

На правах рукописи



Горожанкин Алексей Николаевич

**РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ СИНХРОННЫХ РЕАКТИВНЫХ
И ИНДУКТОРНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН**

Специальность 2.4.2 – «Электротехнические комплексы и системы»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Челябинск – 2023

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» на кафедре электропривода, мехатроники и электромеханики.

Научный консультант –

доктор технических наук, профессор
Григорьев Максим Анатольевич.

Официальные оппоненты:

Сарваров Анвар Сабулханович, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Автоматизированный электропривод и мехатроника» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск;

Мещеряков Виктор Николаевич, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Электропривод» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Липецкий государственный технический университет», г. Липецк;

Хакимьянов Марат Ильгизович, д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Электротехника и электрооборудование предприятий» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Уфа.

Ведущая организация – федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» г. Томск.

Защита состоится 10 октября 2023 г., в 10-00 часов, на заседании диссертационного совета 24.2.437.14 при ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76, ауд. 909.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» по адресу:

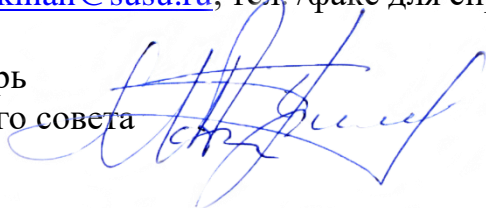
<https://www.susu.ru/ru/dissertation/24243714/gorozhankin-aleksey-nikolaevich>

Автореферат разослан « ____ » _____ 2023 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью учреждения, просим направлять по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, гл. корпус, Ученый совет ЮУрГУ, тел./факс: (351) 267-91-23.

E-mail: gorozhankinan@susu.ru; тел. /факс для справок: +7 (351) 272-32-30 доб. 7.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Григорьев
Максим Анатольевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности. Больше ста лет асинхронные электрические машины занимают ключевые позиции в регулируемом электроприводе переменного тока. Наряду с ними в последние десятилетия активно развиваются новые типы электрических машин, которые конструктивно в активной части не содержат обмоток на роторе, ротор несимметричный в магнитном отношении, на статоре может быть одна или две обмотки. К таким машинам относят синхронные реактивные и индукторные электромеханические преобразователи. Примерами таких машин являются вентильно-индукторные машины (ВИМ), исследованием которых занимались Чиликин М.Г., Ильинский Н.Ф., Ивоботенко Б.А., Lawrenson P., Садовский Л.А., Бычков М.Г., Красовский А.Б., Казаченко В.Ф. Другим примером являются синхронные реактивные машины (Беспалов В.Я., Vagati A.). Отдельный тип синхронных реактивных машин с независимым возбуждением (Усынин Ю.С., Григорьев М.А.). Помимо этих машин есть другие модификации, которые выделял Иванов-Смоленский А.В., в отечественных публикациях о них мало информации. В англоязычных источниках есть некоторые исследования этих машин, указывается на их хорошие удельные показатели и регулировочные характеристики. К ним относятся FSDC, DSDC, VR и VRDF машины. Исследования носят разрозненный, несистемный характер и не охватывают весь класс машин в целом. Нет единых аналитических зависимостей для электромагнитного момента, активной и реактивной мощностей, коэффициента мощности, методов инженерных расчетов таких машин, единых подходов к синтезу управляющих воздействий на статорные обмотки, расчету потерь, не рассматриваются особенности синтеза таких машин для конкретных производственных механизмов с учетом характера нагрузочных и скоростных диаграмм. В связи с вышеизложенным комплексное исследование машин данного класса является актуальным.

Объект исследования – синхронные реактивные и индукторные электрические машины (СРМ и ИМ).

Предмет исследования – удельные характеристики, статические и динамические режимы, энергетические показатели.

Целью работы является развитие теории, улучшение потребительских свойств класса синхронных реактивных и индукторных машин.

Идея работы заключается в использовании синергетического эффекта при питании электрической машины от электрического преобразователя, возможностей информационного обеспечения и вычислительной техники для комплексной оптимизации синхронных реактивных и индукторных машин, как в номинальном, так и перегрузочных режимах (по скорости, по току и моменту).

Достижение поставленной цели потребовало решения следующих **задач**:

1. Комплексная систематизация сведений по классу синхронных реактивных и индукторных электрических машин с оценкой их возможностей.

2. Разработка аналитических математических моделей для расчета показателей эффективности электромеханического преобразования и рекомендаций по выбору параметров электрических машин.

3. Разработка методов и алгоритмов оптимизации геометрических размеров активной части электрических машин.

4. Синтез управляющих воздействий на статорные цепи электрических машин, обеспечивающих высокие удельные показатели.

5. Выбор и верификация метода расчета потерь в стали электрических машин данного класса, коррекция алгоритмов управления с учетом этих потерь.

6. Учет особенностей электрических машин исследуемого класса при их выборе для различных областей применения.

Методы исследования. Для решения поставленных задач использовались основные положения теории электромеханического преобразования энергии, теории расчёта электрических цепей, метод конечных элементов, методы математического моделирования систем на ЭВМ, методы многомерной и многокритериальной оптимизации, методы экспериментального исследования.

Достоверность полученных результатов исследования определялась корректностью постановки задач, обоснованностью принятых допущений, подтверждается удовлетворительным для инженерной методики совпадением основных теоретических результатов и экспериментальных данных, полученных из физического эксперимента, точностью исходных данных, правомерностью использования теории.

Научные положения и результаты, выносимые на защиту, их научная новизна

1. Предложена обобщенная аналитическая математическая модель расчета удельных показателей и эффективности электромеханического преобразования для класса электрических машин, в основу которой положен принцип электромеханического преобразования как изменения энергии всех обмоток машины в функции угла поворота ротора, и отличающаяся тем, что позволяет учесть конфигурацию магнитной системы, тип обмотки и функцию управляющего воздействия;

2. Выполнен анализ конфигураций магнитных систем машин исследуемого класса. Разработан единый алгоритм многомерной оптимизации размеров элементов магнитопроводов активной части машин, отличающийся тем, что выполнен при разных значениях токовых нагрузок, а результаты оптимизации обобщены для исследуемого класса электрических машин. Дан анализ результатов и установлены общие закономерности соотношений геометрических размеров элементов активной части машин данного класса, позволяющие разработать инженерные методики проектирования и расчета;

3. Показано, что улучшение потребительских свойств электрических машин исследуемого класса можно добиться, если учитывать синергетический эффект от взаимодействия электрической машины и электрического преобразователя. Предложен метод поэтапной оптимизации управляющих воздействий, состоящей из двух этапов, и единый алгоритм оптимизации. На первом этапе получен максимум отношения электромагнитного момента к потерям в меди обмоток для каждого из дискретных положений ротора. На втором этапе потери в меди перераспределялись во времени таким образом, чтобы улучшить целевые показатели.

В качестве таких показателей предложены: максимум среднего момента и минимум его пульсаций;

4. Установлена взаимосвязь между типами электрических машин исследуемого класса и величиной потерь в стали в основных режимах работы (номинальный, перегрузка по току, работа на высоких скоростях). Показано, что удельная величина электромагнитного момента может быть увеличена путем коррекции управляющих воздействий. Предложен алгоритм такой коррекции, в основу которого положен принцип поддержания максимальной активной мощности в заданном режиме работы;

5. Разработана методика выбора электрической машины для конкретных применений с учетом требований технологического процесса на основе характеристик машин исследуемого класса. Получены результаты экспериментальных исследований, дан их анализ.

Практическое значение работы заключается в следующем:

– аналитические математические модели позволяют на этапе эскизного проектирования выбрать тип электрической машины в зависимости от требований к ней, а также могут быть применены при моделировании работы электрической машины в составе регулируемого электропривода;

– методы и алгоритмы оптимизации геометрических размеров активной части машины позволяют получить инженерные методики расчета при ее проектировании;

– полученные варианты управляющих воздействий выбираются в зависимости от требований к электрической машине со стороны технологического процесса с учетом характера нагрузочных диаграмм;

– предложенные методы расчёта потерь в стали позволяют косвенно оценить тепловое состояние электрических машин исследуемого класса, а также скорректировать алгоритмы управления.

Реализация результатов диссертационной работы

Результаты диссертационной работы используются и внедрены в производственной деятельности:

- ПАО «Челябинский трубопрокатный завод»;
- ООО НТЦ «Приводная техника» (г. Челябинск);
- ООО «Снежинский завод специальных электрических машин».

Материалы диссертационной работы используются в учебном процессе при чтении лекций по курсам «Электрические машины», «Системы управления электроприводов», а также в учебных пособиях и лабораторных стендах по данным дисциплинам в ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)».

Диссертационная работа подготовлена в рамках реализации:

– ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» в рамках мероприятия 1.3.1. по проблеме «Энергосберегающие решения на основе традиционных и новых типов электроприводов для городского электротранспорта» (госконтракт 14.В37.21.1503 от 21.09.2012 г.).

– ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» в рамках мероприятия 1.3.2. по проблеме «Энергосберегающие тяговые электроприводы электровозов» (госконтракт 14.132.21.1754 от 2012 г.).

– Гранта президента РФ (договор №16.120.11.6780-МК от 01.02.2012).

– Постановления Правительства РФ от 09.04.2010 №218, 14 очередь «Разработка и постановка на высокотехнологическое производство комплектных транзисторных устройств на базе многоуровневых преобразователей частоты широкой номенклатуры с улучшенными энергетическими и надежностными показателями» (соглашение №075-1-2022-025 от 07.04.2022).

– Гранта РНФ «Создание основ теории новых типов электроприводов с улучшенными технико-экономическими, энергетическими и надежностными показателями, и синтез методов проектирования этих систем» (соглашение №22-29-20145).

Апробация работы. В полном объеме работа докладывалась и обсуждалась на заседаниях кафедры «Электропривод, мехатроника и электромеханика» ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», г. Челябинск; на научно-техническом совете ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», отделение электроэнергетики и электротехники, г. Томск.

