

На правах рукописи

ИВАНОВ Сергей Николаевич

**Электротехнические перекачивающие устройства на основе
электромеханических теплогенерирующих преобразователей**

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и
системы

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ 2010

Работа выполнена в Федеральном государственном образовательном
учреждении высшего профессионального образования
«Петербургский государственный университет путей сообщения»

Научный консультант: доктор технических наук, профессор,
член IEEE
КИМ Константин Константинович

Официальные оппоненты: заслуженный работник Высшей школы РФ,
доктор технических наук, профессор
КИСЕЛЕВ Игорь Георгиевич

доктор технических наук, профессор,
член IEEE
МИКЕРОВ Александр Геннадьевич

доктор технических наук, профессор
ВЛАСЬЕВСКИЙ Станислав Васильевич

Ведущая организация: Санкт-Петербургский государственный
политехнический университет (СПбГТУ)

Защита диссертации состоится “ 24 ” декабря 2010 г. в 13³⁰ часов на
заседании диссертационного совета Д 218.008.05 при Федеральном
государственном образовательном учреждении высшего
профессионального образования «Петербургский государственный
университет путей сообщения» по адресу: 190031, г. Санкт-Петербург,
Московский пр., д., ауд. 5-407

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан “ _____ ” _____ 2010 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
д.т.н., профессор

В.А. Кручек

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы: работа направлена на решение проблемы экономического обеспечения заданных температурных условий на пассажирском железнодорожном транспорте за счет разработки и применения объектов и технологий, обеспечивающих эффективное использование энергетических ресурсов и снижение потерь при их передаче потребителям в соответствии с Энергетической стратегией России на период до 2030 года, предусматривающей повышение энергетической и экологической эффективности отечественной энергетики и реализацию программ и мероприятий Федерального закона Российской Федерации "Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности".

Актуальность рассматриваемых в работе вопросов подтверждается выбором направлений «Энергосбережение и энергосберегающие технологии» и «Создание энергосберегающих систем транспортировки, распределения и потребления тепла и электроэнергии» в качестве приоритетных направлений развития науки и техники, направленных на производство и повышение эффективности генерирования, передачи и использования тепловой энергии, как одной из наиболее важных и сложных задач при создании специального энергетического оборудования - электротехнических устройств транспортного назначения и систем управления генерацией тепловой энергией и транспортированием теплоносителя, обеспечивающих не только возможность экономичного и точного поддержания заданных эксплуатационных показателей, но и отвечающих современным требованиям электробезопасности, надежности и технологичности.

Сравнительный анализ существующих типов исполнительных устройств, являющихся источниками тепловой энергии показал, что предпочтительными для автономных теплоснабжающих установок являются устройства, преобразующие электрическую энергию и характеризующиеся экологической чистотой, безопасностью, относительно низкими капитальными затратами, отсутствием необходимости в использовании протяженных тепломагистралей (а следовательно, низкими теплотерями), мобильностью и т.д. Наиболее распространенные установки, выполненные на основе трубчатых нагревательных элементов, электронагреватели с открытыми тепловыделяющими элементами и устройства трансформаторного типа имеют низкий коэффициент теплоотдачи и небольшую площадь теплоотдающей поверхности. Сказанное привело к созданию электронагревательных устройств, не только лишенных отмеченных недостатков и обладающих высокими регулировочными

характеристиками, но и совмещающими в себе функции генерирования тепловой энергии и транспортирования теплоносителя - теплогенерирующих электромеханических преобразователей (ТЭМП). Отсутствие на тот момент теоретических основ проектирования ТЭМП и систем управления электротехническими устройствами на их основе (ЭТУ) также предопределило актуальность темы исследования.

Объект исследования: электротехническое оборудование систем отопления пассажирского железнодорожного транспорта.

Предмет исследования: проблема энергетически эффективного, безопасного и надежного теплоснабжения транспортных систем.

Цель работы: решение крупной научно-технической проблемы экономичного обеспечения заданных температурных условий на пассажирском железнодорожном транспорте за счет создания энергетического оборудования на основе управляемых электротехнических устройств, обеспечивающих эффективную генерацию тепловой энергии и транспортирование теплоносителя.

В соответствии с целью в работе ставятся следующие задачи:

- анализ существующих и перспективных исполнительных электротехнических устройств для экономичного обеспечения заданных температурных условий посредством преобразования электрической энергии в тепловую и перемещения теплоносителя в транспортных системах;

- анализ электромагнитных, тепловых и гидравлических процессов в ЭТУ с использованием ТЭМП и на этой основе разработка принципов конструирования исполнительных элементов устройств, обеспечивающих эффективную генерацию тепловой энергии и транспортирование теплоносителя, создание теории и методики их проектирования и определение обобщенных энергетических показателей данного электротехнического устройства;

- исследование рабочих характеристик ЭТУ аналитическими, численными и экспериментальными методами и формирование на этой основе базы знаний, адекватно описывающей процессы в ТЭМП при генерации тепловой энергии и транспортировании теплоносителя как объекте управления (ОУ);

- анализ систем управления электротехническими устройствами для генерации тепловой энергии и/или транспортирования теплоносителя, обоснование и разработка метода экономичного управления тепловым процессом (ТП) и алгоритмов его реализации, обеспечивающих субоптимальное управление ЭТУ с заданной температурой, производительностью или давлением;

- разработка и реализация процесса изготовления исполнительных элементов, обеспечивающих требования безопасности, надежности и технологичности ЭТУ;

- обоснование и разработка метода определения показателей надежности ЭТУ на основе ТЭМП с учетом конструкторско-технологических и эксплуатационных факторов транспортных систем;

- разработка рекомендаций по проектированию, конструированию, производству, внедрению и эксплуатации электротехнических перекачивающих устройств на основе электромеханических теплогенерирующих преобразователей на железнодорожном транспорте.

Методы исследований включают аналитические и численные методы расчета электромагнитных и тепловых полей, теорию электрических цепей, теорию обобщенного электромеханического преобразователя энергии, теплофизику, гидравлику, теорию подобия, теорию планирования эксперимента, физическое, математическое и численное моделирование, современные методы, способы и средства экспериментальных исследований. В качестве основных математических средств использованы методы математического анализа, вычислительная математика, математический аппарат теории нечетких множеств, теории вейвлетов, дискретной математики, методы математического программирования. Использовались пакеты ELCUT, FEMLAB, Comsol Multiphysics, NASTRAN, Matlab и MathCAD, с целью автоматизации процесса проектирования аппаратного обеспечения использован пакет MAX+PLUS II 10.1 BASELINE, для измерений - PowerGraph 2.1.

Достоверность результатов подтверждается как использованием апробированных теоретических положений и математического аппарата, так и согласованными результатами вычислительных и натуральных физических экспериментов, проведенных с применением стандартизованных методов испытаний на современном оборудовании.

Научная новизна заключается в решении сложной научно-технической проблемы экономичного обеспечения заданных температурных условий на пассажирском железнодорожном транспорте за счет разработки и исследования электротехнических комплексов, объединяющих исполнительные устройства и системы управления генерацией тепловой энергии и транспортированием теплоносителя.

Научную новизну составляют:

- теоретические способы учета особенностей преобразования электрической энергии в тепловую и механическую в теплогенерирующем электромеханическом преобразователе, являющимся исполнительным элементом ЭТУ, обеспечивающего экономичную генерацию тепловой энергии и транспортирование теплоносителя с заданными температурой, производительностью или давлением;

- теоретически обоснованные принципы конструирования и на их основе новые конструкции исполнительных элементов, совмещающих функции генерации тепловой энергии и транспортирования теплоносителя, реализованные в виде теплогенерирующих электромеханических

преобразователей энергии с короткозамкнутыми вторичными обмотками, характеризующиеся высокой степенью электробезопасности и надежности;

- новые математические модели электромагнитных, тепловых и гидравлических процессов, позволяющие проектировать и исследовать электротехнические перекачивающие устройства с учетом особенностей конструкции исполнительных элементов;

- субоптимальная система управления (ССУ) электротехническими устройствами для генерации тепловой энергии и транспортирования теплоносителя и способ ее построения на основе принципа разделения, в соответствии с которым ССУ синтезируется в виде последовательно соединенных оптимального нелинейного фильтра (ОНФ) и детерминированного оптимального регулятора (ДОР), обеспечивающих требуемые показатели качества управления температурой в условиях пассажирского железнодорожного транспорта;

- способ и технология изготовления элементов электротехнических устройств для генерации тепловой энергии и транспортирования теплоносителя применительно к объектам транспортного назначения, повышающие структурную надежность ЭТУ;

- метод определения показателей надежности устройств для генерации тепловой энергии и транспортирования теплоносителя на этапе проектирования с учетом конструкторско-технологических и эксплуатационных факторов транспортных систем.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

1. Теоретические способы учета особенностей преобразования электрической энергии в тепловую и механическую и методика расчета электромагнитных, тепловых, гидравлических процессов и размерных соотношений исполнительного элемента электротехнических устройств для генерации тепловой энергии и транспортирования теплоносителя.

2. Принципы конструирования исполнительных элементов, совмещающих функции генерации тепловой энергии и транспортирования теплоносителя, реализованные в виде теплогенерирующих электромеханических преобразователей энергии с короткозамкнутыми вторичными обмотками, и их практические реализации для железнодорожного транспорта.

3. Комплекс программно-реализованных математических моделей для расчета, проектирования и исследования электромагнитных, тепловых, и гидравлических процессов, в том числе, основанная на знаниях математическая модель управляемого электротехнического устройства для генерации тепловой энергии и транспортирования теплоносителя.

4. Способ управления и алгоритмы синтеза субоптимального управления на основе принципа разделения, в соответствии с которым ССУ строится из последовательно соединенных оптимального нелинейного фильтра и детерминированного оптимального регулятора,

обеспечивающих требуемые показатели качества управления и заданные температуру, производительность или давление при эксплуатации в условиях пассажирского железнодорожного транспорта.

5. Способ и технология изготовления исполнительных элементов электротехнических устройств для генерации тепловой энергии и транспортирования теплоносителя, обеспечивающие повышение надежности и безопасности их работы на железнодорожном транспорте.

6. Метод определения показателей надежности устройств для генерации тепловой энергии и транспортирования теплоносителя с учетом конструкторско-технологических и эксплуатационных факторов транспортных систем на этапе их проектирования.

7. Результаты теоретических и экспериментальных исследований и выработанные на их основе рекомендации по использованию и эксплуатации электротехнических перекачивающих устройств, обеспечивающие экономичное поддержание заданной температуры применительно к пассажирскому железнодорожному транспорту.

Практическая ценность работы заключается в решении крупной научно-технической проблемы экономичного обеспечения заданных температурных условий на пассажирском железнодорожном транспорте за счет создания нового электротехнического оборудования, отвечающего современным требованиям безопасности и экологичности; разработке и исследовании новых конструкций исполнительных элементов, совмещающих функции нагрева и перемещения теплоносителя и обеспечивающих возможность эффективного управления ЭТУ; создании методик и алгоритмов электромагнитных, тепловых и гидравлических расчетов и их реализации с использованием пакетов современных прикладных программ при проектировании и исследовании предложенных устройств; разработке теоретических положений и практических рекомендаций по выбору размерных соотношений при проектировании, конструировании, производстве и эксплуатации электротехнических устройств для генерации тепловой энергии и транспортирования теплоносителя различной мощности и производительности для пассажирского железнодорожного транспорта.

