до 150 °С и усилием на индукторе электрической машины до 11 кН, разработанный с использованием новых методических решений, имеющий модульную конструкцию и предназначенный для генерации электрической энергии и привода механизмов в агрессивной среде в составе автономных объектов.

Теоретическая значимость работы заключается в развитии теории расчета параметров синхронных электрических машин с постоянными магнитами в составе

генерирующих и приводных комплексов, а также разработке методов многокритериальной и топологической оптимизации конструкции роторов и индукторов СЭМПМ, что позволяет улучшить энергетические и массогабаритные характеристики СЭМПМ.

Практическая значимость работы.

Предложенные в диссертации методы и алгоритмы расчета параметров синхронной ЭМВПД с ПМ и конструкторская документация для испытательного стенда использованы в прикладных научных исследованиях в рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно - технологического комплекса России на 2014 – 2020 годы» Соглашение № 14.577.21.0121 от 20.10.2014 г. «Разработка экспериментального образца обратимой электрической машины возвратно-поступательного действия мощностью 10-20 кВт для тяжелых условий эксплуатации», приоритетное направление развития науки, технологий и техники в Российской Федерации: Энергоэффективность, энергосбережение и ядерная энергетика.

Методика многокритериальной 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, утвержденных 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».

Метод топологической оптимизации СЭМПМ реализован в рамках грантов Российского фонда фундаментальных исследований «Разработка нового метода проектирования и программно-аппаратного комплекса для повышения энергоэффективности и надежности линейных электрических машин возвратно-поступательного действия» № 17-48-160438 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. Приоритетное направление, определенное Стратегией научно-технологического развития Российской Федерации - Переход к экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике, повышение эффективности добычи и глубокой переработки углеводородного сырья, формирование новых источников, способов транспортировки и хранения энергии. Разработано

программное обеспечение для проектирования индукторов и роторов СЭМПМ (Свидетельство № 2018613530, Свидетельство № 2019610240).

Разработанные математическое и программное обеспечение для расчета и выбора рациональных параметров СЭМПМ могут быть использованы НИИ и проектными организациями электротехнической промышленности на этапе проектирования СЭМПМ.

Достоверность полученных результатов обеспечивается корректной постановкой исследовательских задач и их физической обоснованностью, использованием современного программного обеспечения и комплексным подходом к проведению исследований; сходимостью теоретических и экспериментально полученных результатов; непротиворечивостью результатам подобных исследований других авторов и основным положениям науки; использованием сертифицированных и поверенных образцов и контрольно-измерительной аппаратуры, а также применением математического анализа при обработке полученных результатов с использованием современных средств вычислительной техники.

Научная новизна диссертационной работы состоит в следующем.

1. Разработана математическая модель работы свободнопоршневого двигателя (СПДВС) стандартного цикла Отто с учетом диаметра цилиндров, массы поршневой группы и индуктора, степени сжатия, хода поршня, теплоты сгорания топлива и сил трения, позволяющая определить положение и скорость индуктора синхронной ЭМВПД с ПМ в составе автономного источника электроснабжения, для последующего расчета энергетических характеристик и оптимизации конструктивных параметров синхронной ЭМВПД с ПМ.

2. Разработана методика расчета электромагнитной силы синхронной ЭМВПД с ПМ через отображение уравнения линейной токовой нагрузки и индукции магнитного поля, создаваемого постоянными магнитами, в виде ряда Фурье, что позволяет ввести в расчетные формулы конструктивные параметры статора и индуктора синхронной ЭМВПД с ПМ с целью повышения качества алгоритма оптимизации.

3. Разработана тепловая модель синхронной ЭМВПД с ПМ, позволяющая определить конструкцию системы охлаждения статора, рассчитать максимально допустимую выдаваемую мощность синхронной ЭМВПД с ПМ, определить параметры, влияющие на теплоотдачу, определить меры по тепловой защите синхронной ЭМВПД с ПМ.

4. Предложена эквивалентная схема магнитной цепи синхронного двигателя с встроенными магнитами в составе станка-качалки нефти. Полученная на основе

данной схемы система уравнений позволяет аналитически определять требуемые размеры магнитов по заданному значению магнитного потока и заданным размерам ротора и статора двигателя, и магнитный поток, рабочую точку магнита при известной конструкции ротора и статора.

5. Разработан комплекс имитационных моделей автономного источника электроснабжения на базе синхронной ЭМВПД с ПМ, что позволяет на основе единой базы данных совместить моделирование тепловых, механических и электромагнитных процессов и оптимизацию конструктивных параметров синхронной ЭМВПД с ПМ.

6. Разработаны новые методики оптимизации конструктивных размеров статора и индуктора синхронной ЭМВПД с ПМ по критерию максимума намагничивающей силы и максимальной генерируемой мощности на основе генетического алгоритма, что позволяет рассматривать при проектировании двигательный и генераторный режимы синхронной ЭМВПД с ПМ.

7. Предложена методика многокритериальной оптимизации конструктивных параметров ротора синхронного электрического двигателя с встроенными постоянными магнитами, позволяющая получить множество допустимых решений, что предоставляет возможность проектировщику, имея информацию о предпочтительных характеристиках, определить наиболее приемлемое решение.

8. Разработан новый метод топологической оптимизации для распределения материалов в индукторах и роторах СЭМПМ с использованием генетического алгоритма, что позволяет проектировать СЭМПМ с новыми топологиями (в том числе и с новыми композиционными материалами), более высокой энергоэффективностью и низкой стоимостью производства.

Соответствие паспорту специальности.

Диссертация соответствует специальности 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты. Полученные в работе научные результаты соответствуют пп. 2 «Разработка научных основ создания и совершенствования электрических, электромеханических преобразователей и электрических аппаратов», пп. 3 «Разработка методов анализа и синтеза преобразователей электрической и механической энергии», пп. 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 в диссертации алгоритмы и методы расчета параметров

синхронной ЭМВПД с ПМ использованы при разработке экспериментального образца синхронной электрической машины возвратно-поступательного действия мощностью 3-11 кВт и испытательного стенда для проведения углубленных исследований ее характеристик. Получены акты изготовления экспериментального образца и испытательного стенда для проведения углубленных исследований характеристик синхронной ЭМВПД индустриальным партнером ЗАО «МПОТК «Технокомплект».

Разработанная методика многокритериальной оптимизации конструктивных параметров ротора синхронного электрического двигателя с встроенными постоянными магнитами использована при создании опытных образцов синхронных электрических двигателей с постоянными магнитами. Получен акт внедрения результатов диссертационной работы на предприятии АО «Чебоксарский электроаппаратный завод».

Теоретические результаты диссертации и разработанное программное обеспечение применяются в учебном процессе ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», которое используется бакалаврами, магистрантами и аспирантами при выполнении научно-исследовательских работ.

Апробация работы.

Основные положения и научные результаты диссертации докладывались и обсуждались на следующих научно-технических конференциях: III Всероссийской научно-практической конференции «Системы управления электротехническими объектами» (г. Тула, 2005 г.), V Международном симпозиуме «Ресурсоэффективность и энергосбережение» (г. Казань, 2004 г.); VI Международном симпозиуме «Ресурсоэффективность и энергосбережение» (г. Казань, 2005 г.); X Международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения» (г. Казань, 2015 г.); XV Международном симпозиуме «Энергоресурсоэффективность и энергосбережение» (г. Казань, 2015 г.); Семинаре «Развитие научно-технического сотрудничества России и ЕС в области повышения энергетической эффективности» (г. Москва, 2015 г.); VII Международной научной конференции молодых ученых «Электротехника. Электротехнология. Энергетика» (г. Новосибирск, 2015 г.); X открытой молодежной научно-практической конференции «Диспетчеризация и управление в энергетике» (г. Казань, 2015 г.); Выставке «ВУЗПРОМЭКСПО-2015» (г. Москва, 2015 г.); Международной специализированной выставке «Энергетика. Ресурсосбережение-2016» (г. Казань, 2016г.); Выставке «ВУЗПРОМЭКСПО-2016» (г. Москва, 2016 г.); Международная научно-практическая конференция посвященная 60-летию высшего нефтегазового образования в Республике Татарстан «Достижения, проблемы и перспективы развития нефтегазовой области»,

28-29 октября 2016 г., Россия, г. Альметьевск, Альметьевский государственный нефтяной институт; Поволжской научно-практической конференция "Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве», 8-9 декабря 2016 г., Россия, г. Казань, Казанский государственный энергетический университет; International Scientific and Technical Conference SES-2019 (Kazan, September 18-20, 2019г.); Заседаниях кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» ФГБОУ ВО «КГЭУ» (2005-2019 г.г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 47 печатных работ в журналах и сборниках, в том числе 14 статей в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 11 статей индексируемых в международных базах данных SCOPUS или/и Web of Science, 1 монография, также получено 2 патента на полезную модель, 7 свидетельств на программы для ЭВМ и 12 работ в сборниках материалов конференций. Список основных публикаций автора приведен в конце автореферата, полный список – в диссертации.

Личный вклад автора. Поставил цели и задачи исследования. Сформулировал и предложил математические модели генерирующего и приводного комплекса на базе СЭМПМ. Разработал имитационные модели генерирующего комплекса на базе синхронной ЭМВПД с ПМ, учитывающая конструктивные параметры электрической машины, а также усилия на шток индуктора и длину его хода. Разработал методику оптимизации конструктивных размеров статора и индуктора синхронной ЭМВПД с ПМ по критерию максимальной генерируемой мощности. Участвовал в разработке методики оптимизации конструктивных размеров статора и ротора синхронного электрического двигателя с постоянными магнитами по критерию максимального номинального момента. Совместно с научным коллективом по грантам РФФИ разработан метод топологической оптимизации СЭМПМ для распределения материалов в роторах и индукторах с использованием генетического алгоритма. Предложена концепция кластеризации материалов и процедура «очистки» материалов. Сформулировал алгоритмы для программного комплекса по оптимизации конструктивных параметров СЭМПМ. Автор провел экспериментальные исследования на испытательном стенде для углубленных исследований характеристик синхронной ЭМВПД с ПМ.

Постановка задач, направление и методология исследований осуществлялась совместно с научным консультантом, д-ром техн. наук профессором Ившиным И.В.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, шести глав, основных результатов и выводов, заключения, списка литературы и приложений. Работа изложена на 352 страницах текста, включает 148 рисунков, 27

таблиц, библиографию из 209 наименований, содержит 10 приложений.

Автор выражает искреннюю благодарность своему научному консультанту д-ру техн. наук, профессору Ившину И.В. за помощь и ценные замечания в ходе выполнения диссертационной работы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сформулирована актуальность темы исследования, выявлена 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, приводятся сведения об авторском вкладе и апробация, внедрение и структура работы.