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на научно-технических конференциях, в том числе:

– VII Международной (VIII Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу: ФГОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», (г. Иваново, 2-4 октября, 2012 г.);

– международной конференции «Современное состояние и перспективы развития технических наук» (г. Уфа, 23 мая 2015 г.);

– международной конференции «Наука и современность» (г. Уфа, 4 апреля 2015 г.);

– международной конференции «Проблемы, перспективы и направления инновационного развития науки» (г. Курган, 20 марта 2016 г.);

– международной конференции «2017 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)» (г. Астана, 29-30 июня 2017 г.);

– международной конференции «2017 International Conference of Industrial Engineering» (г. Сингапур, 10-13 декабря, 2017 г.);

– международной конференции «17th International Ural Conference on AC Electric Drives (ACED)» (г. Екатеринбург, 26-30 марта 2018 г.);

– международном симпозиуме «Научные и технические основы будущих тяговых двигателей с низким содержанием вредных выбросов в окружающую среду» (г. Ньюкасл, Англия, 19-23 ноября, 2018 г.);

– международной конференции «IOP Conference Series: Materials Science and Engineering» (г. Бангкок, Таиланд, 24-26 февраля, 2018г.);

– международной конференции «2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon» (г Владивосток, 3-4 октября 2018 г.);

– международной конференции «Современные научные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации» (г. Пенза, 10 декабря 2021 г.);

– ежегодных научно-практических конференциях Южно-Уральского государственного университета (г. Челябинск, ЮУрГУ, 2010–2020 гг.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 67 печатных работ, в том числе 21 научная статья, входящая в перечень ВАК РФ, 19 статей в Международной базе цитирования Scopus, 15 статей и тезисов докладов на научно-технических конференциях, 7 патентов РФ на изобретение и 8 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Личный вклад автора. Личный вклад автора состоит в постановке задач, разработке методов и обобщении результатов исследований. Все научные положения разработаны автором лично. В работах, выполненных в соавторстве со своим научным консультантом Григорьевым М.А., автору принадлежат результаты, относящиеся к разработке концепции исследования, постановке задач оптимизации, построению обобщённых моделей электрических машин. В разработках с другими соавторами автору принадлежит ведущая роль в постановке задач исследования, обосновании математических моделей и методов решения.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав основного текста объемом 245 страниц, заключения, списка литературы из 225 наименований. Общий объем работы 305 страниц, включая 90 рисунков и 63 таблицы.

Соответствие научной специальности: исследование, выполненное в рамках диссертационной работы, полностью соответствует паспорту специальности 2.4.2, в частности:

- первое научное положение соответствует п. 1;
- второе, третье, четвертое положения соответствуют п. 3;
- пятое научное положение соответствует п. 2.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, определены цель, задачи и методы исследования, научная новизна и практическая значимость, сформулированы основные научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведена комплексная систематизация сведений по классам синхронных реактивных и индукторных электрических машин, дана их классификация, выполнен обзор литературы по каждому типу машины с целью оценки их возможностей и состояния уровня исследований по данной теме. Показано, что машины рассматриваемого класса имеют большой неиспользуемый резерв по улучшению массогабаритных удельных показателей, которые могут быть

достигнуты только при совместном учете работы электромеханического и полупроводникового преобразователей. Развитие таких машин возможно благодаря прогрессу в области силовой, информационной электроники, а также вычислительной техники с учетом нагрузочных и скоростных диаграмм рабочих режимов.

Синхронные реактивные и индукторные машины характеризуются отсутствием возбуждения на роторе (электромагнитного или магнитного), который является несимметричным в магнитном плане. Несимметрия достигается путем придания ротору анизотропных свойств, зубчатостью, эксцентриситетом ротора относительно статора и другими способами. В таких машинах возникает необходимость контролировать положение ротора при работе с помощью датчика или косвенным способом посредством расчета по другим переменным, например, напряжениям и токам фазных обмоток. Управление электромеханическим преобразованием осуществляется от преобразователя электрической энергии. Их достоинствами являются: прочный безобмоточный ротор, простота конструкции, высокие удельные энергосиловые показатели и регулировочные свойства за счет применения двух физически или функционально разделенных обмоток.

По принципу работы такие машины можно разделить на одно- и двухобмоточные варианты, по зубчатости статора – на машины с «гладким» статором и зубчатым статором. По типу возбуждения: электромагнитное, от постоянных магнитов и смешанное. По конструктивному расположению обмотки возбуждения: аксиальное или радиальное. По типу обмотки: распределенная, катушечная или тороидальная. Все классификационные признаки и типы машин представлены в табл. 1.

Таблица 1

Типы синхронных реактивных и индукторных машин

№	Тип статора	Кол-во обмоток радиально	Кол-во обмоток аксиально	Тип машины
1.	Гладкий	Одна	Нет	Синхронная реактивная машина (СРМ)
2.	Зубчатый	Одна	Нет	Синхронная реактивная машина с двухсторонней зубчатостью (СРМсДЗ)
3.	Зубчатый	Нет	Одна	Синхронная реактивная машина с двухсторонней зубчатостью и аксиальным потоком (СРМсДЗиАП)
4.	Гладкий	Две	Нет	Индукторная машина с зубчатым ротором (ИМсЗР)

№	Тип статора	Кол-во обмоток радиально	Кол-во обмоток аксиально	Тип машины
5.	Гладкий	Одна	Одна	Индукторная машина с аксиальным подмагничиванием (ИМсАП)
6.	Зубчатый	Две	Нет	Индукторная машина с двухсторонней зубчатостью (ИМсДЗ)
7.	Зубчатый	Одна	Одна	Индукторная машина с двухсторонней зубчатостью и аксиальным подмагничиванием (ИМсДЗиАПМ)
8.	Зубчатый	Нет	Две	Индукторная машина с двухсторонней зубчатостью и двумя аксиальными потоками (ИМсДЗиАП 2)

Тип электрической машины (табл. 1) включает в себя много модификаций. Например, одну из обмоток электрических машин (табл. 1, №3-6, 8) можно заменить системой из постоянных магнитов, вращающуюся машину заменить линейной или торцевой. Таким образом, модификация – это конкретное конструктивное исполнение типа электрической машины.

Прогресс в синхронных реактивных машинах (№1 в табл. 1) начался с применения электрического преобразователя, устанавливаемого между сетью и электрической машиной. Сетевая СРМ выдавала максимум 40% электромагнитного момента аналогичного по габаритам асинхронного двигателя с низким коэффициентом мощности (порядка 0,5). Причинами такого результата являются разомкнутый принцип управления и малое отношение продольной индуктивности машины к поперечной L_d / L_q . Кононенко Е.В. оптимизировал ротор таких машин, улучшив отношение реактансов, что улучшило показатели СРМ и приблизило их к показателям асинхронных машин. Дальнейшее улучшение удельных показателей удалось достичь благодаря питанию от преобразователя частоты и повышению отношения реактансов в работах Vagati A. и др. Начиная с 2011 года основные электротехнические компании (ABB, Siemens и др.) начали массово выпускать СРМ с высокими классами энергетической эффективности. В рамках данного класса машин известны решения с улучшенными удельными показателями электрической машины без усложнения технологии изготовления ротора за счет оптимизации алгоритмов управления (работы Ю.С. Усынина и М.А. Григорьева).

Параллельно с СРМ с «гладким» статором развивались СРМ с двухсторонней зубчатостью (№2, 3 в табл. 1). Здесь можно выделить машины с катушечными

обмотками и малым числом зубцов статора и ротора, а также машины с распределенной обмоткой и большим количеством зубцов статора и ротора.

Первый вариант получил название в отечественной литературе – вентильно-индукторная машина (ВИМ). Первые работы по созданию ВИМ принадлежат таким российским и зарубежным ученым, как Т.Т. Miller, Р.Т. Lawrenson, R. Krishnan, Л.Ф. Коломийцев, в которых раскрыты основные преимущества и недостатки ВИМ. Свое развитие в России ВИМ получили в трудах В.Ф. Козаченко, Н.Ф. Ильинского, М.Г. Бычкова, В.А. Кузнецова, Ю.А. Голланцева и др. Достоинства ВИМ: низкая стоимость, высокая надежность и отказоустойчивость, высокие удельные показатели (выше на 10-15%, чем у серийной асинхронной машины того же габарита). Недостатки: высокий уровень пульсаций момента и акустического шума. Такие недостатки решаются конструктивными мерами. Например, увеличением числа зубцов на каждом полюсе или увеличением числа фаз обмотки. Либо на уровне управления путем формирования нужных токовых диаграмм в обмотках. Отдельно следует отметить ВИМ с фазными катушками, расположенными на соседних зубцах статора, это приводит к уменьшению длины магнитных силовых линий и улучшению удельных показателей, особенно в режимах с сильным насыщением магнитной системы (труды проф. Шевченко А.Ф.).

Вариант №3 может быть получен из ВИМ путем выполнения машины с равным числом зубцов статора и ротора, а также заменой многофазной радиальной обмотки на однофазную аксиальную. Такое решение характеризуется сильными пульсациями момента, хотя находит применение в вентиляторных установках.

Второй вариант характеризуется малыми пульсациями момента и низким акустическим шумом, но за счет малого отношения L_d / L_q сильно уменьшается коэффициент мощности (вплоть до 0,1) и появляются потери в стали ротора, при этом за счет эффекта редукации скорости удается сохранить высокие значения крутящего момента, которые являются самыми высокими в исследуемом классе машин (в 2..3 раза выше, чем у асинхронной машины того же габарита). Развитие такой машины связано с именами следующих ученых: С.Н. Lee, К.С. Mukherji, А. Tustin.

Индукторные машины, т.е. машины с двумя физически независимыми в общем случае многофазными обмотками и «гладким» статором, занимают в табл. 1 строки №4-8.

Индукторная машина с зубчатым ротором (ИМсЗР, табл. 1 № 4) обладает низкими удельными показателями из-за малой площади на статоре для размещения двух обмоток вместо одной.

Развитием этого варианта является № 5 из табл. 1 (проф. Козаченко В.Ф.), в котором одна из обмоток перенесена в аксиальном направлении и создает соответствующий поток. Преимущества такой машины: бесконтактность, низкая стоимость изготовления, независимое возбуждение и широкий диапазон постоянства мощности, низкие пульсации момента, отсутствие потерь в роторе. Недостатки такого решения: нужны меры для предотвращения замыкания потока по подшипниковым щитам, затрудненный отвод тепла от обмотки возбуждения из-

за воздушного промежутка между обмоткой и статором машины. Авторы относят такую машину к ВИМ, но с независимым возбуждением.

Индукторные машины с двухсторонней зубчатостью (ИМсДЗ, табл. 1 №6, 7), как и в случае СРМ с двухсторонней зубчатостью, можно разделить на два варианта: машины с двумя катушечными обмотками и малым числом зубцов статора и ротора, а также машины с двумя распределенными обмотками и большим количеством зубцов статора и ротора.