Апробация работы: основные положения и результаты диссертационной работы докладывались на семинарах кафедры «Теоретические основы электротехники» ПГУПС, семинаре кафедры «Электроэнергетика, техника высоких напряжений» Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, Дальневосточных региональных научно-практических конференциях «Совершенствование электрооборудования и средств автоматизации технологических процессов промышленных предприятий», г. Комсомольск-на-Амуре, 1989 г., 1992 г., 1995 г.; Международном научно-техническом симпозиуме «Наукоемкие технологии и проблемы их внедрения на машиностроительных и

металлургических предприятиях Дальнего Востока, 1994 г., 1999 г., 3-й Международной конференции (NESSC'97), г. Казань, 1997 г., Международной научной конференции «Синергетика. Самоорганизующиеся процессы в системах и технологиях: материалы», г. Комсомольск-на-Амуре, 2000 г., Международной научно-технической конференции «Электромеханические преобразователи энергии», г. Томск, 2001 г., третьей Международной конференции «Электрическая изоляция», г. Санкт-Петербург, 2002 г., Международной научной конференции «Нелинейная динамика и прикладная синергетика», г. Комсомольск-на-Амуре, 2002 г., Дальневосточном инновационном форуме «Роль науки, новой техники и технологий в экономическом развитии регионов», г. Хабаровск, 2003 г., Международной научно-технической конференции «Пути и технологии экономии и повышения использования энергетических ресурсов региона», г. Комсомольск-на-Амуре, 2003 г., XI Международной научно-технической конференции «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика», г. Москва, 2005 г., Международной научно-технической конференции «Электроэнергия и будущее цивилизации», Томск, 2004 г., Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы и пути решения инвестиционной и инновационной политики на предприятиях Хабаровского края. Технопарки, инновационные центры», г. Комсомольск-на-Амуре, 2004 г., XI Международной научно-практической конференции «Современные техника и технологии», г. Томск, 2005 г., Международной научно-практической конференции «Повышение эффективности инвестиционной и инновационной деятельности в дальневосточном регионе и странах АТР», г. Комсомольск-на-Амуре, 2005 г., третьей Международной научно-практической конференции «Энергосберегающие и природоохранные технологии», г. Улан – Удэ, 2005 г., XXXI Дальневосточной математической школе-семинаре им. академика Е.В. Золотова, г. Владивосток, 2006 г., XI Всероссийской конференции по проблемам науки и высшей школы «Фундаментальные исследования и инновации в технических университетах», г. Санкт-Петербург, 2007 г., Всероссийской научно-технической конференции «Новые технологии и материалы. Инновации и инвестиции в промышленности Дальнего Востока», г. Комсомольск-на-Амуре, 2007 г., II Всероссийской научно-практической конференции "Актуальные проблемы управления техническими, информационными, социально-экономическими и транспортными системами", г. Санкт-Петербург, 2007 г., пятой Международной научно-практической конференции «Высокие технологии, фундаментальные и прикладные исследования, образование. Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности», г. Санкт-Петербург, 2008 г., XVIII Международной конференции по электрическим машинам, г. Виламаура, Португалия, 2008 г., научно-технических семинарах электротехнического факультета Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета,

1984-2009 г., Тихоокеанского государственного политехнического университета, г. Хабаровск, 2008 г., Пятом Международном симпозиуме «Электрификация, инновационные технологии, скоростное и высокоскоростное движение на железнодорожном транспорте», г. Санкт-Петербург, 2009 г.

Реализация работы осуществлена в рамках НИР, выполненной по заказу министерства экономического развития и внешних связей Хабаровского края, межвузовской региональной научно-технической программы «Научно-технические и социально-экономические проблемы развития дальневосточного региона России («Дальний Восток России») по проекту «Совершенствование преобразователей энергии, бытового и промышленного электрооборудования, направленное на применение и освоение производства предприятиями Дальневосточного региона»; НИР 15-И-20 по теме «Создание опытного образца теплогенератора на основе электромеханического преобразователя», выполненной на кафедре электромеханики ГОУ ВПО «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет». Результаты работы использованы при расчете и проектировании перспективных систем электроотопления пассажирских вагонов в ОАО «Октябрьский вагоноремонтный завод» и ООО «НИИЭФА - ЭНЕРГО». Основные положения диссертационной работы используются в учебном процессе (специальности 140601 «Электромеханика» и 150408 «Бытовые машины и приборы») при изучении дисциплин «Испытания, эксплуатация и ремонт электромагнитных устройств и электромагнитных преобразователей» «Проектирование бытовых машин и приборов», «Надежность бытовых машин и приборов», «Основы научных исследований», при проведении практических занятий по указанным курсам, курсовом и дипломном проектировании. Опытный образец исполнительного элемента ЭТУ для генерации и транспортирования тепловой энергии экспонировался и отмечен серебряной медалью на XVI Выставке-конгрессе «Высокие технологии. Инновации. Инвестиции» (г. Санкт-Петербург, 10–12 марта 2010 г.).

Личный вклад: заключается в разработке основных аспектов теории электротехнических устройств, предназначенных для преобразования электрической энергии в тепловую и механическую; принципов конструирования исполнительных элементов с совмещенными функциями генерации тепловой энергии и транспортирования теплоносителя; математических моделей электромагнитных, тепловых и гидравлических процессов; системы управления ЭТУ, обеспечивающей экономичное поддержание заданных эксплуатационных параметров; технологии изготовления элементов ЭТУ; метода определения показателей надежности рассматриваемых устройств при проектировании с учетом эксплуатационных факторов, характерных транспортным системам; разработке и реализации программы и методики для комплексных испытаний ЭТУ.

Публикации: основные положения диссертации опубликованы в 90 печатных работах, в том числе 15 в изданиях из списка, рекомендованного ВАК и 1 монографии. Новизна разработок подтверждается 27 патентами и свидетельствами на изобретения и полезные модели.

Структура и объем работы. Диссертационная работа включает введение, 7 глав, заключение и список использованных источников; изложена на 363 страницах машинописного текста, в том числе 29 таблиц, 115 рисунков, 247 наименований источников и 18 приложений.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, дана общая характеристика научной проблемы, поставлены цель и задачи, показаны актуальность, научная новизна и практическая ценность, перечислены методики проведения, апробация и реализация выполненных исследований, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проводится анализ основных элементов ЭТУ, рассматриваемых как совокупность функционально связанных и взаимодействующих между собой устройств, предназначенных для генерации тепловой энергии и транспортирования теплоносителя и включающей регулируемый источник электроэнергии, преобразователь первичной энергии в тепловую и механическую, системы измерений, обработки информации и управления.

Наибольшая сложность при разработке ЭТУ возникает при выборе устройства преобразования первичной энергии, поскольку оно должно обладать не только хорошими эксплуатационными и массогабаритными показателями, обеспечивать экономичное поддержание заданных температурных параметров, но и иметь простую и технологичную конструкцию, высокую электробезопасность и надежность.

Анализ способов получения тепловой энергии показывает, что для автономных объектов транспортного назначения, наиболее целесообразно применение электронагревательных устройств. При этом традиционные преобразователи имеют низкий класс электробезопасности, а нагревательные элементы трансформаторного типа, обеспечивающие второй класс по электробезопасности вследствие отсутствия гальванической связи между первичной и вторичной обмотками, характеризуются напряженным тепловым режимом работы. Увеличить коэффициент теплоотдачи можно за счет обеспечения вынужденной конвекции, что привело к разработке автором электронагревательных устройств с вращающимися нагревательными элементами в виде короткозамкнутых обмоток, характеризующихся повышенным коэффициентом теплоотдачи, теплопроизводительностью и обладающих хорошими регулировочными свойствами. Принцип действия рассматриваемых устройств аналогичен

принципу действия асинхронного короткозамкнутого электрического двигателя, за исключением того, что вращающийся ротор выполняет дополнительную функцию нагрева теплоносителя, поэтому выходные характеристики таких устройств существенно зависят от скорости вращения подвижного элемента. Для снижения этого влияния на параметры теплогенерирующего устройства и повышения теплопроизводительности в конструкции должны быть предусмотрены добавочные источники тепла, показатели которых не связаны непосредственно со скоростью вращения подвижного нагревательного элемента. Эти технические решения реализованы в устройствах, совмещающих процессы генерации тепловой энергии и транспортирования теплоносителя, пример конструктивной схемы одного из которых приведен рис. 1. Устройство состоит из наружного кожуха 1, отделенного от магнитопровода с сетевой обмоткой 2, зазором 3 и двух короткозамкнутых вторичных обмоток - неподвижной (НЭ) 4 и вращающейся (ВЭ) 5 с напорными лопастями 6. В статоре выполнены осевые каналы 7.

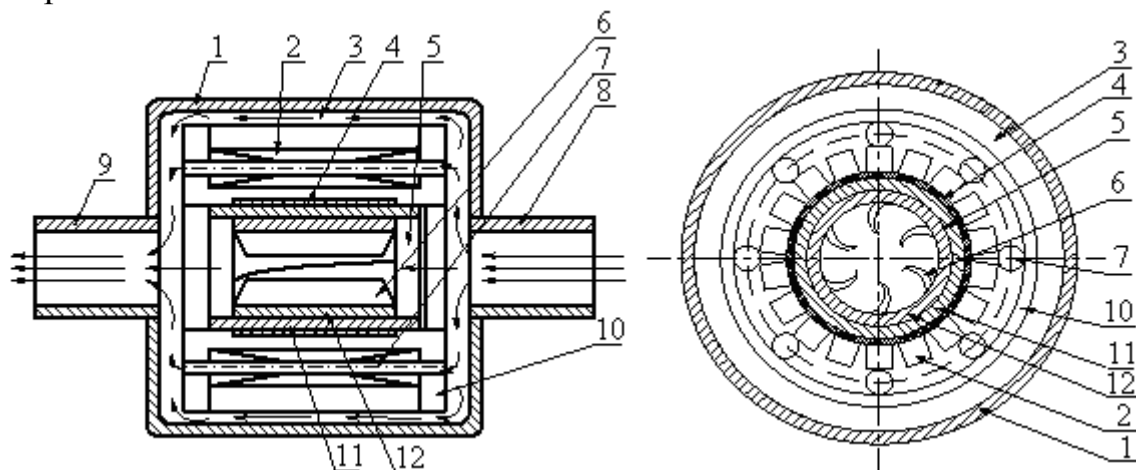


Рис. 1. Устройство для генерации тепловой энергии и транспортирования теплоносителя

Теплоноситель поступает через входной патрубок 8, циркулирует внутри неподвижной обмотки, по осевым каналам и между внешней поверхностью магнитопровода и внутренней поверхностью наружного кожуха, и отводится через выходной патрубок 9. Вращающаяся вторичная обмотка и магнитопровод разделены подшипником скольжения 10, обеспечивающим свободное вращение подвижной обмотки в тангенциальном направлении, но ограничивающим ее осевое и радиальное перемещение относительно магнитопровода. Вращающаяся обмотка выполнена в виде двух коаксиальных цилиндров 11 и 12 жестко закрепленных друг относительно друга, причем наружный изготовлен из электропроводящего немагнитного материала, а внутренний - из ферромагнитного.

Наиболее существенными достоинствами данных ЭТУ являются минимальные потери энергии в процессе ее преобразования и транспортирования теплоносителя за счет практически полного ее использования для нагрева и перемещения, высокая надежность и

безопасность работы, отсутствие наружных вращающихся частей, отсутствие подающих и подкачивающих насосов и т.п. Однако при выборе теплогенерирующих устройств кроме технических характеристик важное значение имеют экономические показатели с учетом расходов на установку, эксплуатацию, поддержание в состоянии готовности и другие факторы. Сравнительный технико-экономический анализ существующих устройств электронагрева, включающих резистивные неподвижные элементы с большим активным сопротивлением, электродные, индукционные, трансформаторные с короткозамкнутой вторичной обмоткой с учетом дополнительного оборудования, обеспечивающего перемещение теплоносителя, и электромеханических преобразователей энергии для генерации тепловой энергии и транспортирования теплоносителя показывает, что эксплуатационная стоимость последних в среднем на 20...25 % ниже, чем используемых в настоящее время.

Это в первую очередь связано с принципиальными особенностями рассматриваемых устройств, совмещающих функции нагревательного элемента и устройства для перемещения теплоносителя. Кроме этого проведенный анализ показал, что даже с учетом высокой цены на электроэнергию за счет невысокой цены оборудования, дешевого подключения и монтажа, суммарная стоимость рассматриваемых устройств в эксплуатации оказывается сравнимой с использованием устройств аналогичного целевого назначения. Для определения точных технико-экономических показателей электротехнических устройств для генерации тепловой энергии и транспортирования теплоносителя требуется их практическая реализация, что в свою очередь приводит к необходимости обоснования теоретических основ проектирования исполнительных элементов, синтеза эффективной системы управления, разработки технологии изготовления и проведения анализа теоретических и экспериментальных исследований.

