

На правах рукописи



Татевосян Андрей Александрович

**МЕТОДЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И РАЗРАБОТКА ТИХОХОДНЫХ
СИНХРОННЫХ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН В СОСТАВЕ
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ**

05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Омск – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Омский государственный технический университет» на кафедре «Электрическая техника»

Научный консультант: доктор технических наук, профессор
Андреева Елена Григорьевна

Официальные оппоненты: **Коняев Андрей Юрьевич**
доктор технических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», профессор кафедры «Электротехника»

Нейман Владимир Юрьевич
доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет», заведующий кафедрой «Теоретические основы электротехники»

Саттаров Роберт Радикович
доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», профессор кафедры «Электромеханика»

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

Защита состоится 24 мая 2022 г. в 11 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.082.06, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Казанский государственный энергетический университет», по адресу: 420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51, ауд. Д-224.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с указанием контактных данных, заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу: 420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51, ФГБОУ ВО «КГЭУ», ученому секретарю диссертационного совета Д 212.082.06, тел./факс (843)519-42-55.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВО «КГЭУ» и на официальном сайте ФГБОУ ВО «КГЭУ» <https://kgeu.ru/Diss/Dissertant/273?idDiss=129>

Автореферат разослан «___» _____ 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Ш.Г. Зиганшин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности.

Прогресс в области создания магнитотвердых материалов на основе редкоземельных металлов (РЗМ) и сплавов, расширение ассортимента и снижение стоимости выпускаемой продукции определяют тенденцию развития тихоходных синхронных магнитоэлектрических машин с постоянными магнитами (СМПМ) в составе высокотехнологичных электротехнических комплексов (ВЭТК). Отсутствие затрат энергии на возбуждение магнитного потока, курс на достижение максимальных удельных показателей работы при общем многообразии практических задач делают использование СМПМ в качестве электромеханических преобразователей энергии в составе ВЭТК экономически привлекательными. Вместе с тем, наличие в электротехнических комплексах механизмов передачи и преобразования движения создает труднопреодолимый барьер на пути повышения их энергоэффективности и надежности. Исключение механического звена преобразования движения в электротехническом комплексе определяет решение сложной научно-технической проблемы создания и совершенствования конструкций электрических машин, включая тихоходные СМПМ, применяемые в автономных ветроэнергетических установках (ВЭУ) малой и средней мощности, линейных магнитоэлектрических приводах (ЛМЭП) поршневых компрессоров и насосов, амортизаторах и демпферах, установках генерирования электроэнергии и электроприводах специального назначения. Применительно к тихоходным конструкциям СМПМ актуальность темы исследований заключается в разработке методологических основ их проектирования, оптимизации конструктивных параметров, достижении максимума КПД электромеханического преобразования энергии, высоких значений удельной выходной мощности генерирования электроэнергии и электропривода, снижении массогабаритных показателей (МГП). Вопросы моделирования электрических, магнитных, тепловых и механических процессов в электрических машинах обозначены основными темами на сессии СИГРЭ 2020 на заседании исследовательского комитета А1 «Вращающиеся электрические машины».

Тихоходные СМПМ являются сложным для исследования объектом, который состоит из электрической, электромагнитной, механической и тепловой подсистем, в которых происходят процессы различной физической природы. Причем особенностью тепловой подсистемы является то обстоятельство, что она имеет свою компоненту в каждой из перечисленных подсистем. Математические модели отдельных подсистем СМПМ объединяются в полную математическую модель и связываются между собой линейными и нелинейными уравнениями, начальными и граничными условиями. Выбор лучшего варианта решения конструктивной схемы тихоходных СМПМ с учетом особенностей рабочего процесса на предварительной стадии проектирования является первоочередной задачей, которая решается с применением эвристических методов поиска и зависит от накопленного опыта разработчиков-исследователей. На этом этапе определяются конструктивные параметры и обмоточные данные СМПМ, удовлетворяющие используемым критериям оптимальности. На стадии поверочных расчетов уточняется геометрия магнитной системы и определяются энергетические показатели работы с применением численных методов расчета математической модели тихоходной СМПМ.

Исследованиям СМПМ посвящено большое число научных работ в нашей стране и за рубежом. Большой вклад в развитие теории, методов расчета, проектирования и разработки синхронных машин внесли работы Э. Арнольда, В. А. Балагурова, В.Я. Беспалова, Д. А. Бута, В.Е. Вавилова, Ф. Р. Исмагилова, Ю. З. Ковалева, И. П. Копылова, В. С. Кривцова, П.А. Курбатова, И.Е. Овчинникова, А. М. Олейникова, Н.П. Ряшенцева, А.Р. Сафина, М. Я. Хитерера, И.В. Черных, А.Ф. Шевченко, R. Frank, J. Ribeiro, M. Walther и многие другие. Задачам расчета электромагнитного поля, применению метода конечных элементов и методам оптимизации посвящены работы С.А. Ганджи, А.Б. Захаренко,

Н.В. Коровкина, О. В. Крылова, О.С. Попеля, И. Е. Тамма, О.В. Тозони, К. Шимони и других ученых.

Несмотря на достигнутые успехи в области создания и совершенствования тихоходных СМППМ, оптимизационные расчеты конструкций тихоходных СМППМ, в которых определение геометрии магнитной системы и обмоточных данных связано со снижением массогабаритных показателей, требуют своего дальнейшего рассмотрения.

Цель работы – создание и совершенствование тихоходных синхронных магнитоэлектрических машин вращательного и возвратно-поступательного движения в составе электротехнических комплексов на основе разработки и реализации методов их проектирования.

Для достижения цели поставлены и решены следующие **основные научные задачи**:

1. Разработать методы, подходы и алгоритмы оптимального проектирования энергоэффективных тихоходных СМППМ вращательного и возвратно-поступательного движения в составе ВЭТК генерирования электрической энергии и электропривода на основе анализа процессов энергопреобразования тихоходных СМППМ в составе электротехнического комплекса с учетом особенностей рабочего процесса и внешних воздействующих факторов.

2. Выбрать критерии оптимальности, построить целевую функцию, используемую для решения задачи оптимизации конструкции тихоходных СМППМ, и установить в аналитическом виде взаимосвязь конструктивных параметров с энергетическими показателями работы тихоходных СМППМ, обеспечивающих максимально возможный КПД электромеханического преобразователя при минимуме массы используемых активных материалов.

3. Построить 2D и 3D математические модели тихоходных СМППМ на основе уравнений магнитного поля с использованием рекуррентных соотношений для определения функции магнитного потока и векторного магнитного потенциала в узлах регулярной триангуляционной сети, полученных на основе метода конечных элементов.

4. Разработать новые конструктивные схемы тихоходных СМППМ в составе ВЭТК и исследовать влияние конструктивных параметров на энергетические показатели работы в нормальном и аварийном режимах с учетом особенностей рабочего процесса.

5. Разработать алгоритмы и программы оптимизации новых конструкций тихоходных СМППМ в составе ВЭТК, удовлетворяющих выбранному критерию оптимальности (максимуму КПД, максимуму тягового усилия) в соответствии с техническим заданием на проектирование.

6. Выполнить исследование пусковых и эксплуатационных характеристик тихоходных СМППМ в составе ВЭУ с системой управления, основанной на применении алгоритмов нечеткой логики, а также ЛМЭП длинноходового одноступенчатого поршневого компрессора и аппаратно-программного измерительного комплекса для испытания вязкоупругих свойств опытных образцов эластомеров.

7. Разработать рекомендации по оптимальному проектированию энергоэффективных тихоходных СМППМ в составе электротехнических комплексов генерирования электроэнергии и линейного электропривода.

Область исследования. Развитие научных основ проектирования и создания энергоэффективных тихоходных СМППМ в электротехнических комплексах генерирования электроэнергии и электропривода конкретного назначения.

Объект исследования. Тихоходные синхронные машины с постоянными магнитами в составе электротехнических комплексов в модельном ряду ВЭУ мощностью до 30 кВт, ЛМЭП длинноходовых поршневых компрессоров с возможностью сжатия газа до давления 2 МПа одной ступенью, испытательных стендов для исследования вязкоупругих свойств опытных образцов эластомеров.

Предмет исследования. Электромеханические, электромагнитные и тепловые процессы разработанных конструкций тихоходных СМППМ вращательного и возвратно-поступательного движения в составе ВЭТК конкретного назначения.

Методология и методы исследования. Для решения поставленных задач использовались методы теории электромеханических преобразователей энергии, теоретической электротехники, математического моделирования, методы оптимизации, методы теории подобия при анализе электрических цепей с нелинейными параметрами, вариационного, дифференциального и интегрального исчисления, матричной алгебры, методы оптимизации, методы аппроксимации функций степенными полиномами и сглаживающими кубическими полиномами (B-сплайнами), численные проекционно-сеточные методы на основе конечно-элементного анализа, методы решения систем линейных алгебраических и дифференциальных уравнений, методы математического планирования эксперимента, методы построения нейронных сетей. Экспериментальные исследования проведены на разработанных макетах, опытных образцах СМПМ в составе ВЭУ и ЛМЭП. Для расчета магнитных полей применялись комплексы программ ANSYS, ELCUT, а также разработанные алгоритмы, реализованные в среде Borland Delphi 7.0 и Java. Решение задач динамики реализовано методами и средствами структурного моделирования в MatLab/Simulink.

Научная новизна работы состоит в следующем.

1. Предложен метод создания энергоэффективных тихоходных синхронных магнитоэлектрических машин с постоянными магнитами в составе высокотехнологичных электротехнических комплексов генерирования электроэнергии и электропривода, отличающийся от известных тем, что совместное решение уравнений, описывающих состояние электромагнитной и механической частей СМПМ, основывается на использовании итеративного процесса, уточняющего заданный в качестве начального приближения закон движения индуктора.

2. Предложен метод оптимального проектирования тихоходных СМПМ, отличающийся от известных тем, что дана математическая постановка задачи оптимизации и получено ее решение, устанавливающее взаимосвязь конструктивных параметров с энергетическими показателями работы электрической машины, доставляющая максимум целевой функции (коэффициент полезного действия, электромагнитное усилие) в зависимости от закона движения подвижной части и условия минимума массы активных материалов, что позволяет на стадии поверочных расчетов уточнить пусковые и эксплуатационные характеристики электрической машины, сократить временные и материальные затраты на проектирование.

3. Предложен метод оптимизации конструкций магнитных систем тихоходных СМПМ в составе ВЭУ и ЛМЭП, отличающийся от известных тем, что на основе выбранного критерия оптимальности получены соотношения, обеспечивающие максимум удельной полезной мощности, исходя из заданных технических условий на проектирование.

4. Предложен метод формирования численных проекционно-сеточных трехмерных моделей магнитного поля тихоходных СМПМ, отличающийся от известных методов возможностью использования «регулярного элемента», для которого получены рекуррентные соотношения, позволяющие максимально автоматизировать процесс формирования глобальной системы линейных алгебраических уравнений в методе конечных элементов, сократив тем самым временные и материальные затраты.

5. Разработаны методики, алгоритмы оптимального проектирования предложенных конструктивных схем тихоходных СМПМ в составе электротехнического комплекса на заданный закон движения подвижной части, включающие тепловые расчеты и отличающиеся от известных учетом особенностей рабочего процесса.

6. Предложена методика идентификации опытных образцов постоянных магнитов для конструирования тихоходных СМПМ в составе электротехнического комплекса, отличающаяся от известных тем, что в ее основе используется идентификация по критерию одинаковой объемной намагниченности.

7. Определен новый принцип формирования системой управления закона движения подвижной части линейной тихоходной СМПМ в двигательном режиме в составе

электротехнического комплекса длинноходового одноступенчатого поршневого компрессора, отличающийся от известных тем, что при удовлетворении требования к обеспечению угла сдвига фаз между законом движения подвижной части и электромагнитной силы обеспечивается максимум КПД электромеханического преобразователя.

8. Предложен способ стабилизации выходного напряжения ВЭУ на основе тихоходных СГПМ модульного типа, который отличается от известных тем, что позволяет обеспечить системой управления на базе нейронной сети стабилизацию напряжения в зависимости от скорости ветра и коэффициента загрузки.

9. Предложен новый способ повышения выходного напряжения СГПМ с общим цилиндрическим магнитопроводом в составе ВЭУ, отличающийся от известных тем, что повышение выходного напряжения достигается применением новой конструктивной схемы магнитной системы ротора и магнитопровода статора, позволяющей реализовать последовательное соединение выпрямительных блоков к каждой фазе СГПМ с уменьшением переменной составляющей выходного напряжения.

Теоретическая и практическая значимость.

Полученные в диссертационной работе результаты представляют собой новые научно обоснованные технические положения, рекомендации, методики, модели и алгоритмы расчета, внедрение которых вносит значительный вклад в область разработки тихоходных СМПМ в составе электротехнических комплексов конкретного назначения и режима работы, а именно:

- на основе единого подхода разработан комплекс математических моделей реализованных в пакетах программ ANSYS, ELCUT, Matlab вариантов конструктивных схем тихоходных синхронных магнитоэлектрических машин с постоянными магнитами в составе электротехнических комплексов, обеспечивающих широкие возможности для решения задач анализа и синтеза, внедрение которых в практику проектирования позволит сократить сроки выполнения проектных работ и повысить их качество;

- предложен метод формирования численного проекционно-сеточного алгоритма на регулярной триангуляционной сети для расчетов осесимметричных и трехмерных полевых моделей тихоходных синхронных магнитоэлектрических машин в цилиндрической (2D) и прямоугольной (3D) системах координат, используя выведенные рекуррентные соотношения для плоского и объемного «регулярного элемента» численного конечно-элементного анализа, что позволяет максимально автоматизировать процесс формирования глобальной системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) метода конечных элементов, минуя этап построения элементных систем уравнений;

- разработаны инженерные методики оптимального проектирования магнитных систем тихоходных синхронных магнитоэлектрических машин по заданным выходным параметрам в соответствии с выбранным критерием оптимальности;

- разработаны инженерные методики расчета выходных параметров рабочего процесса тихоходных СМПМ в составе электротехнических комплексов конкретного назначения и режима работы при заданном законе движения ротора, учитывающие процессы теплопередачи между элементами магнитной системы;

- разработаны испытательные стенды для экспериментального исследования опытных образцов тихоходных СМПМ в составе электротехнических комплексов и идентификации постоянных магнитов из сплава NdFeB в опытной партии по критерию одинаковой объемной намагниченности;

- предложены принципы технической реализации систем управления электротехнических комплексов ВЭУ и ЛМЭП, позволяющие повысить энергоэффективность СМПМ;

- выработаны рекомендации по проектированию тихоходных СГПМ в модельном ряду ВЭУ мощностью до 30 кВт, линейных магнитоэлектрических приводов тихоходных длинноходовых поршневых компрессоров с возможностью сжатия газа до давления

2 МПа и испытательных стендов, предназначенных для исследования вязкоупругих свойств опытных образцов эластомеров.

Реализация результатов работы. Основные результаты диссертационной работы реализованы в виде разработок макетных образцов, методик и компьютерных моделей, выполненных автором. Выполнение диссертационной работы осуществлялось в соответствии с планами и заданиями госбюджетных НИР, в частности, в рамках реализуемой в различные годы программы стратегического развития ФГБОУ ВО «Омский государственный технический университет», определяющих формирование научно-технического задела по приоритетным направлениям развития науки.

Темы НИР:

- Исследование эффективных низкооборотных синхронных магнитоэлектрических генераторов (№ гос. регистрации №115072010084 от 20.07.2015);

- Расчет и оптимизация магнитной системы линейного магнитоэлектрического двигателя на заданный закон движения якоря (№ гос. регистрации 01201464564 от 18.06.2014);

- Исследование способов технической реализации эффективных низкооборотных генераторов малой энергетики с использованием возобновляемых источников энергии (№ гос. регистрации №012013769 от 19.12.2013);

- Математическое моделирование динамических процессов оптимальных конструкций магнитоэлектрических приводов для исследования упруго-пластичных свойств эластомеров (№ гос. регистрации А03-3.14-389 от 27.06.2004).

Материалы диссертации нашли применение в учебном процессе при разработке лекционных курсов «Математическое моделирование электротехнических устройств», «Методы идентификации объектов электротехнических комплексов и систем», выполнении курсовых и выпускных квалификационных работ для студентов направлений 13.03.02 и 13.04.02 - Электроэнергетика и электротехника ФГБОУ ВО «Омский государственный технический университет».

Основные научные положения, полученные автором и выносимые на защиту. В работе присутствуют результаты, соответствующие трем областям исследования паспорта специальности 05.09.01 – «Электромеханика и электрические аппараты» по техническим наукам: 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.

На защиту выносятся следующие научные положения.

1. Метод создания энергоэффективных тихоходных синхронных магнитоэлектрических машин с постоянными магнитами в составе электротехнических комплексов генерирования электроэнергии и линейного электропривода с применением совместного решения уравнений, описывающих состояние электромагнитной и механической частей СМППМ, основанный на использовании итеративного процесса, уточняющего заданный в качестве начального приближения закон движения индуктора.

2. Метод оптимального проектирования тихоходных СМППМ, основанный на математической постановке задачи оптимизации и ее решении, которое устанавливает взаимосвязь конструктивных параметров с энергетическими показателями работы электрической машины, доставляющая максимум целевой функции (коэффициента полезного действия, электромагнитного усилия) в зависимости от закона движения подвижной части.

3. Метод оптимизации конструкций магнитных систем тихоходных СМППМ в составе ВЭУ и ЛМЭП, основанный на использовании полученных соотношений, обеспечивающих

максимум удельной полезной мощности исходя из заданных технических условий на проектирование.

4. Метод формирования численных проекционно-сеточных трехмерных моделей магнитного поля тихоходных СМППМ с возможностью использования трехмерного «регулярного элемента», для которого получены рекуррентные соотношения, позволяющие максимально автоматизировать процесс формирования глобальной системы линейных алгебраических уравнений в методе конечных элементов.