Первый вариант получил название в английской терминологии *FS-Flux switch* (машина с переключением поля). Развитие исследований такой машины связано с именами следующих ученых: Ф.Н. Сарапулов, В.А. Дмитриевский, Y. Tang, Е.А. Ломонова. На статоре машины размещены две катушечные обмотки с разным числом пар полюсов: однофазная обмотка возбуждения и многофазная силовая обмотка. Управление возможно трапецеидальными импульсами тока (BLDC-управление) или синусоидальным током (BLAC-управление).

Вариант №7 может быть получен путем выполнения одной из обмоток аксиально (проф. Козаченко В.Ф.). Предлагается двухпакетный вариант машины. Достоинства: модульная конструкция, малые пульсации момента, возможность векторного управления. Недостаток – усложнение конструкции машины. Такой тип машины авторы также относят к ВИМ с независимым возбуждением, но с зубчатым вариантом статора.

Второй вариант получил название в английской терминологии (VRDF – машина с редукцией скорости и двумя обмотками на статоре). Отличается от первого варианта большим числом зубцов на статоре и роторе и распределенным характером обмоток статора.

Заключительный вариант №8 в табл. 1 похож на №3 с добавлением второй соосной аксиальной обмотки. В этом случае одна обмотка запитывается постоянным током, а вторая – переменным. Недостатком такого решения являются дополнительные потери в обмотках, когда их потоки направлены навстречу друг другу.

Таким образом, разными с точки зрения принципа электромеханического преобразования и обещающими хорошие удельные показатели являются варианты №1, 2, 6 (выделены в табл. 1 серым цветом).

Была сформулирована стратегия синтеза (проектирования) электромеханических преобразователей класса реактивных и индукторных машин, которая учитывает не только особенности совместной работы полупроводникового и электромеханического преобразователей, но и объектно-ориентированный подход, который учитывает характер нагрузочных и скоростных диаграмм механизмов, диктуемый требованиями технологического процесса. В этом случае проектирование выполняется с учетом расширенного диапазона скоростей и моментов нагрузки с предельными удельными показателями. Этапы этой стратегии:

– разработка обобщенной аналитической математической модели, которая бы позволила оценить удельные показатели различных типов электрических машин и дать рекомендации по величинам их параметров;

- оптимизация магнитных систем электрических машин с учётом объектно-ориентированного подхода;
- оптимизация управляющих воздействий на статорные цепи с учётом объектно-ориентированного подхода;
- расчет потерь в стали и оптимизация управляющих воздействий с учётом этих потерь;
- разработка методики выбора конкретного типа электрической машины для различных технологических процессов в зависимости от требований.

Вторая глава посвящена оценке эффективности электромеханического преобразования синхронных реактивных и индукторных электрических машин различных типов и их сравнению между собой при одинаковых исходных данных, а также получению рекомендаций по выбору основных параметров машин (чисел зубцов статора и ротора, чисел полюсов обмоток), выбору наиболее перспективных вариантов машин для дальнейшего исследования. Поставленная задача решается путем моделирования процессов электромеханического преобразования энергии на основе принципа изменения запасенной магнитной энергии всех обмоток в функции угла поворота ротора электрической машины. Важно отметить, что нет обобщенной математической модели, которая позволяла бы оценить эффективность электромеханического преобразования СРМ и ИМ, а также позволяла учесть конфигурацию магнитной системы машины, тип обмотки и функцию управляющего воздействия. Актуальность создания такой модели диктуется необходимостью учитывать процессы электромеханического преобразования СРМ и ИМ с единой позиции, что позволяет осуществлять сопоставление различных типов электрических машин по единым показателям эффективности. К ним относятся: электромагнитный момент, потребляемые активная и полная мощности, коэффициент мощности.

В предлагаемой модели приняты следующие допущения: электрическая машина не насыщена, магнитная проводимость стали равна бесконечности, отсутствуют потоки рассеяния. Такая модель позволила получить показатели эффективности электрических машин при любых управляющих воздействиях и для различных конфигураций магнитных систем активной части до номинальных значений скоростей и моментов с удовлетворительной погрешностью. В зонах перегрузок по моменту и высоких скоростей вращения ротора необходим учет распределения магнитных полей путем решения дифференциальных уравнений с распределенными параметрами методом конечных элементов.

Параметры электрических машин при моделировании подбирались таким образом, чтобы все машины были в одинаковых условиях. Для обычных машин с обмоткой на симметричном в магнитном плане роторе (ОМ) проводимость воздушного зазора была одинаковой и равной единице. Для СРМ с анизотропным ротором (СРМсАР) в момент времени, когда вектор МДС обмотки статора совпадал с магнитной продольной осью ротора, проводимость воздушного зазора была одинаковой и равной единице. По поперечной оси проводимость принималась равной нулю. Для СРМ с зубчатым ротором (СРМсЗР) проводимость ротора менялась по гармоническому закону, максимальная проводимость выбиралась

равной двум, а минимальная – нулю, при этом среднее ее значение было равно единице. Для СРМсДЗ проводимости статора и ротора изменялись также по гармоническому закону. Максимальное их значение было выбрано четверем, а минимальное – нулю. Максимальная общая проводимость воздушного зазора принимала значение два, а минимальная – нулю, что совпадало с распределением для СРМсЗР.

Для ОМ были выбраны следующие расчетные параметры (№1 в табл. 2): $A_S = A_R = 0,707$, $p_S = p_R = 1$, $\omega_S = \omega_R = 1$, $\alpha_0 = \pi/2$. Амплитуды МДС статора и ротора выбирались равными 0,707, чтобы результирующая МДС оказывалась равной единице. Для СРМсАР задавались следующие параметры (№2 в табл. 2): $A_S = 1$, $p_S = 1$, $\alpha_0 = \pi/4$, $f_{Zmax} = 1$, $f_{Zmin} = 0$, $\omega_S = 1$. Для СРМсЗР принимались следующие значения базовых параметров (№3 в табл. 2): $A_S = 1$, $A_R = 0,5$, $p_S = 1$, $\omega_S = 1$, $\alpha_0 = \pi/2$. Для увеличения момента ИМсЗР нужно выбирать амплитуды МДС обмоток примерно одинаковыми и числа пар полюсов брать минимально возможными (№4 в табл. 2). Такими параметрами, например, являются $A_{S1} = A_{S2} = 0,5$ (при суммарной амплитуде, равной единице), $p_{S1} = 1$, $p_{S2} = 2$, $\omega_{S1} = 1$, $\omega_{S2} = 0$. Расчетные параметры $p_Z = 3$, $\omega_Z = 1$. Для СРМсДЗ выбирались следующие параметры машины (№5 в табл. 2): $A_S = 1$, $p_S = 1$, $\omega_S = 1$, $p_{Z1} = 48$. Расчетные параметры: $p_{Z2} = 50$, $\omega_{Z2} = 2$. Здесь следует отметить, что аналитические зависимости справедливы только для приближенного распределения проводимости вдоль воздушного зазора. При точном распределении расчет следует производить численно. Для увеличения момента ИМсДЗ справедливы те же рекомендации, что и для ИМсЗР: нужно выбирать амплитуды МДС обмоток примерно одинаковыми и числа пар полюсов брать минимально возможными. Такими параметрами, например, являются $A_{S1} = A_{S2} = 0,5$ (при суммарной амплитуде, равной единице), $p_{S1} = 1$, $p_{S2} = 2$, $\omega_{S1} = 1$, $\omega_{S2} = 2$, $p_{Z1} = 48$. Расчетные параметры $p_{Z2} = 51$, $\omega_Z = 3$. Здесь так же, как и для СРМсДЗ, аналитические зависимости справедливы для приближенного распределения проводимости.

Таблица 2

Расчетные формулы показателей эффективности электромеханического преобразования

№	Тип машины	Показатель	Расчетная формула
1.	ОМ	M	$M_2(\alpha_0) = A_S \cdot A_R \cdot \sin(\alpha_0)$
		P	$P(\alpha_0) = A_S \cdot A_R \cdot \omega_S \cdot \sin(\alpha_0)$
		S	$S(\alpha_0) = A_S \cdot \omega_S \cdot \sqrt{A_S^2 + A_R^2 + 2 \cdot A_S \cdot A_R \cdot \cos(\alpha_0)}$
2.	СРМсАР	M	$M(\alpha_0) = \frac{A_S^2}{p_S} \cdot \sin(2 \cdot \alpha_0) \cdot \frac{f_{Zmax} - f_{Zmin}}{2}$
		P	$P(\alpha_0) = \left(\frac{A_S}{p_S}\right)^2 \cdot \omega_S \cdot \sin(2 \cdot \alpha_0) \cdot \frac{f_{Zmax} - f_{Zmin}}{2}$

№	Тип машины	Показатель	Расчетная формула
		S	$S(\alpha_0) = \left(\frac{A_s}{p_s}\right)^2 \cdot \omega_s \cdot \sqrt{f_{Z\max}^2 \cdot \cos^2 \alpha_0 + f_{Z\min}^2 \cdot \sin^2 \alpha_0}$
3.	СРМсЗР	M	$M_Z^{11} = 0,5 \cdot \left(\frac{A_s}{p_s}\right)^2 \cdot \frac{p_z}{2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{A_s^2}{p_s}$
		P	$P_Z^{11} = M_Z^{11} \cdot \frac{\omega_s}{p_s} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{A_s}{p_s}\right)^2 \cdot \omega_s$
		S	рассчитывается численно
4.	ИМсЗР	M	$M_Z^{21} = \frac{1}{2} \cdot A_{s1} \cdot A_{s2} \cdot \left(\frac{1}{p_{s2(1)}} \pm \frac{1}{p_{s1(2)}}\right)$
		P	$P_Z^{21} = \frac{A_{s1}}{p_{s1}} \cdot \frac{A_{s2}}{p_{s2}} \cdot \frac{(\omega_{s1(2)} \pm \omega_{s2(1)})}{2}$
		S	рассчитывается численно
5.	СРМсДЗ	M	$M_Z^{12} = \frac{1}{16} \cdot \frac{A_s^2}{p_s} \cdot \left(\frac{p_{z1}}{p_s} \pm 2\right)$
		P	$P_Z^{12} = \frac{1}{8} \cdot \left(\frac{A_s}{p_s}\right)^2 \cdot \omega_s$
		S	рассчитывается численно
6.	ИМсДЗ	M	$M_Z^{22} = \frac{1}{8} \cdot A_{s1} \cdot A_{s2} \cdot \left(\frac{\pm 1}{p_{s2(1)}} \pm \frac{1}{p_{s1(2)}} + \frac{p_{z1}}{p_{s1} \cdot p_{s2}}\right)$
		P	$P_Z^{22} = \frac{A_{s1}}{p_{s1}} \cdot \frac{A_{s2}}{p_{s2}} \cdot \frac{(\omega_{s1(2)} \pm \omega_{s2(1)})}{8}$
		S	рассчитывается численно

Примечание: A – амплитуда МДС; p – число пар полюсов обмотки; s – статор; r – ротор; M – момент; P – потребляемая активная мощность; S – потребляемая полная мощность; ω – угловая скорость; α_0 – угловое положение ротора.