Во второй главе приводятся теоретические основы преобразования энергии в ТЭМП, имеющего признаки, как статического преобразователя трансформаторного типа, так и вращающихся электрических машин переменного тока. Первые связаны с наличием неподвижного нагревательного элемента, вторые с использованием вращающегося, при этом рассмотрение ТЭМП в виде вращающегося преобразователя переменного тока с двумя вторичными короткозамкнутыми полыми цилиндрическими обмотками дает возможность более точного определения проектных параметров.

Для описания электромагнитных процессов в соответствии с теорией электрических машин все величины вторичных обмоток приводятся к параметрам первичной. Замена реального преобразователя, имеющего числа витков первичной обмотки w_1 , вторичных обмоток w_2 и w_3 , эквивалентным с числом витков во вторичных обмотках, равным числу витков первичной обмотки, требует неизменности распределения магнитного поля и потоков

мощности. Для сохранения магнитного потока должны обеспечиваться равенство намагничивающих сил (НС) и пропорциональность ЭДС числу витков при замене обмотки, для инвариантности активной и реактивной составляющих мощности изменяются полные сопротивления вторичных обмоток, поэтому каждая из них приводится к первичной. Особенностью исполнительного устройства является то, что толщина стенок полых цилиндрических элементов, образующих вторичные обмотки, во много раз меньше глубины проникновения электромагнитного поля, поэтому вихревые токи при любых скольжениях распределяются по толщине стенок ротора (ВЭ) практически равномерно, и его приведенное активное сопротивление r'_3 незначительно зависит от скольжения, а индуктивные сопротивления рассеяния НЭ и ВЭ x'_{2L}, x'_{3L} исключительно малы, что позволяет перейти от Т-образной к Г-образной схеме замещения преобразователя, приведенной для одной фазы на рис. 2, на которой введены следующие обозначения: \dot{U}_1 - комплексное значение первичного напряжения; r_1, x_{1L} -

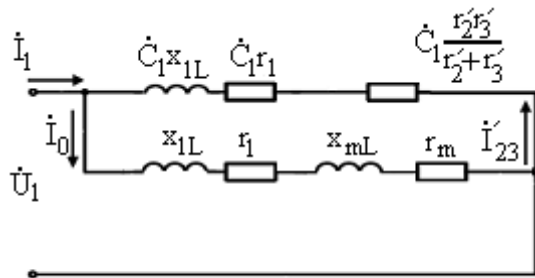


Рис. 2. Г-образная схема замещения

активное и индуктивное сопротивления первичной обмотки; r'_2, r'_3 - приведенные активные сопротивления НЭ и ВЭ; \tilde{N}_1 - комплексный коэффициент приведения параметров Т-образной к Г-образной схеме. Следует отметить, что эта схема точна только при холостом ходе. В режимах нагрузки и короткого замыкания погрешность вычисления первичного тока составляет 2...3,5 %. Из этой схемы находится нагрузочная составляющая потребляемого тока \dot{I}'_{23} . Преобразование и распределение мощностей в ТЭМП с учетом всех составляющих потерь, определяющих

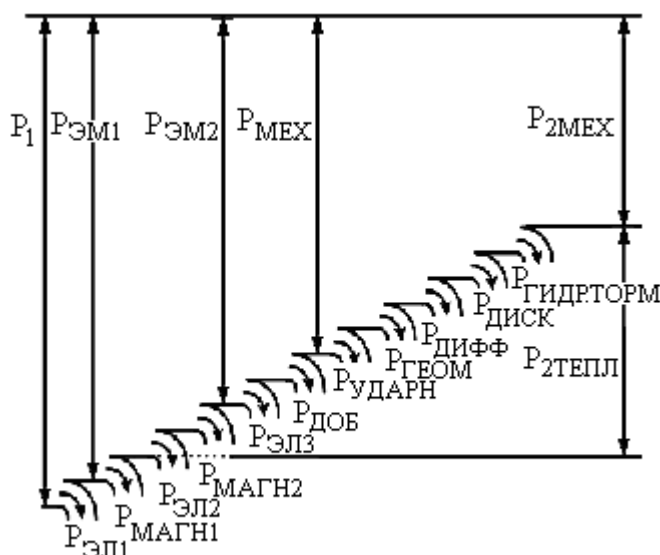


Рис. 3. Энергетическая диаграмма ТЭМП

выходные характеристики устройства, приведено на энергетической диаграмме, представленной на рис. 3 и показывающей, что практически вся мощность, за исключением электрических в первичной обмотке и магнитных потерь в стали статора, определяют полезную мощность ТЭМП, идущую на нагрев и перемещение теплоносителя.

Механическая мощность определяется радиальной составляющей вектора Умова

или плотностью механической мощности, воспринимаемой поверхностью ВЭ как произведение тангенциального механического напряжения на тангенциальную окружную скорость. Электрические потери в НЭ $P_{ЭЛ2}$ находятся на основе допущений о том, что магнитное поле, связанное с НЭ, ограничено расчетной длиной воздушного зазора, равномерно по длине зазора и имеет только нормальную составляющую, неизменную по всей толщине НЭ и гармонически изменяющуюся по окружности воздушного зазора; индукция магнитного поля в лобовых частях НЭ равна нулю; магнитные проницаемости НЭ и воздушного зазора равны; учитывается только основная гармоническая составляющая; индуктивное сопротивление НЭ мало:

$$P_{ЭЛ2} = 4pB_{\Delta}^2\tau^3 f^2 l_{нэ} \rho_{нэ}^{-1} \Delta_{нэ} \left(1 - \frac{4\tau}{\pi l_{нэ} (\operatorname{cth} \pi l_{нэ} / 4\tau)}\right),$$

где p - число полюсов, B_{Δ} - индукция в зазоре, τ - полюсное деление, f - частота тока статора, $\Delta_{нэ}$, $l_{нэ}$, $\rho_{нэ}$ - соответственно толщина, активная длина и удельное сопротивление НЭ.

В установившемся режиме при скоростях близких к синхронным количество потерь во ВЭ $P_{ЭЛ3}$, зависящих от его углового перемещения, стремится к нулю, поэтому тепловые характеристики определяются параметрами статора и НЭ, производительность и напор - параметрами ВЭ.

Электрические потери $P_{ЭЛ3}$:

$$P_{ЭЛ3} = 4pB_{\Delta}^2\tau^3 f^2 s^2 l_{вэ} \rho_{вэ}^{-1} \Delta_{вэ} \left(1 - \frac{4\tau}{\pi l_{вэ} (\operatorname{cth} \pi l_{вэ} / 4\tau)}\right),$$

где $\Delta_{вэ}$, $l_{вэ}$, $\rho_{вэ}$ - толщина, активная длина и удельное электрическое сопротивление вращающегося нагревательного элемента; s - скольжение.

Дополнительные потери включают гидравлические $\Delta P_{ГИДРАВЛ}$, состоящие из ударных $P_{УДАРН}$, геометрических $P_{ГЕОМ}$ и дифференциальных $P_{ДИФФ}$, и механические $\Delta P_{МЕХ}$, состоящие из дисковых потерь $P_{ДИСК}$ и потерь гидравлического торможения $P_{ГИДРТОРМ}$, и при инженерных расчетах определяются на основе коэффициентов k_H , k_Q , $\eta_{об}$, $\eta_{гидр}$ и $\eta_{мех}$, соответственно учитывающих конечное количество напорных лопастей, объемное сжатие теплоносителя, объемный, гидравлический и механический коэффициенты полезного действия. Уравнение, записанное для ВЭ, вращающегося относительно оси z с частотой $\omega_{ВЭ}$, в виде разницы скалярных произведений векторов \mathbf{u} и \mathbf{v} имеет вид формулы Эйлера:

$$gH = (u_2, v_2) - (u_1, v_1),$$

где g - ускорение свободного падения; H - давление (напор); v_1 , v_2 - абсолютная скорость перемещаемого теплоносителя на входе и на выходе соответственно; u_1 , u_2 - тангенциальная скорость на входе и выходе.

Из него получается уравнение, связывающее давление H и производительность Q с учетом геометрических параметров и частоты вращения ВЭ:

$$H = (\pi D_2 n_{BЭ} g^{-0,5} \sin \gamma_2)^2 - (\pi D_1 n_{BЭ} g^{-0,5} \sin \gamma_1)^2 + \\ + Q n_{BЭ} g b_2^{-1} \sin^2 \gamma_2 \operatorname{ctg} \beta_2 - Q n_{BЭ} g b_1^{-1} \sin^2 \gamma_1 \operatorname{ctg} \beta_1,$$

где γ_1 - угол скоса лопасти на внутреннем диаметре ВЭ D_1 ; γ_2 - угол скоса лопасти на внешнем диаметре ВЭ D_2 ; β_1 - угол установки лопасти на входе; β_2 - угол установки лопасти на выходе; b_2 - ширина лопасти на выходе, $n_{BЭ}$ - число оборотов ВЭ (рис. 4).

Механическая мощность, необходимая для обеспечения действительных значений H_D и Q_D с учетом конечного числа лопастей ВЭ и степени объемного сжатия теплоносителя, определится уравнением:

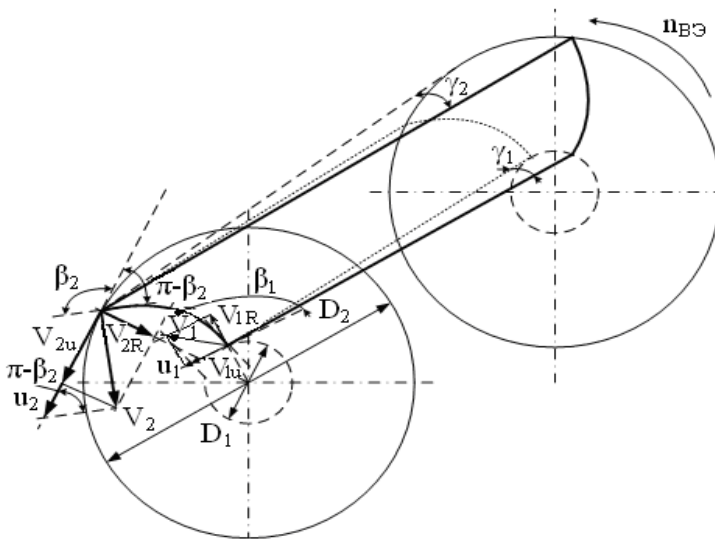


Рис. 4. Распределение скоростей на ВЭ

$$P_{2\text{мех}} = \frac{\rho g H_D Q_D}{k_H k_Q \eta_{об} \eta_{гидр} \eta_{мех}}.$$

Механическая характеристика представляет собой зависимость производительности (количества перемещаемого теплоносителя в единицу времени) от скольжения при постоянных значениях первичного напряжения и частоты.