5. Методики и алгоритмы оптимального проектирования предложенных конструктивных схем тихоходных СМППМ в составе электротехнических комплексов на заданный закон движения подвижной части, учитывающий особенности рабочего процесса и теплового режима.

6. Методика идентификации опытных образцов постоянных магнитов по критерию одинаковой объемной намагниченности для конструирования тихоходных СМППМ в составе электротехнических комплексов.

7. Принцип формирования системой управления закона движения подвижной части линейной тихоходной СМППМ в двигательном режиме в составе привода длинноходового одноступенчатого поршневого компрессора, основанный на удовлетворении требования к обеспечению рассчитанного угла сдвига фаз между законом движения подвижной части и электромагнитной силой, при котором обеспечивается максимум КПД электромеханического преобразователя.

8. Способ стабилизации выходного напряжения тихоходного СГППМ модульного типа в составе ВЭУ системой управления на базе нейронной сети в зависимости от скорости ветра и коэффициента загрузки.

9. Новый способ повышения выходного напряжения СГППМ с общим цилиндрическим магнитопроводом в составе ВЭУ, заключающийся в том, что повышение выходного напряжения достигается применением новой конструктивной схемы магнитной системы ротора и магнитопровода статора, что позволяет реализовать последовательное соединение выпрямительных блоков к каждой фазе СГППМ с уменьшением переменной составляющей выходного напряжения.

Обоснованность и достоверность результатов. Достоверность результатов определяется корректностью постановок задач, обоснованностью принятых допущений и адекватностью используемых при исследованиях математических моделей и методов, а также сопоставлением с данными исследований других авторов, качественным совпадением и согласованностью результатов расчета и экспериментальных данных, апробацией предварительных и окончательных результатов диссертационной работы.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на: Международной конференции «Автоматизированный электропривод» (АЭП, ICEPDS), г. Санкт-Петербург, 2020 г.; Международных конференциях «Федоровские чтения», г. Москва, 2019-2020 г.г.; Международных научно-технических конференциях «Динамка систем, механизмов и машин», Омск, 2004-2020 г.г.; Всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации», Новосибирск, 2003 г.; Международной конференции «Зимняя школа по механике сплошных сред», Пермь, 2005 г.; Всероссийских научно-практических конференциях «Россия молодая: передовые технологии в промышленность», Омск, 2008-2018 г.г.; IV Всероссийской научно-практической конференции «Автоматизированный электропривод и промышленная электроника», Новокузнецк, 2010 г.; XV, XVI Международных научных конференциях «Решетневские чтения», Красноярск, 2011-2012 г.г.; Международной научно-практической конференции «Информационные ресурсы в образовании», Нижневартовск, 2013 г.; III Всероссийской научно-практической конференции «Культура, наука, образование: проблемы и перспективы», Нижневартовск, 2014 г.; International Siberian conference Control and Communications, Omsk, Moscow, Astana 2015-2017; International Scientific and Technical Conference "Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines": conference proceeding, Omsk,

2015-2018; VII Международной научной конференции молодых ученых, Новосибирск, 2015 г.; VII Всероссийской научно-технической конференции «Энергетика: состояние, проблемы, перспективны», Оренбург, 2014 г.; VI, VII Международных научно-технических конференциях «Техника и технологии нефтехимического и нефтегазового производства», Омск, 2016-2017 г.г.; Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM 2016): 2nd International conference, Chelyabinsk, 2016; Международных научно-практических конференциях «Актуальные вопросы энергетики» Омск, 2016-2019 г.г.; VIII Международной молодежной научно-технической конференции «Энергетика глазами молодежи», Самара, 2017 г.; XIV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering, APEIE, Novosibirsk, 2018; Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies, MWENT 2018 – Proceedings, Moscow, 2018; VII Региональной научно-практической конференции с международным участием «Актуальные проблемы современной науки», Омск, 2018 г.; II, III Международных научно-технических конференциях «Проблемы машиноведения», Омск, Journal of Physics: Conference Series, 2018-2019 г.г.

Публикации. Основное содержание диссертации изложено в 67 печатных работах, из них 12 статей в журналах и материалах конференций, входящих в международные базы SCOPUS/Web of Science, 17 статей в журналах, входящих в перечень ВАК Минобрнауки России (в том числе 13 статей в журналах, входящих в перечень ВАК Минобрнауки России по специальности диссертации), 3 монографии, 13 патентов на изобретения, 7 свидетельств о регистрации программы для ЭВМ, 2 патента на полезную модель и 13 публикации в материалах всероссийских и международных научных конференций.

Работа выполнена на кафедре «Электрическая техника» Омского государственного технического университета при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в соответствии с Программой развития университета ФГБОУ ВО «ОмГТУ».

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, изложенных на 317 страницах машинописного текста, содержит 114 рисунков, 16 таблиц, списка литературы, включающего 219 наименований, и приложения.

В **приложении** приведены акты внедрения результатов диссертационной работы и основные патенты и свидетельства о регистрации программ для ЭВМ.

Научные результаты диссертации проверялись, корректировались и внедрялись в АО НТК «Криогенная техника», г. Омск, ООО «Тор», г. Санкт-Петербург; ПАО «Россети» АО «Янтарь Энерго» г. Калининград.

В НТК «Криогенная техника» внедрение осуществлялось путем:

- передачи методик проектирования оптимальных конструкций тихоходных линейных магнитоэлектрических двигателей для привода поршневого компрессора по критерию максимума КПД (минимума удельных относительных потерь в элементах электропривода);
- расчета линейного магнитоэлектрического двигателя для привода поршневого компрессора на развиваемое тяговое усилие 100 Н и 3000 Н по предложенным методикам оптимального проектирования.

В ООО «ТОР» внедрение осуществлялось путем:

- передачи алгоритмов расчета осесимметричных и трехмерных магнитных полей на основе «регулярного элемента» в части уравнений задачи магнитостатики для двумерного и трехмерного анализа относительно векторного потенциала магнитного поля для треугольного и тетраэдрического конечного элемента первого порядка;
- успешной проверки предложенных уравнений и использованы в программе ELCUT в качестве элементных уравнений магнитостатики в осесимметричном анализе, записанных относительно функции магнитного потока;
- планирования использования уравнений, полученных на основе предложенных алгоритмов, к применению в разрабатываемой версии ELCUT для трехмерной задачи магнитостатики.

В ПАО «Россети» АО «Янтарь Энерго» внедрение осуществлялось путем:

- передачи методик оптимального проектирования тихоходных синхронных магнитоэлектрических генераторов в составе ветроэнергетических установок по критерию максимума КПД и максимума удельной полезной мощности;
- проведения расчета ветроэнергетической установки по предложенным методикам оптимального проектирования на основе синхронных генераторов с общим цилиндрическим магнитопроводом и модульного типа с независимыми магнитопроводами.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и основные задачи работы, указаны методы исследования, изложены научная новизна и практическая ценность.

В первой главе рассматривается область применения и особенности рабочих режимов тихоходных синхронных магнитоэлектрических машин (СМПМ) в составе высокотехнологичных электротехнических комплексов (ВЭТК). Показано, что при отсутствии передаточных и преобразовательных механизмов энергоэффективность электротехнического комплекса определяется процессами энергопреобразования в магнитной системе синхронной магнитоэлектрической машины. Раскрыто понятие «высокотехнологичного электротехнического комплекса» через общие признаки: качество, надежность, экономичность, обуславливающие требования к разрабатываемому изделию (рис. 1).

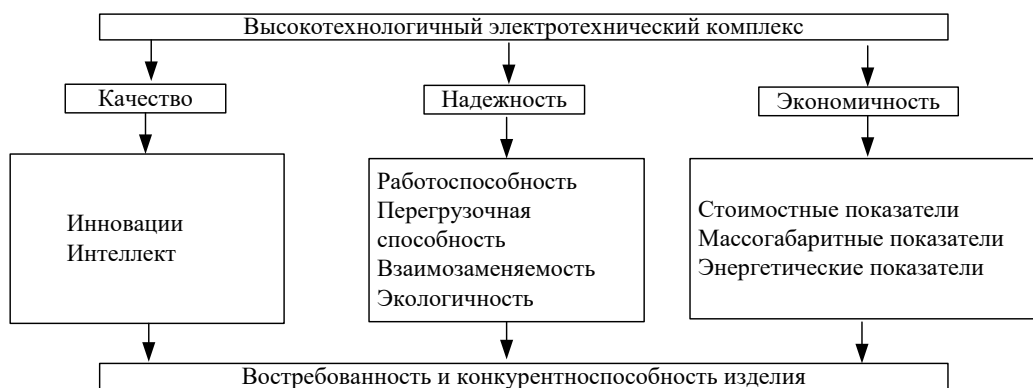


Рисунок 1. Требования к ВЭТК

В соответствии с целью диссертации приведена классификация пусковых и эксплуатационных характеристик тихоходных СМПМ в составе ВЭТК, работающих в двигательном и генераторном режиме вращательного и возвратно-поступательного движения, подлежащих улучшению в процессе проектирования и разработки. Учитывая, что современная элементная база полупроводниковых и микропроцессорных узлов в системах управления электрических преобразовательных устройств обладает высокой энергоэффективностью (малыми электрическими потерями), выходные характеристики ВЭТК в значительной степени определяются выходными характеристиками тихоходных СМПМ. В свою очередь, выходные характеристики СМПМ могут быть представлены двумя группами: пусковыми и эксплуатационными.

Классификация пусковых и эксплуатационных характеристик тихоходных СМПМ представлена на рис. 2.



Рисунок 2. Классификация пусковых и эксплуатационных характеристик тихоходных СМПМ в составе ВЭТК

В соответствии со структурой электротехнического комплекса на рис. 3 приведены компоненты ВЭТК: С – система питания, Пр – электрический преобразователь, ЭДУ – электродвигательное устройство, ИМ – исполнительный механизм, РМ – рабочая машина, УУ – устройство управления.

Для тихоходных синхронных генераторов с постоянными магнитами (СГПМ) в составе ВЭУ особенности рабочего процесса заключаются в варьировании электрической нагрузки в широком диапазоне, изменчивости скорости и силы ветра, частых бросках тока при переходных процессах, электродинамических усилиях, вызывающих вибрации и биения вала при небольших окружных скоростях ротора. ВЭТК ВЭУ включает в свой состав рабочую машину – ветроколесо, СГПМ, систему управления, аккумуляторную батарею, устройство заряда, балластные сопротивления, инвертор. Работа СГПМ в составе ВЭУ определяется характером электрической нагрузки, поэтому решение задачи оптимизации конструкции СМПМ возможно при учете параметров присоединенного к ВЭУ потребителя электрической энергии. Функциональные схемы ВЭТК ВЭУ с СГПМ модульного типа и СГПМ с общим цилиндрическим магнитопроводом приведены на рис. 3, а, б (1 – датчик скорости; 2 – измерительная система; 3 – информационная система (ИС); 4 – система управления (СИ); 5 – ветроколесо; 6 – электромеханическая система (ЭМС); 7 – выпрямительный блок; 8 – инвертор напряжения; С – сеть питания потребителя; Пр – электрический преобразователь; ИМ – исполнительный механизм; РМ – рабочая машина; УУ – устройство управления).

Проектирование тихоходного синхронного двигателя с постоянными магнитами (СДПМ) в составе ЛМЭП для испытания вязкоупругих свойств эластомеров с учетом особенностей рабочего процесса определяется механическими свойствами эластомеров и требованиями стандарта испытаний по снятию их реологических характеристик. Генерирование импульсов силы определенной частоты и интенсивности, оказывающих воздействие на опытный образец эластомера, обуславливает необходимость представления привода в виде сложной электротехнической системы, состоящей из источника питания, устройства управления, электродвигательного устройства и опытного образца эластомера, выполняющего функцию рабочей машины, испытывающей многократное циклическое нагружение.

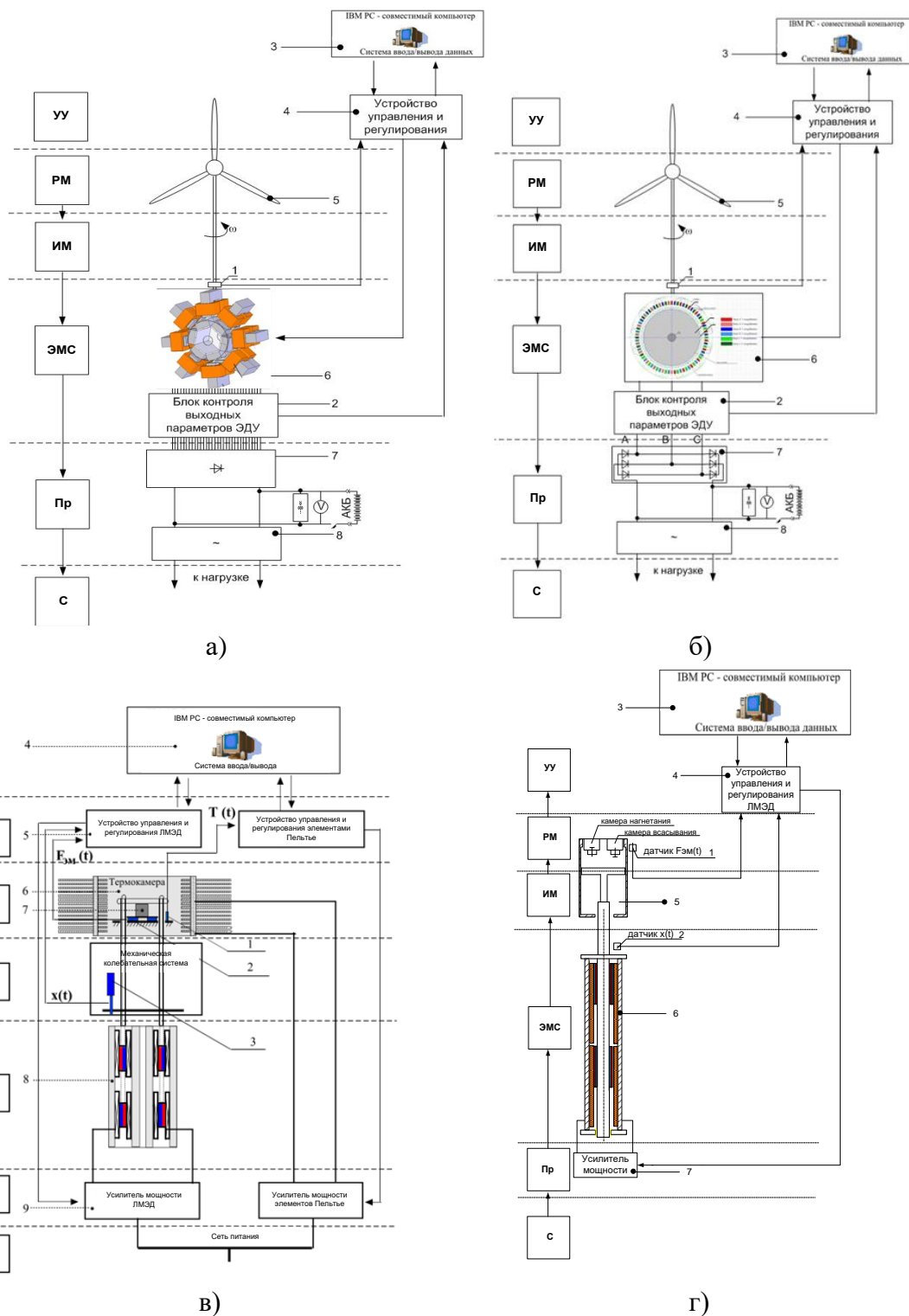


Рисунок 3. Функциональные схемы ВЭТК на основе тихоходных СМПП: а - ВЭУ на основе СГПМ модульного типа; б – ВЭУ на основе СГПМ с общим цилиндрическим магнитопроводом; в – ЛМЭП для испытания вязкоупругих свойств эластомеров; г – ЛМЭП длинноходового одноступенчатого поршневого компрессора

Особенности рабочего процесса, заключающиеся в обеспечении заданного режима нагружения опытного образца эластомера путем варьирования значения прижимного электромагнитного усилия по амплитуде, частоте и постоянной составляющей, указывают на целесообразность выбора линейного магнитоэлектрического двигателя в качестве электродвигательного устройства и на этой основе построить функциональную схему всего привода. Функциональная схема ЛМЭП для испытания вязкоупругих свойств эластомеров

приведена на рис. 3, в (1 - датчик температуры; 2 - датчик силы; 3 - датчик перемещения; 4 - информационная система (ИС); 5 - устройство управления (УУ); 6 - термостатическая система (ТС); 7 - вязкоупругая система (ВУС); 8 - электромеханическая система (ЭМС); 9 - электрическая система (ЭС); С - сеть питания; Пр - электрический преобразователь; ИМ - исполнительный механизм; РМ - рабочая машина).

Применение СМППМ возвратно-поступательного движения для привода тихоходного длинноходового одноступенчатого поршневого компрессора, являющегося альтернативой гидро- и пневмоприводу в области высоких развиваемых усилий, представляет научно-практический интерес. Прежде всего, это относится к компрессорным ступеням производительностью от 0.5 до 100 м³/мин с рабочим давлением нагнетания 2 МПа.

Особенностью поршневых длинноходовых тихоходных компрессорных агрегатов является увеличение параметра $\psi = S/D > 10$, где S - перемещение поршня, м; D - диаметр поршня, м; время цикла $N = 2 \dots 6$ с.

Особенности рабочего процесса тихоходного длинноходового одноступенчатого поршневого компрессора заключаются в учете нелинейных свойств сжимаемого газа, обусловленных влиянием его температуры в цикле нагнетания-всасывания, режимами работы клапанов, влиянием давления в ресивере. Кроме этого, высокое значение развиваемого усилия и хода якоря определяют его массу, что делает необходимым реализацию системой управления пускового режима, устанавливающего заданное колебательное движение якоря. Функциональная схема ЛМЭП приведена на рис. 3, г (1 - датчик силы; 2 - датчик перемещения; 3 - информационная система (ИС); 4 - устройство управления (УУ); 5 - пневматическая подсистема; 6 - электромеханическая система (ЭМС); 7 - электрическая система (ЭС); С - сеть питания; Пр - электрический преобразователь; ИМ - исполнительный механизм; РМ - рабочая машина).