В табл. 3 приведены показатели эффективности электромеханического преобразования для СРМ. Электромагнитный момент для всех типов электрических машин, кроме СРМсДЗ, получился равным 0,5 (табл. 3, строка №1). Только для ОМ этот показатель был достигнут при суммарной МДС двух обмоток, равной 1,41, что на 40% выше МДС остальных машин. Момент СРМсДЗ оказался выше,

чем у остальных машин примерно в 6 раз за счет двухсторонней зубчатости и редукции скорости. Для реальной машины этот показатель будет значительно ниже (в 3...4 раза) за счет того, что разность в магнитной проводимости согласованного и рассогласованного положения зубцов статора и ротора намного меньше при малой ширине большого количества зубцов, что не учитывалось в предлагаемой математической модели.

Таблица 3

Результаты расчета показателей эффективности

№	Наименование	Значение показателя эффективности			
		ОМ	СРМсЗР	СРМсАР	СРМсДЗ
1	Электромагнитный момент, M	0,5	0,5	0,5	3,05
2	Активная мощность, P	0,5	0,5	0,5	0,105
3	Полная мощность, S	0,707	1,225	0,707	0,745
4	Коэффициент мощности, λ	0,707	0,408	0,707	0,14

Активная мощность для всех машин ($P=0,5$), кроме СРМсДЗ, оказалась одинаковой. Более низкий показатель для СРМсДЗ ($P=0,105$) объясняется меньшей магнитной проводимостью вблизи воздушного зазора, обусловленный двухсторонней зубчатостью с разным количеством зубцов статора и ротора (табл. 3, строка №2).

Полная мощность ОМ была равна мощности СРМсАР ($S=0,707$), что связано с применением упрощенных моделей, в которых не учитывалось влияние высших гармоник. Полная мощность СРМсЗР оказалась существенно выше ($S=1,225$), и обусловлено это влиянием третьей гармоники индукции, регистрируемой в зазоре электрической машины. Полная мощность СРМсДЗ оказалась сопоставима с аналогичными показателями ОМ и СРМсАР ($S=0,745$) и обусловлена большим количеством высших гармоник индукции в зазоре электрической машины, амплитуда которых заметно снижена из-за двухсторонней зубчатости (табл. 3, строка №3).

Расчеты показали, что коэффициент мощности ОМ можно регулировать путем воздействия на амплитуду МДС обмоток статора и ротора, а коэффициент мощности СРМсАР – путем изменения угла α_0 . Установлено, что в электроприводах с СРМсЗР и СРМсДЗ коэффициенты мощности не зависели от способа управления.

Результаты расчета показателей эффективности для СРМсДЗ рассчитаны численным способом. Приближенный расчет дает высокую точность только для расчета электромагнитного момента (ошибка 2,5%). Остальные показатели рекомендуется считать по точной методике.

Показатели эффективности электромеханического преобразования для ИМ значительно ниже аналогичных показателей СРМ (табл. 4). Это объясняется, во-первых, размещением двух обмоток в тех же пазах статора, где размещалась одна обмотка СРМ, во-вторых, полюсность второй обмотки по расточке статора выбирается выше, чем первой, что приводит к еще большему уменьшению

амплитуды МДС. Кроме того, как и для ОМ момент, эквивалентный СРМ получается при МДС на 40% большей, чем у последней. Это обстоятельство справедливо только для синусоидальных распределений МДС обмоток. Достоинством ИМ является возможность увеличения коэффициента мощности вплоть до опережающих значений и расширения диапазона регулирования за счет увеличения МДС обмотки возбуждения при сохранении амплитуды результирующей МДС в зазоре машины, как у обычной синхронной машины, при этом момент будет ниже из-за сильной разницы по величине МДС обмоток.

Таблица 4

Результаты расчета показателей эффективности ИМ

№	Результат	Тип машины	
		ИМсЗР	ИМсДЗ
1	Электромагнитный момент, M	0,188	0,78
2	Активная мощность, P	0,0625	0,039
3	Полная мощность, S	0,26	0,28
4	Коэффициент мощности, λ	0,24	0,14

Третья глава посвящена оптимизации магнитной системы и оценке удельных показателей машин класса для режимов работы при номинальной нагрузке, а также в режиме с перегрузкой по току и моменту с учетом объектно-ориентированного подхода к проектированию.

На первом этапе выполнялся синтез конечно-элементных математических моделей наиболее перспективных типов машин класса в программном пакете ANSYS Electronics Desktop, который включает в себя модуль Ansys Maxwell для анализа установившихся и переходных режимов работы электрических машин. Решение уравнений Максвелла позволяет выполнять анализ и синтез электрических машин при работе в зонах перегрузок и высоких скоростей вращения ротора, где использование схем расчета на основе представления параметров магнитной системы в сосредоточенном виде не дает достоверного результата.

По результатам обзора (глава 1) и по показателям эффективности электромеханического преобразования разных типов электрических машин класса (глава 2) выбраны для оптимизации магнитных систем три четырехполюсные трехфазные СРМ, которые соответствуют типу №1 из табл. 1: СРМсЗР, две СРМсАР. В первом случае (СРМсАР 1) отношение индуктивностей по продольной и поперечной осям составляет 4-6. Другой вариант выполнения ротора (СРМсАР 2) предусматривает явно выраженные полюса и меньшую спинку ротора в месте примыкания к воздушному зазору. Эти конструктивные особенности позволяют поднять отношение индуктивностей по осям до 7-9, но при этом возрастают пульсации момента за счет увеличения амплитуды высших гармоник

проводимости магнитного потока через ротор, уменьшается его механическая прочность.

Выбраны две модификации четырехполюсных трехфазных СРМсДЗ, которые соответствуют типу №2 из табл. 1. Первый вариант – это вентильно-индукторная 4-х полюсная машина (ВИМ) в конфигурации 12/8. Конструктивные особенности: катушечная (зубцовая) обмотка и малое число зубцов статора и ротора. Вторым вариантом – это СРМсДЗ с большим числом зубцов статора и ротора, а также распределенной обмоткой.

Выбраны две модификации четырехполюсных трехфазных ИМсДЗ, которые соответствуют типу №6 из табл. 1. Первый вариант – это машина с переключением потока с 2-х полюсной силовой обмоткой и 6-ти полюсной обмоткой возбуждения в конфигурации 12/8. Конструктивные особенности: катушечная (зубцовая) обмотка и малое число зубцов статора и ротора. Вторым вариантом – это СРМсДЗ с большим числом зубцов статора и ротора, а также двумя распределенными обмотками: силовой трехфазной 4-х полюсной и 6-ти полюсной однофазной обмоткой возбуждения.

Следующей задачей являлся выбор габарита (мощности) для всех рассмотренных типов электрических машин. Моделирование выполнено в габаритах асинхронной машины с короткозамкнутым ротором М0160М4 (18 кВт). Полученные конечно-элементные модели среднего диапазона мощности позволяют экстраполировать и обобщить результаты оптимизации на другие диапазоны (малой и большой мощности) с точки зрения конфигурации магнитных систем вариацией относительного магнитного сопротивления воздушного зазора. Кроме того, 4-х полюсные машины обладают хорошими массогабаритными показателями, высоким КПД и коэффициентом мощности.

Задача оптимизации СРМ и ИМ решалась для двух предельных состояний магнитных систем электромеханического преобразователя: ненасыщенной и сильно насыщенной (4-х кратная перегрузка по току). Такие состояния получались путем задания базового значения тока в обмотках статора. Другой особенностью решения задачи оптимизации являлось поддержание постоянства величины потерь в меди обмоток. Предлагалось учитывать нагрев пазовой части обмотки, как величину, пропорциональную произведению линейной нагрузки на плотность тока в проводниках. Отсюда получена зависимость потерь в меди обмоток от величины протекающего в них тока:

$$P_{CU} = k_{CU} \cdot \frac{I_P^2}{S_P} \tag{1}$$
$$I_P = \sqrt{\frac{P_{CU}}{k_{CU}} \cdot S_P}$$

где k_{CU} – коэффициент пропорциональности; I_P – величина пазового тока; S_P – площадь паза.