Выражение для механической характеристики при средних значениях

коэффициентов, учитывающих количество напорных лопастей, объемное сжатие, гидравлический, механический и объемный коэффициенты полезного действия имеет вид:

$$Q_D = \frac{(((D_2 \sin \gamma_2)^2 - (D_1 \sin \gamma_1)^2)^2 + \frac{0,63 \times 10^{-5} p^2 m_1}{(1-s) f_1^2 \rho} \left(\frac{\sin^2 \gamma_2 \operatorname{ctg} \beta_2}{b_2} - \frac{\sin^2 \gamma_1 \operatorname{ctg} \beta_1}{b_1} \right))^{0,5}}{0,64 \left(\frac{\sin^2 \gamma_2 \operatorname{ctg} \beta_2}{b_2} - \frac{\sin^2 \gamma_1 \operatorname{ctg} \beta_1}{b_1} \right)} \times \\ \times \frac{\left(\left(\frac{U_1 r_2'}{(r_2' + r_3')} \sqrt{\left(r_1 + \frac{r_2' r_3'}{r_2' + r_3'} \right)^2 + x_{IL}^2} \right)^2 r_3' \right)^{0,5} + \frac{3,12(1-s) f_1}{p} ((D_2 \sin \gamma_2)^2 - (D_1 \sin \gamma_1)^2)}{0,64 \left(\frac{\sin^2 \gamma_2 \operatorname{ctg} \beta_2}{b_2} - \frac{\sin^2 \gamma_1 \operatorname{ctg} \beta_1}{b_1} \right)}.$$

Анализ динамических процессов в ТЭМП проводится на основе известной в электромеханике модели обобщенного электромеханического

преобразователя, в которой учитываются конструктивные особенности ТЭМП, а именно, наличие двух обмоток на статоре. Модель в осях α, β представляется системой уравнений:

$$\begin{pmatrix} u_{1\alpha}^s \\ u_{2\alpha}^s \\ u_{1\alpha}^r \\ u_{1\beta}^r \\ u_{1\beta}^s \\ u_{2\beta}^s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_{1\alpha}^s + \frac{d}{dt} L_{1\alpha}^s & \frac{d}{dt} M_{12\alpha}^s & \frac{d}{dt} M_{11\alpha}^{sr} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{d}{dt} M_{21\alpha}^s & r_{2\alpha}^s + \frac{d}{dt} L_{2\alpha}^s & \frac{d}{dt} M_{21\alpha}^{sr} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{d}{dt} M_{11\alpha}^{rs} & \frac{d}{dt} M_{12\alpha}^{rs} & r_{1\alpha}^r + \frac{d}{dt} L_{1\alpha}^r & L_{1\beta}^r \cdot \omega_p & M_{11\beta} \cdot \omega_p & M_{1\beta} \cdot \omega_p \\ -M_{11\alpha} \cdot \omega_p & -M_{12\alpha} \cdot \omega_p & -L_{1\alpha}^r \cdot \omega_p & r_{1\beta}^r + \frac{d}{dt} L_{1\beta}^r & \frac{d}{dt} M_{11\beta}^{rs} & \frac{d}{dt} M_{12\beta}^{rs} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{d}{dt} M_{11\beta}^{sr} & r_{1\beta}^s + \frac{d}{dt} L_{1\beta}^s & \frac{d}{dt} M_{12\beta}^s \\ 0 & 0 & 0 & \frac{d}{dt} M_{21\beta}^{sr} & \frac{d}{dt} M_{21\beta}^s & r_{2\beta}^s + \frac{d}{dt} L_{2\beta}^s \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} i_{1\alpha}^s \\ i_{2\alpha}^s \\ i_{1\alpha}^r \\ i_{1\beta}^r \\ i_{1\beta}^s \\ i_{2\beta}^s \end{pmatrix}$$

и уравнением электромагнитного момента:

$$M_{\vartheta} = M_{11} (i_{1\alpha}^r i_{1\beta}^s - i_{1\alpha}^s i_{1\beta}^r) + M_{21} (i_{1\alpha}^r i_{2\beta}^s - i_{2\alpha}^s i_{1\beta}^r).$$

В этих уравнениях i – токи, r – активные сопротивления, M – взаимная индуктивность, L – полная собственная индуктивность. Каждая обмотка имеет обозначение, показывающее ее принадлежность к оси α или β , расположение на роторе r или на статоре s . Учет температуры осуществляется введением зависимости сопротивления вторичных обмоток ТЭМП от температуры.

Хотя эта модель позволяет определить параметры ТЭМП во всех режимах работы, в том числе и переходных, но основная трудность ее непосредственного использования заключается в том, что коэффициенты, связанные с определяемыми величинами (активные сопротивления, индуктивности, взаимные индуктивности) в рассматриваемой системе являются нелинейными функциями этих величин, и в ней не учитываются процессы теплоотдачи с поверхностей охлаждения. Предполагая, что источником тепловой мощности является НЭ, в котором отсутствует теплопередача теплопроводностью, можно считать, что основным видом теплообмена между НЭ и рабочей средой является конвективный теплообмен, учитываемый в формуле Ньютона - Рихмана коэффициентом теплоотдачи.

Следует отметить, что наличие коэффициента теплоотдачи $k_{ТО}$, зависящего от физико-химических и геометрических факторов, таких как температура, скорость перемещения среды, состояние поверхности и форма канала, критерий Рейнольдса и целого ряда других, затрудняет использование этой формулы при точных расчетах. Проведенный анализ показал, что для расчета коэффициента теплоотдачи для канала с нормальной турбулентностью ($10^4 < Re < 10^6$) можно воспользоваться

эмпирической формулой Рихтера, учитывающей параметры, достаточно полно характеризующие объект исследования. При известной мощности, выделяемой в НЭ, который в соответствии с принятым допущением в установившемся режиме определяет тепловую мощность ТЭМП, согласно первому закону термодинамики превышение температуры теплоносителя над температурой окружающей среды $\Theta_{НЭ}$ определяется выражением:

$$\Theta_{НЭ} = \frac{2pB_{\Delta}^2\tau^3 f^2 l_{НЭ} \Delta_{НЭ} \left(1 - \left(\frac{\pi l_{НЭ}}{4\tau} \left(\operatorname{cth} \frac{\pi l_{НЭ}}{4\tau} \right) \right)^{-1} \right)}{0,178\lambda^{0,178} (\rho \cdot c)^{0,832} (D_{НЭ} - D_{ВЭ})^{0,088} l_{НЭ}^{0,744} \nu^{0,832} \pi (0,5D_{НЭ} - \Delta_{НЭ})}, \quad (1)$$

где - λ , ρ , c , ν - теплопроводность, плотность, удельная теплоемкость и скорость рабочей среды соответственно.

При использовании в качестве теплоносителя жидкой рабочей среды точное нахождение коэффициента теплоотдачи приводит к необходимости решения краевой задачи конвективного теплообмена, сводящейся к известной системе дифференциальных уравнений энергии, теплоотдачи, движения и сплошности с учетом геометрических размеров элементов, их физических свойств, начальных и граничных условий (температур, скоростей на входе и выходе и т.д.), что представляет отдельную научную задачу. Приближенное значение коэффициента теплоотдачи определяется из критериальных уравнений и на основе теплофизического эксперимента, в частности с использованием калориметрических методов.

Температура вращающегося элемента определяется аналогично, но с учетом приведенной выше зависимости электрических потерь $P_{элз}$ от s .

Анализ полученных выражений показывает, что температура нагревательных элементов в основном является функцией конструктивных параметров (числа полюсов, геометрических размеров статора, толщины НЭ, внешнего радиуса НЭ); электромагнитных параметров (магнитной индукции, частоты питающего напряжения); удельной электрической проводимости материалов НЭ и ВЭ; параметров нагреваемого теплоносителя (коэффициента теплопроводности, плотности, удельной теплоемкости); гидродинамических параметров ТЭМП (гидравлического радиуса сечения, скорости нагреваемого теплоносителя); скорости вращения нагревательного элемента.

Гораздо сложнее протекают процессы в неподвижной части ТЭМП - капсулированном статоре, в котором уложена первичная обмотка теплогенератора, поэтому здесь определение тепловых параметров характеризуется большой сложностью. Это обусловлено как конструктивным исполнением капсулированного статора, представляющим собой совокупность физически разнородных материалов, находящихся в весьма разных условиях теплопередачи и соответственно характеризующихся объемными градиентами температур, так и наличием

дополнительного нагреваемого элемента, непосредственно прилегающему к пакету статора, поэтому тепловые процессы в капсулированном статоре исследуются численными методами.

Кроме температуры, выходными параметрами рассматриваемых устройств являются производительность и давление, создаваемое в гидравлической цепи ЭТУ. Эти величины связаны между собой и с температурой, при этом каждая составляющая суммарной тепловой мощности в той или иной степени определяется токами и индукциями, т.е. тепловому расчету, предшествует электромагнитный расчет ТЭМП, что приводит к необходимости решения связанной электромагнитно-тепловой задачи с использованием пакетов специализированных программ.

В третьей главе рассматриваются вопросы моделирования и проводится анализ электромагнитных, тепловых и гидравлических процессов в электротехнических устройствах для генерации тепловой энергии и транспортирования теплоносителя на основе численных методов с использованием результатов расчета электромагнитных процессов для исследования тепловых нагрузок в исполнительных элементах. Основные расчеты реализованы в программах ELCUT, FEMLAB, Comsol Multiphysics. Первый пакет использован для моделирования двухмерных полей МКЭ в электромеханическом преобразователе энергии, а его версия 5.7 позволяет решать связанную тепловую задачу, источники тепла для которой предварительно определяются в результате расчета магнитного поля переменных токов. Результаты представляются в виде визуализации распределения магнитного поля в расчетной области и плотности тока в проводящих элементах. После нахождения токов и магнитной индукции определяются источники тепла для связанной задачи теплопередачи. При моделировании электрические потери рассматриваются во всех блоках с отличной от нуля удельной электропроводностью. Для анализа стационарного температурного поля используется уравнение теплопроводности в следующем виде:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial \Theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial \Theta}{\partial y} \right) = -q,$$

где λ_x, λ_y – компоненты тензора теплопроводности; q – удельная мощность тепловыделения.

Основные результаты критериального анализа максимальной температуры в виде функции двух переменных приведены на рис.5. Полученные зависимости позволяют оценить влияние частоты питающего напряжения f при изменении толщины неподвижного элемента $\Delta_{НЭ}$ на температуру теплоносителя. Совместное рассмотрение влияния толщины НЭ и частоты необходимо для определения диапазона изменения частоты при вариации конструктивного параметра ($\Delta_{НЭ}$), так как теоретически они определяет тепловую мощность, т.е. задача переходит в разряд

оптимизационных с определением соотношения «частота питающего напряжения - толщина НЭ».

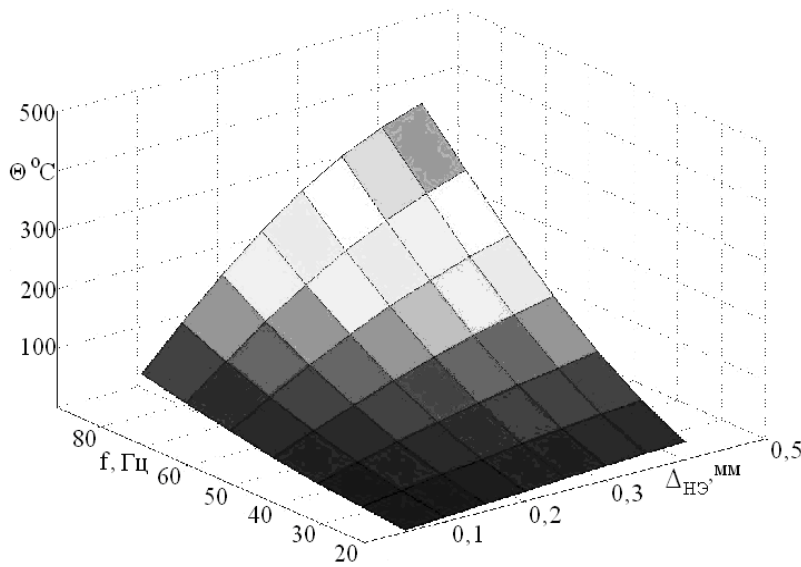


Рис. 5. Зависимость температуры от толщины НЭ и частоты

200...280 °С, которые отличаются от расчетных не более, чем на 3...5 %. Моделирование работы ТЭМП при питании частотой 75...100 Гц и толщине НЭ 0,40 мм дает температуры порядка 300...380 °С, что примерно на 30 % выше, чем результаты расчета по (1).

Анализ полученных результатов в частотном диапазоне 25...100 Гц указывает на приемлемую точность и возможность использования выражения (1) на начальном этапе проектирования для выбора основных размерных соотношений исполнительного элемента ЭТУ и позволяет выполнить уточненный тепловой расчет принятой конструкции.