В первой главе проведенный аналитический обзор показал, что широкие перспективы раскрываются перед СЭМПМ, обладающими повышенной надежностью, высокими динамическими качествами, малыми массами, габаритными размерами и возможностью работать в нестандартных окружающих условиях. Поэтому их значимость в электроэнергетике быстро возрастает.

Повышение энергоэффективности СЭМПМ, предназначенных для генерации электрической энергии в составе автономных энергоустановок и привода различных механизмов позволит повысить общую эффективность технических комплексов.

Существенно улучшить характеристики рассмотренных электрических машин можно за счет применения систем проектирования и алгоритмов оптимизации конструкции. Данное исследование соответствует приоритетному направлению развития РФ - Энергоэффективность, энергосбережение и ядерная энергетика.

Одним из перспективных направлений является использование в автономных источниках электроэнергии (АИЭ) свободно-поршневых двигателей совместно с синхронными ЭМВПД с ПМ, обладающих высокой надежностью, высокими динамическими качествами, малыми массами, габаритными размерами и возможностью работать при повышенных механических, электромагнитных, тепловых нагрузках.

На основе анализа (в том числе и патентного) различных типов электрических машин возвратно-поступательного действия в АИЭ установлено, что наиболее рационально формой реализации синхронной ЭМВПД с ПМ является цилиндрическая конструкция с постоянными магнитами на подвижном индукторе. Выбранная форма реализации обеспечит наилучшие технико-экономические характеристики синхронной ЭМВПД с ПМ.

Перспективным направлением внедрения СЭДПМ является нефтедобывающая

отрасль. Электропривод штанговой скважинной насосной установки (ШСНУ) является одним из важнейших компонентов данных установок. Повышение его работоспособности является ключевой задачей для снижения себестоимости добываемой нефти.

Разработка конструкции электрических машин включает в себя два основных этапа: проектирование и оптимизацию. Основная цель этапа проектирования – определить конструкцию электрической машины (или несколько конструкций) для данных условий эксплуатации путем исследования различных материалов и размеров, типов электрической машины и топологий, в том числе междисциплинарный анализ, включая электромагнитный анализ, тепловой и прочностные расчеты.

Основной целью этапа оптимизации является повышение энергетических или улучшение рабочих характеристик электрической машины (КПД, коэффициент мощности, вращающий момент), рассчитанных на этапе проектирования, с помощью алгоритмов и методов оптимизации.

Укрупненная структура этапов проектирования и оптимизации электрических машин представлена на рисунке 1. Интеллектуальные алгоритмы активно внедряются для оптимизации электрических машин.

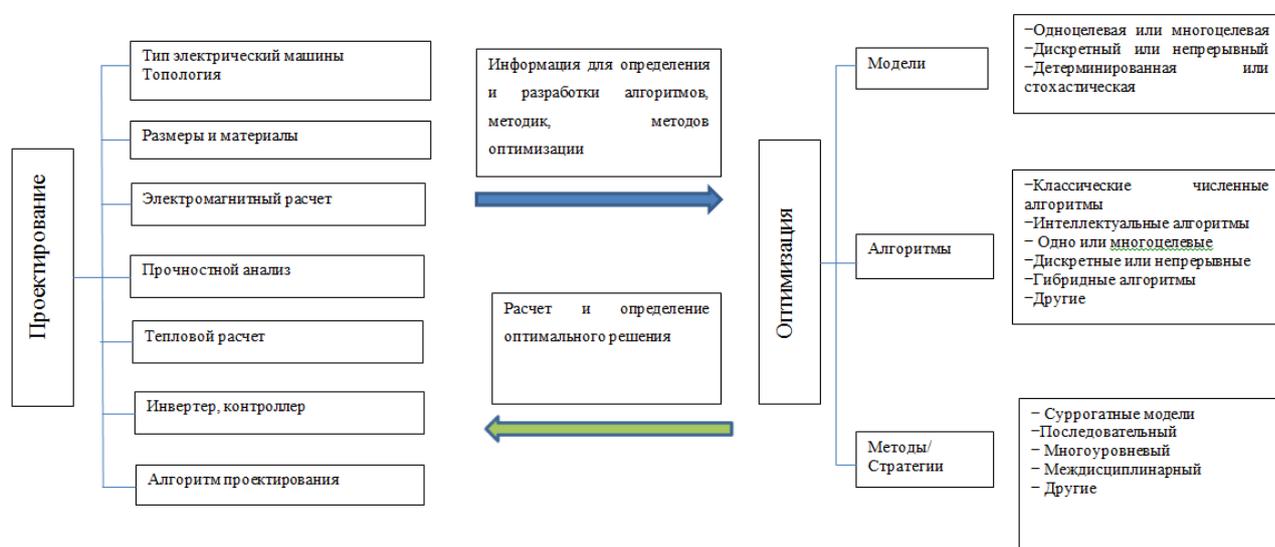


Рисунок 1. Структура этапов проектирования и оптимизации электрических машин

Для решения поставленных задач требуется разработка алгоритмов и методов многопараметрической и топологической оптимизации параметров СЭМПМ.

Распределение материалов в роторе или индукторе СЭМПМ имеет решающее значение для электромагнитных, тепловых процессов и структурных решений в электрических машинах. Чтобы в полной мере использовать перспективные виды

материалов в конструкции электрической машины особое внимание следует уделить разработке новых топологий на основе разработанных алгоритмов и методов топологической оптимизации.

Вторая глава посвящена разработке математических и численных моделей генерирующего комплекса на базе синхронной ЭМВПД с ПМ. Разработана математическая модель работы свободнопоршневого двигателя (СПДВС) стандартного цикла Отто с учетом диаметра цилиндров, массы поршневой группы и индуктора, степени сжатия, хода поршня, теплоты сгорания топлива и сил трения. В рассматриваемом СПДВС два оппозитно-расположенных поршня установлены на общий шатун, что позволяет им колебаться между двумя крайними точками в цилиндрах (рисунок 2).

Процесс горения топливной смеси происходит поочередно в каждом цилиндре, заставляя поршни совершать возвратно-поступательные движения.

Уравнение баланса сил запишется в скалярном виде согласно выражению (1)

$$P_L(x)A_B - P_R(x)A_B - F(x) = m\ddot{x}, \quad (1)$$

где $P_L(x)$ – мгновенное давление в левом цилиндре;

$P_R(x)$ – мгновенное давление в правом цилиндре; A_B – площадь поперечного сечения цилиндра;

$F(x)$ – электромагнитная сила и сила трения; m – масса индуктора (поршневой группы);

x – положение индуктора (позиция).

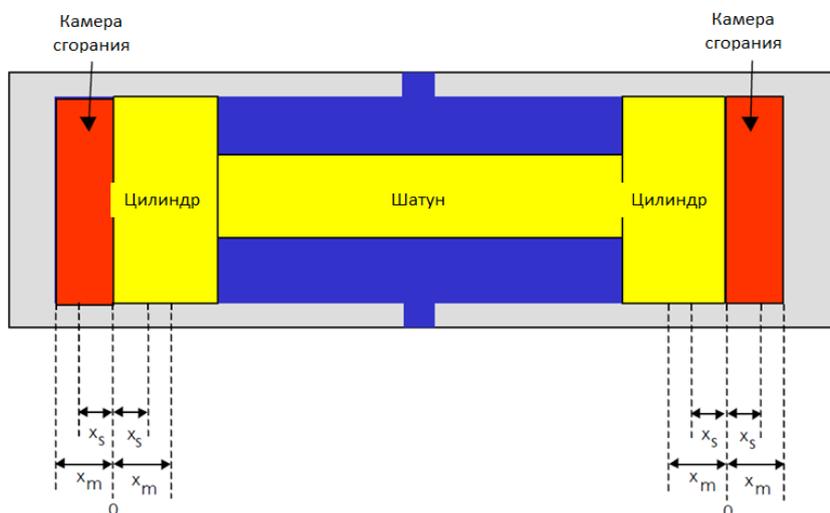


Рисунок 2. Упрощенный вид поперечного сечения СПДВС

Путем преобразований, получено уравнение баланса сил (2), которое может быть использовано для моделирования стационарного режима работы линейного СПДВС в скалярном виде

$$A_B P_1 \left(\frac{2r}{r+1} \right)^n \left[\left(1 + \frac{x}{x_m} \right)^{-n} - \left(1 - \frac{x}{x_m} \right)^{-n} \right] + \frac{Q_{in}(n-1)}{x_m - x_s} - F(x) = m\ddot{x}, \quad (2)$$

где r – степень сжатия; P_1 – входное давление; x_m – максимальный ход индуктора; x_s – текущий ход индуктора; n – политропный коэффициент сжатия; Q_{in} – теплота сгорания топлива.

Решение уравнение баланса сил позволяет определить положение и скорость поршневой группы и, соответственно, индуктора синхронной ЭМВПД с ПМ.

Для полного решения уравнения баланса сил (2) необходимо определить значения электромагнитных сил возникающих в синхронной ЭМВПД с ПМ.

Важнейшими электромагнитными нагрузками электрической машины, определяющими степень использования материалов и размеры машины при заданной номинальной мощности, являются магнитная индукция в воздушном зазоре B_δ и линейная токовая нагрузка A .

Для отображения в виде уравнения линейная токовая нагрузка представлена в виде ряда Фурье (распределение линейной токовой нагрузки представляет собой нечетную функцию).

Получено следующее выражение для токовой линейной нагрузки (3)

$$A(x, t) = \frac{3}{\tau_s} \cdot \omega_n \cdot i \cdot \sqrt{2} \sum_{v=0}^{\pm\infty} \xi_n \cdot \xi_s \cdot \sin\left(v \frac{\pi}{\tau_s} x - \omega t\right) \quad (3)$$

где v – номер гармоники; $v=6g+1$, $g=0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \pm 4$; ω_n – количество витков обмотки; i – ток в статорной обмотке; ξ_n – коэффициент распределения обмотки в статоре; ξ_s – коэффициент укорочения шага обмотки; ω – круговая частота; τ_s – полюсное деление статора; x – положение индуктора.

Результирующее значение магнитной индукции в воздушном зазоре получено сложением индукции воздушного зазора статора и индуктора

$$\begin{aligned} B_{рез}(x, t) &= B_{er}(x) + B_s(x, t) \\ &= B_0 \cdot \frac{4}{\pi} \\ &\cdot \sum_{v=1}^{\infty} \left[\frac{1}{2v+1} \cdot \cos\left((2v+1)\pi \left(\frac{1}{2} - \frac{b_m}{2\tau_s}\right)\right) \cdot \right. \\ &\quad \left. \sin\left((2v+1) \left(\frac{\pi}{\tau_m}(x)\right)\right) \right] \\ &+ \frac{\sqrt{2} \cdot 3 \cdot \mu_0 \cdot \omega_n \cdot i}{\delta \cdot \pi} \sum_{v_D=0}^{\pm\infty} \frac{\xi_n \cdot \xi_s}{v} \cdot \cos\left(v \frac{\pi}{\tau_s} x - \omega t\right), \end{aligned} \quad (4)$$

где B_0 – остаточная намагниченность; τ_m – полюсное деление индуктора; b_m – ширина магнита.