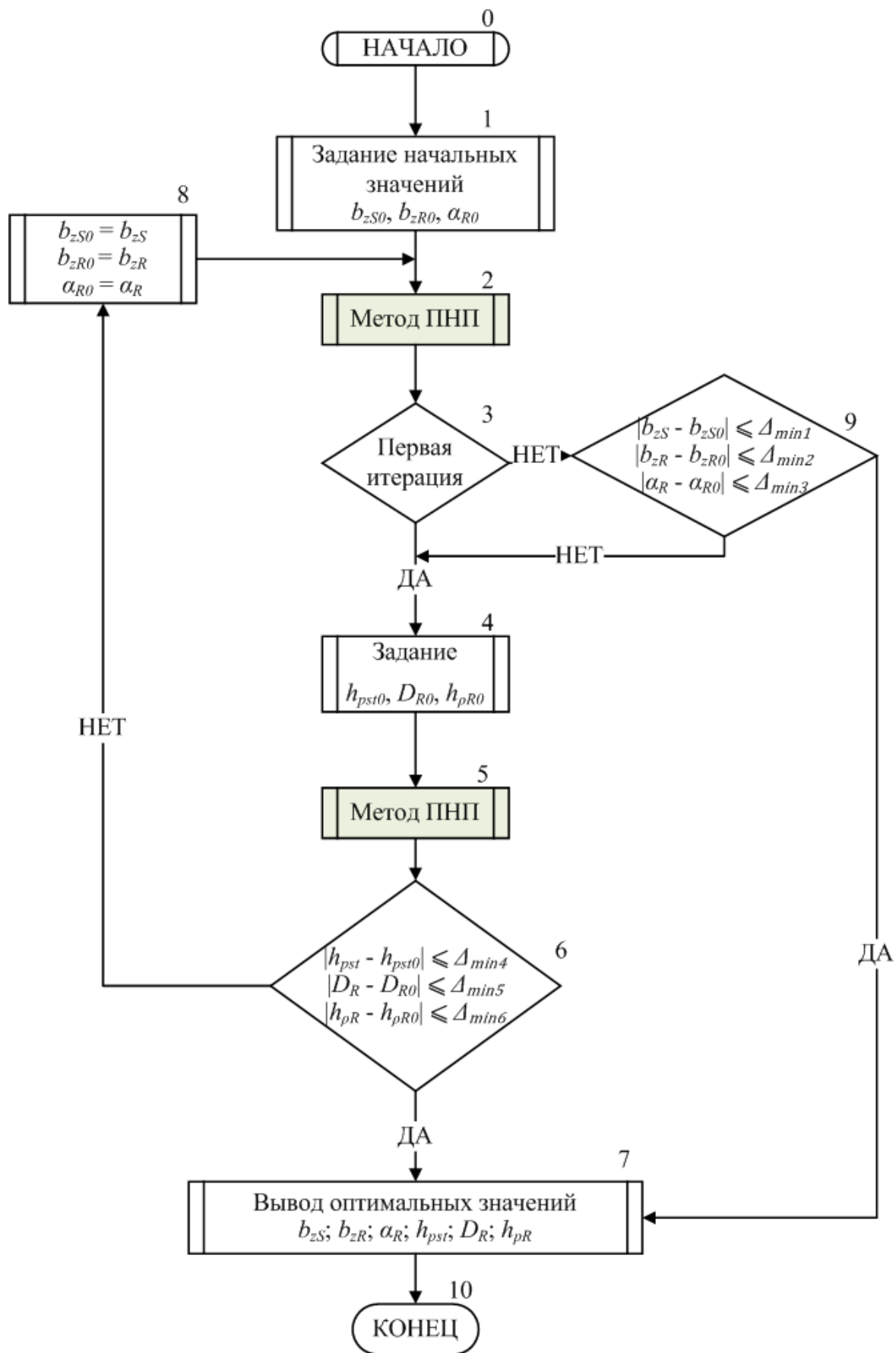


Рис. 1. Обобщенный алгоритм оптимизации размеров элементов магнитопроводов СРМ и ИМ

Следовательно, пазовый ток пропорционален корню квадратному из площади паза при заданных постоянных потерях в меди. В результате оптимизационных процедур менялась площадь паза и пазовый ток.

Токи всех фазных обмоток для выбранных модификаций задавались одинаковыми, а направление выбиралось таким образом, чтобы амплитудное значение МДС в зазоре было максимальным. Для модификации ВИМ задавался ток только в одной фазной обмотке. Для модификации FSDC задавались равные токи двух обмоток, обеспечивая максимальное значение МДС в зазоре машины. Кроме того, для многофазной (в пределе количество фаз равно бесконечности) машины максимальный момент являлся рабочим, что позволило получить предельные результаты оптимизации магнитной системы.

Был предложен алгоритм оптимизации СРМ и ИМ по максимуму момента в заданных габаритах, состоящий из двух частей (рис. 1). В первой части выполнялся поиск наилучших параметров $X (bz_{ST}, hp_{ST}, hp_R, bz_R, D_R, \alpha_R)$. Здесь bz_{ST} – ширина зубцов статора; hp_{ST} – высота зубцов (пазов) статора; hp_R – высота зубцов (пазов) ротора; bz_R – ширина зубцов ротора; D_R – диаметр ротора; α_R – угол поворота ротора. При этом остальные значения параметров оптимизации в векторе $X (\delta, h_{SH}, b_{SH})$ поддерживались постоянными. Здесь δ – величина воздушного зазора; h_{SH} – высота шлица паза статора; b_{SH} – ширина шлица паза статора. Критерием оптимизации выступала величина, пропорциональная величине электромагнитного момента. В блоке 1 задавались начальные размеры ширины зубцов статора и ротора, а также начальное положение ротора. Выбор такой группы параметров объясняется следующим. При изменении ширины зубцов статора или ротора меняется гармонический состав проводимостей магнитного потока со стороны статора или ротора. Это приводит к изменению величины зубцовых пульсаций и среднего значения электромагнитного момента при заданном углом α_R положении ротора. Разделение параметров оптимизации на 2 группы помогает достичь заданной точности оптимизации за меньшее количество итераций. В работе использовался метод многомерной однокритериальной оптимизации последовательного нелинейного программирования (в английской терминологии – *Sequential Nonlinear Programming*), который относится к группе градиентных методов первого порядка и показал хорошую сходимость. В блоках 2 и 5 методом последовательного нелинейного программирования (ПНП) осуществлялся поиск оптимальных значений параметров. В блоке 3 проверялся номер итерации. В случае второй и последующих итераций проверялась величина изменения параметров оптимизации первой группы после оптимизации в блоке 2, чтобы принять решение о продолжении или завершении оптимизационных процедур. В блоке 6 проводилась аналогичная проверка для другой группы параметров после оптимизации методом ПНП (блок 5). Вторая группа параметров (блок 4) не влияла на величину пульсаций момента. Во второй части оптимизации исследовалась чувствительность к изменению воздушного зазора δ величины электромагнитного момента.

Общей закономерностью по результатам оптимизации магнитных систем СРМ и ИМ по предложенному алгоритму являлось уменьшение размеров их

элементов относительно базовой геометрии асинхронной машины, что приводило к увеличению отношения реактансов по продольной и поперечной осям. В большей степени размеры элементов уменьшались у СРМсДЗ, ИМсДЗ, ВИМ и FSDC, т.е. у машин с существенно отличающимися принципом работы, конфигурацией обмоток и алгоритмом управления от асинхронных машин. Поэтому их выгодно проектировать с существенно большей долей обмоточной меди относительно электротехнической стали.

На рис. 2 показан эффект от оптимизации. Общей закономерностью здесь является увеличение удельного показателя при оптимизации под один режим работы и уменьшение критерия оптимизации при оптимизации под другой режим работы. Введен критерий интегрального эффекта от оптимизации (желтые столбцы на рис. 2). Положительный эффект в наибольшей степени наблюдается в номинальном режиме работы для ВИМ и FSDC. Самый большой эффект наблюдается у СРМсДЗ. Это объясняется сильным расхождением оптимальной геометрии этих машин от оптимальной геометрии асинхронной машины, которая была взята за базу при проведении оптимизационных процедур.

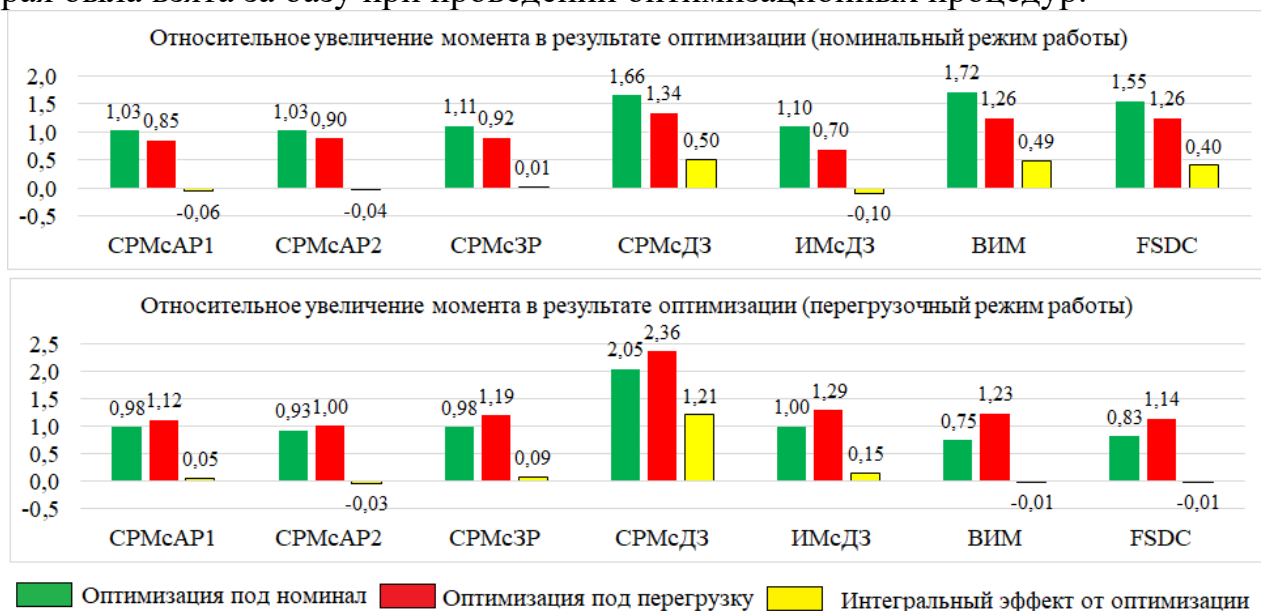


Рис. 2. Относительное изменение момента в результате оптимизации магнитных систем СРМ и ИМ для двух предельных режимов работы

Наилучшее использование активных материалов по электромагнитному моменту (номинальному и перегрузочному) по результатам оптимизации элементов магнитных систем СРМ и ИМ реализуется в электрических машинах, геометрия которых существенно отличается от классических асинхронных машин. Наибольшее значение момента в номинальном режиме наблюдается у СРМсДЗ, наименьшее – у ИМсДЗ. Такие зависимости прослеживаются и на упрощенной математической модели (глава 2). В зоне перегрузок наилучшей оказалась ВИМ за счет самого большого отношения реактансов по продольной и поперечной осям в классе.

Получена группа зависимостей между величинами воздушного зазора и момента. Результаты такого исследования могут быть полезны на этапе объектно-ориентированного проектирования СРМ и ИМ в большом диапазоне мощностей при выборе их класса и типа. Известно, что в машинах малой мощности доля магнитного сопротивления, приходящаяся на зазор, значительно больше, чем у машин большой мощности. За счет изменения доли магнитного сопротивления воздушного зазора в магнитных системах машин исследуемых машин в зависимости от мощности в разной степени меняется отношение реактансов. Это приводит к разной чувствительности момента к изменению зазора. Например, наибольшая чувствительность у СРМсДЗ и ИМсДЗ, где изменение реактансов наиболее существенно. Наименьшая чувствительность у СРМсЗР, где реактансы меняются меньше всего.