На основании исследований, проведенных в первой главе, раскрыто понятие объекта исследования тихоходной СМППМ в составе ВЭТК. Указаны направления улучшения выходных показателей СМППМ, а также определены особенности рабочего процесса и методы исследования ВЭТК ВЭУ и ЛМЭП тихоходного одноступенчатого поршневого компрессора и электропривода по испытанию вязкоупругих свойств эластомеров.

Основные выводы данной главы позволили обоснованно сформулировать цель данной работы и поставить задачи ее реализации.

Во второй главе проведен анализ магнитных систем тихоходных СМППМ вращательного и возвратно-поступательного движения в составе ВЭУ и ЛМЭП с учетом особенностей рабочего процесса (рис. 3, а, б, в, г). Всесторонний анализ существующих критериев оптимальности и методов оптимизации применительно к работе тихоходных СМППМ в режимах генератора и двигателя позволил выбрать в качестве критерия оптимальности максимум КПД электромеханического преобразователя при использовании минимума массы активных материалов. В качестве метода оптимизации применяется вариационный метод отыскания минимума функционала P_r^* , физический смысл которого есть относительные потери, связанные с КПД зависимостью $\eta = (1 + P_r^*)^{-1}$.

Предложенная в работе методология проектирования оптимальных конструкций тихоходных СМППМ рассматривает их проектирование как сложных объектов, математические модели которых состоят из математических моделей электрической, электромагнитной, механической и тепловой подсистем, охваченных между собой линейными и нелинейными связями (рис. 4).

Начальный этап проектирования СМППМ характеризуется концепцией выбора схемных решений и зависит от интуиции и накопленного опыта разработчиков. Ошибка принятия решения на этом этапе может нивелировать все усилия, направленные на достижение конечного результата.

Допущения, принимаемые на предварительном этапе проектирования, используются для ориентировочных расчетов основных размеров магнитных систем и обмоточных данных СМПМ, а их уточнение проводится на этапе поверочных расчетов. Для решения задачи оптимизации параметров тихоходных СМПМ в генераторном и двигательном режимах приняты следующие допущения: плотность тока в активном слое якоря распределяется равномерно по всей площади ее поперечного сечения; относительная магнитная проницаемость стали магнитопровода является бесконечно большой; схема замещения



Рисунок 4. Методологическая схема проектирования оптимальных конструкций магнитных систем СМПМ

магнитной цепи машины представляется последовательной магнитной цепью, в которой ферромагнитные участки с обмотками отделены от постоянных магнитов воздушным зазором; размещение проводников обмотки якоря в пазах машины (активный слой якоря) учитывается в схеме замещения магнитной цепи эквивалентным воздушным зазором.

В разработанной методологии математическая постановка и решение задачи оптимизации тихоходных СМПМ предусматривает использование итеративного процесса с циклической релаксацией, известный как метод Шварца. Согласно методу необходимо задать начальное изменение координаты $q_0(t)$ во времени, в качестве которой для СМПМ вращательного движения используется угловая частота $\omega_0(t)$, а для СМПМ возвратно-поступательного движения - линейное перемещение индуктора $x_0(t)$. Это позволяет найти решение уравнений динамики электрической части СМПМ независимо от процессов в механической части. В результате получим начальное приближение электромагнитного момента $M_0(t)$ и соответственно электромагнитного усилия $F_0(t)$ во времени. Из решения уравнений движения механической части находим первое, в общем случае отличное от начального, приближение координаты $q_1(t)$. Близость принятого приближения $q_0(t)$ к полученному на первом шаге итерации $q_1(t)$ определяется оценкой по

$$\text{среднеквадратичному отклонению } \varepsilon_0(t) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (q_1 - q_0)^2 dt} .$$

Процедуру можно повторить и закончить процесс приближений, когда величина ε будет меньше заданного значения. Наличие устойчивого периодического режима СМПМ определяет сходимость итеративного процесса с циклической релаксацией, при этом число итераций зависит насколько к нужному решению взято начальное приближение. На предварительном этапе задача оптимизации конструкций тихоходных СМПМ рассматривается как задача оптимального управления, которая заключается в отыскании оптимальных законов изменения во времени тока и напряжения $i(t)$, $u(t)$ на зажимах электрической машины, которые обеспечивают периодический режим работы электромеханического преобразователя с максимальным КПД.

Математическая постановка задачи оптимального управления для ЛМЭП длинноходового одноступенчатого поршневого компрессора сводится к определению $i(t)$, $u(t)$, принадлежащие некоторому классу допустимых функций, доставляющие максимум функционалу

$$\eta_d = \frac{\int_0^T C\vartheta(t)i(t)dt}{\int_0^T u(t)i(t)dt} = \frac{\int_0^T C\vartheta(t)i(t)dt}{\int_0^T [Ri^2(t) + C\vartheta(t)i(t)]dt} \quad (1)$$

при уравнениях связи

$$u(t) = i(t)R + u_L(t) + e_{\text{я}}(t), \quad u_L(t) = L_{\sigma} \frac{di(t)}{dt}, \quad e_{\text{я}}(t) = C\vartheta(t), \quad (2)$$

$$x(t) = X_0 + \sum_{v=1}^N [X_{vs} \sin(v\omega t) + X_{vc} \cos(v\omega t)], \quad \vartheta(t) = \frac{dx(t)}{dt}, \quad (3)$$

ограничениях

$$|u(t)| < U_d, \quad 0 < x(t) < 2x_m, \quad (4)$$

краевых условиях

$$i(0) = i(T), \quad (5)$$

где R – постоянное активное сопротивление обмотки якоря; L_{σ} – индуктивность рассеяния обмотки якоря; $x(t)$ – линейное перемещение индуктора в установившемся режиме есть несинусоидальная периодическая функция во времени, которую можно аппроксимировать рядом Фурье с конечным числом слагаемых N ; x_m – половина хода индуктора (поршня); $e_{\text{я}}(t)$ – противо-ЭДС обмотки якоря, зависящая от скорости $\vartheta(t)$ движения индуктора; $C = B_{\text{cp}} \ell_{\text{cp}} k w_a$ – постоянная машины; B_{cp} – среднее значение индукции в межполюсном зазоре; w_a – число активных витков обмотки якоря; ℓ_{cp} – средняя длина витка обмотки якоря; k – коэффициент, учитывающий долю средней длины витка обмотки якоря под полюсами постоянных магнитов; U_d – максимально допустимое напряжение; $\omega = 2\pi f$ – угловая частота; $f = 1/T$ – частота колебаний индуктора.

Отыскание оптимальной функции тока $i(t)$ в функционале (1) можно найти из условия минимума относительных потерь $P_r^* = (1 - \eta_d) / \eta_d$. Поскольку $P_r^* = \frac{P_r}{P_{\text{мех}}}$ есть число, устанавливающее отношение электрических потерь P_r в двигателе к мощности $P_{\text{мех}}$, передаваемой в механическую подсистему, то введем его под знак интеграла

$$\int_0^T [P_r^* C\vartheta(t)i(t) - Ri^2(t)] dt = 0. \quad (6)$$

В момент времени $\omega t = \omega t_k$, где ωt_k – оптимальный угол сдвига,

$$P_r^* C \vartheta(\omega t_k) i(\omega t_k) - R i^2(\omega t_k) = 0 \quad (7)$$

относительные потери достигают минимального значения $P_r^* = P_{r\min}^*$, если

$$\frac{dP_r^*}{d\omega t_k} = 0. \quad (8)$$

После преобразования (7) с учетом (8) получим

$$i'(\omega t_k) \vartheta(\omega t_k) - \vartheta'(\omega t_k) i(\omega t_k) = 0. \quad (9)$$

Решение уравнения (9) удовлетворяет условию резонанса механической системы ЛМЭП длинноходового одноступенчатого поршневого компрессора, при котором электромагнитное усилие $F = Ci(t)$, действующее на поршень, опережает ход поршня компрессора на 90 эл. градусов, т.е. $i(t) = K\vartheta(t)$, где $K = \text{const}$. Возвращаясь к соотношению (7), получим, что минимально возможные относительные потери при заданном законе движения индуктора

$$P_r^* = P_{r\min}^* = \frac{KR}{C}. \quad (10)$$

Среднее значение механической мощности, поступающей в компрессор,

$$P_{\text{мех}} = \frac{1}{T} \int_0^T Ci(t) \vartheta(t) dt = \frac{1}{2} CK \sum_{v=1}^N [\vartheta_{vs}^2 + \vartheta_{vc}^2] = CK \bar{\vartheta}^2, \quad (11)$$

где $\bar{\vartheta}$ – среднеквадратичное (действующее) значение скорости движения индуктора.

Для синусоидального закона движения ротора $x(t) = x_m(1 - \cos \omega t)$ среднее значение механической мощности будет $P_{\text{мех}} = CK \bar{\vartheta}^2 = \frac{1}{2} I_m C x_m \omega$. Выполнив подстановку выражения для

коэффициента $K = \frac{I_m x_m \omega}{2 \bar{\vartheta}^2}$ в формулу (10) и расчетные соотношения для постоянной машины, активного сопротивления обмотки и амплитуды тока, получим в явном виде минимально возможные относительные потери соответственно для несинусоидального и синусоидального закона движения ротора ЛМЭП

$$P_r^* = P_{r\min}^* = \frac{\gamma_{\text{пр}}^{-1} J_d}{\sqrt{2} B_{\text{cp}} k \bar{\vartheta}^2}, \quad (12)$$

$$P_r^* = P_{r\min}^* = \frac{\sqrt{2} \gamma_{\text{пр}}^{-1} J_d}{B_{\text{cp}} k x_m \omega}$$

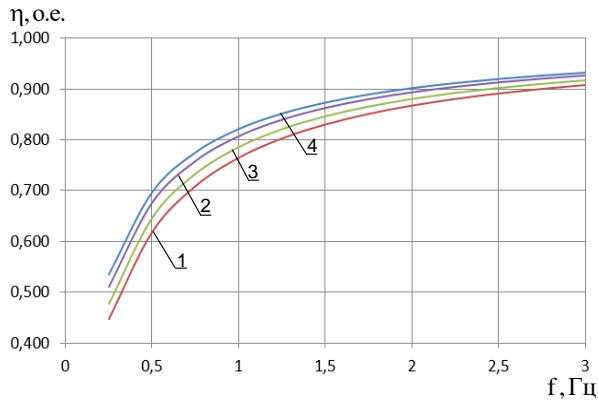
где J_d – максимально допустимая плотность тока; $\bar{\vartheta} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\sum_{v=1}^N [\bar{\vartheta}_{vs}^2 + \bar{\vartheta}_{vc}^2]}$ – действующее

значение скорости ротора, выраженное в относительных единицах; $\bar{\vartheta}_{vs} = \frac{\vartheta_{vs}}{x_m \omega} = \frac{v x_{vs}}{x_m}$,

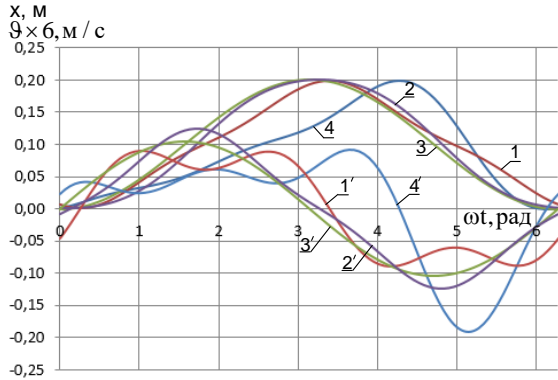
$\bar{\vartheta}_{vc} = \frac{\vartheta_{vc}}{x_m \omega} = \frac{v x_{vc}}{x_m}$ – относительные значения соответственно амплитуд синусной и

косинусной v -ой гармоники скорости ротора; $\gamma_{\text{пр}} = 56 \cdot 10^6 \text{ (Ом} \cdot \text{м)}^{-1}$ – удельная электропроводность медного обмоточного провода.

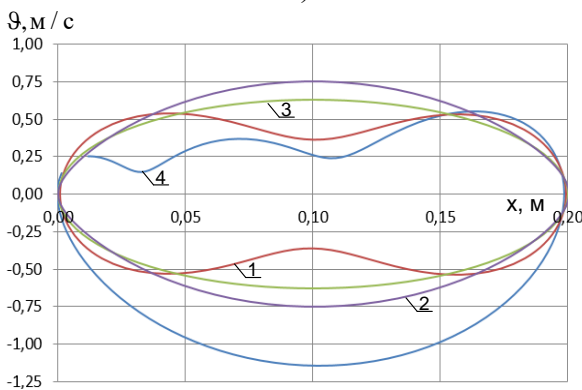
Анализ выражения (12) определяет пути достижения максимально возможного КПД ЛМЭП в зависимости от закона движения индуктора во времени. На рис. 5 приведены некоторые характерные законы $x(t)$ и $\vartheta(t)$ движения индуктора, которые можно представить конечным числом из трех членов ряда Фурье для аппроксимируемой функции скорости, обеспечиваемые постоянной или изменяемой за время рабочего цикла производительностью компрессора.



а)



б)



в)

Рисунок 5. Максимально возможные (а) значения КПД ЛМЭП для некоторых характерных законов $x(t)$ и $v(t)$ движения индуктора (б) и расчетные зависимости $v = v(x)$ за время рабочего цикла (в): 1 - движение индуктора (поршня) с близкой к постоянной по модулю скорости $v = v(t)$; 2 - то же, но близкой к линейной зависимости $v = v(t)$; 3 - то же, но синусоидальная зависимость скорости $v = v(t)$; 4 - движение индуктора с предлагаемой зависимостью скорости $v = v(t)$ - линии при $P_{\text{мех}} = \text{const}$ и $x_m = \text{const}$, $f = 1 \text{ Гц}$, $J_d = 3 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$, $B_{\text{ср}} = 0,5 \text{ Тл}$, $x_m = 0,1 \text{ м}$, $k = 0,85$.

На рис. 5 зависимости, обозначенные: кривой 1 соответствуют линейному закону $x(t)$ перемещения индуктора (поршня) от нуля до $2x_m$ ($x_m = 0,1 \text{ м}$) за время прямого и от $2x_m$ до нуля обратного циклов работы компрессора; кривой 2 - линейному закону скорости движения индуктора во времени при перемещении поршня от нуля до $2x_m$ и обратно; кривой 3 - синусоидальному закону скорости движения индуктора во времени; кривой 4 - предлагаемому закону скорости движения индуктора, учитывающего время разгона и торможения поршня в окрестностях мертвых точек и смещение максимальной нагрузки в сторону окончания времени рабочего цикла.

Введение в выражение (11) плотности материала обмоточного провода $\gamma_{\text{обм}}$ позволяет вывести формулу для расчета необходимой массы активной части витков обмотки СМПП, работающего с максимально возможным значением КПД, обеспечивающим заданное среднее значение механической мощности $P_{\text{мех}}$, поступающей в компрессор, или максимальное значение электромагнитной силы, определяющей величину давления сжимаемого газа

$$m_{\text{обм.акт.}} = \frac{\sqrt{2} P_{\text{мех}} \gamma_{\text{обм}}}{B_{\text{ср}} J_d k \cdot x_m \omega} = \frac{F_{\text{эм.макс}} \gamma_{\text{обм}}}{\sqrt{2} B_{\text{ср}} J_d k} \quad (13)$$

Для поршневых одноступенчатых длинноходовых компрессоров получение больших степеней повышения давлений сжимаемого газа связано с достижением максимального значения удельной электромагнитной силы. Применительно к конструктивной схеме ЛМЭП длинноходового одноступенчатого поршневого компрессора (рис. 3, г) формула электромагнитной удельной силы (без учета потоков рассеяния) может быть записана в виде функции двух независимых переменных (k_m, k_χ)

$$F_{\text{эм.уд.}} = \frac{F_{\text{эм.мах}}}{m_{\text{обм.акт}} + m_{\text{м}}} = \frac{\sqrt{2}\mu_0 H_c J_d k_M k_\chi}{\gamma_{\text{обм}}} \cdot \frac{(1 - F_{\text{разм.}}^*)}{\left[1 + \mu_0 \frac{H_c}{B_r} k_M k_\chi^2 \frac{\gamma_M}{\gamma_{\text{обм}} k_3}\right]}, \quad (14)$$

где $k_M = m_{\text{обм.акт.}}/m_M$ – отношение массы активной части обмотки к массе постоянных магнитов; $k_\chi = d/\delta$ – отношение высоты постоянного магнита к длине воздушного зазора; $F_{\text{разм.}}^*$ – относительное значение МДС обмотки якоря; γ_M – плотность материала постоянного магнита; B_r – остаточная индукция; H_c – коэрцитивная сила; k_3 – коэффициент заполнения.

Определение максимального значения удельной электромагнитной силы $F_{\text{эм.уд.мах}}$ в выражении (14) связано с приравнением нулю частных производных $\partial F_{\text{эм.уд.}}/\partial k_M = 0$, $\partial F_{\text{эм.уд.}}/\partial k_\chi = 0$. Объединив два этих условия в систему уравнений, найдем $k_{M\text{опт}} = 1$ и

$k_{\chi\text{опт}} = \sqrt{\frac{B_r}{\mu_0 H_c} \frac{\gamma_{\text{обм}}}{\gamma_M} k_3}$. Подстановка их выражений в (14) позволяет получить выражение максимума удельной электромагнитной силы

$$F_{\text{эм.уд.мах}} = \frac{J_d (1 - F_{\text{разм.}}^*)}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{\mu_0 (BH)_{\text{мах}} k_3}{\gamma_{\text{обм}} \gamma_M}}, \quad (15)$$

где $(BH)_{\text{мах}}$ – максимальная удельная энергия постоянного магнита.