После тригонометрических преобразований получено значение электромагнитной силы намагничивания в направлении x

$$F_x(x, t) = 2pl_{sp} \int_{v=-\infty}^{+\infty} A_{vD} B_{ervD} \int_0^{\tau_s} \cos \left(x\pi \left(\frac{v}{\tau_m} - \frac{v}{\tau_s} \right) + \omega t \right) - \cos \left(x\pi \left(\frac{v}{\tau_m} + \frac{v}{\tau_s} \right) - \omega t \right) dx \quad (5)$$

Разработана тепловая модель синхронной ЭМВПД с ПМ, которая дает возможность определить максимально допустимую выдаваемую мощность, определить параметры, влияющие на теплоотдачу, определить меры по тепловой защите синхронной ЭМВПД с ПМ.

Определение теплопередачи и теплопроводности элементов синхронной ЭМВПД с ПМ основано на разбиении поперечного сечения синхронной ЭМВПД с ПМ, представленного на рисунке 3.

| | | |
|----|----|----|
| 22 | 23 | 24 |
| 19 | 20 | 21 |
| 16 | 17 | 18 |
| 13 | 14 | 15 |
| 10 | 11 | 12 |
| 7 | 8 | 9 |
| 4 | 5 | 6 |
| 1 | 2 | 3 |
| L1 | L2 | L3 |

Рисунок 3. Разбиение поперечного сечения синхронной ЭМВПД с ПМ на области с соответствующими номерами

Области 2, 5 и 8 относятся к катушке с обмоткой, области L1, L2 и L3 относятся к транслятору синхронной ЭМВПД с ПМ, области 22, 23, 24 – канал охлаждения, области 16 - 21 – кожух охлаждения, остальные относятся к пакету статора. Получены уравнения для определения теплопередач между пакетом статора и катушкой, в пакете статора в радиальном направлении, в пакете статора и кожухе охлаждения в аксиальном направлении, в радиальном направлении от кожуха охлаждения к каналу охлаждения, от пакета статора к кожуху охлаждения, от индуктора к статору.

В третьей главе разработана математическая модель приводного комплекса ШСНУ, позволяющая рассчитать мгновенную электрическую мощность, потребляемую приводным двигателем в зависимости от конструктивных параметров станка-качалки.

Синхронные машины с постоянными магнитами в составе ШСНУ отличаются тем, что вместо обмотки возбуждения на роторе у них расположены постоянные магниты, создающие возбуждающий магнитный поток. Статор этих машин подобен

статору АД и имеет трёхфазную обмотку. Исходя из достоинств и недостатков, в исследуемых СЭДПМ принимается ПМ на основе неодим-железо-бор.

Многообразие исполнения роторов с постоянными магнитами можно объединить двумя конструктивными особенностями: с расположением ПМ на поверхности ротора и с внутренним расположением ПМ в роторе.

Использование встроенных магнитов имеет два преимущества с точки зрения производственных затрат: с одной стороны, автоматизированное производство роторов может осуществляться относительно легко, поскольку ПМ могут устанавливаться в выемках, предусмотренных в роторе, с помощью соответствующего устройства. При правильном размещении соединительных перемычек (мосты) между сталью над полюсом можно не использовать опорное кольцо или бандажирование. Одним из важнейших этапов проектирования СЭДПМ является расчет магнитной системы, который упрощенно можно осуществить с помощью метода эквивалентных магнитных цепей. По результатам анализа выбрана коллекторная конструкция магнитной системы ротора. В магнитную цепь входят четыре участка: ПМ с полюсом из магнитомягкой стали; участки рассеяния магнитного потока, включающие стальные мосты; воздушный зазор; зубцы и ярмо статора.

Полная эквивалентная схема магнитной цепи, размещенная в границах полюса СЭДПМ изображена на рисунке 4.

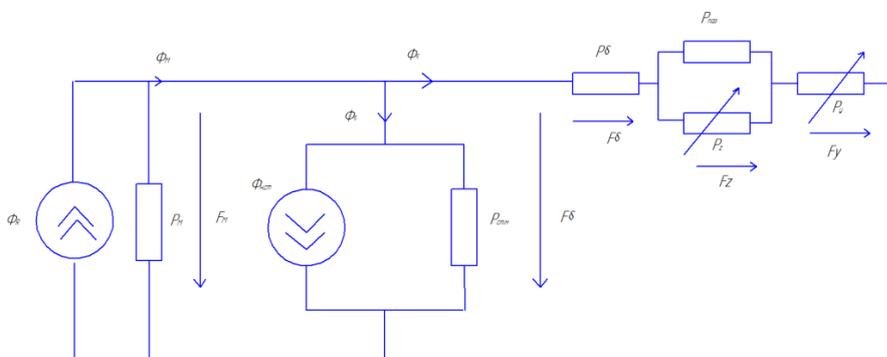


Рисунок 4. Эквивалентная схема магнитной цепи

На основе эквивалентной схемы составлена система уравнений по первому и второму законам Кирхгофа для магнитных цепей.

Полученная система уравнений позволяет аналитически решить две задачи:

1. Найти требуемые размеры магнитов по заданному значению магнитного потока и заданным размерам ротора и статора двигателя с встроенными магнитами.
2. Определить магнитный поток, рабочую точку магнита при

известной конструкции ротора и статора.

В четвертой главе показано имитационное моделирование генерирующих комплексов на базе синхронной ЭМВПД с ПМ мощностью 10 кВт. Разработана имитационная модель СПДВС, которая позволяет моделировать различные режимы работы СПДВС при варьировании входных параметров: давление топлива на входе, площадь поперечного сечения цилиндра, масса поршневой группы, положение индуктора. Данная модель позволяет решать уравнение (2).

В таблице 1 представлены параметры СПДВС перед началом моделирования. Масса индуктора определяется из предварительных расчетов и построения 3-D модели синхронной ЭМВПД с ПМ.

Таблица 1. Параметры СПДВС

| Параметр | Обозначение | Значение | Единица измерения |
|---|-------------|----------|-------------------|
| Диаметр цилиндра | D | 0,1 | м |
| Максимальный ход индуктора | x_m | 120 | мм |
| Давление топлива на входе | P_1 | 250 | кПа |
| Степень сжатия | r | 10 | |
| Масса поршневой группы (включает массу индуктора) | m | 10 | кг |
| Политропный коэффициент сжатия | n | 1,5 | |

В программном комплексе *Matlab-Simulink* разработаны блоки расчета линейной токовой нагрузки, магнитной индукции статора, магнитной индукции, создаваемой постоянными магнитами индуктора, электромагнитной силы и потерь в синхронной ЭМВПД с ПМ согласно теоретическим выкладкам 2 главы.

На рисунке 5 представлено изменение магнитной индукции постоянных магнитов в аксиальном направлении на высоте радиуса воздушного зазора. Хорошо видно влияние статорной обмотки на поле возбуждения. Это приводит к снижению качества генерируемой электрической энергии и требует работы на выпрямительную нагрузку с последующим аккумулированием энергии.

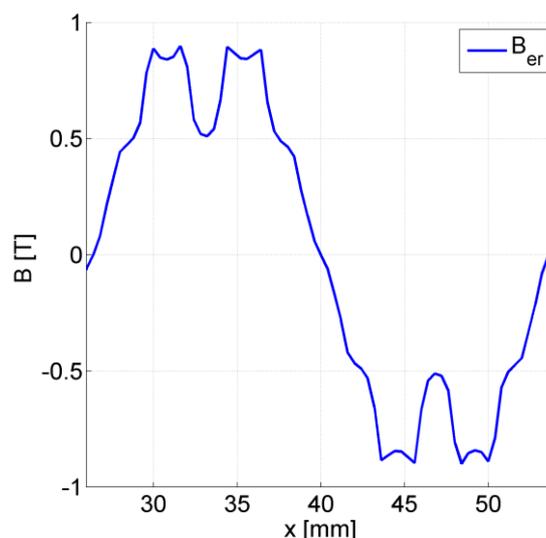


Рисунок 5. Поле возбуждения в границах полюсного деления

Прочностной анализ конструктивных элементов синхронной ЭМВПД С ПМ является необходимым условием надежной работы всего АИЭ и позволяет произвести оптимизацию конструкции, прежде всего, подвижных элементов синхронной ЭМВПД С ПМ (индуктора) с целью снижения механической и вибрационной нагрузки на элементы АИЭ.

Изначально конструктивные параметры определяются на основе расчетов численной модели синхронной ЭМВПД С ПМ, куда заложены основные размеры статора, постоянных магнитов и индуктора.

Параметры механических процессов (скорости, ускорения, нагрузки) в программном комплексе *Matlab-Simulink* на основе программ, написанных на языке *Matlab*, передаются в проектную таблицу *Excel*, которая синхронизируется с системой автоматизированного проектирования (САПР) *CatiaV5*. В *CatiaV5* строятся 3D модели статора и индуктора синхронной ЭМВПД С ПМ.

Программный файл, интегрированный в данную модель, после окончания расчета, выгружает полученные значения нагрузок в виде проектной *Excel*-таблицы, которая синхронизируется с САПР *CatiaV5*. Общий вид электрической машины представлен на рисунке 6.