Четвертая глава посвящена оптимизации управляющих воздействий на статорные цепи электрических машин для режимов работы с 4-х кратной перегрузкой по току и в номинальном режиме с учетом объектно-ориентированного подхода к проектированию и ограничения на количество фаз. Так как рассматриваются трехфазные машины, то при переключении тока в одной из обмоток ротор повернется на 1/3 полюсного деления. Таким образом, диаграмма момента может быть представлена как огибающая серии угловых характеристик, смещенных друг относительно друга. При выборе геометрии на этом этапе определяющим являлось среднее значение момента за период коммутации и его пульсации. Угловые характеристики для каждой геометрии магнитных систем были получены в главе 3. Параметрами оптимизации на первом этапе выступали фазные токи обмоток статора. Критерием оптимизации выступало отношение электромагнитного момента к потерям в меди обмоток для каждого углового положения ротора с выбранной величиной шага в пределах величины угла поворота ротора на величину фазной зоны:

$$q_{ai}(P_{Mi}) = \frac{M_{ai}}{P_{Mi}} \quad (2)$$

$$P_{Mi} = \sum_{j=1}^n I_{jai}^2 = const$$

где ai – i -е угловое положение ротора электрической машины; I_{jai} – величина тока в j -ой фазе фазной обмотки и ai положении ротора; n – количество фаз обмотки; P_{Mi} – величина, пропорциональная потерям в меди, при i -ом угловом положении ротора.

Оптимизация первого этапа актуальна только для количества фаз обмотки больше единицы. В противном случае показатель q_{ai} пропорционален моменту в определенном угловом положении ротора. Ток в этом случае является постоянной заданной величиной, определяемой величиной потерь меди обмоток. При количестве фаз больше одной возникает задача поиска наилучшего соотношения токов фазных обмоток при заданном угловом положении ротора и одинаковых потерях в меди обмоток в каждом его угловом положении. Здесь нельзя

применить методы многомерной оптимизации подобно тому, как это было сделано в главе 3 по следующей причине. При одинаковом соотношении фазных

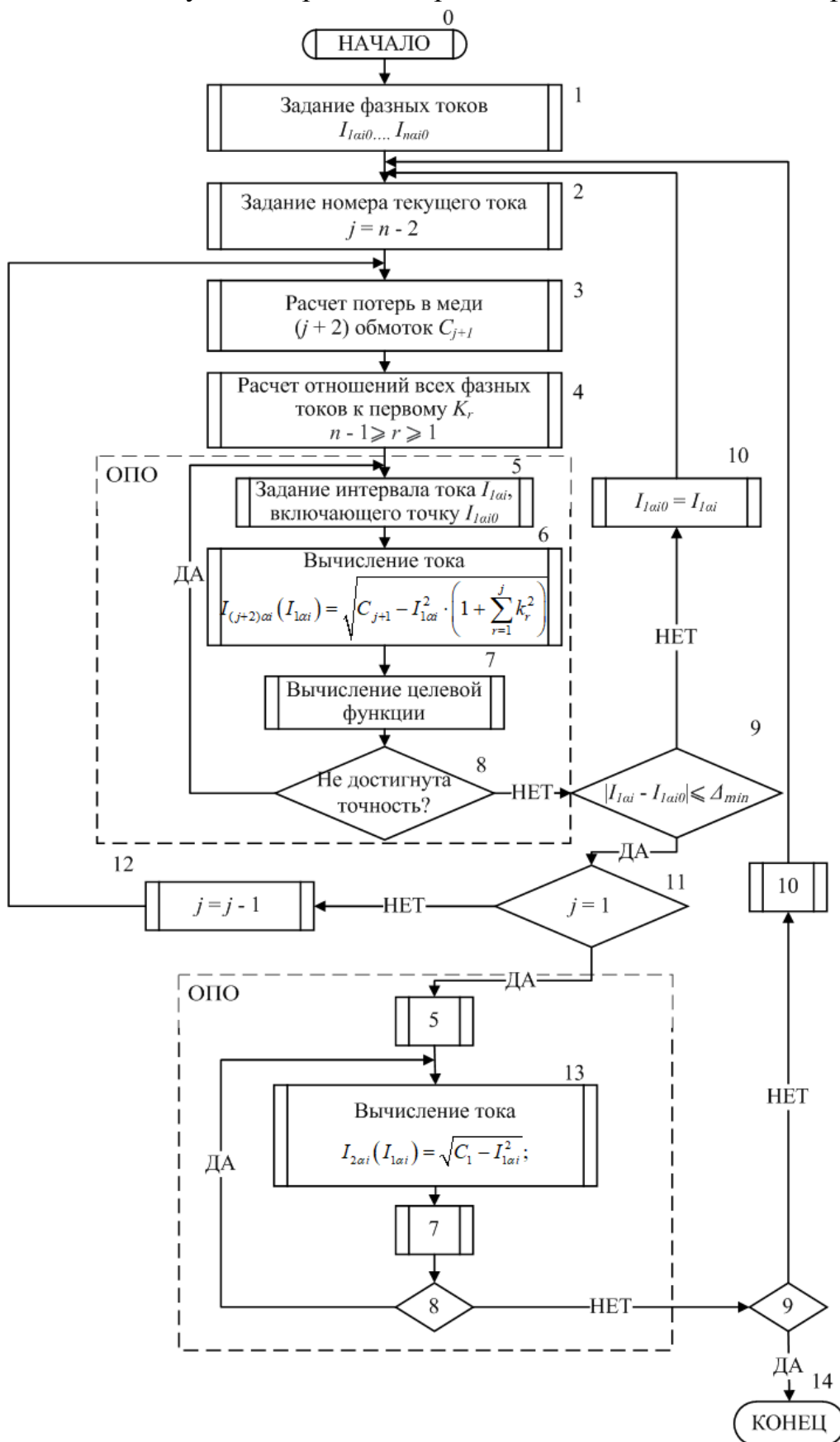


Рис. 3. Алгоритм синтеза законов управления токами СРМ и ИМ

токов параметр оптимизации будет выше при меньших их значениях. Это следует из того, что кривая намагничивания стали является нелинейной. Поэтому при задании диапазонов фазных токов наименьшая величина потерь в меди будет при равных и минимальных (на нижней границе диапазона) фазных токах. Такое распределение не обязательно будет оптимальным, а оптимальное распределение будет получаться, например, при большей величине потерь в меди в силу разных величин токов. Чтобы получить оптимальное распределение нужно сдвигать нижнюю границу диапазона изменения тока, что в процессе оптимизации не предусмотрено. Оптимизацию следует начинать с точки, соответствующей максимуму на угловой характеристике. Затем ротор поворачивался равными шагами сначала в одну, а затем в другую сторону по угловой характеристике до границ фазной зоны. В этом случае процесс оптимизации шел быстрее за счет того, что оптимальные токи меньше менялись от шага к шагу, параметром оптимизации выступал ток I_{1ai} . Задача при заданном угловом положении ротора может быть решена согласно следующему алгоритму (рис. 3). Соотношения фазных токов всех типов электрических машин задавались по алгоритму главы 3. Абсолютные их значения рассчитывались исходя из заданной суммы потерь всех фазных обмоток P_{Mi} в текущем угловом положении ротора (блок 1). Фазные токи обмоток нумеровались по порядку от единицы до n . Такая оптимизация является одномерной поисковой оптимизацией (ОПО) и решается любым методом, разработанным для данного типа оптимизации (блоки 5-8). Параметры для ОПО рассчитывались в блоках 2-4. При количестве фаз больше или равном трём ($n-2 \geq j \geq 1$) соотношение всех токов, кроме последнего, поддерживалось постоянным. Последний ток варьировался в функции первого тока I_{1ai} по выражению (блок 6):

$$I_{(j+2)ai}(I_{1ai}) = \sqrt{C_{j+1} - I_{1ai}^2 \cdot \left(1 + \sum_{r=1}^j k_r^2\right)} \quad (3)$$

$$C_j = C_{j+1} - I_{(j+2)ai}^2$$

где C_{j+1} – величина, пропорциональная потерям в меди, которые выделяются в $j+2$ фазных обмотках, при текущем положении ротора; C_j – величина, пропорциональная потерям в меди, которые выделяются в $j+1$ фазных обмотках; k_r – отношение $r+1$ тока к первому.

В случае изменения I_{1ai} по результатам второго и последующих шагов оптимизации – возвращались к первому шагу (блоки 9 и 10). Если изменение тока I_{1ai} не превысило допустимый предел, то переходили к следующему по номеру току (блоки 11 и 12). Начиная со второго шага, процесс оптимизации носил итерационный характер. На каждом подэтапе осуществлялось решение задачи одномерной безусловной однокритериальной поисковой оптимизации (ОПО).

На заключительном шаге оптимизации два тока связывались соотношением (блок 13):

$$I_{2ai}(I_{1ai}) = \sqrt{C_1 - I_{1ai}^2} \quad (4)$$

На втором этапе оптимизации перераспределялись потери в меди фазных обмоток для достижения целевых показателей: минимум пульсаций момента или максимум его среднего значения.

В табл. 5 сведены номера гармоник оптимальной (синтезированной) формы фазного тока для различных модификаций СРМ и ИМ. Помимо первой гармоники машины с зубчатым ротором содержат третью гармонику. Чётные номера гармоник содержат только оптимальные управляющие воздействия для машин с катушечными обмотками и малым числом пазов на статоре и роторе (ВИМ и FSDC). От величины тока в обмотках оптимальная форма тока существенно не зависит. Для ИМсДЗ и FSDC величина тока возбуждения увеличилась в результате оптимизации на 20-35% в зависимости от режима работы.