Для тихоходных СМПМ модульного типа (рис. 3, а), а также СМПМ с общим цилиндрическим магнитопроводом (рис. 3, б), работающих в режиме генератора в составе ВЭУ, постановка задачи оптимизации параметров магнитной системы на предварительной стадии проектирования может быть также сформулирована в виде задачи оптимального управления – определению $i(t)$, $u(t)$ на обмотке якоря, принадлежащих некоторому классу допустимых функций, доставляющих максимум функционалу

$$\eta_r = \frac{\int_0^T u(t)i(t)dt}{\int_0^T e_0(t)i(t)dt} = \frac{\int_0^T u(t)i(t)dt}{\int_0^T [Ri^2(t) + u(t)i(t)]dt}, \quad (16)$$

при уравнениях связи

$$u(t) = e_0(t) - i(t)R - u_L(t), \quad u_L(t) = L_\sigma \frac{di(t)}{dt}, \quad (17)$$

ограничениях

$$|u(t)| < U_d, \quad (18)$$

краевых условиях

$$i(0) = i(T), \quad (19)$$

где $e_0(t)$ – ЭДС обмотки якоря, зависящая от угловой скорости вращения индуктора $\omega(t) = \text{const}$.

Для конструктивной схемы тихоходного СГПМ модульного типа, в которой каждый модуль статора является самостоятельным источником индуцированной ЭДС (рис. 10), расчетная мощность генератора

$$S_{\text{ном}} = \frac{P_{\text{ном}}}{\cos \varphi} = U_{\text{ном}} I_{\text{ном}} = u^* E_0 I_{\text{ном}} = k_{\text{и}} E_0 I_{\text{к}}, \quad (20)$$

где $k_{\text{н}} = u^* \left[-\frac{u^* (\cos \varphi + Q_{\text{д}} \sin \varphi)}{\sqrt{1+Q_{\text{д}}^2}} + \sqrt{1 - \frac{u^{*2} (\sin \varphi - Q_{\text{д}} \cos \varphi)}{1+Q_{\text{д}}^2}} \right]$ – коэффициент использования,

$I_{\text{к}} = \frac{E_0}{\sqrt{R_{\text{а}}^2 + X_{\text{а}}^2}}$ – ток короткого замыкания, $Q_{\text{д}} = \frac{X_{\text{а}}}{R_{\text{а}}}$ – добротность обмотки якоря,

$R_{\text{а}}$ – активное сопротивление обмотки якоря, $X_{\text{а}}$ – индуктивное сопротивление обмотки якоря, u^* – относительное значение напряжения при нагрузке.

При определении магнитной индукции $B_{\text{м}}$ в нейтральном сечении постоянного магнита $S_{\text{м}}$ примем $B_{\text{м}} S_{\text{м}} = B_{\delta} S_{\delta}$, тогда из расчета магнитной цепи СГПМ

$$B_{\delta} = B_{\text{ср}} = \frac{B_{\text{м}} S_{\text{м}}}{S_{\delta}} = B_{\text{г}} \frac{\lambda_{\delta}^*}{1 + \lambda_{\delta}^*} \cdot \frac{S_{\text{м}}}{S_{\delta}}, \quad (21)$$

где $\lambda_{\delta} = \mu_0 \frac{S_{\delta}}{\delta}$, $\lambda_{\text{м}} = \frac{B_{\text{г}} S_{\text{м}}}{H_{\text{с}} d}$ – соответственно магнитные проводимости воздушного зазора и постоянного магнита, приходящиеся на один полюс, δ – воздушный зазор, d – высота постоянного магнита.

Намагничивающая сила обмотки ЭМ с учетом реакции якоря выразим через допустимую плотность тока $J_{\text{д}}$, площадь поперечного сечения катушки $S_{\text{кат}}$ и коэффициент заполнения k_3

$$I w_{\text{эм}} = 2 J_{\text{д}} S_{\text{кат}} k_3 k_{\text{д}}. \quad (22)$$

Подстановка соотношений (21) и (22) в (20) позволяет получить выражение полной мощности тихоходного СГПМ модульного типа

$$S_{\text{ном}} = u^* 4 \sqrt{2} \frac{\mu_0 H_{\text{с}} R S_{\text{кат}} J_{\text{д}} \alpha_{\delta} k_3 k_{\text{д}}}{\left(1 + \mu_0 \frac{H_{\text{с}} S_{\delta} d}{B_{\text{г}} S_{\text{м}} \delta}\right) \sin\left(\frac{\pi}{N}\right)} \left(\frac{\pi D_{\text{а}} n}{60}\right) \left(\frac{d}{\delta}\right), \quad (23)$$

где R – радиус постоянного магнита, изготовленного в форме диска, $k_{\text{д}}$ – расчетный коэффициент, учитывающий реакцию якоря.

Создание энергоэффективных тихоходных СГПМ в составе ВЭУ связано с определением условий достижения максимума удельной полной мощности. Выражение (23) позволяет выразить удельную полную мощность генератора модульного типа в виде функционала, используя две независимые переменные

$$S_{\text{ном.уд}} = \frac{S_{\text{ном}}}{m_{\text{обм}} + m_{\text{м}}} = \frac{A_1 k_{\text{м}} k_{\chi}}{(1 + A_2 k_{\text{м}} k_{\chi}^2)(1 + k_{\text{м}})} = F(k_{\text{м}}, k_{\chi}), \quad (24)$$

где $A_1 = u^* \frac{\sqrt{2} \pi}{30} \mu_0 H_{\text{с}} \frac{R J_{\text{д}} D_{\text{а}} n}{N \sin\left(\frac{\pi}{N}\right)} \frac{\alpha_{\delta} k_{\text{д}}}{\gamma_{\text{обм}} \ell_{\text{ср}}}$, $A_2 = \mu_0 \frac{H_{\text{с}}}{B_{\text{г}}} \frac{2p}{N} \frac{1}{k_3} \frac{\gamma_{\text{м}}}{\gamma_{\text{обм}}} k_{\ell}$, $k_{\text{м}} = \frac{m_{\text{обм}}}{m_{\text{м}}}$ – отношение

массы обмоточного провода к массе постоянного магнита, $k_{\chi} = d/\delta$ – отношение высоты постоянного магнита к длине воздушного зазора, $m_{\text{обм}} = 2 N S_{\text{кат}} \ell_{\text{ср}} k_3 \gamma_{\text{обм}}$, $m_{\text{м}} = 4 p d S_{\text{м}} \gamma_{\text{м}}$, p – частота вращения (об/мин), $\ell_{\text{ср}}$ – средняя длина витка, N – число независимых электромагнитных модулей, α_{δ} – коэффициент полюсного перекрытия, $D_{\text{а}}$ – диаметр якоря.

При выводе функционала (24) поправочный расчетный коэффициент, учитывающий соотношение объемов обмотки якоря и воздушного зазора $k_\ell = S_\delta \delta / S_{\text{кат}} \ell_{\text{cp}}$, находится методом последовательных приближений. В начале итерационного процесса значение $k_\ell = 1$.

Отыскание максимума удельной полной мощности $S_{\text{ном.уд.макс.}}$ тихоходного СГПМ модульного типа связано с отысканием $k_{\chi\text{опт}}$ и $k_{\text{мопт}}$, при которых частные производные $\partial S_{\text{ном.уд.}} / \partial k_\chi = 0$, $\partial S_{\text{ном.уд.}} / \partial k_{\text{м}} = 0$. Объединив полученные два условия в систему уравнений можно убедиться, что она имеет единственное решение, при котором $k_{\chi\text{опт}} = \frac{d}{\delta} = \sqrt{\frac{1}{A_2}} = \sqrt{\frac{B_r}{\mu_0 H_c} \frac{N}{2p} \frac{\gamma_{\text{обм}}}{\gamma_{\text{м}}} \frac{k_3}{k_\ell}}$, $k_{\text{мопт}} = \frac{m_{\text{обм}}}{m_{\text{м}}} = 1$. После подстановки корней системы $k_{\chi\text{опт}}$ и $k_{\text{мопт}}$ в функционал (24) найдем

$$S_{\text{ном.уд.макс.}} = \sqrt{2} u^* \left(\frac{\pi D_a n}{60} \right) \frac{R J_d}{N \sin\left(\frac{\pi}{N}\right)} \frac{\alpha_\delta k_d}{\ell_{\text{cp}}} \sqrt{\frac{\mu_0 (BH)_{\text{макс}}}{\gamma_{\text{м}} \gamma_{\text{обм}}} \frac{N k_3}{2p k_\ell}}. \quad (25)$$

Исследование функционала $F(k_{\text{м}}, k_\chi)$ в широком диапазоне независимых переменных приведено на рис. 6.

Аналогичным образом решается задача оптимизации параметров тихоходных СГПМ с общим цилиндрическим магнитопроводом в составе ВЭУ. При ее решении получены выражения необходимой массы активной части витков трехфазной обмотки

$$m_{\text{обм.акт}} = \frac{60}{\pi} \cdot \frac{P_{\text{ном}} \gamma_{\text{обм}}}{u^* B_\delta D_i n k_\phi k_{\text{обм}} \alpha_\delta J_d}, \quad (26)$$

минимально возможные относительные потери

$$P_{\text{г.мин}} = \frac{30}{\pi} \frac{J_d \gamma_{\text{пр}}^{-1}}{u^* B_\delta \alpha_\delta D_i n k_\phi k_{\text{обм}} k}, \quad (27)$$

максимум удельной активной мощности при активной нагрузке ($\cos \varphi = 1$)

$$P_{\text{ном.уд.макс}} = \frac{u^*}{120} \sqrt{\frac{\mu_0 (BH)_{\text{макс}} k_3}{\gamma_{\text{обм}} \gamma_{\text{м}}}} \sigma_p \pi D_i n k_\phi k_{\text{обм}} J_d, \quad (28)$$

где D_i – диаметр ротора, $k_{\text{об}}$ – обмоточный коэффициент, k_ϕ – коэффициент формы, $k = \frac{\ell'}{\ell_{\text{cp}}}$ –

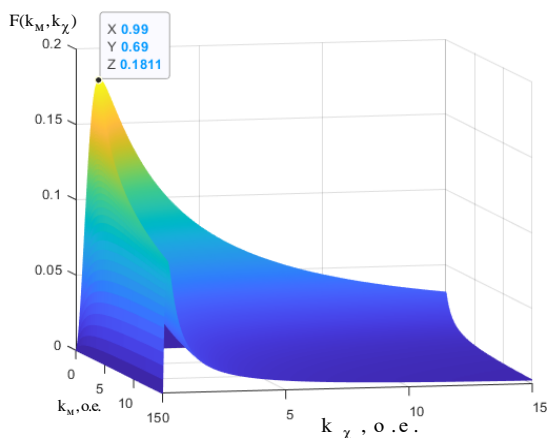


Рисунок 6. Нахождение максимума функционала $F(k_\chi, k_{\text{м}})$ путем перебора значений переменных ($N=8$, $2p=6$, $k_3 = 0.4$, $k_\ell = 1$)

отношение расчетной длины сердечника к средней длине витка (секции) обмотки статора.

На рис. 7 приведена блок-схема алгоритма проектирования тихоходных СДПМ в составе привода поршневого компрессора. На предварительной стадии расчета конструкций тихоходного СДПМ определяется условие, при котором достигается максимально возможный КПД электромеханического преобразователя энергии (минимум удельных относительных потерь). На блок-схеме этому этапу соответствуют блоки 3 и 4 на основе исходных данных (блок 2),

которые дополняются следующими параметрами: $J_{\text{доп}}$ – допустимая плотность тока (определяет тепловой режим); A – линейная токовая нагрузка; k – коэффициент, учитывающий долю средней длины витка обмотки якоря под полюсами постоянных магнитов; σ_p – расчетный коэффициент, учитывающий рассеяние магнитного потока, λ – коэффициент, равный отношению средней длины витка обмотки якоря к длине полюса.

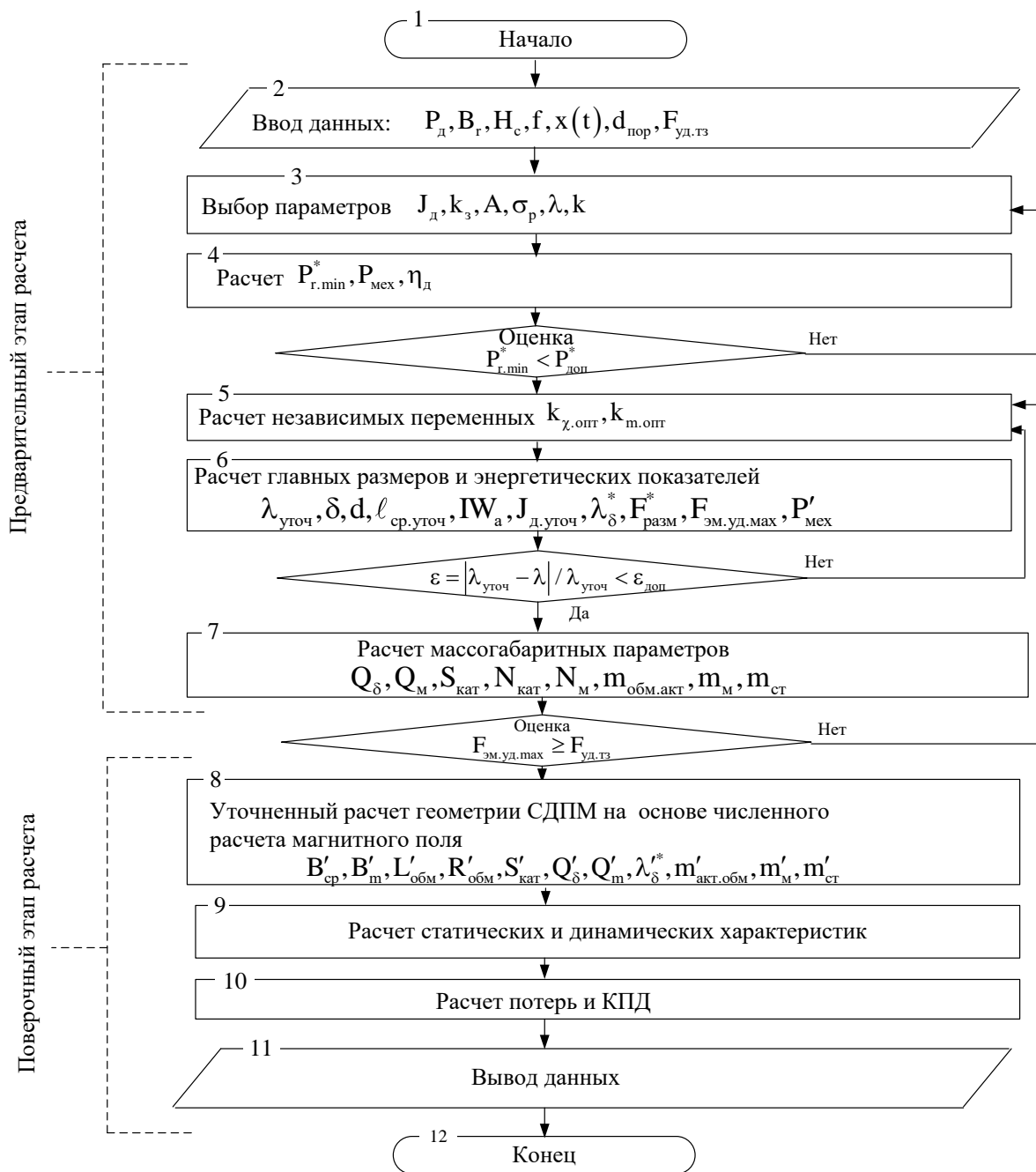


Рисунок 7. Блок-схема алгоритма проектирования магнитной системы тихоходного СДПМ в составе привода одноступенчатого поршневого компрессора

Указанные коэффициенты уточняются в ходе итерационного расчета после определения полезной механической мощности и КПД электромеханического преобразования энергии в соответствии с заданным законом движения индуктора.

В блоках 5,6 реализуется методика расчета базовых размеров магнитной системы и энергетических показателей в соответствии с критерием оптимальности максимум удельной

полезной мощности, который для тихоходного СДПМ может быть преобразован в максимум удельного тягового электромагнитного усилия. При выбранных значениях A , σ_p и λ рассчитываются значения независимых переменных $k_{\text{хонт}} = \frac{d}{\delta}$, $k_{\text{мопт}} = \frac{m_{\text{обм}}}{m_m}$, зная которые

можно определить остальные массогабаритные и энергетические показатели СДПМ (блок 7). Уточнение значения индукции в воздушном зазоре, индуктивности обмотки, плотности тока выполняется на этапе поверочных расчетов как средствами стороннего прикладного программного обеспечения (например, ANSYS или ELCUT), так и на основе собственных разработанных методик. Успешным выполнением этапа поверочных расчетов является соответствие массогабаритных показателей, а также энергетических характеристик оптимизируемой конструкции тихоходной СДПМ требованиям технического задания.

Предложенная во второй главе диссертации методология к проектированию оптимальных конструкций магнитных систем тихоходных СМПМ, работающих в различных режимах для ВЭТК конкретного назначения, позволила сформулировать задачу оптимизации, выбрать целевую функцию и метод решения задачи с разделением уравнений электромагнитной и механической подсистем СМПМ с учетом особенностей рабочего процесса ВЭТК. Показана целесообразность уточнения геометрии магнитной системы и обмоточных данных через уточнение закона движения подвижной части машины на основе уравнений магнитного поля, записанных с использованием метода конечных элементов и включенных в состав полной математической модели.

Третья глава посвящена исследованию магнитного поля СМПМ на основе конечно-элементного анализа. Основное место в уточнении решения задачи оптимизации базовой конструкции СМПМ в составе ВЭТК занимает расчет магнитного поля. По известному распределению индукции магнитного поля в областях, занятых обмоткой с током, вычисляются: индуктивность обмотки, противо-ЭДС и электромагнитное усилие, развиваемое СДПМ или наводимая ЭДС в обмотке СГПМ. В главе представлено решение для осесимметричного и трехмерного распределения магнитного поля.