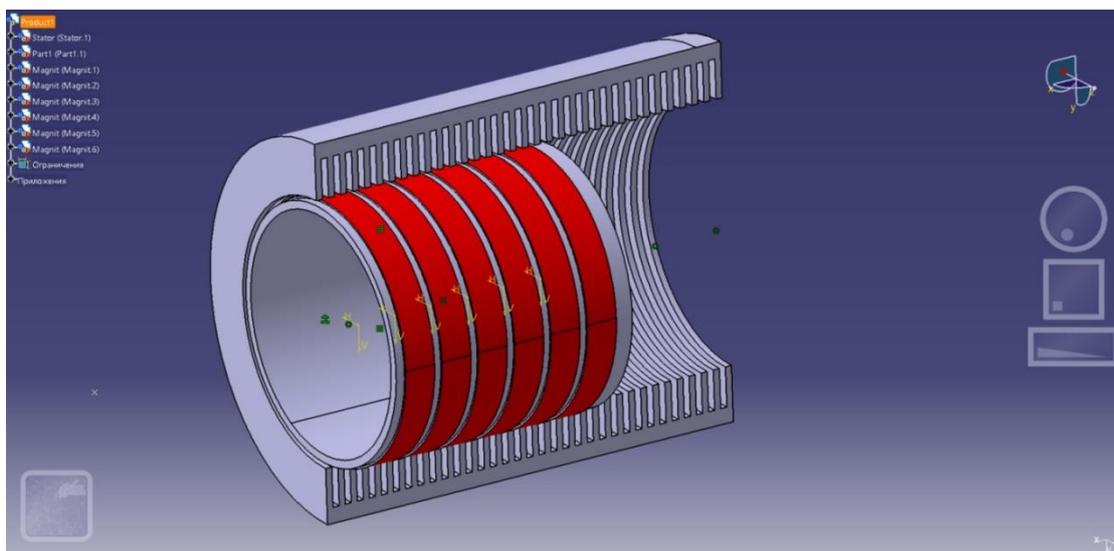


Рисунок 6. 3-D модель линейного генератора в программе *CatiaV5*

Моделирование электромагнитного поля в синхронной ЭМВПД с ПМ проводится в программном пакете *Comsol Multiphysics*, использующий метод конечных элементов (МКЭ) для решения полевых задач.

Расчетная модель участка синхронной ЭМВПД с ПМ показана на рисунке 7.

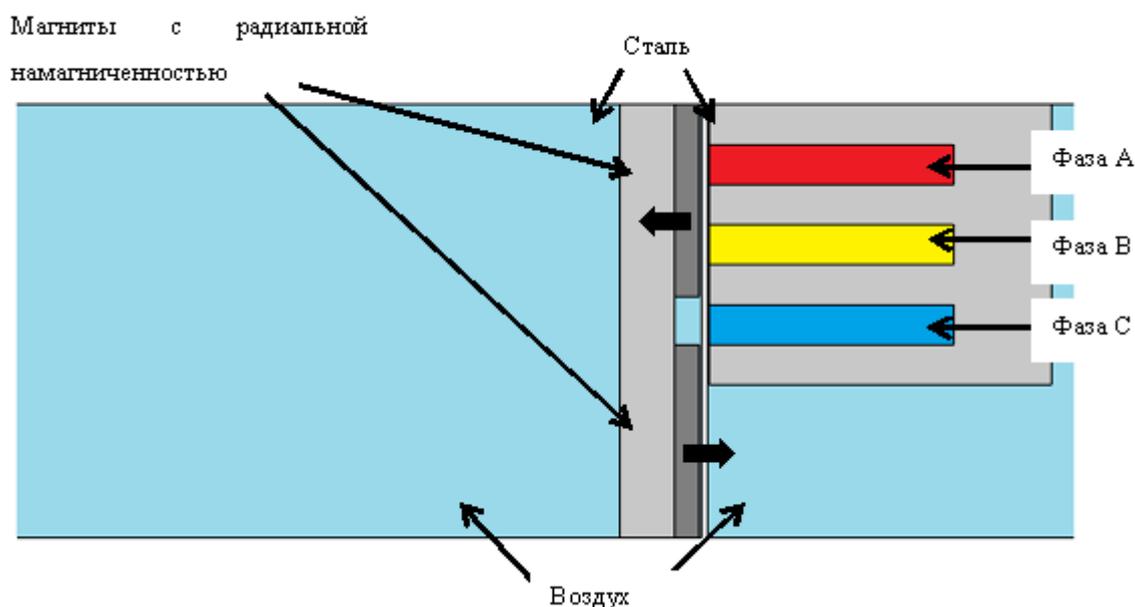


Рисунок 7. Участок синхронной ЭМВПД с ПМ

Достаточно точным способом моделирования сложного теплообмена выступают методы, основанные на использовании электрических схем замещения тепловых процессов. Основанием для использования данных методов являются положения теории подобия и изоморфизм уравнений, описывающих тепловые процессы и процессы в электрической цепи.

Разработана электрическая схема замещения тепловой цепи синхронной ЭМВПД с ПМ, созданная в среде математического пакета *Simulink*.

Для эффективной совместной работы, обмена данными между *Matlab/Simulink*, *CATIA V5* и *COMSOL Multiphysics* и оптимизации параметров машины разработана система управления базами данных на базе *Microsoft Excel*.

При разработке алгоритмов численного моделирования синхронной ЭМВПД с ПМ в основу ставилась глубокая параметризация геометрии индуктора и статора для исследования значительного количества возможных конфигураций геометрии электрической машины. Это позволяет оценить влияние отдельных геометрических параметров на энергоэффективность синхронной ЭМВПД с ПМ и модернизировать модель машины к новым требованиям.

В пятой главе разработаны методы и алгоритмы оптимизация параметров СЭМПМ в составе генерирующих и приводных комплексов.

Выполнена оптимизация конструктивных параметров синхронной ЭМВПД с ПМ по критерию максимума намагничивающей силы. Цель оптимизации – в достижении максимальной электромагнитной силы в зависимости от варьируемых параметров, на основании теоретических выкладок полученных во второй главе. Проводилась вариация параметров синхронной ЭМВПД с ПМ с определенным шагом, представленных в таблице 2.

Таблица 2. Варьируемые параметры

| Параметр | Начальное значение (мм) | Шаг варьирования(мм) | Область варьирования (мм) | |
|-------------------------|-------------------------|----------------------|---------------------------|-----|
| | | | min | max |
| Воздушный зазор | 0,75 | 0,25 | 0,25 | 1,5 |
| Ширина зубца статора | 5 | 1 | 3 | 9 |
| Высота паза для обмотки | 30 | 5 | 15 | 40 |
| Ширина ярма статора | 10 | 2 | 2 | 10 |
| Ширина ярма индуктора | 7 | 2 | 2 | 10 |
| Высота магнита | 5 | 1 | 1 | 5 |

При увеличении воздушного зазора наблюдается постоянное снижение намагничивающей силы. При увеличении воздушного зазора увеличивается магнитное сопротивление, что приводит к снижению электромагнитной силы (рисунок 8,а).

Варьирование ширины зубца статора дает максимальную силу при 4 мм (рисунок 8,б). При условии постоянной плотности тока при варьировании величины ширины зубца наблюдаются два эффекта:

1. Так как полюсное деление и длина машины являются постоянными величинами, увеличение ширины зубца приводит к увеличению площади контакта с магнитным потоком, что снижает насыщение материала зубца статора.

2. При постоянной плотности тока увеличение ширины зубца приводит к снижению линейной токовой нагрузки, так как уменьшается ширина и соответственно площадь обмоток.

При ширине 4 мм сумма этих двух эффектов дают максимальную электромагнитную силу. При постоянной плотности тока увеличение высоты паза обмотки статора приводит к увеличению силы намагничивания. По достижении высоты паза 32,5 мм начинается процесс насыщения материала статора, что ведет к уменьшению нарастания силы (рисунок 8,в). Изменение размера ярма статора, начиная со значения 7 мм, не приводит к дальнейшему увеличению силы тока (рисунок 8,г). Увеличение размера ярма статора приводит к увеличению площади, через который проходит магнитный поток, что приводит к уменьшению магнитного сопротивления. Однако при этом силовые линии магнитного поля увеличивают свою длину, чем компенсируют в определенный момент снижение магнитного сопротивления. Данный эффект приводит к прекращению возрастания силы при дальнейшем увеличении размера ярма статора.

Изменение высоты ярма индуктора, представленного на рисунке 8,д, показывает, что начиная с высоты 6 мм, наблюдается незначительное увеличение электромагнитной силы. Причина аналогична процессу, рассмотренному в случае с высотой ярма статора. Увеличение высоты магнита, как следствие приводит к увеличению силы намагничивания. Начиная с высоты магнита 2 мм наблюдается снижение интенсивности нарастания электромагнитной силы (рисунок 8,е). Если площадь магнита остается постоянной, только высота магнита влияет на величину магнитного потока постоянных магнитов. С увеличением высоты магнита наступает эффект насыщения магнитной цепи, что ослабевает дальнейшее увеличение намагничивающей силы.

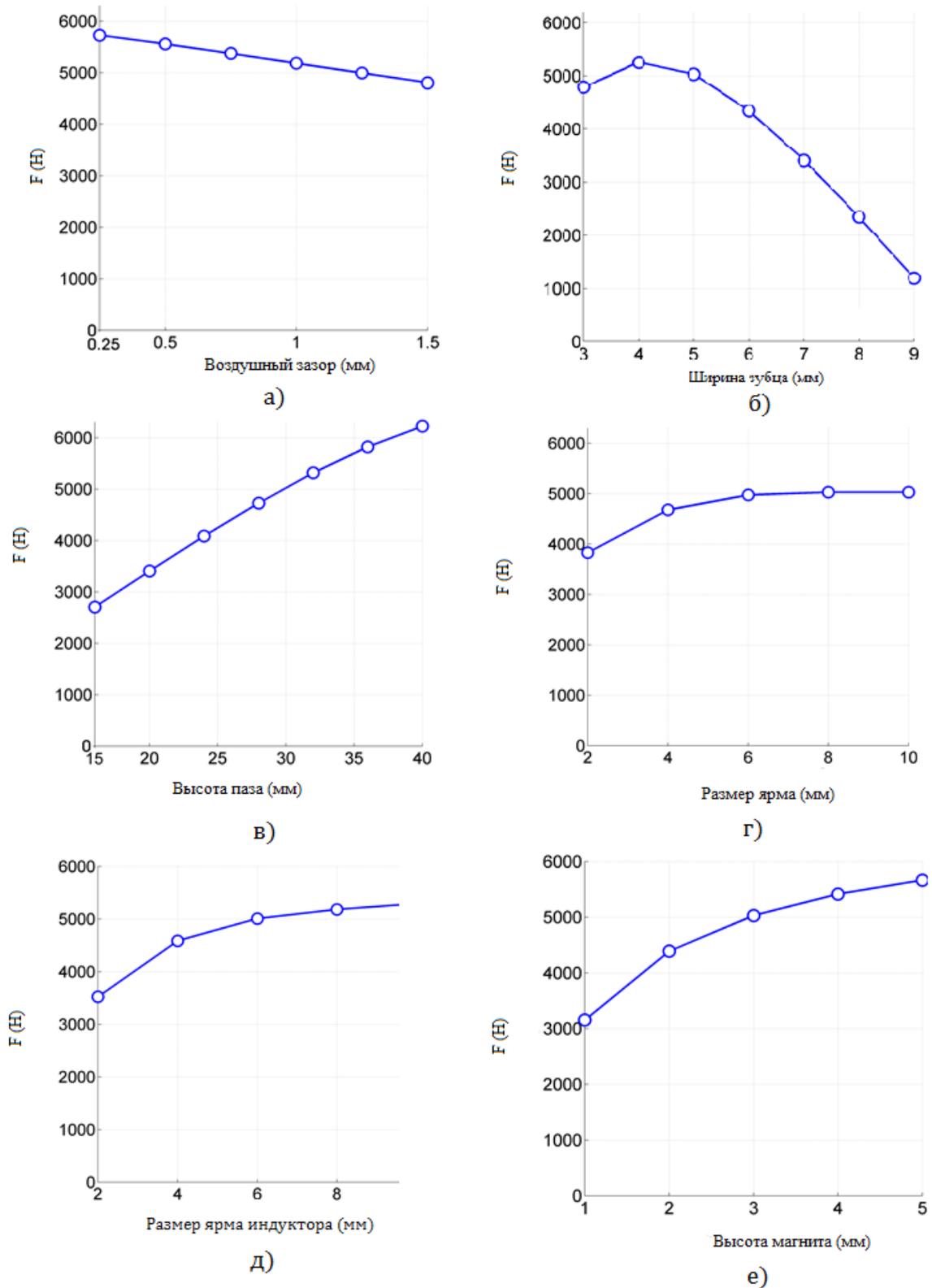


Рисунок 8. Влияние варьируемых параметров на электромагнитную силу

Предложена методика оптимизации конструктивных размеров статора и индуктора синхронно ЭМВПД с ПМ по критерию максимальной генерируемой

мощности.