Таблица 5

Номера гармоник оптимальной (синтезированной) формы фазного тока для разных типов и модификаций СРМ и ИМ

№	Тип машины	Режим работы	
		Номинальный	Перегрузочный
1.	СРМсЗР	1,3	1,3
2.	СРМсАР1	1	1,3
3.	СРМсАР2	1,3	1,3
4.	СРМсДЗ	1,3	1,3
5.	ИМсДЗ	1	1,3
6.	ВИМ	0, 2, 4, 8, 10	0, 2, 4, 8, 10, 14, 16
7.	FSDC	2	2, 4, 6

Эффективность алгоритма оптимизации по величине среднего номинального момента изменялась от 0 до 10%. С учётом ограниченного количества фаз обмотки в процессе работы машины наблюдались пульсации момента, которые снижали его среднее значение. Прямоугольная диаграмма тока, которая являлась наилучшей для СРМ и ИМ, в предположении бесконечного количества фаз статорной обмотки оказалась наихудшей как с точки зрения величины среднего значения момента, так и с точки зрения величины его пульсаций. Синусоидальная диаграмма тока занимала промежуточное положение между прямоугольной и синтезированной по величине среднего номинального момента. Синтезированная диаграмма тока обеспечивала большую величину среднего момента машин, чем синусоидальная, но при этом пульсации момента несколько возрастали. По результатам сопоставления машин наибольшую величину среднего номинального момента показала СРМсДЗ, затем следуют СРМсАР и СРМсЗР, наихудший результат у ИМсДЗ, ВИМ и FSDC. Относительно большой момент СРМсДЗ объясняется ее принципом работы, когда магнитная энергия обмоток изменялась существенно при незначительном угле поворота ротора несмотря на то, что отношение реактансов по продольной и поперечной осям у нее худшее в классе. У СРМсАР и СРМсЗР величина момента определялась уже отношением реактансов по осям, так как из-за их конструкции не наблюдалось редукации скорости, которая есть у СРМсДЗ. Наихудшие показатели ИМсДЗ объясняются размещением двух обмоток в одних пазах статора, что снижает амплитуду МДС каждой

обмотки, кроме того, как и у обычной синхронной машины с обмоткой возбуждения на роторе та же амплитуда МДС в зазоре, как у СРМ, наблюдалась при превышенном на 40% суммарном токе обмоток. У FSDC и ВИМ снижение показателей объяснялось принципом работы, при котором только часть обмоток участвовала в электромеханическом преобразовании в каждый момент времени.

Эффективность алгоритма оптимизации по величине среднего перегрузочного момента изменялась от 0 до 20%. По результатам сопоставления машин наибольшую величину среднего перегрузочного момента показали СРМсАР, затем следуют СРМсЗР, ВИМ и FSDC. Наихудший результат, напротив, у ИМсДЗ и СРМсДЗ. То преимущество, которое «работало» в номинальном режиме, при перегрузке превращается в недостаток за счет того, что поля выпучивания идут в паз и отношение реактансов, которое и без того самое низкое в классе, снижается еще сильнее. У СРМсАР и СРМсЗР величина момента определялась уже отношением реактансов по осям. ВИМ, которая по показателю момента перегрузки была самой лучшей в классе (глава 3), сейчас занимает среднее положение за счет существенного снижения момента в результате его пульсаций, хотя по кратности перегрузки по-прежнему занимает лидирующие позиции. Здесь наибольший положительный эффект могут дать многофазные схемы питания. Пульсации момента для всех машин в классе снизились при перегрузке, что ожидаемо, из-за насыщения системы магнитный поток не столь сильно пульсирует в рабочем режиме.

В отличие от оптимизации магнитных систем СРМ и ИМ здесь не нужно рассчитывать интегральный эффект от оптимизации, так как алгоритмы управления можно менять в зависимости от нагрузки и получать наилучшие характеристики машины.

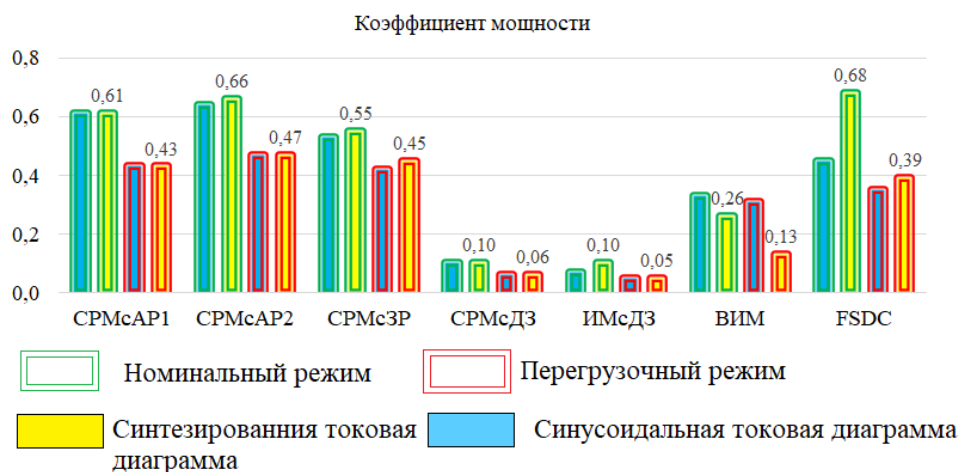


Рис. 4. Коэффициенты мощности для СРМ и ИМ

На рис. 4 показаны значения коэффициента мощности для машин исследуемого класса. Закономерным является снижение этого показателя при перегрузке. Наилучшие показатели у СРМсАР и СРМсЗР. Для этих машин все определялось соотношением реактансов по продольной и поперечной осям. Средние значения коэффициента мощности у ВИМ и FSDC. Самые низкие значения у машин с двухсторонней зубчатостью из-за малого отношения реактансов по осям.

Следует отметить, что коэффициент мощности снижался у машин исследуемого класса не за счет малой активной мощности на выходе и момента, а за счет завышенного значения напряжения фазных обмоток. Вклад в это напряжение вносила реакция якоря, которая присутствует у всех машин исследуемого класса, и при этом никак не компенсируется, как например, в машинах постоянного тока. В асинхронных машинах реакция якоря компенсируется естественным образом за счет появления в токе статора составляющей тока ротора, которая и компенсирует эту реакцию якоря. В синхронных машинах с обмоткой возбуждения на роторе реакция якоря может быть частично скомпенсирована током возбуждения.

Пятая глава посвящена расчету потерь в стали СРМ и ИМ, а также коррекции управляющих воздействий с учетом потерь в стали.

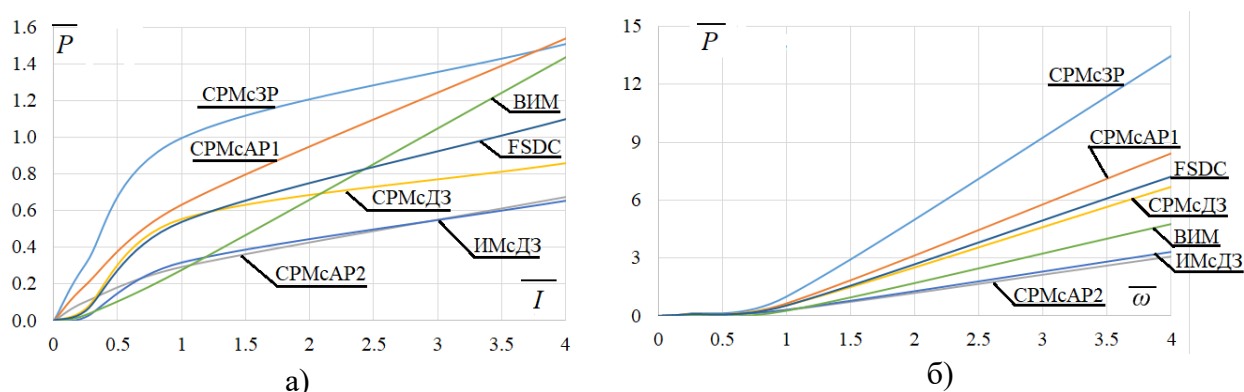


Рис. 5 Относительные потери в стали СРМ и ИМ
а) – в функции тока; б) в функции скорости

На рис. 5 а показаны зависимости относительных потерь в стали СРМ и ИМ от величины тока в фазных обмотках при постоянной скорости, равной номинальному значению. За базу потерь выбраны потери в СРМсЗР при номинальных значениях скорости и тока. По своему характеру эти зависимости повторяют кривую намагничивания стали, так как амплитуда индукции являлась определяющей для величины потерь. Вторым по значимости фактором, влияющим на характер данной зависимости, является амплитуда высших гармонических, возникающих из-за зубчатостей статора и ротора. Наибольший рост потерь в стали наблюдается у ВИМ (в 5,2 раза), так как здесь есть большой резерв роста индукции в зазоре при сохранении амплитуды высших гармонических. Наименьший рост потерь у СРМсДЗ (в 1,55 раза) и СРМсЗР (в 1,51 раза). При отсутствии резервов роста индукции резко уменьшается амплитуда высших гармонических для этих машин из-за насыщения стали и снижения реактансов по осям машины.

На рис. 5 б показаны зависимости потерь в стали СРМ и ИМ в функции скорости при постоянном действующем значении тока в фазных обмотках. Характер зависимостей в этом случае на скоростях до номинальных значений приближен к квадратичной функции. С увеличением скорости возникал магнитный скин-эффект, когда магнитное поле вытеснялось на поверхность магнитопровода, и темп нарастания потерь снижался. Зависимость приобретала почти линейный характер. На распределение потерь в стали между типами машин влияли удельные

потери в стали на единицу индукции магнитного поля в номинальной режиме работы и частотный состав гармонических индукции в зазоре.