Для расчета трехмерного магнитного поля используется введенный «регулярный элемент» в виде шестигранной призмы (рис. 8, а). Использование «регулярного элемента» для расчета магнитного поля в сочетании с методом конечных элементов позволяет существенно уменьшить время расчета, а также сократить требования к вычислительным ресурсам ПК, что обусловлено исключением этапа формирования матрицы жесткости и непосредственным формированием глобальной СЛАУ по определенным рекуррентным выражениям.

Уравнение Пуассона для трехмерной модели магнитного поля в прямоугольной системе координат имеет вид

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial \bar{A}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial \bar{A}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial \bar{A}}{\partial z} \right) = -\bar{J} - \bar{i}_m \quad (29)$$

где \bar{A} – векторный магнитный потенциал, \bar{J} – вектор плотности тока проводимости, \bar{i}_m – вектор плотности тока намагниченности, $\mu = \mu_0 \mu_r$ – абсолютная магнитная проницаемость материала модели, μ_r – относительная магнитная проницаемость.

Для расчетной модели приняты следующие допущения: обмотки с током заменяются областью с равномерно распределенной плотностью тока J ; относительная магнитная проницаемость стальных элементов конструкции магнитопровода μ_r постоянна; линейный участок на кривой размагничивания и высокое значение магнитной твердости постоянных магнитов из сплавов на основе редкоземельных металлов позволяют заменить их действие токами намагниченности, имеющими плотность i_m .

Наличие в объеме моделирования V внутренних границ раздела кусочно-однородных сред, а также объемов с распределенной плотностью сторонних токов обмотки и токов

намагниченности делает предпочтительным для решения поставленной краевой задачи применение метода Галеркина в сочетании с МКЭ. Согласно методу моделируемый объем V СМПМ разбивается трехмерной триангуляционной сетью с q узлами на p тетраэдрических конечных элементов первого порядка (рис. 8, б). На каждом конечном элементе векторный магнитный потенциал представлен следующим образом:

$$\tilde{A} = [N_m]_r [A_m]_r, \quad (30)$$

где $N_m = \frac{a_m + b_m x + c_m y + d_m z}{6V_e}$ – функция формы, m принимает значения i, j, k, l –

наименование вершин тетраэдрического конечного элемента; V_e – объем тетраэдрического конечного элемента.

Преобразования Галеркина уравнения (30) приводят к системе интегральных уравнений

$$\sum_{r=1}^p \int_{V_e} \left[\frac{\partial [N_m]_r^T}{\partial r} \frac{\partial [A_m]_r}{\partial r} + \frac{\partial [N_m]_r^T}{\partial z} \frac{\partial [A_m]_r}{\partial z} + \frac{\partial [N_m]_r^T}{\partial \theta} \frac{\partial [A_m]_r}{\partial \theta} \right] dV - \int_{V_e} [N_m]_r^T \mu_0 J dV - \int_S [N_m]_r^T \mu_0 i_m dS = 0 \quad (31)$$

Использование МКЭ к системе линейных алгебраических уравнений относительно p конечных элементов

$$[U] \{A\} = \{F\} \quad (32)$$

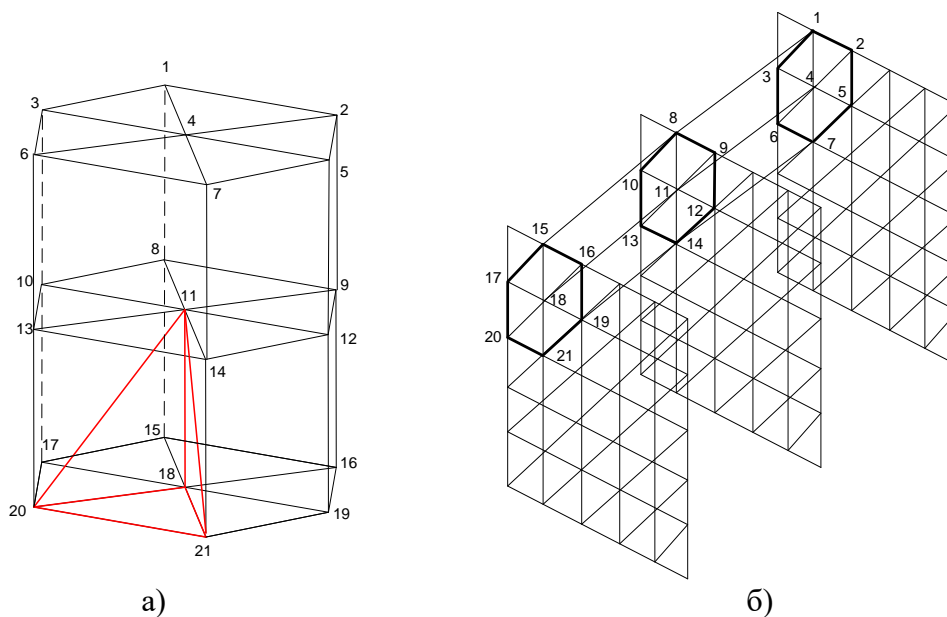


Рисунок 8. Трехмерный «регулярный элемент» (а) и его расположение в регулярной триангуляционной сети (б)

Для расчета векторного магнитного потенциала в узлах трехмерной триангуляционной сети формируется система линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) для «регулярного элемента», приведенного на рис. 8.

Рекуррентные соотношения для формирования глобальной СЛАУ:

при $m \neq s$

$$\begin{aligned}
 u_{ms} &= \frac{1}{\mu_{r1}} \left(b_m^{(r1)} b_s^{(r1)} + c_m^{(r1)} c_s^{(r1)} + d_m^{(r1)} d_s^{(r1)} \right) + \\
 &+ \frac{1}{\mu_{r2}} \left(b_m^{(r2)} b_s^{(r2)} + c_m^{(r2)} c_s^{(r2)} + d_m^{(r2)} d_s^{(r2)} \right) + u'_{ms} \\
 u'_{ms} &= h \left[\left[\frac{1}{\mu_{r1}} \left(b_m^{(r1)} + b_s^{(r1)} \right) + \frac{1}{\mu_{r2}} \left(b_m^{(r2)} + b_s^{(r2)} \right) \right] \cos(n \wedge x) + \right. \\
 &\left[\frac{1}{\mu_{r1}} \left(c_m^{(r1)} + c_s^{(r1)} \right) + \frac{1}{\mu_{r2}} \left(c_m^{(r2)} + c_s^{(r2)} \right) \right] \cos(n \wedge y) + \\
 &\left. \left[\frac{1}{\mu_{r1}} \left(d_m^{(r1)} + d_s^{(r1)} \right) + \frac{1}{\mu_{r2}} \left(d_m^{(r2)} + d_s^{(r2)} \right) \right] \cos(n \wedge z) \right]; \tag{33}
 \end{aligned}$$

при $m = s$

$$\begin{aligned}
 u_{mm} &= \sum_{r=1}^{20} \frac{1}{\mu_{r1}} \left(b_m^{(r)} b_m^{(r)} + c_m^{(r)} c_m^{(r)} + d_m^{(r)} d_m^{(r)} \right) + u'_{mm} \\
 u'_{mm} &= h \sum_{r=1}^6 \left(\frac{1}{\mu_r} \left(b_m^{(r)} + b_m^{(r)} \right) \cos(n \wedge x) + \right. \\
 &\left. + \left(c_m^{(r)} + c_m^{(r)} \right) \cos(n \wedge y) + \left(d_m^{(r)} + d_m^{(r)} \right) \cos(n \wedge z) \right), \tag{34}
 \end{aligned}$$

где $r1, r2$ – номера конечных элементов с узлами m и s (рис. 8), h – длина ребра.

Программная реализация предложенного метода расчета трехмерного поля выполнена на языке Java. На основе используемого разработанного программного обеспечения проведен расчет магнитного поля тихоходных СМПМ.

В третьей главе разработан метод и устройство для идентификации постоянных магнитов по критерию объемной намагниченности, позволяющие на стадии изготовления СМПМ выполнить отбор постоянных магнитов с одинаковыми магнитными свойствами. Исключение процедуры идентификации опытных образцов постоянных магнитов перед их установкой в узел СМПМ сопровождается негативными последствиями. Например, при создании индуктора синхронной электрической машины с использованием постоянных магнитов наблюдаются биение вала, повышенная вибрация подвижных частей, отклонение от заданных технических условий энергетических показателей работы. Методика идентификации опытных образцов постоянных магнитов по критерию одинаковой объемной намагниченности основывается на определении среднеквадратичного отклонения экспериментальных зависимостей электромагнитной силы от расстояния между взаимодействующими опытными образцами постоянных магнитов (для каждого в отдельности) с магнитным отражателем. На рис. 9 представлены внешний вид лабораторной установки и результаты испытаний опытных образцов постоянных магнитов, используемых в составе магнитной системы СДПМ привода поршневого компрессора.

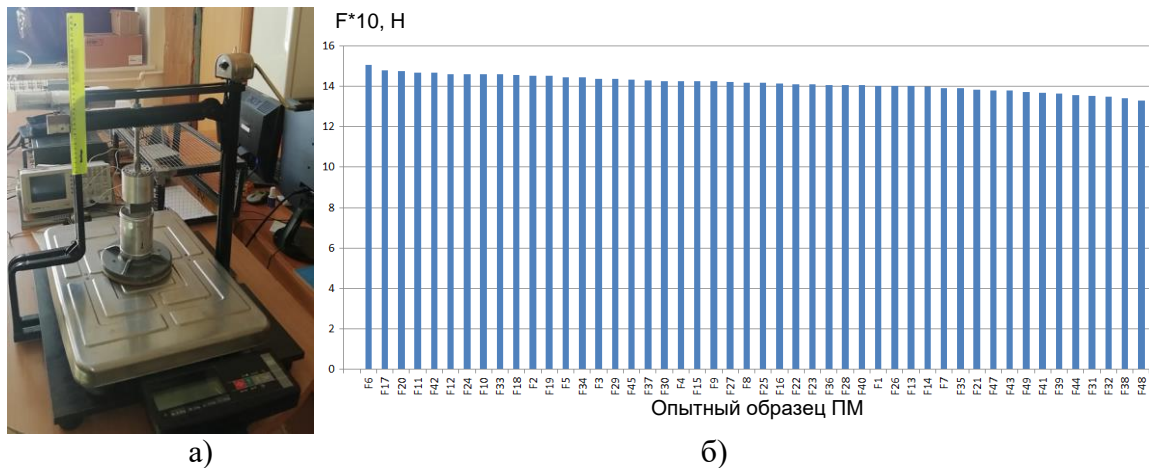


Рисунок 9. Испытательный стенд для исследования опытных образцов постоянных магнитов 50x50x25 мм (а) и результаты их испытаний (б)

В четвертой главе рассмотрены примеры практической реализации СГПМ модульного типа и с общим цилиндрическим магнитопроводом в составе ВЭТК ВЭУ. Приведено решение задачи оптимизации массогабаритных параметров СГПМ с учетом особенностей рабочего режима ВЭУ и обоснование их базовых конструкций.

На рис. 10 представлена трехмерная модель конструкции магнитной системы СГПМ модульного типа (а) и макетный образец синхронного генератора номинальной мощностью 500 ВА, скоростью вращения индуктора 500 об/мин и напряжением на обмотке 220 В (б).

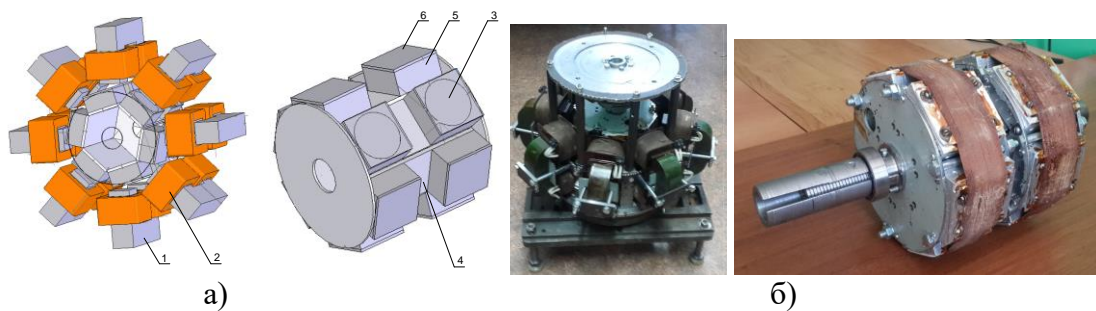


Рисунок 10. Тихоходный СГПМ модульного типа: модель в сборе и отдельно ротор (а) 1 – шихтованный магнитопровод, 2 – катушки, 3 – постоянный магнит, 4 – стальная пластина, 5– алюминиевый контейнер, 6 – крышка; макетный образец (б)

Экспериментальные временные зависимости напряжения и тока в обмотке якоря СГПМ в режимах холостого хода и короткого замыкания показаны на рис. 11.

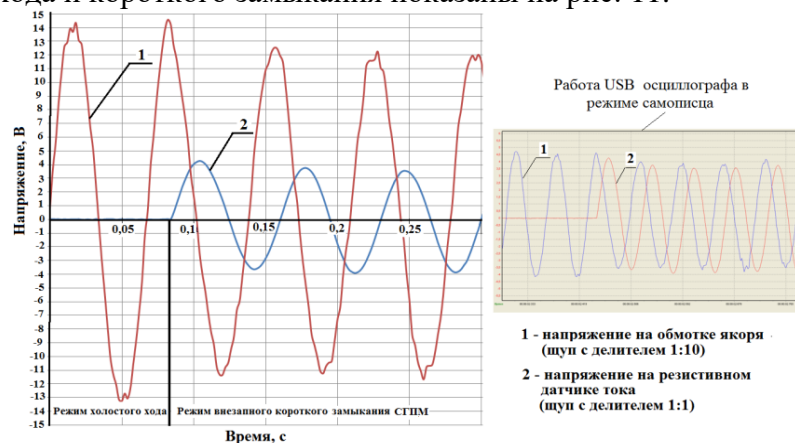


Рисунок 11. Осциллограммы напряжений одной половины обмотки якоря и резистивного датчика тока в режиме холостого хода и внезапного короткого замыкания СГПМ

Расчет энергетических показателей тихоходного СГПМ модульного типа выполнен на основе разработанной математической модели в программном комплексе ANSYS Maxwell (рис. 12).

Результаты расчета модели сопоставлены с результатами экспериментального исследования СГПМ на разработанном испытательном стенде.

На этапе поверочных расчетов выполнено исследование электромагнитных потерь в программном обеспечении ANSYS Maxwell 16.0. При номинальной скорости вращения индуктора потери в независимых магнитопроводах не превышают 5%.

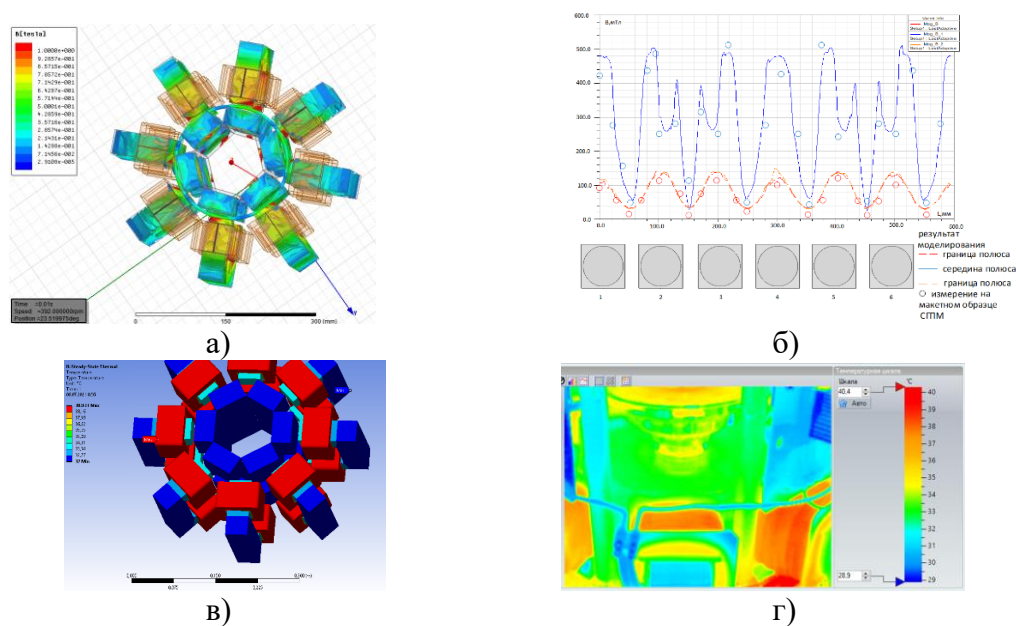


Рисунок 12. Результаты расчета имитационной модели (а, в) и экспериментального исследования СГПМ модульного типа (б, г): а, б – распределение вектора магнитной индукции; в, г – температура отдельных элементов магнитной системы (моделирование и тепловизионная съемка)

На рис. 13. приведены имитационная модель СГПМ с общим цилиндрическим магнитопроводом (а) и внешний вид его макетного образца (б, позиция 2).

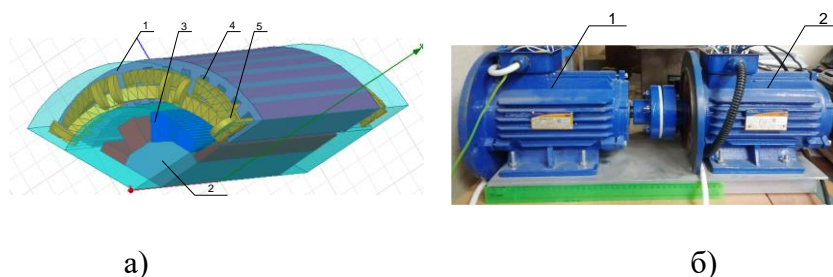


Рисунок 13. Имитационная модель СГПМ с общим цилиндрическим магнитопроводом (а) и его внешний вид (б),

Магнитная система синхронного генератора состоит из неподвижного статора 1, подвижного якоря 2, на котором закреплены постоянные магниты 3, в пазах 4 расположена трехфазная обмотка 5.