Целью оптимизации конструкции синхронной ЭМВПД с ПМ является получение максимальной электрической мощности генератора P_e .

Согласно Хитереру М.Я., максимальная электромагнитная мощность, которая может быть получена от генератора, равна:

$$P_e = \frac{1}{2} C_{MW} x_m \omega \cos \omega t i_m \cos \varphi. \quad (6)$$

Повышение амплитуды колебаний x_m и частоты перемещения индуктора ω являются тривиальными решениями и ограничиваются техническим заданием и прочностными характеристиками машины. Ток генератора i_m ограничивается сечением обмотки статора и условиями охлаждения электрической машины. При работе на активную нагрузку можно принять коэффициент мощности $\cos \varphi \approx 0,9$.

Коэффициент электромагнитной силы C_{MW} включает в себя конструктивные размеры статора и индуктора электрической машины, а также магнитодвижущую силу магнитов. Данный множитель выражения (6) можно принять за целевую функцию, которую необходимо максимизировать с учетом накладываемых ограничений на входящие в нее параметры.

Задача оптимизации целевой функции решена в приложении *Optimization Toolbox* программы *Matlab*. На языке *Matlab* написана программа, позволяющая рассчитать параметры целевой функции на основе генетического алгоритма.

Результаты оптимизации по максимуму генерируемой мощности конструктивных параметров синхронной ЭМВПД с ПМ коррелируют с результатами методики оптимизации по критерию максимума электромагнитной силы.

Предложена методика многокритериальной оптимизации конструктивных параметров ротора синхронного электрического двигателя с встроенными постоянными магнитами, позволяющая получить приблизительное множество оптимальных по Парето решений.

Выбранные целевые функции:

— максимизация номинального момента M_H

$$f_1 = M_H \rightarrow \max,$$

— минимизация массы магнита $m_{ПМ}$ для уменьшения стоимости

$$f_2 = -m_{ПМ} \rightarrow \max.$$

Функции ограничения определяются следующими условиями:

- требуемый номинальный момент: $M_m \geq M_{\text{треб}}$, где M_m – максимальное возможное значение; $M_{\text{треб}}$ – номинальный момент, необходимый для привода

станка-качалки;

- условие обеспечения устойчивости к размагничиванию постоянных магнитов: $I_m \leq I_{m.p}$, где I_m – допустимое значение тока; $I_{m.p}$ – предельное значение тока статора, при котором обеспечивается устойчивость к размагничиванию.

Оптимизируемые параметры представлены на рисунке 9 и таблице 3.

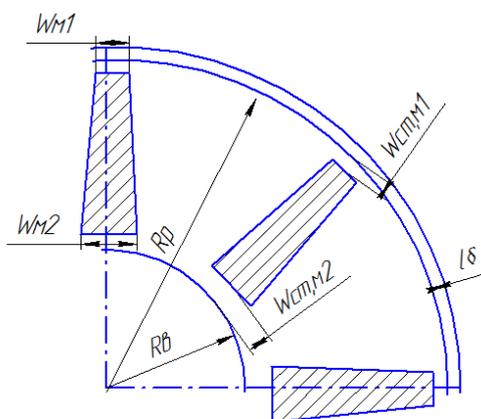


Рисунок 9. Оптимизируемые параметры ротора

Таблица 3. Параметры оптимизации на роторе

| Обозначение | Описание |
|-------------|---------------------------------|
| R_p | Радиус ротора |
| $w_{ст.м1}$ | Ширина верхнего стального моста |
| $w_{ст.м2}$ | Ширина нижнего стального моста |
| $w_{м1}$ | Ширина магнита сверху |
| $w_{м2}$ | Ширина магнита снизу |
| R_B | Радиус вала |
| l_δ | Ширина воздушного зазора |

Топологическая оптимизация синхронной ЭМВПД с ПМ с целью получения максимально возможной электромагнитной силы основывается на рациональном распределении материалов в индукторе с использованием генетического алгоритма и повышении технологичности изготовления путем объединения однотипных материалов по кластерам и внедрения процедуры «очистки» для получения однородной структуры кластеров.

В предлагаемом методе при проведении оптимизации, стартовая конструкция узлов и деталей синхронной ЭМВПД с ПМ основывается на результатах многокритериальной оптимизации, далее производится сегментация элементов автономной энергоустановки в вертикальном и горизонтальном направлениях. Учитывается симметрия конструкции для снижения объема вычислительных

операций. Функциональный принцип генетических алгоритмов состоит в идентификации уникальным двоичным кодом каждого элемента автономной энергоустановки, в том числе и различных вариантов используемого материала. Кластеры из нескольких видов материалов позволяют сформировать материал индуктора и материал постоянных магнитов.

Предложена концепция кластеров, зон с однородными свойствами, для различных типов материалов. Например, сталь в ячейках 2 и 3, являются элементами одного кластера, так как соседствуют друг с другом, как показано на рисунке 10,а, а сталь 4 является элементом другого кластера (рисунок 10,а). Если область, занимаемая кластером узкая, т.е. количество ячеек в одном кластере меньше или равно целому числу N_{min} , то запускается процедура «очистки». Например, когда $N_{min} = 2$, то сталь 2 и 3 остаются, а сталь 1 заменяется на окружающий воздух, сталь 4 заменяется на магнит (рисунок 10,б). В результате такого способа достигается однородная структура кластера и упрощается изготовление рассчитанной топологии.

Магнит



а) Перед «очисткой»



б) После «очистки»

Рисунок 10. Концепция кластеров и процедуры «очистки»

В шестой главе представлены результаты физического моделирования и верификация имитационной модели.

Для физического моделирования разработан испытательный стенд предназначенный для исследования работы модуля синхронной ЭМВПД с ПМ при механическом, температурном воздействии и при воздействии электрической нагрузки.

Аппаратный состав испытательного стенда представлен на рисунке 11.

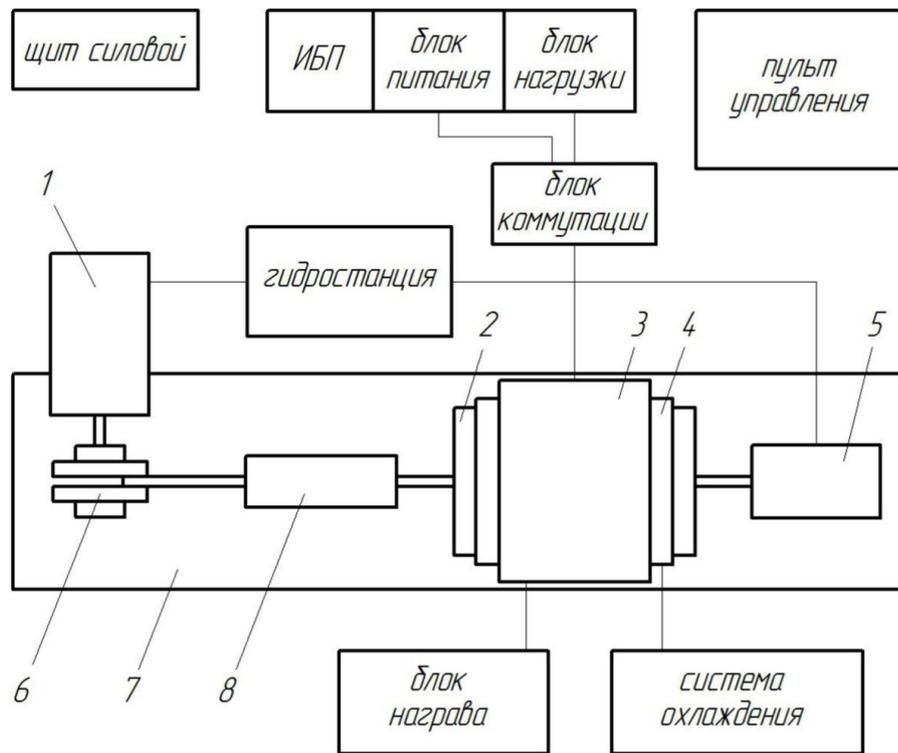


Рисунок 11. Аппаратный состав испытательного стенда

1 – гидромотор; 2 – синхронная ЭМВПД с ПМ; 3 – нагревательный элемент; 4 – охлаждающий элемент; 5 – гидроцилиндр; 6 – кривошипно-шатунный механизм; 7 – рама; 8 – система направляющих

На рисунке 12 изображен общий вид испытательного стенда для проведения углубленных исследований образца синхронной ЭМВПД с ПМ.