Уравнение теплопереноса в пакете FEMLAB, учитывающее теплопроводность и конвекцию, для стационарного режима имеет вид:

$$\operatorname{div}(-\lambda \operatorname{grad} \Theta + \rho c_p \Theta \mathbf{u}) = q,$$

где \mathbf{u} – вектор скорости движения теплоносителя.

Его решение дает распределение температурного поля теплоносителя, пример такого расчета при $k_{TO}=70 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \times \text{К})$, $f=50 \text{ Гц}$ показан на рис. 6.

Качественный анализ температурного поля расчетной модели позволяет определить внутреннюю часть исполнительного элемента ЭТУ как наиболее напряженную область, поскольку именно в ней наблюдаются максимальные значения температуры, что в свою очередь накладывает определенные требования к распределению вектора скоростей в проточной части преобразователя.

Результаты моделирования показывают, что при частоте ниже 40 Гц изменение толщины нагревательного элемента от 0,05 мм до 0,40 мм приводит к росту его температуры до 80 °С, что требует некоторой корректировки выражения (1) в этом частотном диапазоне. Повышение частоты до значений 50...60 Гц и аналогичное изменение толщины НЭ приводит к значениям температуры порядка

Количественная оценка изменения температуры в средней части поперечного сечения при $f=50$ Гц показывает (рис. 7), что в пределах смачиваемой области, т.е. при радиальном размере 0...38 мм, градиент температуры независимо от величины коэффициента теплоотдачи равен нулю, при этом установившаяся температура при $k_{TO}=100$ Вт/(м²×К) составляет 86 °С и с уменьшением коэффициента теплоотдачи возрастает, достигая температуры кипения, так при $k_{TO}=70$ Вт/(м²×К) расчетное

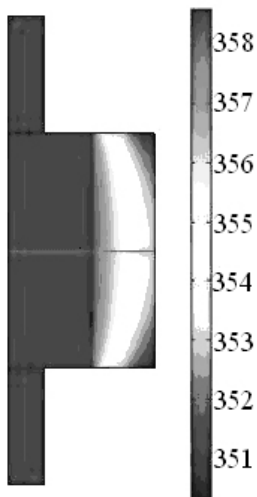


Рис.6. Визуализация температурного поля

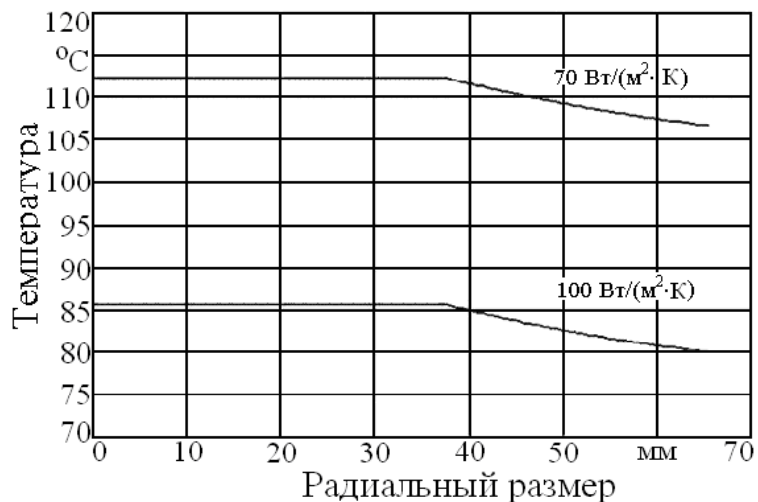


Рис. 7. Распределение температуры по среднему сечению исполнительного устройства значение температуры составляет 112 °С и указывает на необходимость учета фазового состояния теплоносителя.

Для оценки влияния скорости теплоносителя на коэффициент теплоотдачи смоделировано поле скоростей перемещаемого теплоносителя при входной скорости потока 1 м/с и 0,15 м/с (рис. 8), анализ которого

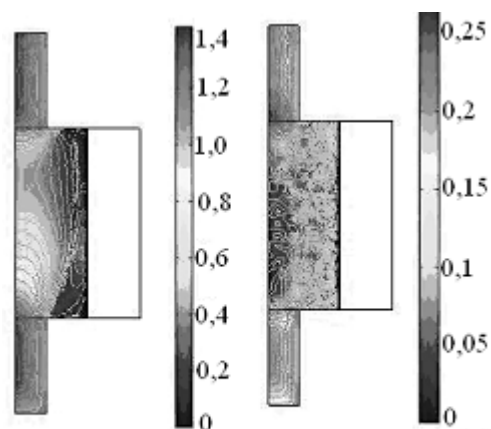


Рис. 8. Поле скоростей при входной скорости потока 1 м/с и 0,15 м/с

показал, что при скорости потока 1 м/с неподвижный нагревательный элемент попадает в область с медленно перемещающимися слоями теплоносителя, максимальные скорости наблюдаются в патрубках, имеющих наиболее высокое гидравлическое сопротивление. При скорости 0,15 м/с эффективность теплообмена на стороне НЭ возрастает, но на оси образуется узкий протяженный участок с низкой скоростью потока.

Основной конструкционной особенностью исполнительного элемента ЭТУ, является его малое гидравлическое сопротивление. В тоже время при отсутствии ферромагнитных элементов (ФЭ) в проточной части устройство характеризуется значительным намагничивающим реактивным током и мощностью, вызывающими существенный нагрев неподвижной

части преобразователя. Для оценки возможности получения требуемого соотношения между тепловой и механической составляющими проведено сравнение механической характеристики базового асинхронного двигателя (1) и расчетной (2) и экспериментальной (3) характеристиками ТЭМП с полым немагнитным ВЭ (рис. 9), которое позволяет определить диапазон выполнимости ЭТУ на основе теплогенерирующих электрохимических преобразователей, так как механическая мощность, передаваемая электромагнитным путем на ВЭ, и производительность зависят от размерных соотношений ФЭ. При этом поскольку величина основного магнитного потока ограничена индукцией в зубцах статора, толщина ФЭ предварительно может быть выбрана равной ширине зубца, а осевая длина ФЭ определена

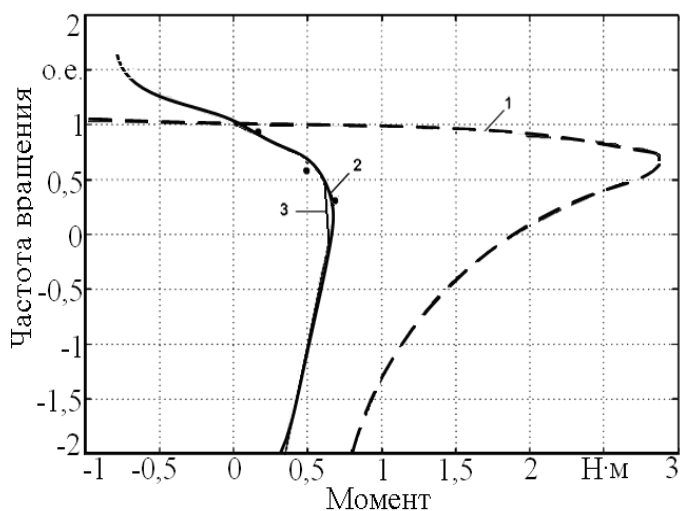


Рис. 9. Сравнительные механические характеристики

экспериментально.

Для оценки влияния размерных соотношений ФЭ и анализа работы исполнительного элемента ЭТУ рассмотрена плоскопараллельная задача расчета электромагнитного поля с учетом вращения ВЭ и осесимметричная модель, объединяющей процессы теплопередачи и гидродинамики. Ниже приводятся результаты расчета, полученные при различной толщине d ферромагнитного вращающегося

элемента с магнитной проницаемостью $\mu_r = 500$, проницаемость магнитопровода статора - $\mu_r = 1000$.

На первом этапе расчета определяются значения объемного тепловыделения в исполнительных элементах устройства, которые используются в задаче теплопроводности в качестве источников тепла. Следует отметить, что тепловыделением в ФЭ можно пренебречь, поскольку, как показали расчеты, мощность тепловыделения в них на порядок меньше, чем в электрически активной части ВЭ.

На рис. 10 и 11 показаны мощности тепловыделения во ВЭ и НЭ. Полученные результаты подтверждают целесообразность использования НЭ, не только являющегося основным источником нагрева теплоносителя при подсинхронных скоростях, но и компенсирующего снижение тепловой мощности ВЭ при увеличении его скорости вращения. На рис.12 показано распределение температуры по среднему сечению в случае использования ФЭ толщиной 5 мм при величине $k_{TO} = 70 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \times \text{К})$ для разных значений

скольжения *s*. Интегральные температурные характеристики исполнительных модулей с ФЭ различной толщины приведены на рис.13.

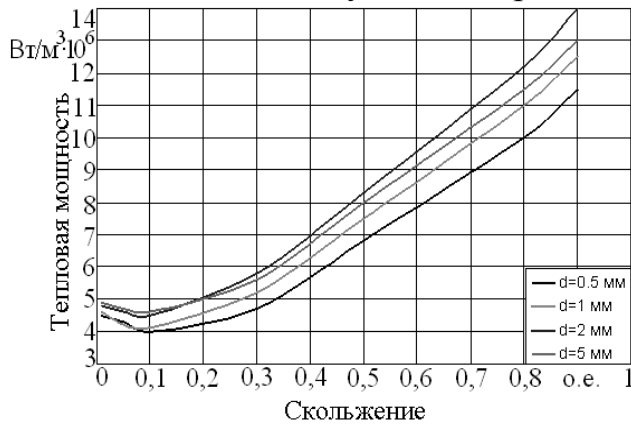


Рис.10. Зависимость тепловой мощности ВЭ

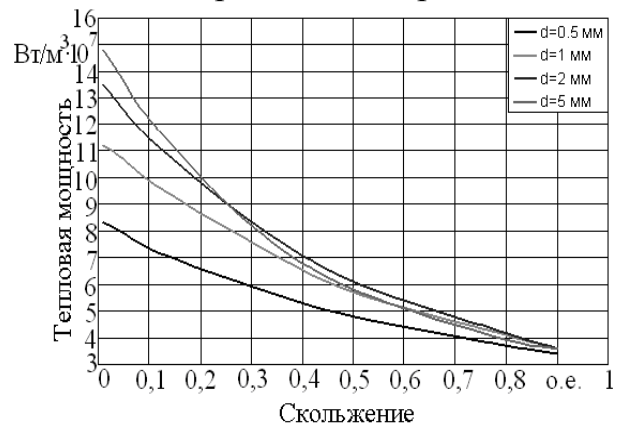


Рис.11. Зависимость тепловой мощности НЭ

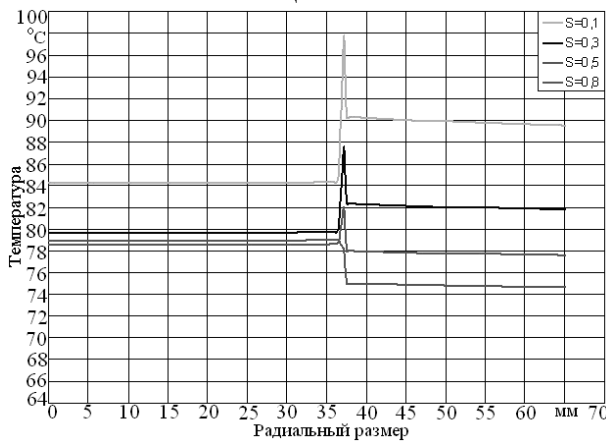


Рис.12. Распределение температуры по среднему сечению

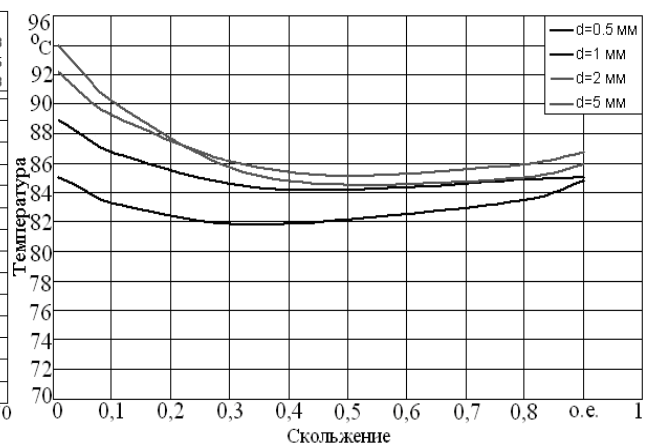


Рис.13. Зависимость температуры от скольжения

Анализ полученных зависимостей подтверждает возможность использования рассматриваемых устройств для генерации тепловой энергии и перекачивания теплоносителя, характеризующихся повышенной эффективностью теплообмена с нагреваемой средой, и позволяет выбирать размерные отношения ФЭ, определяющие электромагнитные и тепловые процессы и рабочие характеристики в исследованном интервале скольжения. Зависимости температуры нагревательных элементов от коэффициента теплоотдачи при фиксированной частоте питающего напряжения имеют нелинейный вид, что в первую очередь связано с существенной зависимостью физических характеристик теплоносителя (теплопроводности, плотности, теплоемкости) от температуры. При этом изменение коэффициента теплоотдачи от 40 до 150 $\text{Вт}/(\text{м}^2 \times \text{К})$ приводит к уменьшению температуры элементов при номинальных напряжении и частоте от 180 до 60 $^{\circ}\text{C}$. Установление взаимосвязи между этими величинами позволяет уже на стадии проектирования обеспечивать заданные тепловые режимы за счет обоснованного выбора теплоносителя.