Макетный образец синхронного генератора имеет номинальную мощность 1 кВА, напряжение на обмотке 220 В, скорость вращения индуктора 400 об/мин.

Так как СМПМ постоянно находится в возбужденном состоянии, индуктор обладает остаточным моментом. Конструктивная схема СГПМ с общим цилиндрическим

магнитопроводом обладает способностью к уменьшению остаточного момента за счет обоснованного выбора числа пазов статора, приходящихся на полюс и фазу:

$$k = \frac{z}{2p \cdot m}, \quad (35)$$

где k – нецелое (дробное) число, z – число пазов, p – число пар полюсов, m – число фаз.

Показано, что наименьший остаточный момент можно получить в случае, если выражение (35) представляет собой периодическую дробь. Например, этому условию удовлетворяет конструкция СГПМ, имеющая 72 паза и 11 пар полюсов, то есть 72/22, представленная на рис. 14. Синхронный генератор рассчитан на номинальную мощность 5 кВА, фазное напряжение на обмотке 130 В, скорость вращения индуктора 120 об/мин.

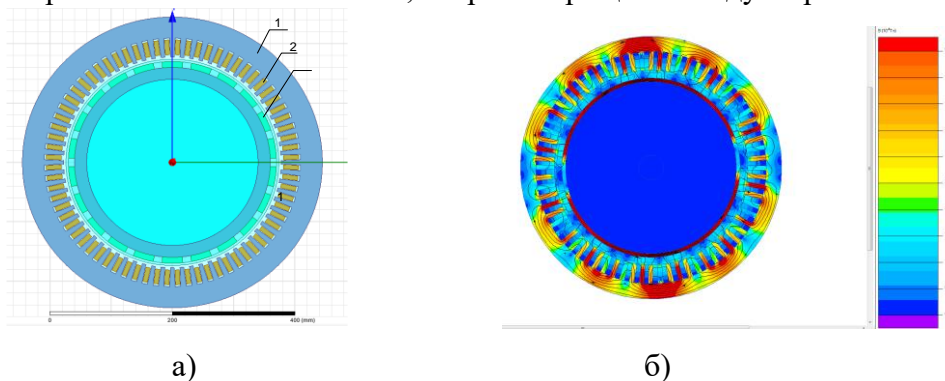


Рисунок 14. Конструкция (а) магнитной системы СГПМ с общим магнитопроводом 72/22: 1 – статор, 2 – паз с обмоткой, 3 – постоянные магниты; реакция якоря в программном обеспечении ELCUT 6.0 (б)

Развернутая схема обмотки якоря с двумя параллельными ветвями в каждой фазе показана на рис. 15, а.

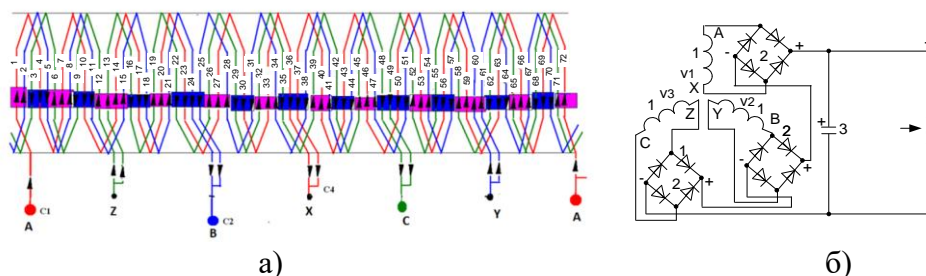


Рисунок 15. Схема укладки обмотки в пазах СГПМ с общим цилиндрическим магнитопроводом (а) и схема подключения выпрямителя (б).

На рис. 15, б приведена схема подключения трех выпрямительных блоков к фазным обмоткам СГПМ. Рассматривается случай, когда фазы обмоток якоря разомкнуты и не имеют общей точки. Для уменьшения пульсаций выходного напряжения используется емкостной сглаживающий фильтр. За счет изменения способа присоединения фаз обмотки якоря к выпрямительным блокам в трехфазной обмотке и из-за углового сдвига между обмотками переменные составляющие электродвижущей силы равны и сдвинуты друг относительно друга на 120° , что исключает из результирующего напряжения переменные составляющие электродвижущей силы. Предложенный способ позволяет оставить постоянную составляющую и нулевые гармоники, остальные составляющие высших гармоник компенсировать, что облегчает работу сглаживающего фильтра. При последовательном соединении выпрямительных блоков можно получить увеличение выходного напряжения в 2.7 раза от действующего значения фазного напряжения, тогда как в трехфазной мостовой схеме выпрямления (профессора А.Н. Ларионова) 2.34 раза соответственно.

На рис. 16 представлены внешняя характеристика СГПМ 72/22 (а) и зависимость выходной мощности $P(I)$ от тока нагрузки (б) при различных скоростях вращения индуктора.

На основе предложенной методики оптимального проектирования разработано программное обеспечение по расчету конструкций СГПМ с общим цилиндрическим магнитопроводом.

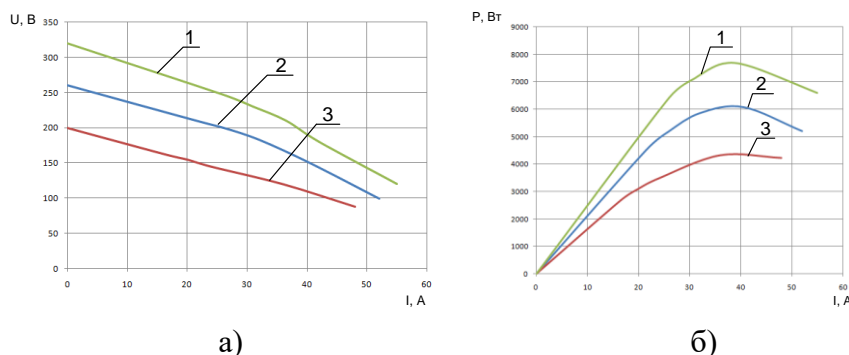


Рисунок 16. Внешняя характеристика СГПМ (а) и зависимость выходной мощности от тока нагрузки при: 1 – 150 об/мин; 2 – 90 об/мин; 3 – 70 об/мин

В пятой главе рассмотрены подходы к проектированию и разработке СДПМ для ВЭТК ЛМЭП: прецизионного ЛМЭП для испытания вязкоупругих свойств эластомеров и ЛМЭП тихоходного одноступенчатого поршневого компрессора.

Результаты расчетов оптимальных конструкций СМПМ в составе ВЭТК показывают, что в качестве базовой конструкции привода для испытания вязкоупругих свойств эластомеров целесообразно использование магнитной системы с двумя воздушными каналами и постоянными магнитами, намагниченными в радиальном направлении, изготовленными в виде сегментов.

Проведенные исследования динамических характеристик ЛМЭП с различными опытными образцами эластомеров показали работоспособность математической модели и хорошую степень соответствия ее реальным процессам в приводе, что подтверждается уточнением решения задачи оптимизации конструкции привода и накопленным опытом проектирования, созданием экспериментального макетного образца на основе разработанных в диссертации расчетных методик.

Рабочий процесс ЛМЭП тихоходного одноступенчатого длинноходового поршневого компрессора с возможностью создания электромагнитного усилия 2000 Н существенно отличается от ВЭТК для испытания вязкоупругих свойств эластомеров. Большая масса индуктора и ход перемещения 0,2 м обуславливают высокую инерционность подвижной части, что определяет специфические требования не только к системе управления, но и к оптимизации конструкции магнитной системы линейной магнитоэлектрической машины.

Рассматриваемые рабочие параметры: диаметр цилиндра компрессорной ступени и гидроцилиндра – 0,02 м; ход поршня – 0,2 м; диаметр штока 0,02 м; тип клапанов – тарельчатые; температура всасывания – 290 К; давление всасывания – 0,1 МПа; давление нагнетания – 1,2 МПа; сжимаемый газ – воздух; время рабочего цикла – 2...4 с. Компрессор разработан коллективом кафедры «Холодильная и компрессорная техника и технология» ФГБОУ ВО «ОмГТУ».

На основе решения задачи оптимизации с учетом особенностей рабочего процесса ВЭТК ЛМЭП тихоходного длинноходового одноступенчатого поршневого компрессора получены соотношения массогабаритных параметров магнитной системы ЛМЭП по максимуму удельного тягового усилия при использовании минимуме массы используемых активных материалов. Методика расчета ВЭТК ЛМЭП реализована в виде программного обеспечения «Оптимизация параметров магнитоэлектрического привода колебательного движения». Конструкция линейной магнитоэлектрической машины приведена на рис.17 .

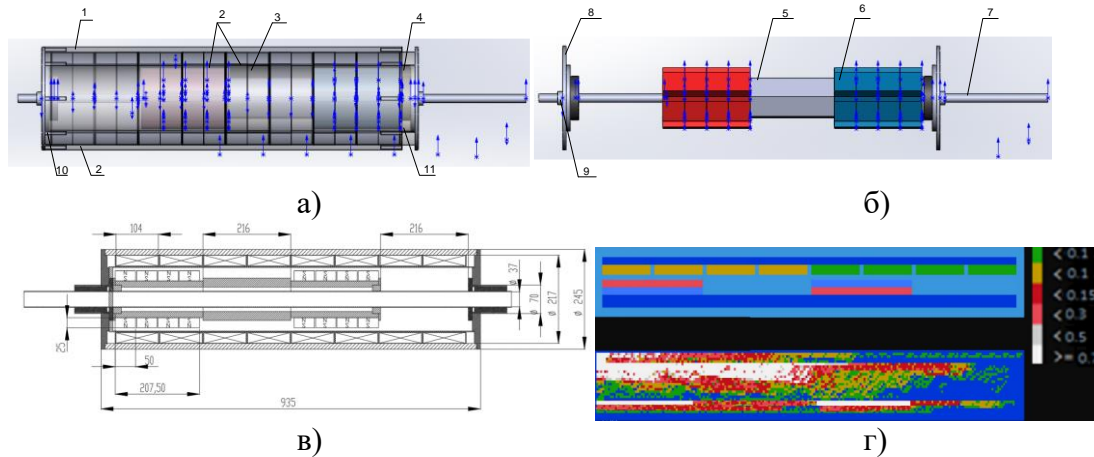


Рисунок 17. Конструктивная схема (а,б), конструкция магнитной системы линейного магнитоэлектрического двигателя (в), расчет магнитного поля в разработанном программном обеспечении (г): 1 – корпус, 2 – внешний магнитопровод, 3 – катушки, 4 – демпфер, 5 – внутренний магнитопровод, 6 – постоянные магниты, 7 – шток, 8 – крышки, 9 – подшипник качения (линейного перемещения), 10 – крепежные элементы, 11 – каркас обмотки

На рис. 18 представлен разработанный макетный образец ВЭТК ЛМЭП одноступенчатого поршневого компрессора.

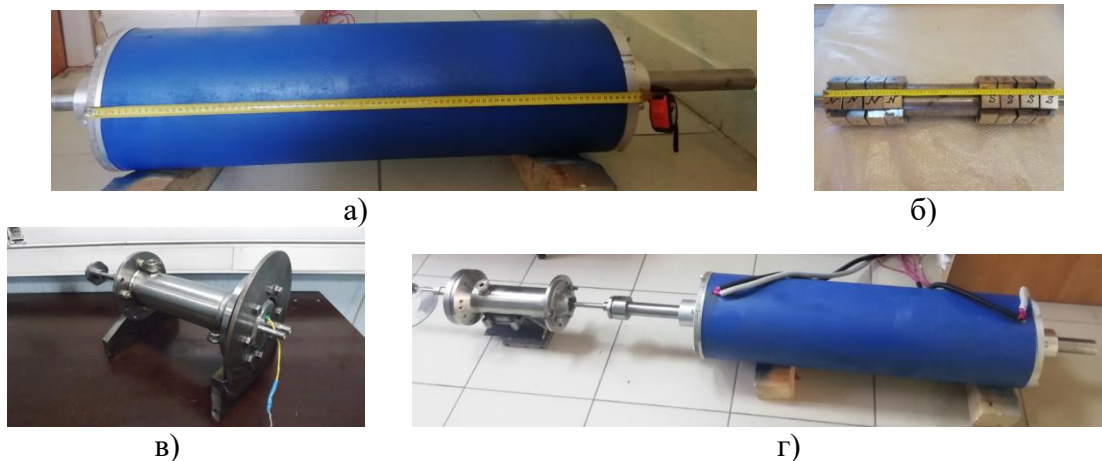


Рисунок 18. Макетный образец тихоходного СДПМ для привода длинноходового поршневого компрессора: а – в сборе, б – индуктор, в – макетный образец бесщеточной квазиизотермической ступени поршневого компрессора, г – внешний вид

Основные параметры проектируемого тихоходного СДПМ для привода одноступенчатого поршневого компрессора: выходная мощность – 4 кВт, частота – 0.5..3 Гц, номинальное напряжение 220 В, число фаз – 1, число пар полюсов – 24, развиваемое тяговое усилие – 2кН, диаметр поршня – 0.02 м, создаваемое усилие – 1.2 МПа, среднее значение индукции в зазоре – 0.5 Тл, ход якоря – 0.2 м, линейная токовая нагрузка – $4 \cdot 10^4$ А·м, число катушек обмотки якоря на пару полюсов – 8.

Предварительный расчет выходных характеристик тихоходного СДПМ: максимальное развиваемое усилие – 2531 Н, максимальная потребляемая мощность – 2.3 кВт, частота 0.5 Гц, оптимальное отношение массы активной части витков обмотки якоря к массе постоянных магнитов – 1, оптимальное отношение высоты воздушного зазора к высоте постоянного магнита – 1.13, максимально возможный КПД электромеханического

преобразователя – 87.2%, масса постоянных магнитов – 21.3 кг, полное число ампервитков – 16, 4 кА, ток в обмотке – 7.6 А, активное сопротивление обмотки – 7.62 Ом.

На рис. 19 представлены экспериментальные статические характеристики развиваемого электромагнитного усилия макетного образца СДПМ при различном количестве катушек якоря, подключенных к источнику питания.

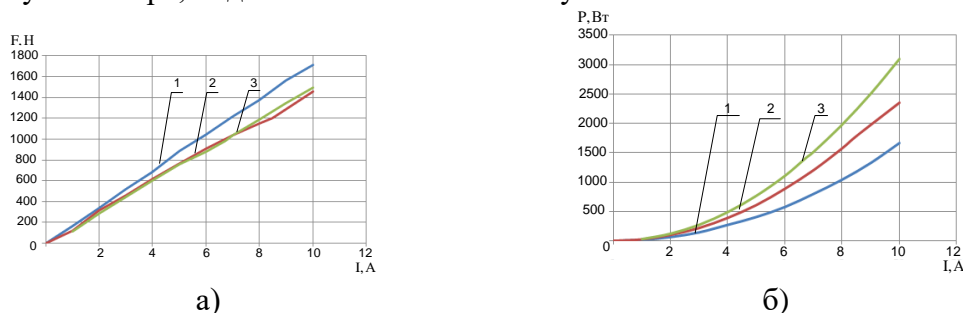


Рисунок 19. Статические характеристики СДПМ при 1 – 4 катушки, 2 – 6 катушек, 3 – 8 катушек): а – электромагнитное усилие, б – потребляемая мощность.

На основе численного расчета магнитного поля при различных положениях якоря были получены средние значения коэффициентов для определения электромагнитного усилия и противо-ЭДС обмотки СДПМ.

Результаты математического моделирования динамических характеристик тихоходного СДПМ в составе ЛМЭП поршневого одноступенчатого компрессора показывают возможность получения тягового электромагнитного усилия 2000 Н при частоте движения индуктора 0.5 Гц.

В шестой главе рассмотрены принципы управления, позволяющие реализовать условия, используемые при проектировании оптимальных конструкций магнитных систем тихоходных СМПМ в составе ВЭТК.

В составе ВЭУ СГПМ модульного типа может функционировать при различных комбинациях, включенных/отключенных независимых модулей – электромагнитов (ЭМ). С учетом того, что выходное напряжение близко к синусоидальной форме (коэффициент несинусоидальности менее 1%), практическое применение СГПМ модульного типа предпочтительно при изменении ветровой нагрузки, что позволяет уменьшить негативное влияние внешних факторов (рис. 20, а).

Одним из вариантов решения задачи ввода/вывода из электрической цепи ЭМ является использование в системе управления СГПМ модуля искусственного интеллекта – нейронной сети (НС). При обучении НС используются такие параметры режима работы СГПМ как скорость вращения индуктора СГПМ, коэффициент загрузки и выходное напряжение генератора при различном количестве включенных ЭМ (рис. 20, б). Обученная нейронная сеть применяется в системе управления для определения в реальном времени необходимого количества ЭМ, наиболее целесообразного для текущего режима работы ВЭУ.