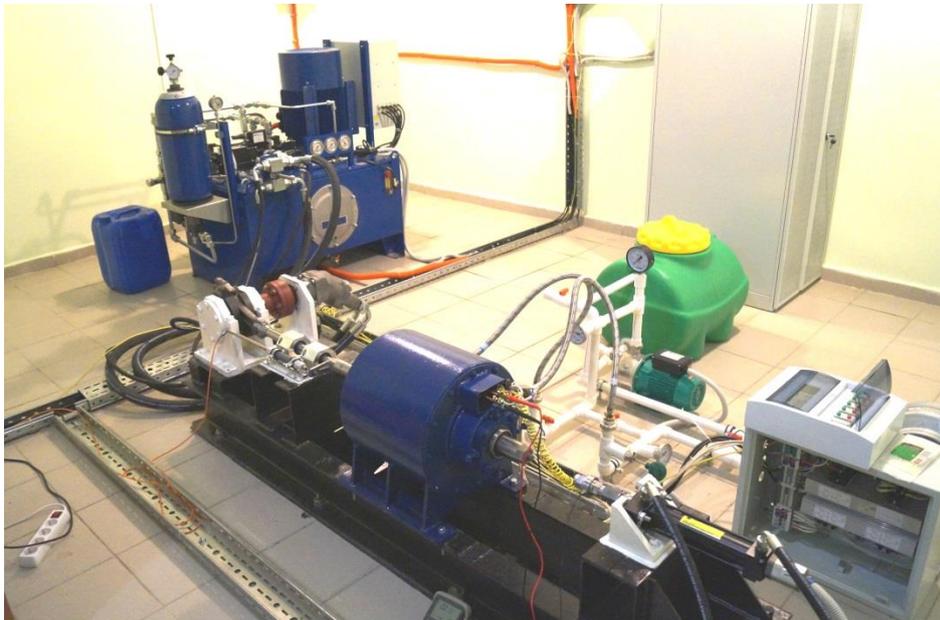


Рисунок 12. Общий вид испытательного стенда

Изготовлен экспериментальный образец синхронной ЭМВПД с ПМ. Размеры индуктора, статора и постоянных магнитов определены на основе разработанной

методики оптимизации конструктивных размеров статора и индуктора синхронной ЭМВПД с ПМ и метода топологической оптимизации.

КПД синхронной ЭМВПД с ПМ в режиме генератора зависит от частоты перемещения индуктора f , хода индуктора (x_m - амплитуда колебаний) и тока статора. В связи с этим, характеристика КПД представлена в зависимости от выдаваемой электрической мощности. На рисунке 13 представлены КПД генератора при различных значениях хода индуктора.

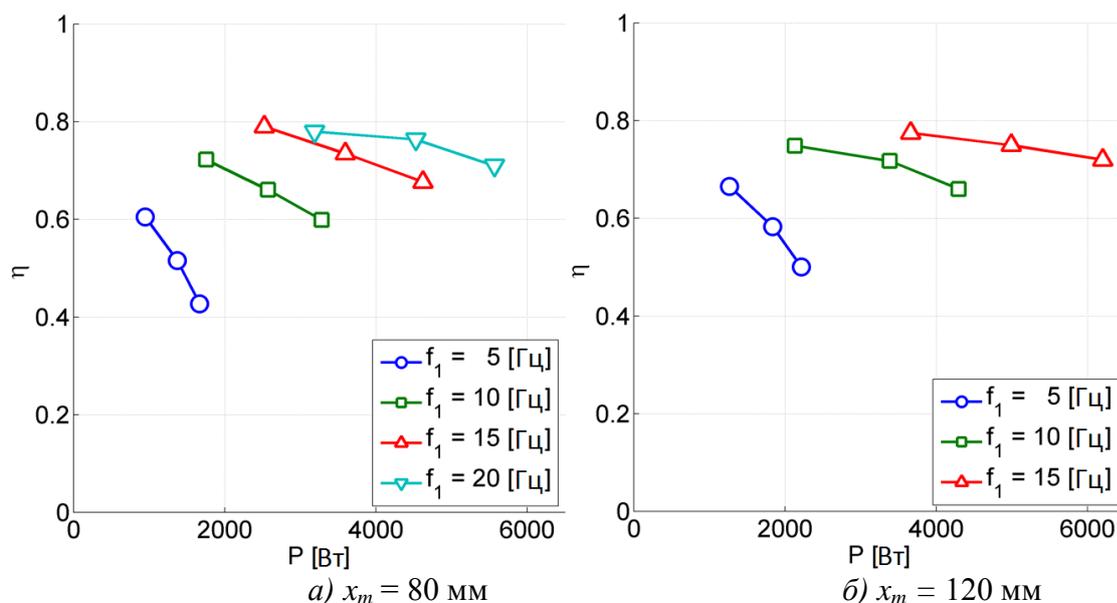


Рисунок 13. Динамика изменения КПД при ходе индуктора 80 мм и 120 мм

На рисунке 14 представлено сравнение КПД синхронной ЭМВПД с ПМ в режиме генератора, аналитически полученного на основе предложенной имитационной модели и измеренного на частотах перемещения индуктора 5 и 20 Гц.

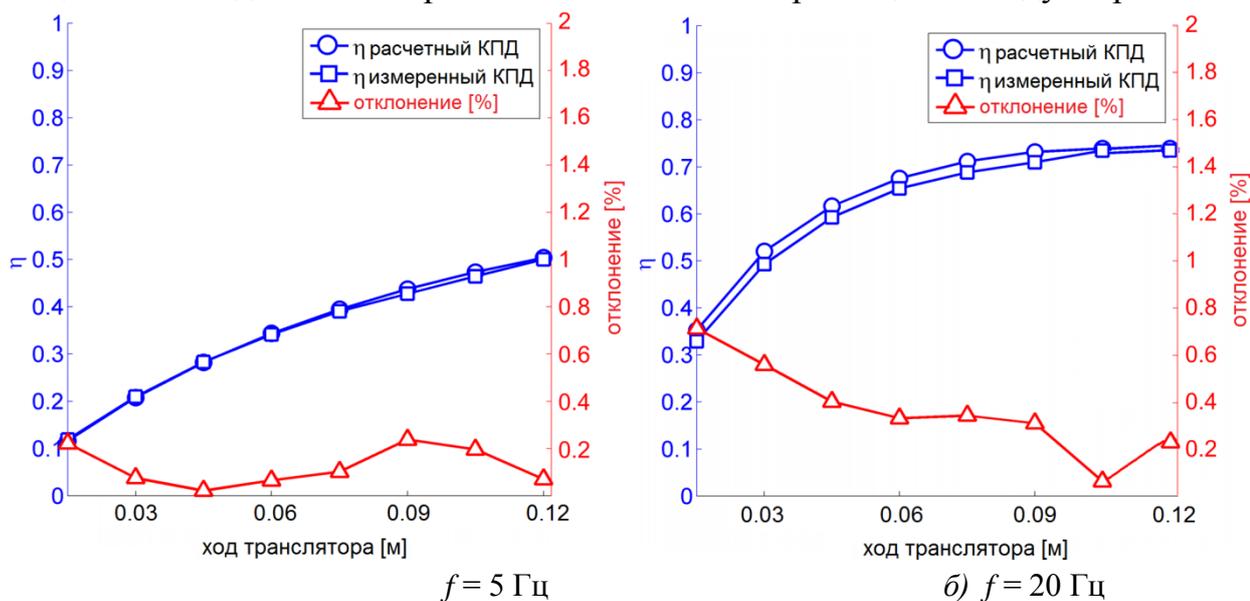


Рисунок 14. Сравнение измеренного и рассчитанного КПД

Расхождение данных величин связано с неточностью аналитических зависимостей для расчета потерь в стали, в обмотках и добавочных потерь, а также отклонениями характеристик материалов (электротехнической стали и медных обмоток) от реальных значений.

С целью определения потенциальных возможностей синхронной ЭМВПД с ПМ проведены расчеты КПД в режиме генератора на частотах перемещения индуктора до 50 Гц.

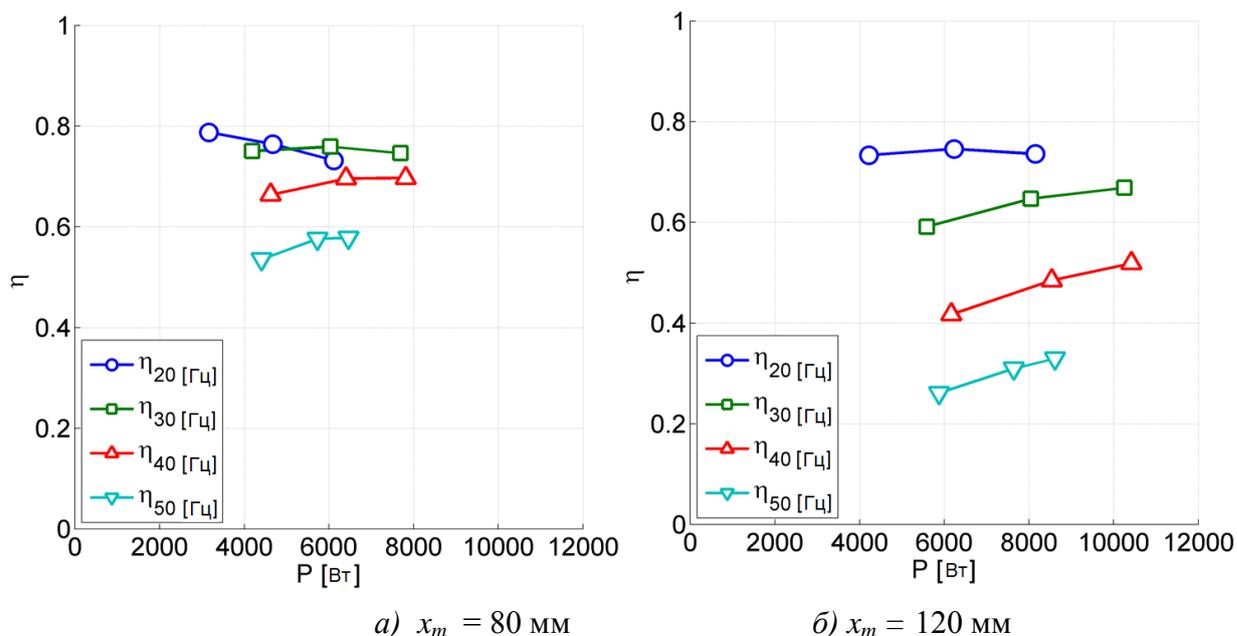


Рисунок 15. Динамика изменения КПД при ходе индуктора 80 мм и 120 мм

Как видно из рисунка 15, с увеличением частоты перемещения индуктора наблюдается снижение КПД в режиме генератора, что связано с увеличением потерь в стали от частоты перемагничивания.

В корпус синхронной ЭМВПД с ПМ были интегрированы 15 температурных датчиков. Температурные датчики расположены таким образом, чтобы при измерении определить процесс изменения температуры внутри линейного генератора, а также определить значения теплопроводности и теплопередачи для построения тепловой модели синхронной ЭМВПД с ПМ.

На рисунке 16 показаны измеренные и рассчитанные значения температуры при генерируемой мощности 6150 Вт и потерях мощности (в стали и в обмотках) 1710 Вт. Среднее отклонение в процентах значений моделирования от измеренных составляет 6,5 %.