Количественная оценка влияния скорости перемещения теплоносителя на температуру показывает, что независимо от вида нагреваемого теплоносителя и значений коэффициентов теплоотдачи, необходимо различать две области, в которых теоретически может эксплуатироваться ТЭМП, первая - включает диапазон скоростей $0 \dots 0,25$ м/с, вторая - $0,25 \dots 5$ м/с. Анализ полученных зависимостей позволяет допустить, что температура нагреваемого теплоносителя при скорости потока более $0,5$ м/с и соблюдении геометрического подобия ($D_{вз}/l_{вз} = idem$) незначительно зависит от скорости его перемещения. Это в свою очередь дает возможность обосновать принципы раздельного управления выходными характеристиками при регулировании питающего напряжения.

После выбора основных геометрических параметров, материалов активных элементов, определения электромагнитных и тепловых нагрузок исполнительных элементов произведена проверка их механической прочности. Расчет напряженно деформированного состояния в пакете MSC/NASTRAN показал, что максимальные температурные напряжения возникают на торцах неподвижного нагревательного элемента. Сравнение расчетных данных по максимальным главным напряжениям позволяет сделать вывод, что механические напряжения, обусловленные температурными нагрузками, ниже диапазона предела прочности как технической меди ($170 \dots 250$ МПа), так и алюминия ($50 \dots 90$ МПа).

В четвертой главе исследуются нечеткие системы управления электротехническими устройствами для генерации тепловой энергии и транспортирования теплоносителя. Субоптимальное электротехническое устройство для генерации тепловой энергии и транспортирования теплоносителя (СЭТУ) - результат синтеза ТЭМП и субоптимальной СУ, образующих единую замкнутую систему. Функциональная схема субоптимального ЭТУ приведена на рис. 14, на ней введены следующие обозначения: СИ - система измерений; СУ - система управления; ОНФ - оптимальный нелинейный фильтр; ДОР - детерминированный оптимальный регулятор;

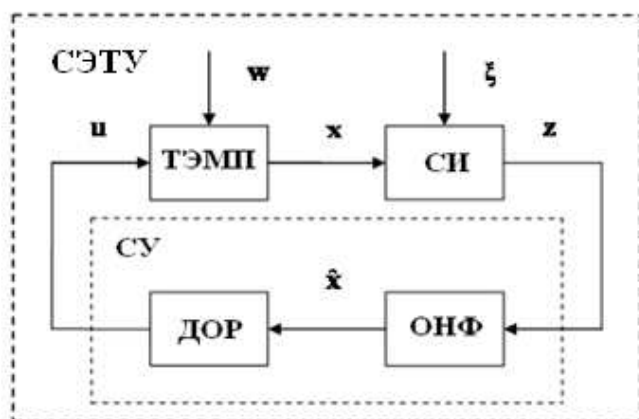


Рис. 14. Функциональная схема СЭТУ

$\mathbf{u} = (u_1, u_2)^T$ - вектор управления; $\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3)^T$ - вектор состояния; u_1 - напряжение; u_2 - частота; x_1 - температура; x_2 - производительность; x_3 - давление.

Выходные параметры образуют вектор состояния \mathbf{x} , которому соответствует вектор оценок $\hat{\mathbf{x}}$, и контролируются с помощью СИ, учитывающей

изменение внешних и/или внутренних воздействующих факторов \mathbf{w}

(вектор возмущений параметров ТЭМП), ξ (вектор помех измерений). При изменении любого из выходных параметров СИ фиксирует их отклонение от требуемой величины с учетом значений векторов w , ξ и вырабатывает вектор измерений z , поступающий на СУ, которая формирует входной вектор управляющих сигналов u , обеспечивая регулирование напряжения и частоты. Наличие векторов w , ξ указывает на степень неопределенности математической модели. Задача субоптимального управления формулируется следующим образом: необходимо синтезировать статистически ССУ, формирующую входные сигналы управления u , минимизирующие заданный критерий качества поведения всей системы J . В этом случае можно рассматривать синтез СЭТУ для реализации требуемого теплового процесса (ТП) как задачу при частично заданной структуре. Общая схема управления тепловым процессом в ЭТУ представлена на рис. 15, на котором приняты следующие обозначения: $x(t)$ - вектор состояния системы; $g(t)$ - цель управления, которая задает желаемую программу изменения состояния объекта во времени; $u(t)$ - вектор управления; $y(t)$ - вектор измеряемых переменных; $w(t)$ - вектор неуправляемых и ненаблюдаемых возмущений как внутри, так и вне системы; $v(t)$ - вектор ошибок измерения; $J(t) = f(x(t), u(t)) \rightarrow \min$ - критерий оптимизации.

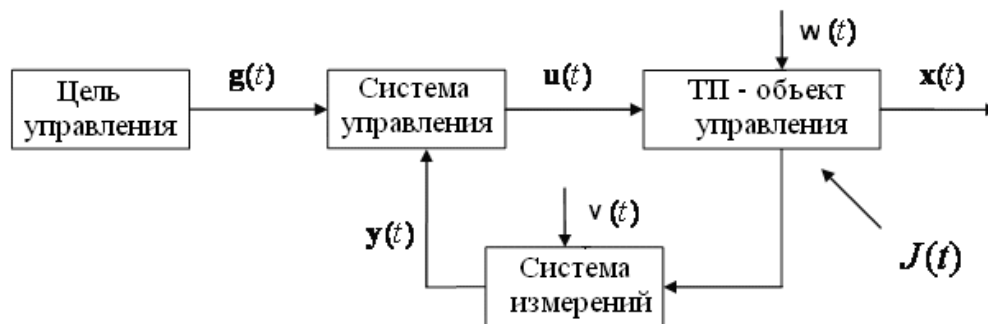


Рис.15. Общая схема управления тепловым процессом

Разработка ССУ устройством для генерации тепловой энергии и транспортирования теплоносителя сводится к синтезу ОНФ для оценки вектора состояния выходных управляющих (детерминированных) и возмущающих (случайных) параметров, функционально связанных с вектором входных параметров, и детерминированного оптимального регулятора. Для синтеза ОНФ использован метод оценивания случайных дискретных последовательностей, основанный на регрессионном анализе и вейвлет-преобразовании, обеспечивающий нахождение n -мерной векторной функции измерений, исходя из условия минимизации критерия J , для которого оптимальная оценка $\hat{x}_{i/k}$ представляет собой условное математическое ожидание $\hat{x}_{i/k} = M[x_i/Y_k] = h_i(Y_k)$, где h_i для

произвольных случайных последовательностей $x_i, i = 0, 1, \dots$ и $y_j, j = \overline{1, k}$ является в общем случае нелинейной относительно измерений функцией.

Для этого метода смоделирована реализация $(x_i^{(j)}, Y_i^{(j)},), i = \overline{1, k}, k = 3,$ для вейвлета Добеши 4 с уровнем разложения 7, показывающая, что точность оценивания с помощью вейвлет-алгоритма мало отличается от предельно достижимой точности оптимального нелинейного байесовского алгоритма. Следует отметить, что практическая реализация метода связана с высокой сложностью вычислений, так как алгоритм является нерекуррентным и в процессе вычислений требуется проводить последовательную оценку, т.е. при поступлении в момент времени t_i новых измерений $y_i = (y_{i1}, \dots, y_{mi})^m$ имеющаяся оценка $\hat{x}_{i-1/i-1}^B$ не может быть использована, необходимо формировать новый вектор измерений y_i и затем полностью повторять процедуру вычислений для оценки $\hat{x}_{i/i}^B$.

Проектирование ДОР с помощью классических подходов требует построения математической модели, учитывающей большое число параметров, введения перекрестных связей в структуру регулятора для достижения требуемого качества управления, учета возможных нелинейностей системы, вследствие чего результирующий регулятор оказывается сложным и дорогим, поэтому для построения ДОР СЭТУ используется система нечеткого вывода, позволяющая синтезировать сложные контуры регулирования без проведения объемных математических исследований. При использовании в качестве ДОР нечеткого регулятора (НР), вырабатывающего сигналы управления при воздействии внешних и/или внутренних возмущений, НР содержит как минимум два входа и два выхода. На один вход подается, например, сигнал пропорциональный температуре, на другой - сигнал пропорциональный ее производной. В работе реализованы структурные схемы замкнутой системы подчиненного регулирования с нечетким регулятором в контурах тока и скорости с использованием алгоритмов нечеткого вывода по Мамдани и Сугено.

Следует отметить, что электротехнические устройства для генерации тепловой энергии и транспортирования теплоносителя характеризуются нелинейными и динамическими процессами и создание для них классических регуляторов, требующих автоматической настройки с учетом нелинейности, большого числа входных переменных и перекрестных связей является сложной задачей. Аппарат нечеткой логики позволяет учитывать все отмеченные факторы.

Задача синтеза нечеткого регулятора для ТЭМП может рассматриваться как подбор вида и взаимного расположения термов в диапазонах изменения входных и выходных величин, а также как создание необходимых правил, связывающих состояния входов и выходов.

Примерами таких задач является регулирование температуры, давления теплоносителя и связанной с ним производительности ТЭМП.

ДОР является выходным элементом СУ и совместно с ОНФ обеспечивает заданный режим работы СЭТУ, реализуя неизвестное отображение:

$$\mathbf{u}^{(j)} = f(\mathbf{z}^{(j)}) = f(z_1^{(j)}, z_2^{(j)}, \dots, z_n^{(j)}), \quad j = 1, \dots, J,$$

при наличии обучающего множества $\{(\mathbf{z}^1, \mathbf{u}^1), \dots, (\mathbf{z}^J, \mathbf{u}^J)\}$.

Введение критерия оптимальности в виде функции ошибки для j -го рассматриваемого значения вида $E_j = 0,5 \|\mathbf{u} - \mathbf{u}^{(j)}\|^2$ позволяет использовать градиентный метод оптимизации для подстройки параметров заданных предикатных правил.

Синтез регуляторов в подчиненных структурах в среде Matlab обеспечивает заданные характеристики системы, в которой ОУ разбивается на ряд динамических звеньев для каждого из которых синтезируется свой регулятор. Для исполнительных элементов устройств для генерации тепловой энергии и транспортирования теплоносителя динамические процессы делятся на два вида: электромеханические (высокочастотные) и тепловые (низкочастотные). Таким образом, процессы изменения производительности (давления), которая определяется скоростью вращения ВЭ, и температуры являются разнотемповыми, и синтез регулятора производительности и температуры можно рассматривать как синтез двух независимых частей: регулятора производительности (давления) и регулятора температуры соответственно с настройкой на технический и симметричный оптимумы.