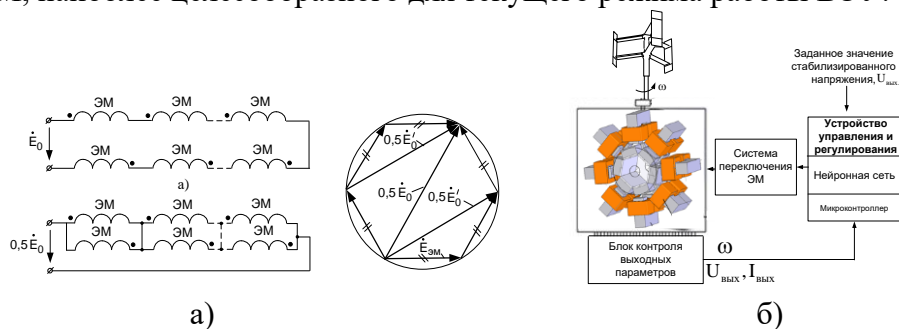


Рис. 20. Принцип управления СГПМ модульного типа (а) и функциональная схема системы управления ВЭУ (б)

Система управления, базирующаяся на ПС, может быть реализована на микроконтроллерах различного исполнения. В работе для проведения исследования использовалась платформа семейства Arduino (Arduino Due), обладающая низкой стоимостью и вместе с тем представляющий собой новую архитектуру, построенную на 32-битном микроконтроллере Atmel SAM 3X8Es ARM с процессором на базе ядра ARM Cortex-M3. На платформе предусмотрены цифровые входы/выходы, связь по USB. Кроме этого, указанный микроконтроллер совместим с системой MatLab, в которой создана и обучена ПС. При изменении скорости вращения вала производится расчет количества включенных электромагнитов, обеспечивающих заданное напряжение на выходе тихоходного синхронного генератора. При понижении скорости вращения вала уменьшается ЭДС в витках катушки и выходное напряжение генератора может быть скорректировано ПС.

Разработка системы управления, обеспечивающая максимум КПД тихоходного ЛМЭП поршневого компрессора при периодическом режиме электромеханического преобразования, связана с отысканием оптимальных токов и напряжений на ее выходе.

Для определения амплитуды тока I_m и угла ωt_k получены следующие выражения:

$$I_m = \frac{\sqrt{F_n'^2 - (m_d x_m \omega^2)^2}}{c}, \quad \omega t_k = \pi + \arctg\left(-\frac{m_d x_m \omega^2}{c I_m}\right) \quad (36)$$

Несовпадение между F_n и $F_{эм}$ обусловлено наличием динамической силы $F_{дин} = m_d \frac{d^2 x}{dt^2}$.

Для достижения оптимального режима работы ЛМЭП, при котором удельные потери будут минимальны, необходимо чтобы временные зависимости тока и скорости совпадали по фазе. Для этого рассчитывается угол θ начальной фазы напряжения источника питания

$$\theta = \arctg \frac{I_m \omega L}{I_m R + c x_m \omega} \quad (37)$$

В диссертации рассмотрены две системы управления ЛМЭП одноступенчатого поршневого компрессора: питание обмотки выпрямленным напряжением с возможностью переключения катушек (рис. 21, а) и питание обмотки от управляемого частотного преобразователя с применением широтно-импульсной модуляции (рис. 21, б).

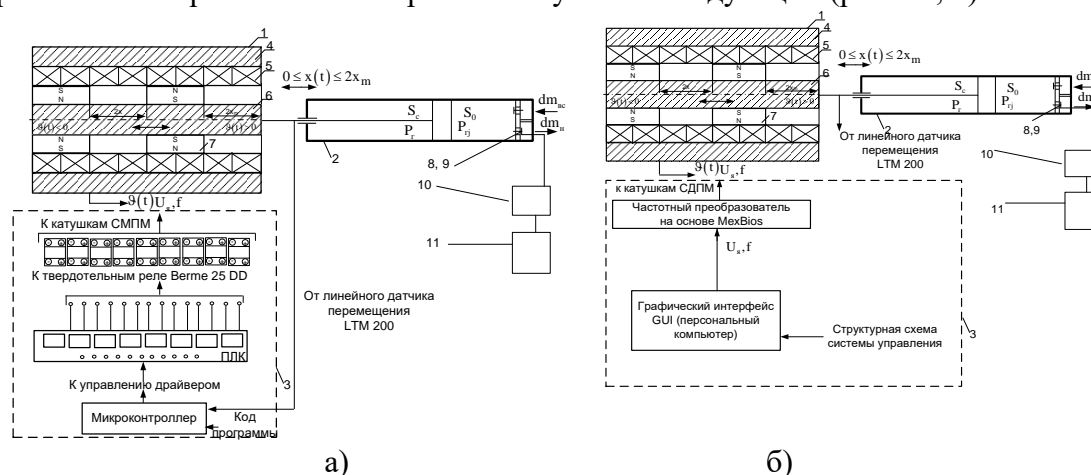


Рисунок 21. Система управления ЛМЭП с возможностью переключения обмоток (а), схема присоединения частотного преобразователя с открытым программным кодом MexBios(б): 1 – тихоходный СДПМ, 2 – компрессорная ступень, 3 – система управления, 4 – внешний магнитопровод, 5 – обмотка СДПМ, 6 – внутренний магнитопровод, 7 – постоянные магниты, 8 – датчик давления, 9 – датчик температуры, 10 – усилитель, 11 – осциллограф

На рис. 22 представлен разработанный макетный образец СДПМ и структурная схема управления частотным преобразователем.

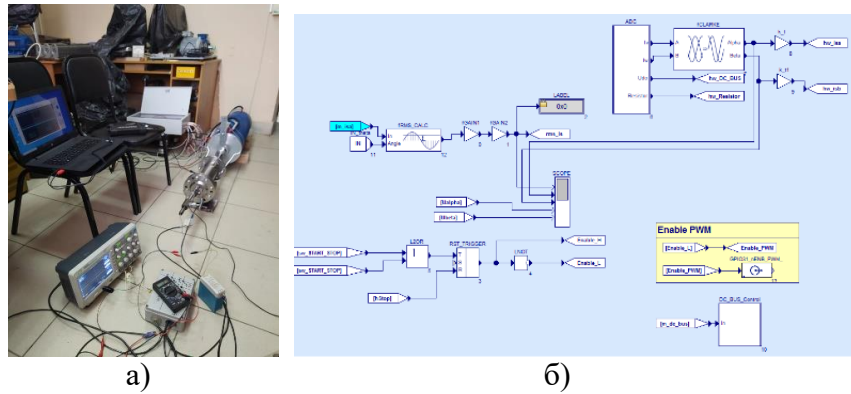


Рисунок 22. Макетный образец тихоходного СДПМ для поршневой компрессорной ступени с системой управления (а), структурная схема ШИМ (б)

Временные зависимости выходных параметров ЛМЭП приведены на рис. 23. Экспериментально установлена возможность применения исследуемых систем управления.

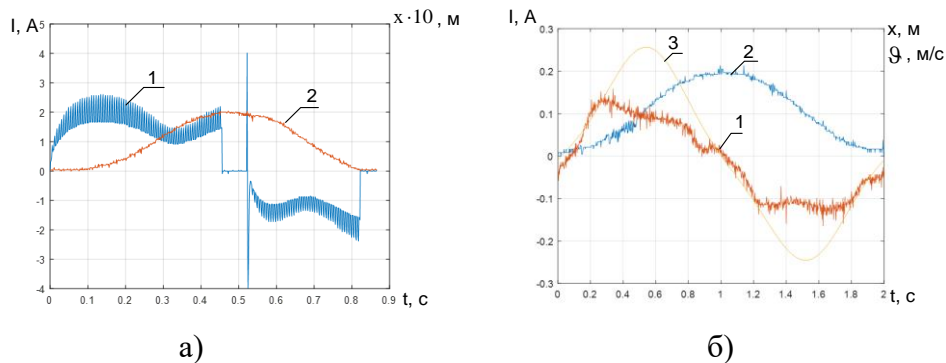


Рисунок 23. Результаты испытаний ЛМЭП: а) питание обмотки двигателя выпрямленным напряжением, б) при помощи частотного преобразователя с открытым программным кодом: 1 – временная зависимость тока, 2 – закон изменения хода индуктора, 3 – закон изменения скорости перемещения индуктора

Экспериментально полученный КПД электромеханического преобразователя для предложенной конструкции тихоходной СДПМ $\eta_{д.мах} = 82.1\%$.

В заключении диссертации сформулированы основные результаты работы.

1. Предложен метод проектирования оптимальных конструкций тихоходных СМПМ вращательного и возвратно-поступательного движения, работающих в двигательном и генераторном режимах в составе ВЭУ и ЛМЭП, в соответствии с выбранным критерием оптимальности, что позволило осуществить разработку комплектов конструкторской документации для изготовления опытных образцов тихоходных СГПМ и СДПМ с улучшенными пусковыми и эксплуатационными характеристиками.

На основе предложенного метода проектирования тихоходных СМПМ проведено решение задачи оптимизации их параметров. Впервые получены выражения, устанавливающие аналитическую взаимосвязь конструктивных параметров с энергетическими показателями работы тихоходных СМПМ.

2. Разработаны обобщенные математические модели СМПМ, объединяющие математические модели подсистем различной физической природы, отличающиеся от известных возможностью прямой интеграции конечно-элементного анализа расчета осесимметричных и трехмерных магнитных полей тихоходных СМПМ.

3. Получены рекуррентные соотношения для определения векторного магнитного потенциала в узлах триангуляционной сети модели магнитного поля, позволяющие максимально автоматизировать процесс создания глобальной СЛАУ. Верификация полученных рекуррентных соотношений произведена путем сопоставления

экспериментальных измерений магнитной индукции в воздушном зазоре при помощи миллитесламетра ТПУ – 01 разработанных тихоходных СМПМ и результатов расчета, при этом расхождение в локальной точке не превышает 5%.

4. Предложена методика идентификации опытных образцов постоянных магнитов для конструирования тихоходных СМПМ в составе ВЭТК в основе критерия одинаковой объемной намагниченности. Экспериментально установлено, что результаты среднеквадратичного отклонения, полученного при взаимодействии испытуемого постоянного магнита 50x50x25 мм и магнитного отражателя для опытных образцов из партии постоянных магнитов 48 шт., составляют до 12%.

5. Разработаны алгоритмы и программы по оптимизации магнитных систем предложенных конструкций тихоходных синхронных магнитоэлектрических машин в составе ВЭУ и ЛМЭП, отвечающих выбранному критерию оптимальности и режиму работы. На основе обобщения и развития известных и предложенных в диссертации математических моделей, методик, алгоритмов проектирования и подходов к созданию ВЭТК с тихоходными СМПМ предложены принципы создания энергоэффективных СГПМ модульного типа и СГПМ с общим цилиндрическим магнитопроводом в модельном ряду ВЭУ до 30 кВт, а также СДПМ возвратно-поступательного движения для ЛМЭП с возможностью сжатия газа одной ступенью до 2 МПа.

6. Исследованы динамические характеристики тихоходных СМПМ в составе ВЭТК и даны рекомендации по оптимальному проектированию ВЭУ:

- исследовано влияние высоты постоянного магнита и величины воздушного зазора на эффективность СГПМ модульного типа и установлены оптимальные параметры магнитной системы, при которой изменение магнитного поля в воздушном зазоре под действием реакции якоря будет минимальным;

- исследование пускового момента СГПМ с общим цилиндрическим магнитопроводом указывает на рациональность построения магнитной системы с двумя полуобмотками, в которой число пазов, приходящихся на полюс и фазу представляет собой периодическую дробь.

Впервые разработан и применен электротехнический комплекс длинноходовой компрессорной ступени для обеспечения средних и высоких давлений до 2 МПа на основе тихоходного СДПМ возвратно-поступательного движения 2 кВт на ход поршня 0.2 м, напряжение питания 240 В, ток 10 А, представлена методика проектирования, расчета, а также конструкторская документация.

Проведены исследования различных конструктивных схем синхронных магнитоэлектрических машин в составе ВЭУ, в результате которых установлено, что

- конструкции СГПМ модульного типа с независимыми магнитопроводами имеют низкий коэффициент несинусоидальности выходного напряжения (менее 1%), что позволяет использовать их с системой управления на базе нейронной сети. Исследования и экспериментальные испытания проводились на СГПМ модульного типа, имеющего шесть пар полюсов постоянных магнитов и восемь электромагнитов;

- применяемый в ЛМЭП для испытания вязкоупругих свойств эластомеров СДПМ возвратно-поступательного движения с двумя воздушными каналами и постоянными магнитами, намагниченными в радиальном направлении, имеет меньшую массу индуктора и обладает лучшими динамическими свойствами по сравнению с СДПМ с постоянными магнитами, намагниченными в осевом направлении;

- ЛМЭП тихоходного длинноходового одноступенчатого поршневого компрессора на основе СДПМ с постоянными магнитами призматической формы, расположенными на шестигранном индукторе, позволяет обеспечить заданное электромагнитное усилие на сжатие 2000 Н и максимум КПД 82.1%.

7. Разработаны, исследованы и рекомендованы к внедрению новые, научно обоснованные конструктивные схемы СМПМ в составе ВЭУ и ЛМЭП. Проведены

экспериментальные исследования тихоходных СМППМ в статическом и динамическом режимах с учетом особенностей их работы в двигательном и генераторном режимах работы.

На основе проведенных исследований разработаны методики, алгоритмы проектирования тихоходных СМППМ в составе ВЭТК конкретного назначения и выполнены их программные реализации, позволяющие осуществить обоснованный выбор базовых конструкций магнитных систем в соответствии с заданным техническим заданием и режимом работы электрической машины. В результате обобщения исследований, приведенных в диссертации, разработан общий подход к проектированию и созданию тихоходных синхронных магнитоэлектрических машин с постоянными магнитами в составе ветроэнергетических установок и линейного магнитоэлектрического привода, представляющий собой набор методик, математических моделей, приведенных в главах диссертации. Предложенный подход представлен в виде методологии, суть которой заключается в обосновании базовой конструкции магнитной системы тихоходной синхронной магнитоэлектрической машины с постоянными магнитами на основе аналитических выражений, устанавливающих взаимосвязь между конструктивными параметрами машины и выходными параметрами комплекса, полученных при оптимизационном расчете по критерию минимума удельных электромагнитных потерь и последующего ее уточнения на основе исследования магнитного поля, что позволяет минимизировать материальные и временные затраты при проектировании и изготовлении тихоходной СМППМ и ВЭТК в целом. Цель работы достигнута.

Перспективы дальнейшей разработки темы исследования представляется целесообразным ориентировать по следующим направлениям:

- продолжение работ по применению разработанных методов оптимального проектирования для других конструктивных схем СМППМ;
- продолжение работ по созданию новых конструктивных схем СГППМ в составе ВЭУ;
- продолжение работ по созданию систем управления СДППМ в составе привода поршневого компрессора, в том числе с использованием нейросетевых технологий и нечеткой логики, реализующих заданный закон движения подвижной части.

Публикации автора по теме диссертации

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

1. Татевосян, А.А. Оптимизация тихоходного синхронного генератора модульного типа и принцип реализации системы управления напряжением генератора на основе нейронной сети / А.А. Татевосян// *Электричество*, №7, – 2021, С. 61-70

2. Татевосян, А.А. Исследование рабочих процессов энергопреобразования в магнитоэлектрическом приводе тихоходного одноступенчатого поршневого компрессора на заданный закон движения якоря при обеспечении максимума КПД// *Омский научный вестник*. – 2020. – №3 (171). – С. 37-41.

3. Татевосян, А.А. Формирование общего подхода к оптимальному проектированию высокотехнологических энергоэффективных электротехнических комплексов на основе тихоходных синхронных магнитоэлектрических машин/А.А. Татевосян, А.В. Бубнов//*Омский научный вестник*. – 2019. – №6 (168). – С. 46-51.

4. Татевосян, А.А. Методика формирования численного проекционно-сеточного алгоритма на основе «трехмерного регулярного элемента» для расчета 3D-моделей магнитного поля в цилиндрической системе координат для синхронных магнитоэлектрических машин в составе высокотехнологических электротехнических комплексов/ А.А. Татевосян, Е.Г. Андреева //Омский научный вестник. – 2019. – №6 (168). – С. 40-45.

5. Татевосян, А.А. Решение задачи оптимального управления магнитоэлектрического привода колебательного движения//Омский научный вестник. – 2019. – №4 (166). – С.48-51.

6. Татевосян, А.А. Исследование влияния конструктивных параметров тихоходных синхронных генераторов с постоянными магнитами в составе электротехнических

комплексов на их энергетические характеристики//Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2019. – №2. –т. 15 – С.15-25.

7. Татевосян, А.А. Выбор оптимальной конструкции, экспериментальное исследование и математическое моделирование магнитного поля низкооборотного синхронного генератора на постоянных магнитах//Омский научный вестник. – 2018. – №6. – С.86-93.

8. Татевосян, А.А. Моделирование магнитного поля синхронного генератора с постоянными магнитами/ А.А. Татевосян, В.С. Мищенко//Омский научный вестник. – 2016. – №4. – С. 90-93.

9. Татевосян, А.А. Расчет индуктированной ЭДС в витке при относительном движении постоянного магнита с различной формой поперечного сечения/ А.А. Татевосян, Б.И. Огорелков, А.С. Татевосян // Омский научный вестник. – 2014. – №3. – С. 179-183.

10. Татевосян, А.А. Исследование моделей магнитных систем открытого типа в комплексах программ ELCUT и ANSYS/ А.А. Татевосян, Е.Г. Андреева, И.А. Семина// Омский научный вестник – 2013. -№2 (120). – С.231-236

11. Татевосян, А.А. Синтез многоконтурной схемы замещения эластомеров.// Электротехнические и информационные комплексы и системы – 2013. – №3. – С.24-31.

12. Татевосян, А.А. Имитационное трехмерное моделирование с помощью программного пакета ANSYS конструкции линейного магнитоэлектрического двигателя/Е.Г. Андреева, А.А. Татевосян // Омский научный вестник. – 2010. – №2. – С.141-144.

13. Татевосян, А.А. Исследование осесимметричной модели магнитной системы открытого типа. //А.А. Татевосян, Е.Г. Андреева, И.А. Семина// Омский научный вестник. – 2010. – №1. – С.110-113.

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

14. Татевосян, А.А. Экспериментальная оценка характеристик системы «компрессорная ступень–линейный магнитоэлектрический привод / С. С. Бусаров, А. В. Недовенчаный, И. С. Бусаров, А. О. Жуков.//Омский научный вестник. Серия Авиационно-ракетное и энергетического машиностроение Т.5, №2, – 2021, С.59 – 65.

15. Татевосян, А.А. Разработка, моделирование и экспериментальное исследование синхронного генератора с постоянными магнитами/А.А. Татевосян, Е.Г. Андреева // Промышленная энергетика. – 2019. – №4. 15 – С.20-28.