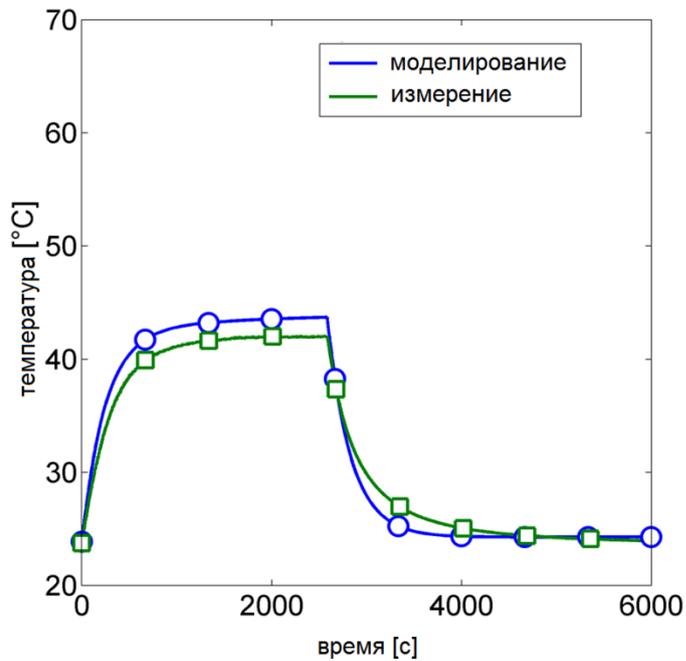


Рисунок 16. Рассчитанное и измеренное значение температур

На рисунке 17 представлены измеренные и рассчитанные значения температур в средней части линейного генератора. Показания расположены геометрически так же, как и реальные датчики в корпусе генератора.

Плоскость Y1 горизонтальная и сопряжена с каналом охлаждения. Плоскость Y3 также горизонтальная и сопряжена с воздушным зазором.

Распределение температуры в аксиальном направлении представлено на рисунке 17 при средней температуре охлаждающей жидкости (вода) 25 °С, генерируемой мощности 6150 Вт (потери 1710 Вт), частоте индуктора 20 Гц и ходе индуктора 120 мм.

Наиболее горячими точками в синхронной ЭМВПД с ПМ являются средние области: в радиальном направлении воздушный зазор и в аксиальном направлении средняя часть синхронной ЭМВПД с ПМ. Именно в этих областях необходимо предусмотреть повышенную термозащиту.

Перегрузочная способность синхронной ЭМВПД с ПМ хорошо предсказуема, так как тепловая модель с достаточной точностью описывает реальные тепловые процессы, происходящие в машине.

Измеренные и рассчитанные значения температур позволяют сделать вывод, что для лучшего охлаждения синхронной ЭМВПД с ПМ необходимо улучшать значение теплопроводности от кожуха охлаждения к охлаждающей жидкости (вода) для отвода тепла из средней части корпуса синхронной ЭМВПД с ПМ.

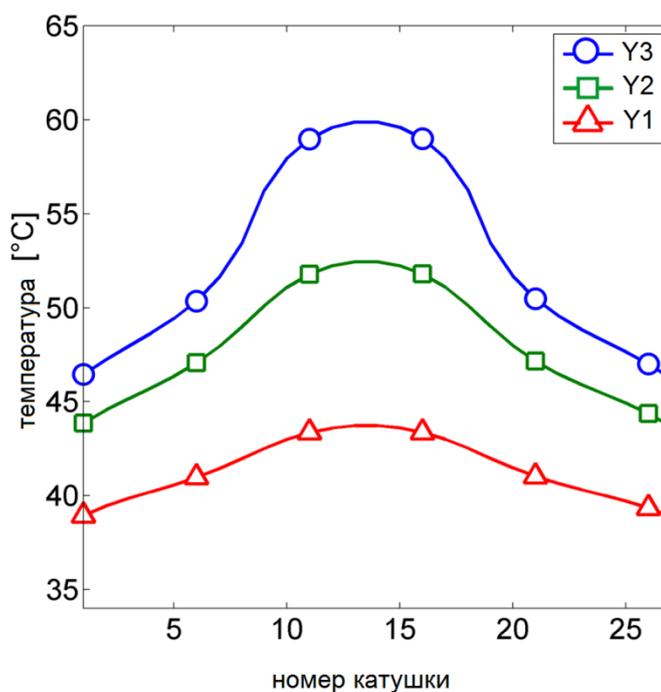


Рисунок 17. Распределение температуры в аксиальном направлении в ЭМВПД

Разработанные математические модели СЭМПИМ обеспечивают степень совпадения результатов математического моделирования и исследовательских испытаний погрешностью не более 3 %.

Адекватность математического моделирования позволяет воспроизводить заданные свойства, состояние и поведение исследуемого объекта с достаточной для поставленных целей точностью и в условиях достаточно широкого диапазона изменения входных параметров.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ДИССЕРТАЦИИ

Проведенные исследования позволили сформулировать и обосновать научные положения, совокупность которых может быть классифицирована как развитие теоретических основ и совершенствование методических и конструктивных решений, обеспечивающих создание энергоэффективных синхронных электрических машин с постоянными магнитами, предназначенных для генерации электрической энергии в составе автономных энергоустановок и приводах различных механизмов.

В качестве наиболее существенных результатов работы можно выделить следующие:

1. На основе анализа различных типов линейных электрических машин возвратно-поступательного действия в автономных источниках электроснабжения установлено, что наиболее рациональной формой реализации синхронной ЭМВПД

является цилиндрическая конструкция с постоянными магнитами на подвижном якоре. Конструктивно выполнять якорь целесообразно полым, с поверхностно монтируемыми магнитами, формирующими радиальный магнитный поток. Выбранная форма реализации позволяет обеспечить наилучшие технико-экономические характеристики синхронной ЭМВПД.

2. Проектирование и оптимизация параметров СЭДПМ является актуальной задачей, так как данный тип двигателей всё больше распространяется на области, где традиционно применялись двигатели постоянного тока (ДПТ) или АД, таких, как привод циркуляционных насосов, привод компрессоров в холодильной технике, системах вентиляции, буровые установки по добычи нефти. Одним из перспективных направлений внедрения СЭДПМ является нефтедобывающая отрасль. Электропривод ШСНУ является одним из важнейших компонентов данных установок. Повышение его работоспособности является ключевой задачей для снижения себестоимости добываемой нефти.

3. Разработана математическая модель работы свободнопоршневого двигателя (СПДВС) стандартного цикла Отто с учетом диаметра цилиндров, массы поршневой группы и индуктора, степени сжатия, хода поршня, теплоты сгорания топлива и сил трения. Решение уравнения баланса сил позволяет определить положение и скорость поршневой группы и, соответственно, индуктора синхронной ЭМВПД с ПМ, работающей в стационарных условиях.

4. Разработана методика расчета электромагнитной силы синхронной ЭМВПД с ПМ через отображение уравнения линейной токовой нагрузки и индукции магнитного поля, создаваемого постоянными магнитами, в виде ряда Фурье, что позволяет провести расчет и оптимизацию конструктивных параметров индуктора и статора электрической машины возвратно-поступательного действия.

5. Разработана тепловая модель синхронной ЭМВПД с ПМ, которая дает возможность определить максимально допустимую выдаваемую мощность синхронной ЭМВПД с ПМ, определить параметры, влияющие на теплоотдачу, определить меры по тепловой защите синхронной ЭМВПД с ПМ.

6. Предложена эквивалентная схема магнитной цепи синхронного двигателя с встроенными магнитами в составе станка-качалки нефти. На основе эквивалентной схемы составлена система уравнений по первому и второму законам Кирхгофа для магнитных цепей. Полученная система уравнений позволяет аналитически определять требуемые размеры магнитов по заданному значению магнитного потока и заданным размерам ротора и статора двигателя и магнитный поток, рабочую точку магнита при известной конструкции ротора и статора.

7. Разработан программный комплекс, реализующий алгоритмы расчета термодинамических процессов в СПДВС, электромеханических процессов в синхронной ЭМВПД с ПМ, тепловых процессов в синхронной ЭМВПД с ПМ, а

также позволяющий производить прочностные расчеты конструкции синхронной ЭМВПД с ПМ и оптимизацию конструктивных параметров генерирующего комплекса с СПДВС на базе синхронной ЭМВПД с ПМ.

8. Разработана методика оптимизации конструктивных размеров статора и индуктора синхронной ЭМВПД с ПМ по критерию максимума намагничивающей силы на основе разделения конструктивных параметров синхронной ЭМВПД с ПМ на постоянные и варьируемые.

9. Разработана методика оптимизации конструктивных размеров статора и индуктора синхронной ЭМВПД с ПМ по критерию максимальной генерируемой мощности. Результаты оптимизации по максимуму генерируемой мощности показали, что конструктивные параметры синхронной ЭМВПД с ПМ коррелируют с методикой оптимизации по критерию максимума электромагнитной силы.

10. Предложена методика многокритериальной оптимизации конструктивных параметров ротора синхронного электрического двигателя с встроенными постоянными магнитами, позволяющая получить приблизительное множество оптимальных по Парето решений.

11. Разработан метод топологической оптимизации для распределения материалов в индукторах и роторах СЭМППМ с использованием генетического алгоритма. Предложена концепция кластеризации материалов и процедура «очистки» материалов. Рассмотрено использование более двух материалов, а именно: воздух, сталь, а также постоянных магнитов с радиальной и аксиальной намагниченностью.

12. Разработан испытательный стенд для проведения углубленных исследований характеристик синхронной ЭМВПД с ПМ, обладающий следующими характеристиками: максимальная скорость перемещения индуктора до 20 м/с, максимально измеряемое усилие до 100 кН, частота перемещения индуктора до 100 Гц, мощность электрической нагрузки до 25 кВт, напряжение нагрузки до 400 В, измерение электрического тока до 300 А, точность определения положения индуктора до 0,1 мм, измерение температуры элементов машины до 200 °С, частота оцифровки входных сигналов системы контроля и управления до 800 кГц.

13. Разработан экспериментальный образец синхронной электрической машины возвратно-поступательного действия мощностью 3-11 кВт, с температурным рабочим диапазоном от 0°С до 150 °С и усилием на индукторе электрической машины до 11 кН с использованием новых методических и конструктивных решений, имеющего модульную конструкцию и предназначенного для генерации электрической энергии и привода механизмов в агрессивной среде в составе автономных объектов.

Таким образом, цель и задачи работы можно считать выполненными

полностью.

Результаты диссертационного исследования могут быть использованы для проектирования и создания энергоэффективных синхронных электрических машин для привода и генерации электрической энергии различными НИИ и проектными организациями.