Непосредственная реализация НР (рис.16, 17), выполненная с использованием алгоритмов Мамдани и Сугено на основе эвристических правил, использующих результаты численного и физического моделирования, позволяет получить решение задачи синтеза ССУ, известной в классической теории управления как задача синтеза

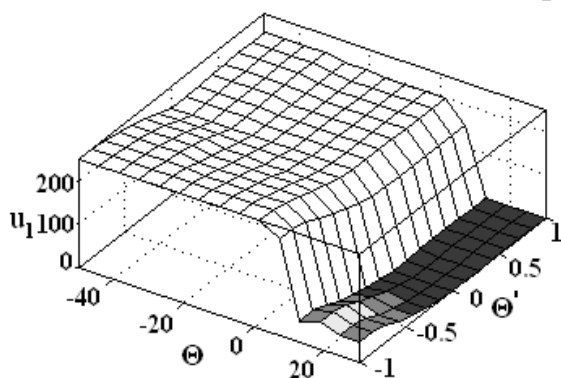


Рис. 16. Визуализация поверхности напряжения u

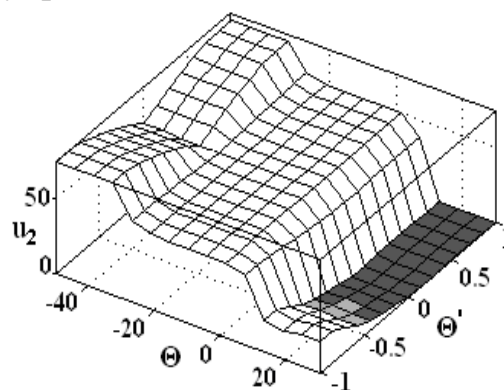


Рис. 17. Визуализация поверхности частоты f

управляющих воздействий, для решения которой использованы средства нечеткой логики и теории нечетких множеств, в виде зависимостей напряжения u_1 и частоты u_2 от температуры и ее производной.

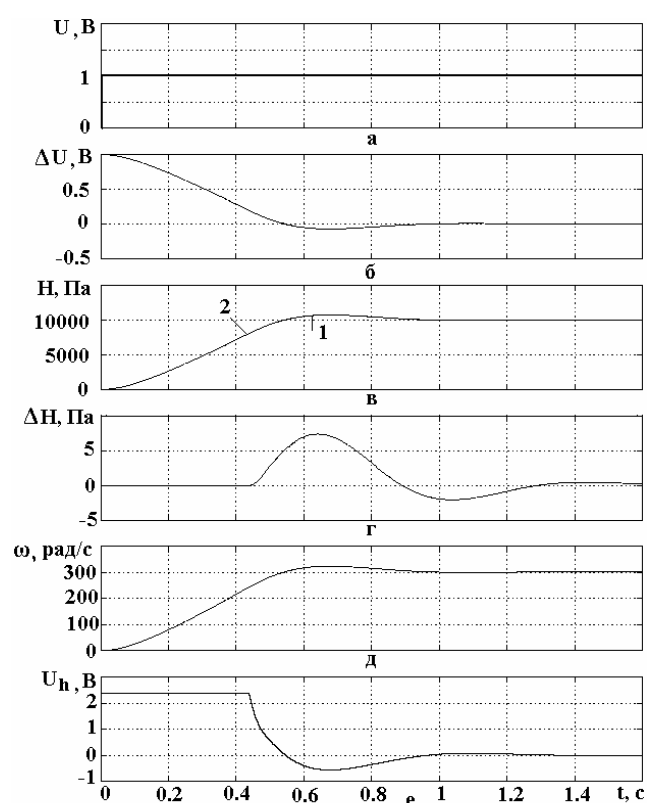


Рис. 18. Переходные процессы в ТЭМП

На рис. 18 показаны переходные процессы (ПП) по давлению при настройке регулятора на технический оптимум: а) единичный скачок задающего воздействия; б) разность между задающим воздействием и сигналом обратной связи; в) кривая 1 является сигналом на выходе непрерывной системы, который представляет собой давление на выходе ТЭМП, кривая 2 – на выходе цифровой системы; г) разность сигналов непрерывной и цифровой частей; д) угловая частота на выходе цифровой части; е) сигнал на выходе блока Zero-Order Hold. Из графиков определяются прямые показатели качества переходного процесса:

перерегулирование, время первого согласования, время переходного процесса и запас устойчивости системы. Сравнение ПП, полученных для разных схем регуляторов показывает, что все они имеют близкие показатели качества по точности и времени ПП, за исключением перерегулирования, при этом в НР легко учесть первую и вторую производные температуры и давления, что обеспечивает энергосберегающие режимы работы ЭТУ.

Анализ интегральных характеристик результатов моделирования ЭТУ с использованием НР, реализующего любой из алгоритмов вывода, позволяет сделать вывод о повышении качества переходных режимов (время выхода на установившийся режим, точность регулирования, устойчивость к внешним возмущениям), а построение систем управления на основе технологий нечеткого вывода дает существенно более простое решение при требуемом качестве процессов управления.

В пятой главе приведены технологические основы изготовления основных элементов устройства с учетом его конструктивных особенностей, обуславливающих необходимость поэтапного рассмотрения и обоснования технологических процессов, среди которых основное значение имеет изготовление неподвижной части исполнительного элемента,

представляющей собой капсулированный изоляционным антифрикционным самосмазывающимся материалом статор, выполняющий также функции подшипника скольжения. Капсулирование статора исполнительного элемента включает подготовку исходных компонентов наполнителей, смолы, отвердителя, композиционного состава и подготовку основы; смешивание эпоксидной смолы с наполнителями и получение композиции; дозирование композиции и отвердителя; их смешивание и подачу для формирования элемента скольжения; формирование полимерной заготовки; армирование; отверждение ПКМ, термообработку и механическую обработку.

Заключительным этапом технологического процесса является исследование физико-механических и триботехнических характеристик, определяющих механическую прочность исполнительного элемента. Анализ результатов измерений прочности материала, образующего поверхность скольжения, показывает, что средняя прочность на растяжение составляет около 42 МПа, на сжатие - 88 МПа. Коэффициент трения (давление 2,5...15 МПа; скорость скольжения 2...6 м/с; температура масла 30...100 °С) составляет 0,03...0,12, что обеспечивает средний ресурс работы вращающихся элементов не менее 40 тыс. час.

В шестой главе рассмотрены вопросы надежности, учитывающие конструкционные и эксплуатационные особенности работы устройства для генерации тепловой энергии и транспортирования теплоносителя, в частности возможность длительного воздействия повышенных температур на основные элементы устройства. Анализ конструкции (например, отсутствие традиционных подшипниковых узлов) и учет особенностей эксплуатации макетных образцов позволяет обратиться к известной модели «слабейшего звена», учитывающей отказы изоляции обмоток статора, из которых более половины носит эксплуатационный характер и зависит не только от уровня воздействующих на изоляцию обмоток нагрузок, но и от сочетания конструктивных и эксплуатационных факторов. Для обмоток ТЭМП факторами, воздействующими на изоляцию, выбраны температура, механические (вибрация) и термомеханические нагрузки, электрические перенапряжения. По результатам статистической обработки экспериментальных данных получены регрессионные модели приращения дефектности витковой и корпусной изоляции обмоток и скорости роста дефектов в витковой изоляции, которые позволяют определять показатели надежности ЭТУ для генерации тепловой энергии и транспортирования теплоносителя на этапе проектирования с учетом конструкторско-технологических и эксплуатационных факторов транспортных систем.

В седьмой главе приведены результаты экспериментальных исследований с использованием информационно-измерительного комплекса. Возможность исследования регулировочных характеристик обеспечивается интеграцией в структурную схему привода переменного тока регулируемой частоты. Для количественного и качественного анализа основных выходных

характеристик ЭТУ и сравнения теоретических и экспериментальных данных рассматриваются три группы параметров: электромагнитные, тепловые и механические (гидравлические).

Измерение температуры рабочей среды производится с помощью термопар типа ТХК, устанавливаемых непосредственно в проточную часть и на теплоотдающие поверхности ЭТУ. Определение производительности осуществляется на основе измерения скорости вращения ВЭ с использованием интегрированной среды разработки цифровых устройств MAX+PLUS II BASELINE для проектирования и реализации диагностической системы на основе высокоскоростных программируемых логических интегральных схем. При измерении давления учитывается, что расчетный диапазон его изменения приблизительно составляет 0,01 - 0,5 МПа, что определяет выбор датчика динамического давления PS01-01, усилителя заряда и программного обеспечения (ПО) PowerGraph 2.1. В качестве аналого-цифрового преобразователя использован модуль АЦП-ЦАП 16/16 Sigma USB с ПО ZETLab.

Экспериментальные исследования проведены для двух типов исполнительных устройств: без внутренних ферромагнитных элементов (ФЭ) и с установленными ФЭ. Отсутствие в устройстве для генерации тепловой энергии и транспортирования теплоносителя ФЭ обуславливает значительно более высокие (в 5-7 раз) значения тока статора, чем у базовых асинхронных двигателей, при этом изменение тока при переходе от режима холостого хода к режиму короткого замыкания не превышает 5..8 %, а мощности - 10...12 %, что указывает на существенную тепловую нагрузку.

С увеличением частоты питающего напряжения температура нагрева нелинейно возрастает, причем регулировка температуры без существенного ухудшения механических параметров при отсутствии внутренних ФЭ осуществляется в диапазоне частоты до 50...60 Гц, при этом изменение частоты как при работе под нагрузкой, так и в режиме холостого хода, приводит к практически прямо пропорциональному изменению скорости вращения ВЭ и определяет целесообразный диапазон регулирования выходных характеристик. С увеличением частоты свыше 75 Гц доля тепловых потерь существенно увеличивается, что приводит к уменьшению механической мощности и момента, развиваемого ВЭ, и при частотах близких к 100 Гц практически вся подводимая к устройству для генерации тепловой энергии и транспортирования теплоносителя без внутренних ферромагнитных элементов мощность переходит в тепловую.

Использование внутренних ФЭ приводит к изменению соотношения между тепловой и механической составляющими мощности (рис. 9). При неизменной толщине ФЭ их длина оказывает значительное влияние на потребляемые устройством ток и мощность. В частности, для опытного варианта устройства при номинальном напряжении потребляемая мощность уменьшается в 1,6 раза при использовании ФЭ длиной 20 мм и в 2 раза при

длине 60 мм. Полученные данные, аппроксимированные кубической сплайн-интерполяцией, позволяют определить относительный диапазон длин ФЭ, составляющий приблизительно 0,25...0,70 электрически активной длины ВЭ, в котором достигается повышение производительности без существенного изменения условий теплоотдачи с поверхности НЭ. Технические параметры опытного варианта устройства: мощность - 1,8 кВт; номинальное фазное напряжение - 220 В; ток статора - 8,28 А; коэффициент мощности - 0,329; температура теплоносителя (трансформаторное масло) - 92 °С; производительность - 0,0055 м³/мин; давление - 0,15 МПа. Сравнение расчетных и экспериментальных данных в исследованном диапазоне основных эксплуатационных характеристик устройства показывает, что с учетом принятых допущений они согласуются между собой, что подтверждает как адекватность полученных математических моделей, так и возможность их использования при разработке электротехнических перекачивающих устройств на основе электромеханических теплогенерирующих преобразователей в транспортных системах.

Основные результаты и выводы

1. В работе решена крупная научно-техническая проблема обеспечения заданных температурных условий в вагонах на пассажирском железнодорожном транспорте путем создания нового класса электротехнических устройств, совмещающих функции генерации тепловой энергии и транспортирования теплоносителя, и синтеза систем управления этими устройствами.