16. Татевосян, А.А. Разработка стенда для испытания синхронных генераторов с постоянными магнитами /А.А. Татевосян, А.С. Татевосян, А.А. Бельский, В.С. Добуш // Промышленная энергетика. – 2019. № 12. – С. 57-62.

17. Татевосян, А.А. Расчет оптимальных параметров электромагнитного привода колебательного движения/А.А. Татевосян, А.С. Татевосян // Известия томского политехнического университета. – 2014. – т. 325, №4. – С.121-133.

Статьи в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в международной базе данных SCOPUS / Web of Science

18. Tatevosyan, A.A. Determination of conditions for optimal control of a permanent magnet synchronous motor of a single-stage reciprocating compressor for a proposed law of motion for ensuring the maximum efficiency/A.A. Tatevosyan DOI:10.1088/1742-6596/1901/1/012080// Journal of Physics: Conference Series. –1901 (2021) 012080. – P. 1-7.

19. Tatevosyan, A.A. Characteristics research of a permanent magnet linear synchronous motor driving piston compressor/ A.A. Tatevosyan, D.A. Polyakov, M.A. Kholmov//Proceedings of the 3rd 2021 International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering, REEPE 2021. 3. 2021. С. 9387980.

20. Tatevosyan, A.A. Research of heat mode of linear permanent magnetmotor for Long – Way one stage piston compressor/A.A. Tatevosyan DOI:10.1088/1742-6596/1791/1/012062 // Journal of Physics: Conference Series. –1791 (2021) 012062. – P. 1-6.

21. Tatevosyan, A.A. Calculation And Simulation Of Slow-Moving Linear Magnetolectric Drive Of Single-Stage Piston Compressor/A.A. Tatevosyan, N.V. Zaharova DOI:10.1088/1742-6596/1546/1/012054 // Journal of Physics: Conference Series. –1546 (2020) 012054. – P. 1-7.
22. Tatevosyan, A.A. Comparative analysis of the magnetolectric drive with linear drives of low-speed single-stage piston units / A. A. Tatevosyan , S. S. Busarov , R. E. Kobyl'skiy, T. A. Zamiralova DOI: 10.1063/5.0027296// AIP Conference Proceedings. – 030064(2020) 2285.
23. Tatevosyan, A.A. Research of the Piston Movement Law Effect on Energy and Dynamic Characteristics of a Single-Stage Compressor Unit with a Linear Magnetolectric Drive / A.A. Tatevosyan, S.S. Busarov, A.V. Nedovenchaniy DOI:10.1063/5.0027290 // AIP Conference Proceedings. – 030066 (2020) 2285.
24. Tatevosyan, A.A. General Approach to Calculation of Magnetic System of Slow-Moving Linear Magneto-Electric Drive as Part of Electrical Complex/ A.A. Tatevosyan, A.V. Bubnov, E.G. Andreeva, A.S. Tatevosyan DOI:10.1088/1742-6596/1546/1/012053 // Journal of Physics: Conference Series. –1546 (2020) 012053. – P. 1-7.
25. Tatevosyan, A.A. Mathematical Description of Solution of the Three-Dimensional Boundary Value Problem for the Stationary Magnetic Field in the Cylindrical Coordinate System /A.A. Tatevosyan, E.G. Andreeva DOI:10.1088/1742-6596/1441/1/012016 // Journal of Physics: Conference Series – 1441(2020) 012016. – P.1-7.
26. Tatevosyan, A.S. Experimental method for identifying high-coercive permanent magnets / Tatevosyan, A.S., Tatevosyan, A.A., Pedder, V.V., Zaharova, N.V. doi:10.1088/1742-6596/1260/5/052031// Journal of Physics: Conference Series – 1260(2019) 052031. –P.1-7
27. Tatevosyan, A.S., Tatevosyan, A.A., Zaharova, N.V. Calculation of Non-Stationary Magnetic Field of the Polarized Electromagnet with the External Attracted Anchor/A.S. Tatevosyan, A.A. Tatevosyan, N.V. Zaharova DOI:10.1088/1742-6596/1050/1/012086 //Journal of Physics:Conference Series.–2018.–№4(166).–P.1-5.
28. Tatevosyan. A.A. Modeling Of Magnetolectric Drive For The Research Of Rheological Properties Of Elastomers/ A.A. Tatevosyan DOI: 10.1063/1.5051959 //AIP Conference Proceedings, 2018
29. Tatevosyan. A.S. Determination of the Multicircuit Equivalent Parameters for the Linear Electromagnetic Motor with a Massive Anchor by the Non-Stationary Magnetic Field Analysis in Elcut Software/ A.S. Tatevosyan, A.A. Tatevosyan, N.V. Zaharova DO: 10.1109/SIBCON.2017.7998494//2017 International Siberian Conference On Control And Communications (SIBCON): proceedings, Astana, June, 29-30, 2017. – Astana: Kazakhstan, IEEE Russia Siberia Section, 2017.

Монографии

30. Татевосян, А. А. Линейный магнитоэлектрический привод: монография /А.А. Татевосян; Минобрнауки России, ОмГТУ. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2013. – 108 с.: ил.
31. Татевосян, А. А. Динамика электромагнитов: монография / [А.А. Татевосян и др.]; Минобрнауки России, ОмГТУ. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2016. – 148 с.: ил.
32. Татевосян, А. А. Исследование магнитных и электрических характеристик электротехнических устройств с применением программного обеспечения LabView: учебное пособие [гриф УМО ВУЗов России] / [А.А. Татевосян и др.]; Минобрнауки России, ОмГТУ: Изд-во ОмГТУ, 2014.–88 с.: ил.

Другие издания

33. Татевосян, А.А. Исследование теплового режима тихоходного линейного магнитоэлектрического привода для длинноходового одноступенчатого поршневого компрессора/ А.А. Татевосян // Динамика систем, механизмов и машин. Т.8, №3. Омск, – 2020. С. 77-80
34. Татевосян, А.А. Сравнительный анализ магнитоэлектрического привода с существующими линейными приводами тихоходных одноступенчатых поршневых агрегатов/А.А. Татевосян, С.С. Бусаров, Т.А. Замиралова// Техника и технология

нефтехимического и нефтегазового производства. Матер. 10-й Междунар. науч.-техн. конф. Омск, –2020. С. 183-185.

35. Татевосян, А.А. Расчет и проектирование тихоходного синхронного магнитоэлектрического двигателя в составе привода длинноходового одноступенчатого поршневого компрессора/ А.А. Татевосян// Фёдоровские чтения — 2020: I Междунар. науч.-практ. конф. с элементами науч. шк. – МЭИ, Москва, 2020. С. 294-301.

36. Татевосян, А.А. Методика идентификации опытных образцов постоянных магнитов на примере индуктора магнитоэлектрического привода тихоходного одноступенчатого поршневого компрессора/А.А. Татевосян, А.С. Татевосян, Н.А. Хлянов, А.А. Макарова// Актуальные вопросы энергетики. материалы всероссийской науч.-практ. конф. с междунар. участием. ОмГТУ, 2020. Т. 2. № 1. С. 84-88.

37. Татевосян, А.С. Математическое моделирование магнитных полей и сил взаимодействия катушек с током и постоянных магнитов: монография/А.С. Татевосян, А.А. Татевосян, Б.И. Огорелков, Н.В. Захарова//Минобрнауки России, ОмГТУ. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2019. – 120 с.: ил.

38. Татевосян, А.А. Уравнения магнитного поля для численного исследования магнитоэлектрических машин в электротехническом комплексе / Е. Г. Андреева, А. А. Татевосян// Актуальные проблемы современной науки : материалы VIII Регион. науч.-практ. конф. с междунар. участием, ОмГТУ. – Омск, –2019. – С. 64–68.

39. Татевосян, А.С. Разработка стенда и методики идентификации постоянных магнитов. // Актуальные вопросы энергетики /А.С. Татевосян, А.А., Татевосян, Н.В. Захарова, Н.Д. Буряков//Актуальные вопросы энергетики: материалы всероссийской науч.-практ. конф. с междунар. участием. ОмГТУ, – Омск, –2018. С. 287-293.

40. Татевосян, А.А. Использование высококоэрцитивных постоянных магнитов в магнитоэлектрических машинах и классификация машин/А.А. Татевосян, Е.Г. Андреева// Актуальные проблемы современной науки. Материалы VII Рег. Науч.-практ. конф. с междунар. участием. Минобрнауки России, ОмГТУ, –2018. С. 123-126.

41. Татевосян, А.А., Метод исследования реологических свойств эластомеров на основе синтеза многоконтурной схемы замещения опытного образца/А.А. Татевосян, А.С. Татевосян // Техника и технология нефтехимического и нефтегазового производства : материалы 7-й Междунар. науч.-техн. конф., ОмГТУ – Омск, –2017, С.14-15.

42. Татевосян, А.А. Конструкция и моделирование бесколлекторного синхронного генератора с постоянными магнитами / А.А. Татевосян, В.В. Фокина// Россия молодая: передовые технологии - в промышленность. – 2015. – № 1. – С. 275–278.

43. Татевосян, А.А. Исследование индуктированной электродвижущей силы в обмотке магнитоэлектрического генератора/А.А. Татевосян, А.С. Татевосян, В.В. Фокина// Электротехника, электротехнология, энергетика : сб. науч. тр. VII Междунар. науч. конф. молодых ученых. – Новосибирск: НГТУ –2015. – Ч. I. – С. 67–71.

44. Татевосян, А.А. Моделирование осесимметричного магнитного поля линейного магнитоэлектрического двигателя/А.А. Татевосян, А.Ю. Самохвалова// Энергоэффективность и экономика: тематический сборник научных трудов. -Омск: Полиграфический центр КАН, 2012. -С. 177-183.

45. Татевосян, А.А. Исследование магнитного поля системы открытого типа с использованием комплексов программ ELCUT и ANSYS/А.А. Татевосян, И.А. Семина // Россия молодая: передовые технологии - в промышленность: материалы IV Всерос. молодежной науч. -техн. конф. с междунар. участием, 15-17 ноября, 2011 в 2 кн. - Омск: ОмГТУ, 2011.-С. 120-127.

Патенты и свидетельства отраслевой регистрации

Патенты

46. Пат. №2743072 РФ. МПК. G01N 24/08 (2006.01) Способ и устройство идентификации постоянных магнитов по объемной намагниченности/ А.А.Татевосян, А.С. Татевосян. Заявка №2020120695; Оpubл. 15.02.2021, Бюл. №5. – 2 с.: ил.

47. Пат. №2720882 РФ. МПК. H02K 41/03 (2006.01) Электротехнический комплекс поршневого компрессора на основе линейной магнитоэлектрической машины /А.А.Татевосян, С.С. Бусаров, С.С. Сиромеха. Заявка №2019127825; Оpubл. 13.05.2020, Бюл. №14. – 12 с.: ил.

48. Пат. №2718641 РФ. МПК. G01N 24/08 (2006.01) Способ и устройство идентификации постоянных магнитов по объемной намагниченности/ А.А.Татевосян. Заявка №2019127858; Оpubл. 10.04.2020, Бюл. №10. – 10 с.: ил.

49. Пат. №2707559 РФ. МПК H02K21/14 (2006.01). Линейная магнитоэлектрическая машина/ А.А.Татевосян, С.С. Сиромеха, С.С. Бусаров Заявка №2019117544 Оpubл. 28.11.2019, Бюл. №34. – 12 с.: ил.

50. Пат. №2693011 РФ. МПК H02K21/14 (2006.01). Бесколлекторный синхронный генератор модульного типа с постоянными магнитами/ А.А.Татевосян. Заявка №2018146967; Оpubл. 01.07.2019, Бюл. №19. – 12 с.: ил.

51. Пат. №2687964 РФ. МПК H02K21/14 (2006.01). Бесколлекторный синхронный генератор с постоянными магнитами / А.А.Татевосян, А.С. Татевосян. Заявка №2018136868; Оpubл. 17.05.2019, Бюл. №14. – 9 с.: ил.

52. Пат. №2667661 РФ. МПК H02K23/26 (2006.01). Способ изготовления усовершенствованной магнитоэлектрической машины/А.А. Татевосян. Заявка №2017136935; Оpubл. 24.09.2018, Бюл. №27. – 13 с.: ил.

53. Пат. №2660945 РФ. МПК H02K3/12 (2006.01). Магнитоэлектрическая машина/ А.А.Татевосян, А.С. Корнев. Заявка №2016147632; Оpubл. 11.07.2018, Бюл. №20. – 14 с.: ил.

54. Пат. №2632817 РФ. МПК H02K 23/00 (2006.01).Способ получения повышенного выходного напряжения /А.А. Татевосян. Заявка №2016118977; Оpubл. 10.10.2017, Бюл.№28.– 8 с.: ил.

55. Пат. №2604051 РФ. МПК H02K 21/14 (2006.01). Магнитоэлектрическая машина/ А.А.Татевосян, А.С. Татевосян. Заявка №2015140379/07; Оpubл. 10.12.2016, Бюл. №34. – 10 с.: ил.

56. Пат. №2585279 РФ. МПК H02K1/27 (2006.01). Магнитоэлектрическая машина/ А.А. Татевосян, А.С. Татевосян, Б.И. Огорелков. Заявка №2015122572/07; Оpubл. 27.05.2016, Бюл. №15. – 12 с.: ил.

57. Пат. №2565775 РФ. МПК H02K 21/14 (2006.01). Бесколлекторный синхронный генератор с постоянными магнитами/ А.А.Татевосян, А.С. Татевосян. Заявка №2014140005/07; Оpubл. 20.10.2015, Бюл. №29. – 8 с.: ил.

58. Пат. №151437 РФ. МПК H02K23/04 (2006.01). Магнитоэлектрическая машина/ А.А.Татевосян, А.С. Татевосян. Заявка №2014134571/07; Оpubл.10.04.2015,Бюл.№10. – 2 с.:

59. Пат. №2516270 РФ. МПК H02K 21/12 (2006.01). Магнитоэлектрическая машина/ А.А.Татевосян. Заявка №2012138233/07; Оpubл. 20.05.2014, Бюл. №14. – 8 с.: ил.

60. Пат. №116714 РФ. МПК H02K21/24 (2006.01). Магнитоэлектрическая дисковая машина/ А.С.Татевосян, А.А.Татевосян. Заявка №2011153158/07; Оpubл.27.05.2012, Бюл. №15. – 2 с.: ил.

Свидетельства

61. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ №2021660370 Российская Федерация. Расчет оптимальных конструкций тихоходных синхронных магнитоэлектрических генераторов модульного типа в составе электротехнических комплексов по максимуму удаленной мощности: №2021619730; заявл. 25.06.2021, опубл. 25.06.2021/А.А. Татевосян; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «ОмГТУ».

62. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ №2020617967 Российская Федерация. Расчет оптимальных конструкций тихоходных синхронных магнитоэлектрических генераторов с общим цилиндрическим магнитопроводом в составе электротехнических комплексов по критерию максимума КПД: №2020616972; заявл.08.07.2020, опубл. 15.07.2020/А.А. Татевосян; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «ОмГТУ».

63. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ №2020613416 Российская Федерация. Численный расчет магнитного поля осесимметричных конструкций синхронных магнитоэлектрических машин в составе электротехнических комплексов: №2020612340; заявл. 06.03.2020, опубл. 16.03.2020 /А.А. Татевосян; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «ОмГТУ».

64. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ №2019661236 Российская Федерация. Оптимизация параметров магнитоэлектрического привода колебательного движения: №2019660163; заявл. 20.08.2019, опубл. 23.08.2019/А.А. Татевосян; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «ОмГТУ».

65. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ №2019614129 Российская Федерация. Оптимизация электромагнитных параметров синхронного генератора модульного типа с постоянными магнитами и определение основных размеров его магнитной системы: заявл. №2019613026, опубл. 01.04.2019/А.А. Татевосян; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «ОмГТУ».

66. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ №2015612665 ФИПС. Расчет индуктированной электродвижущей силы (ЭДС) синхронного магнитоэлектрического генератора на базе асинхронной электрической машины: заявл. 2014663558, опубл. 20.03.2015 /А.А. Татевосян, Б.И. Огорелков; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «ОмГТУ».

67. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ №2013619811 ФИПС. Расчет оптимальных конструкций магнитных систем магнитоэлектрического привода по исследованию вязкоупругих свойств эластомеров: заявл. №2013617561, опубл. 20.12.2013/А.А. Татевосян; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «ОмГТУ».

Личный вклад. Автор внес определяющий вклад в постановку задачи, выбор направлений и методов исследования, в проведении экспериментальных исследований, в разработку технических решений и практическую реализацию макетных образцов тихоходных синхронных магнитоэлектрических машин в составе электротехнических комплексов, обобщение полученных результатов. В работах и изобретениях автору принадлежат: идея применения общего подхода к оптимальному проектированию конструкций магнитных систем магнитоэлектрических машин, входящих в состав ВЭТК, работающих в генераторном и двигательном режимах на заданный критерий оптимальности, развитие теории создания синхронных магнитоэлектрических генераторов модульного типа, разработка математических моделей для исследования динамических характеристик тихоходных СМПМ.

В работах, подготовленных в соавторстве, автору принадлежат полученные расчетные формулы, анализ результатов, обработка экспериментальных данных.

Автору также принадлежат разработанные в ходе подготовки диссертации имитационные модели магнитных систем тихоходных магнитоэлектрических машин, а также разработанное программное обеспечение по расчету и проектированию конструкций магнитных систем.

Все результаты, составляющие научную новизну диссертации и выносимые на защиту, получены автором лично.

Печатается в авторской редакции

Подписано в печать 08.02.22 г. Формат 60x84/16.

Отпечатано на дупликаторе. Усл.печ.л. 2,5.

Тираж 100 экз. Заказ 21.

Типография: 644050, Омск-50, пр. Мира, 11, т.: 65-32-08.

Омский государственный технический университет,
отдел научной информации