Практическая реализация методов и алгоритмов расчета используется и может найти дальнейшее применение в следующих направлениях: производство высокоэффективных СЭДПМ для привода станков-качалок нефти, разработка погружных линейных электрических для привода плунжерных насосов в малодебитных скважинах; производство энергоэффективных электроприводов с улучшенными массо-габаритными характеристиками; производство синхронных генераторов с постоянными магнитами для альтернативных источников электроэнергии.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

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

1. Сафин, А.Р. Выбор рациональных схем управления тяговым электроприводом трамвая на основе разработки имитационной модели/ А.Р. Сафин// Электротехника. – 2013. – № 1. – С. 57.

2. Сафин, А.Р. Разработка метода проектирования линейных электрических машин возвратно-поступательного действия на основе топологической оптимизации / А. Р. Сафин, Р. Р. Хуснутдинов, А. М. Копылов, В. В. Максимов, А. Н. Цветков, Р. Р. Гибадуллин // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2017. – № 5. – С. 34.

3. Сафин, А.Р., Обоснование рациональной модели тележки трамвая на основе параллельного моделирования в среде Matlab/Simulink и CAD, CAE - системе Catia V5/ А.Р. Сафин, Р.Ш. Мисбахов, В.М. Гуреев // Электроника и электрооборудование транспорта. –2015. – № 5-6. – С. 28.

4. Сафин, А.Р. Испытательный стенд с программно-аппаратным комплексом для исследования электрической машины возвратно-поступательного действия / Р. Р. Гибадуллин, А. Н. Цветков, А. Р. Сафин, А. М. Копылов, И. В. Ившин // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2016. – № 3. – С. 105.

5. Сафин, А.Р. Определение предельных эффективных конструктивных параметров и технических характеристик обратимой электрической машины

возвратно-поступательного действия / А. М. Копылов, Р. Р. Гибадуллин, И. В. Ившин, А. Р. Сафин, Р. Ш. Мисбахов // Энергетика Татарстана. – 2016. – № 1(41). – С. 75.

6. Сафин, А.Р. Обоснование рациональной схемы управления тяговым электроприводом трамвая на основе разработки имитационной модели / А.Р. Сафин, Р.Ш. Мисбахов, В.М. Гуреев // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2014. – № 3. – С. 19.

7. Сафин, А. Р. Выбор и оптимизация конструктивных параметров обратимой электрической машины возвратно-поступательного движения /А.Р. Сафин, И. В. Ившин, А.М. Копылов, Е.И. Грачева, А.Н. Цветков // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2017. – № 3. – С. 10.

8. Сафин, А.Р. Разработка электрической машины возвратно-поступательного действия модульного типа / А. М. Копылов, А. Р. Сафин, Р. Р. Гибадуллин, Л.В. Долманюк, А. Н. Цветков // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2016. – № 9-10. – С. 126.

9. Сафин, А.Р. 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.–№ 7–8. – С. 107.

10. Сафин, А.Р. Анализ развития электроприводов для станков-качалок нефти по результатам патентного поиска/ И.В. Ившин, А.Р. Сафин, Т.И. Петров, А.Н. Цветков, В.Ю. Корнилов, А.И. Мухаметшин // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. –2019.–№ 5. – С. 3.

11. Сафин, А.Р. Разработка математической модели автономного источника электроснабжения с свободно-поршневым двигателем на базе синхронной электрической машины возвратно-поступательного действия с постоянными магнитами / А.Р. Сафин, И.В. Ившин, Т.И. Петров, Е.И. Грачева // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. –2019.–№ 6. – С. 4.

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

12. Сафин, А.Р. Разработка рациональной структуры тягового электропривода трамвая в среде моделирования электроэнергетических объектов программы *Matlab*/ А.Р. Сафин, Р.Ш. Мисбахов, В.М. Гуреев // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2015. – № 2. –С. 111.

13. Сафин, А.Р. 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.

14. 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.

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

15. Safin, A. R. Assessment, calculation and choice of design data for reversible reciprocating electric machine / A.M. Kopylov, I.V. Ivshin, A.R. Safin, R. Sh. Misbakhov, R. R. Gibadullin // International Journal of Applied Engineering Research. – 2015. – № 10. – P. 31449.

16. Safin, A. R. Optimization of reciprocating linear generator parameters / A. P. Reshetnikov, I. V. Ivshin, N. V. Denisova, A. R. Safin, R. Sh. Misbakhov, A. M. Kopylov // International Journal of Applied Engineering Research. – 2015. – № 10. – P. 31403.

17. Safin, A.R. Selection and justification of design parameters for reversible reciprocating electric machine / A.R. Safin, I.V. Ivshin, A.M. Kopylov, R. Sh. Misbakhov, A.N. Tsvetkov // International Journal of Applied Engineering Research.– 2015. – № 10. – P. 31427.

18. Safin, A.R. Numerical Modeling of Dynamic Processes of the reciprocating reversible Electrical Machine /I.V. Ivshin, A. M. Kopylov, A.R. Safin // Applied Mechanics and Materials: Trans Tech Publications, Switzerland. – 2015.– №. 792. – P. 134.

19. Safin, A.R Controlled rectifier simulation model development for reversible reciprocating electrical machine/A.R.Safin , I.V. Ivshin, R.Sh. Misbakhov, A.N. Tsvetkov, N.V. Denisova // International Journal Of Pharmacy & Technology. –2016. – №.8 – P. 14059.

20. Safin, A.R. Titanium chemical nature features which determine its most important performance properties in linear engine-generator/ R.O. Sirotkin, O.S. Sirotkin, I.V. Ivshin, A.R. Safin, A.N. Tsvetkov , L.V. Dolomanyuk // Journal of Engineering and Applied Sciences. –2016. – №.11– P. 9664.

21. Safin, A.R. Hardware-software system test bench for studies of a reciprocating

electrical machine/ Tsvetkov A.N., Safin A.R., Gibadullin R.R.// 2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM . – 2016. – P. 7911493.

22. Safin, A.R. The Prospects of Using a Synchronous Machine with Permanent Magnets in the Oil Industry/ T.I. Petrov, A.R. Safin, I.V. Ivshin, A.N. Tsvetkov, V.Yu Kornilov // 2018 XIV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE). – 2018. – P. 336.

23. Safin, A.R. The Method Topological Optimization for Design Linear Electric Machines / A. R. Safin, R. Khusnutdinov, A. M. Kopylov // 2019 International Science and Technology Conference "EastConf", Vladivostok, Russia. – 2019. – P.46.

24. Safin, A. R. Control station based on synchronous motors/ T.I. Petrov, A.R. Safin, I.V. Ivshin, L.V. Dolomanyuk, M.F. Nizamiev// Russia International Scientific and Practical Conference: Water Power Energy Forum 2018. – 2019. –P. 1561.

25. Safin, A. R. Adaptive Control System of the Pumping Unit / A.N. Tsvetkov, I.V. Ivshin, T.I. Petrov, R.Sh. Misbakhov, V.Yu. Kornilov// International Journal of Engineering and Advanced Technology. –2019. – №.8– P. 289.

Монографии

26. Сафин, А.Р. Новые технологии, материалы и оборудование в энергетике: монография. Цифровые технологии, возобновляемые источники и малая энергетика: монография / И.В. Ившин, А.Р. Сафин, А.Н. Цветков, Н.В. Денисова, А.Н. Копылов, Р.Р. Гибадуллин; под общ. ред. Э.Ю. Абдуллазянова, Э.В. Шамсутдинова. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2018. – В 3 т. Т. I. – 424 с.

Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ

27. Свидетельство № 2015663605 Рос. Федерация. Программный комплекс для моделирования электрической машины возвратно-поступательного движения / А. Р. Сафин, И. В. Ившин, Р. Ш. Мисбахов, А. Н. Цветков, А. М. Копылов, Р. Р. Гибадуллин. – № 2015619478; заявл. 07.10.2015; опубл. 20.02.2016.

28. Свидетельство № 2015615063 Рос. Федерация. Программа оптимизации конструктивных размеров статора и индуктора электрической машины возвратно-поступательного действия/ А.Р. Сафин, И.В. Ившин, Н.В. Денисова, А.Н. Цветков, А.М. Копылов. - № 2015615063; заявл. 17.03.2015; опубл. 20.02.2016.

29.Свидетельство № 2016611030 Рос. Федерация. Программа оптимизации конструктивных размеров паза и количества витков обмоток статора электрической

машины возвратно-поступательного движения/ А.М. Копылов, Р. Р. Гибадуллин, И.В. Ившин, А.Р. Сафин, Р.Ш. Мисбахов, А.Н. Цветков, А.К. Мезиков, Л.В. Долманюк, В.В. Максимов. - № 2016611030; заявл.08.12.2015; опубл. 25.01.2016.

30. Свидетельство № 2016661811 Рос. Федерация. Программа управления стендом для испытания обратимых электрических машин возвратно-поступательного действия / Р.Р. Гибадуллин, А.Н. Цветков, И.В. Ившин, А.М. Копылов, А.Р. Сафин. - № 2016661811; заявл.08.12.2015; опубл. 25.01.2016.

31. Свидетельство № 2016663776 Рос. Федерация. Программа оптимизации конструктивных размеров индуктора электрической машины возвратно-поступательного движения / А.М. Копылов, А.Р. Сафин, И.В. Ившин, Р.Р. Гибадуллин. - № 2016663776; заявл.08.12.2015; опубл. 25.01.2016.

32. Свидетельство № 2018613530 Рос. Федерация. Программа топологической оптимизации электрических машин на основе генетического алгоритма / А.М. Копылов, А.Р. Сафин, Р.Р. Хуснутдинов, В.В. Максимов, А.Н. Цветков, Р.Р. Гибадуллин. - № 2018613530; заявл.13.11.2017; опубл. 16.03.2018.

33. 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.

Патенты на полезную модель

34. Пат. 159449 Рос. Федерация: МПК H02P25/06, H02P6/16. Устройство управления обратимой электрической машиной возвратно-поступательного действия. / А. М. Копылов, Р. Р. Гибадуллин, И. В. Ившин, Ш. И. Вафин, А. Р. Сафин, В. В., Максимов, Л. В. Долманюк, А. Н. Цветков, М. Ф. Низамиев. // Бюл. «Изобретения. Полезные модели». – 2016. – № 4. – 2 с.

35. Пат. 161647 Рос. Федерация: МПК H02P25/066, H02P9/06, H02K29/06. Устройство управления обратимой электрической машиной возвратно-поступательного действия. / А. М. Копылов, Р. Р. Гибадуллин, И. В. Ившин, Ш. И. Вафин, А. Р. Сафин, В. В., Максимов, Л. В. Долманюк, А. Н. Цветков, М. Ф. Низамиев. // Бюл. «Изобретения. Полезные модели». – 2016. – № 12. – 2 с. и др.

Подписано в печать 24.12.2019. Формат 60x84 1/16.
Бумага офсетная. Печать ризографическая.
Усл. печ. л. 2,5. Тираж 100. Заказ № 2412/1

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