2. Разработаны теоретические способы учета особенностей преобразования электрической энергии в тепловую и механическую в электротехнических устройствах, обеспечивающих генерацию тепловой энергии и транспортирование теплоносителя с заданными температурой, производительностью или давлением.

3. Теоретически обоснованы принципы конструирования и на их основе предложены конструкции устройств, совмещающих функции генерации тепловой энергии и транспортирования теплоносителя, реализованные в виде теплогенерирующих электромеханических преобразователей энергии с короткозамкнутыми вторичными обмотками, характеризующихся высокой степенью электробезопасности и надежности применительно к пассажирскому железнодорожному транспорту.

4. Получены и подтверждены экспериментально математические модели электромагнитных, тепловых и гидравлических процессов, позволяющие проектировать устройства для генерации тепловой энергии и транспортирования теплоносителя с требуемыми эксплуатационными показателями.

5. На основе принципа разделения обоснован способ построения и синтезирована система управления электротехническими

перекачивающими устройствами на основе электромеханических теплогенерирующих преобразователей, реализованная в виде последовательно соединенных оптимального нелинейного фильтра и детерминированного оптимального регулятора.

6. Разработан способ и технология изготовления исполнительных элементов электротехнических устройств для генерации тепловой энергии и транспортирования теплоносителя, обеспечивающие их высокую технологичность, степень готовности и удобство монтажа применительно к объектам транспортного назначения.

7. Обоснован метод, разработана инженерная методика экспериментального определения надежности и получены регрессионные модели, позволяющие на этапе проектирования прогнозировать показатели безотказности ЭТУ с учетом конструкторско-технологических и эксплуатационных факторов транспортных систем.

8. Разработана автоматизированная система научных исследований, контроля и испытаний, обеспечивающая возможность получения экспериментальных результатов, согласующихся с расчетными значениями выходных параметров рассмотренных устройств.

9. Разработаны рекомендации и приведены примеры использования электротехнических перекачивающих устройств на основе электромеханических теплогенерирующих преобразователей в системах отопления пассажирского железнодорожного транспорта.

Основные положения диссертации опубликованы в работах:

Статьи в периодических изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Иванов, С.Н. Использование электромеханических преобразователей в качестве устройств электронагрева / С.Н.Иванов // Научно-технические ведомости СПбГТУ. Основной выпуск. – 2008. - № 3. – С.246-252.

2. Иванов, С.Н. Проектирование элементов электротехнических комплексов для систем отопления транспортного назначения / С.Н.Иванов // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2010. – Выпуск 3. - С.105-113.

3. Иванов, С.Н. Системы управления электротехническими устройствами для генерации тепловой энергии и транспортирования теплоносителя / С.Н.Иванов // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2010. – Выпуск 3. - С.249-257.

4. Пащенко, Ф.Ф. Синтез систем управления электромеханическими преобразователями / Ф.Ф. Пащенко, О.С. Амосов, С.Н. Иванов // Датчики и системы / Sensors & Systems.- 2006.- № 8.- С.18-24.

5. Иванов, С.Н. Математическое моделирование устройств генерирования тепловой энергии на основе электромеханического преобразователя с разделенными нагревательными элементами / С.Н. Иванов, О.С. Амосов, А.В. Еськова // Известия ВУЗов. Северо-

Кавказский регион. Технические науки. Спец. вып. Математическое моделирование и компьютерные технологии. – 2006. – С. 32-35.

6. Ким К.К. Теплогенерирующий электромеханический преобразователь / К.К. Ким, С.Н. Иванов, И.М. Карпова // Электротехника. – 2008. - № 9. – С.46-52.

7. Ким К.К. Основы проектирования гидроэлектродинамических теплогенераторов / К.К. Ким, С.Н. Иванов, С.В. Уханов // Электро. Электроэнергетика. Электротехника. Электротехническая промышленность. – 2008.- № 4. – С. 14-16.

8. Ким, К.К. Некоторые вопросы определения показателей надежности теплогенерирующих электромеханических преобразователей / К.К. Ким, С.Н. Иванов // Изв.ВУЗ. Электромеханика. – 2008.- № 6 – С. 13-17.

9. Иванов, С.Н. Определение параметров теплогенерирующих электромеханических преобразователей / С.Н. Иванов, С.В. Уханов // Энергоснабжение и водоподготовка.- 2009.- №1(57).- С.56-61.

10. Ким, К.К. Новая система отопления пассажирского вагона / К.К. Ким, С.Н. Иванов // Железнодорожный транспорт. – 2009.- №2 – С.46.

11. Амосов, О.С. Синтез оптимальных систем управления электромеханическим теплогенерирующим комплексом / О.С. Амосов, Л.Н. Амосова, С.Н. Иванов // Информатика и системы управления.- 2009.- №1(19) – С.73-83.

12. Ким, К.К. К вопросу определения механической характеристики теплового электромеханического преобразователя / К.К. Ким, С.Н. Иванов // Электротехника. – 2009. - № 8. – С.47-54.

13. Иванов, С.Н. Моделирование и управление электромеханическими теплогенераторами на основе нейросетевых и нечетких алгоритмов / К.К. Ким, С.Н. Иванов, Л.Н. Амосова // Электричество. – 2009. - № 10. – С.36-40.

14. Иванов, С.Н. Аппаратное обеспечение формирования базы знаний нечеткой системы управления тепловым процессом в электромеханическом преобразователе / С.Н. Иванов, К.К. Ким // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2010.- №1– С.2-8.

15. Ким, К.К. Регулирование теплового режима купейного вагона / К.К. Ким, О.С. Амосов, С.Н. Иванов // Мир транспорта. – 2010. - № 2. - С. 96-101.

Монографии:

16. Иванов, С.Н. Теплогенерирующие электромеханические устройства и комплексы / С.Н. Иванов, К.К. Ким, В.М. Кузьмин. - СПб.: Издательство ОМ-Пресс, 2009.-347 с.

Патенты на изобретения и полезные модели:

17. Пат. № 50741 Российская Федерация, МПК⁷ Н 05 В 6/10, F 25 В 29/00. Управляемый теплогенерирующий электромеханический преобразователь [Текст] / О.С. Амосов, С.Н. Иванов, Ф.Ф. Пашенко.; заявитель и патентообладатель Комсомольский-на-Амуре гос. техн. ун-т.- № 2005123300/22; заявл. 21.07.2005; опубл. 20.01.2006. Бюл. № 16. -2 с.

18. Пат. № 78747 Российская Федерация, МПК В 61 D 27/00. Система отопления пассажирского вагона [Текст] / К.К. Ким, С.Н. Иванов.; заявитель и патентообладатель Петербургский гос. ун-т путей сообщения.- 2008128704/22(035417); заявл.14.07.2008;опубл. 10.12.08.Бюл. № 34. – 2 с.

19. Пат. № 85425 Российская Федерация, МПК В 61 D 27/00. Система отопления пассажирского вагона [Текст] / К.К.Ким, С.Н. Иванов, Н.А. Кудинова.; заявитель и патентообладатель Петербургский гос. ун-т путей сообщения.- № 2009112596/22(017199); заявл. 06.04.2009; опубл. 10.08.09.Бюл. № 22. – 2 с.

20. Пат. № 85426 Российская Федерация, МПК В 61 D 27/00. Автоматизированная система отопления пассажирского вагона [Текст] / К.К.Ким, С.Н. Иванов, Л.Н. Амосова, Н.А. Кудинова.; заявитель и патентообладатель Петербургский гос. ун-т путей сообщения.-№ 2009112597/22(017200); заявл. 06.04.2009; опубл. 10.08.09.Бюл. № 22. – 2 с.

21. Пат. № 85428 Российская Федерация, МПК В 61 D 27/00. Система отопления пассажирского вагона [Текст] / К.К.Ким, С.Н. Иванов, Н.А. Кудинова.; заявитель и патентообладатель Петербургский гос. ун-т путей сообщения.- № 2009112612/22(017215); заявл. 06.04.2009; опубл. 10.08.09.Бюл. № 22. – 2 с.

22. Пат. № 87855 Российская Федерация, МПК⁷ Н 05 В 6/10. Теплогенерирующий электромеханический преобразователь [Текст] / К.К. Ким, С.Н. Иванов, С.В. Уханов.; заявитель и патентообладатель Петербургский гос. ун-т путей сообщения.- № 2008115841/22; заявл. 21.04.2008; опубл. 20.10.09. Бюл. № 29. – 2 с.

Свидетельства о регистрации программ:

23. Иванов С.Н., Еськова А.В., Амосов О.С., Уханов С.В. Свидетельство об официальной регистрации программы «Расчет температуры в неподвижном нагревательном элементе ЭМПРЭ» для ЭВМ № 2006612895. Заявка № 2006611934. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 11.08.2006.

Статьи:

24. Иванов, С.Н. Разработка теплогенерирующих электромеханических преобразователей /С.Н. Иванов, О.С. Амосов, А.В. Еськова // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: XI Международная научно-техническая конференция; 1-2 марта 2005 г. 6 в 3 ч. - М.: МЭИ, 2005. – Ч.2.- С. 338-339.

25. Иванов, С.Н. Особенности разработки и проектирования теплогенерирующих устройств на основе электромеханических преобразователей энергии / С.Н.Иванов, В.М. Кузьмин, А.В. Еськова // Современные техника и технологии: XI Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 29 марта–2 апреля 2005 г. – Томск: Изд-во Томского политехн. ун-та, 2005. – Т. 1. – С. 297-299.

26. Иванов, С.Н. Оценка параметров витковой изоляции, определяющих надежность обмоток асинхронных двигателей / В.В. Пыхтин, С.Н. Иванов, В.Н. Лешков // Вестник Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Уральский государственный технический университет (ГОУВПО «УПИ»): вып. 5 (25) в 2 ч.: сб. науч. тр. - Екатеринбург: ГОУВПО «УПИ», 2003.- Ч.1.-С. 359-362.

27. Ким, К.К. Теплогенерирующая электромеханическая система отопления пассажирского вагона / К.К. Ким, С.Н. Иванов // Наука и транспорт.- 2009. – С.44-46.

28. Иванов, С.Н. Оптимальное управление теплогенерирующим электромеханическим преобразователем/ С.Н. Иванов, О.С. Амосов, Л.Н. Амосова // Электротехнические системы и комплексы: Межвузовский сборник научных трудов. Вып.17. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет», 2009.– С.128 - 134.

29. Иванов, С.Н. Информационное обеспечение доказательства адекватности математической модели электромеханического теплогенератора / С.Н. Иванов, А.В. Еськова, С.В. Уханов// Известия ВУЗов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2008. – С. 77-79.

Тезисы докладов:

30. Иванов, С.Н. Разработка и исследование нового класса теплогенераторов на основе электромеханического преобразователя с разделенными нагревательными элементами/ С.Н. Иванов, О.С. Амосов, Л.Н. Амосова// XXXI Дальневосточная математическая школа-семинар им. академика Е.В.Золотова: тез. докл. – Владивосток: Дальнаука, 2006. – С. 107.

31. Иванов, С.Н. Энергосберегающая система электроотопления пассажирского вагона / К. К. Ким, С.Н. Иванов, М. Т. Никифоров // Электрификация, инновационные технологии, скоростное и высокоскоростное движение на железнодорожном транспорте: тезисы докладов Пятого Международного симпозиума; Санкт-Петербург, 20-23 октября 2009 г. – Санкт-Петербург: ПГУПС, 2009.- С.94.

Личный вклад С.Н. Иванова в указанные труды состоит в разработке теоретических положений, принципов конструирования, математических моделей электромагнитных, тепловых и гидравлических процессов, разработке системы управления, методов оценки надежности, аппаратном обеспечении формирования базы знаний нечеткой системы управления электротехническими перекачивающими устройствами на основе электромеханических теплогенерирующих преобразователей.

Подписано к печати

2010 г.

Печ. л. – 2

Печать – ризография.

Бумага для множит. апп.

Формат 60x84 1/116

Тираж 100 экз.

Заказ №

СР ПГУПС

190031, С-Петербург, Московский пр.9