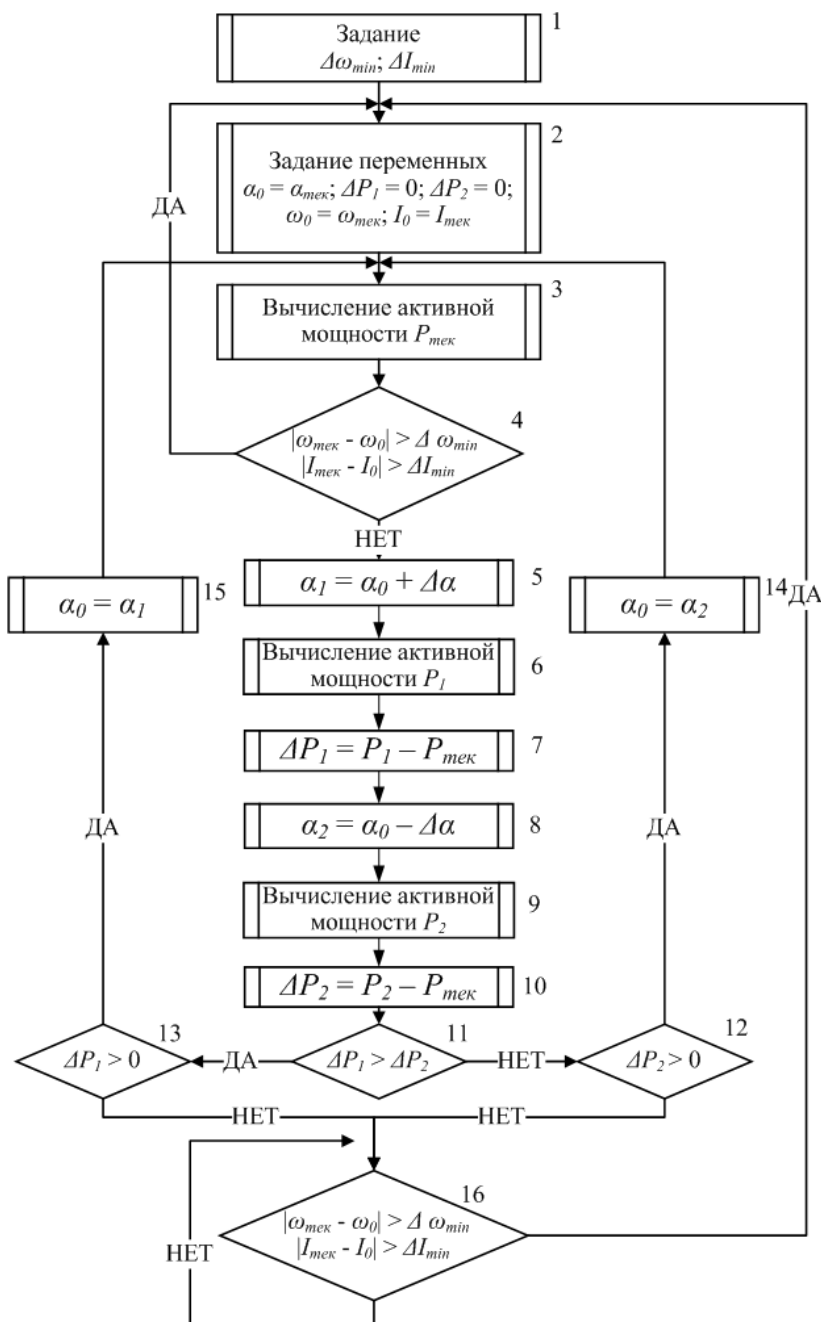


Рис. 6. Алгоритм работы адаптивного регулирования активной мощности

В замкнутых системах электропривода питание СРМ в контуре момента осуществляется от источника тока при заданном оптимальном угле нагрузки, при котором момент является максимальным. Эта ситуация характерна для случая малых потерь в стали. В случае их возрастания из-за увеличения скорости или тока величина дополнительных составляющих тока в статорных обмотках машины, которые изменяют не только величину вектора тока по первой гармонике, но и меняют его направление, становится существенной. Изменение направления вектора тока по первой гармонике объяснялось тем, что ток от потерь в стали по поперечной оси существенно выше, чем ток по продольной оси машины. Это

связано с разными величинами индуктивности по этим осям. В такой ситуации, если не предпринимать дополнительных мер по коррекции управляющих воздействий, фактический угол нагрузки, который может быть получен путем вычитания составляющих тока потерь, будет не оптимальным, т.е. электрическая машина будет работать не на максимуме угловой характеристики. Для того чтобы была возможность такой коррекции, предлагалось в систему управления электрической машины, работающей в составе регулируемого электропривода, внедрить наблюдатель, с помощью которого можно определить величину корректирующего воздействия. Недостатком коррекции угла нагрузки с помощью наблюдателя СРМ является упрощенный характер модели и, следовательно, существенные ошибки коррекции на высоких скоростях вращения (до 4 крат) и при больших перегрузках по току (до 4 крат).

Для повышения точности корректировки предложен алгоритм автоматической подстройки угла нагрузки по максимальной входной активной мощности. Такой вариант реализации оптимального управления заключался в построении алгоритма работы адаптивного регулирования активной мощности. Алгоритм показан на рис. 6. В блоке 1 задавались минимальные отклонения скорости и тока нагрузки от текущих значений, при которых осуществлялся запуск алгоритма оптимизации. В блоке 2 задавался угол нагрузки, равным текущему, присваивалось нулевое значение двум переменным ΔP_1 и ΔP_2 , запоминались текущие значения тока и скорости. В блоке 3 осуществлялось вычисление активной мощности $P_{ТЕК}$. В блоке 4 осуществлялась проверка превышения допустимых изменений тока и скорости, если это так, то алгоритм оптимизации перезапускался и начинался с блока 2. В блоке 5 давалось приращение угла нагрузки на некоторую заданную величину $\Delta\alpha$. В блоке 6 осуществляется вычисление активной мощности после корректировки угла нагрузки в блоке 5. В блоке 7 переменной ΔP_1 присваивается значение разности полученной и текущей активной мощности. В блоке 8 осуществляется уменьшение угла на некоторую заданную величину $\Delta\alpha$. В блоке 9 осуществляется вычисление активной мощности после корректировки угла нагрузки в блоке 8. В блоке 10 переменной ΔP_2 присваивается значение разности полученной и текущей активной мощности. В блоке 11 сравниваются две переменные ΔP_1 и ΔP_2 . Большая положительная переменная меняет текущий угол нагрузки на оптимальный (блоки 12, 13, 14 и 15). В блоке 16 превышение скорости и тока над заданными значениями приводит к повторному запуску алгоритма оптимизации. Во время работы алгоритма оптимизации ток и скорость СРМ или ИМ не должны меняться.

Шестая глава посвящена экспериментальным исследованиям на объектах внедрения и разработке методики выбора типа машины в зависимости от требований технологического процесса.

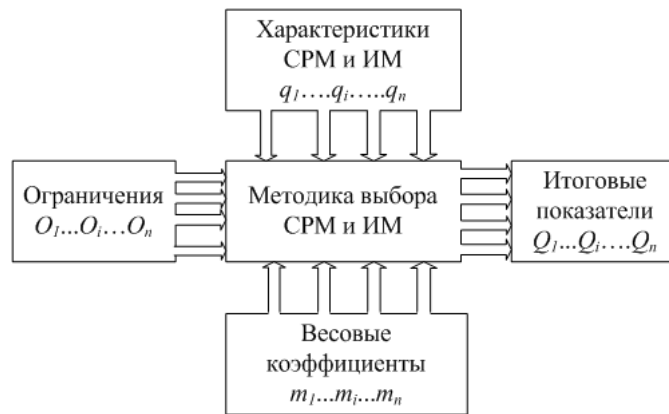


Рис. 7. Пояснение методики выбора CRM и ИМ

Методика такого выбора (рис. 7) представляет из себя поиск компромисса между несколькими критериями. В этом случае может быть использован критерий Парето в форме скалярного ранжирования. Критерий выбора представляется к взвешенной сумме. Параметры вектора X для целевой функции, в качестве которых выступают характеристики электрических машин, входят в формулу для критерия выбора:

$$Q_1 = \sum_{i=1}^3 (O_i \cdot w_i \cdot q_i(X)) \quad (5)$$

Весовые коэффициенты w получены методом экспертной оценки в зависимости от степени значимости того или иного критерия. Количество параметров вектора определяют требования к электрической машине со стороны рабочего органа: величина удельного момента; пульсации момента; величина максимального значения напряжения; прочность ротора машины; возможности по перегрузочной способности; динамические показатели; энергоэффективность (КПД); возможности работы на высоких скоростях (коэффициент мощности) и прочие. Кроме того, возможно наложение ограничений: на конструкцию активной части (стандартные размеры асинхронной машины или сильно отличающиеся от них); на схемы силовых цепей преобразователя (стандартный трехфазный инвертор или нестандартная схема).

Таким образом, целевая функция будет иметь свое значение для любой электрической машины исследуемого класса, на основании этих значений и осуществлялся выбор.

Полученные в главе 4 количественные показатели (среднее значение электромагнитного момента M_{CP} , его пульсации ΔM , максимальное значение фазного напряжения U_M , действующее значение фазного напряжения U , максимальная скорость нарастания напряжения в фазной обмотке при заданной скорости вращения ротора U' , коэффициент мощности K_M) были переведены в дискретный вид, т.е. наилучшему показателю присвоено значение 3, среднему – 2, а наихудшему – 1. При этом величина показателя определялась в сравнении с двумя другими вариантами. Вес каждого показателя в зависимости от его значимости для электропривода стана ХПТ исходя из требований технологического процесса выделен в отдельный столбец (табл. 6). Распределение значений будет выглядеть

следующим образом: наиболее важный показатель – 3, средний – 2, неважный – 1. Итоговые показатели приведены в табл. 6.

Таблица 6

Значения параметров и критерия выбора для электрических машин стана ХПТ

№ параметра	Обозначение	Вес параметра	Значение параметра		
			ИМсДЗ	СРМсДЗ	СРМсЗР
1	M_{CP}	3	1	2	2
2	ΔM	3	3	2	1
3	U_M	2	2	1	3
4	U	2	2	1	3
5	U^*	1	3	2	1
6	K_M	3	1	2	3
Значение критерия выбора			26	24	31

Таким образом, наибольшее значение критерия выбора получилось у СРМсЗР, которая работает в составе регулируемого электропривода стана ХПТ.

Таблица 7

Значения параметров и критерия выбора для тяговых электрических машин

№ параметра	Обозначение	Вес параметра	Значения параметра		
			ВИМ	СРМсЗР	FSDC
1	M_{CP}	3	1	3	2
2	ΔM	3	1	3	3
3	U_M	2	1	3	2
4	U	2	2	1	3
6	K_M	3	1	2	2
7	$M_{ПЕРЕГР.}$	3	1	2	3
Значение критерия выбора			18	36	40

По результатам исследования для тягового применения по аналогии с табл. 6 можно рекомендовать FSDC или СРМсЗР, работающие в составе регулируемого тягового электропривода (табл. 7). Здесь введен дополнительный качественный показатель $M_{ПЕРЕГР.}$ – перегрузочная способность электрической машины.

Наибольшее значение критерия выбора у СРМсАР1 или СРМсАР2 при работе в составе регулируемого электропривода механизмов с нагрузкой вентиляторного типа.

В заключении изложены основные научные результаты работы.

В приложении приведены акты внедрения результатов диссертационной работы в образовательных, научных и производственных организациях с расчетом технико-экономического эффекта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации изложены теоретические и практические результаты работы, направленные на решение научно-технической проблемы, имеющей важное хозяйственное значение для промышленности страны – улучшение технико-экономических характеристик синхронных реактивных и индукторных электрических машин, работающих в расширенных диапазонах скоростей и моментов нагрузки рабочего органа.

Основные результаты и выводы по работе заключаются в следующем

1. Предлагается стратегия создания нового научного направления – нового подхода к разработке электромеханических преобразователей класса реактивных и индукторных машин, который учитывает не только особенности совместной работы полупроводникового и электромеханического преобразователей, но и объектно-ориентированного подхода, который учитывает характер нагрузочных и скоростных диаграмм механизмов, диктуемый требованиями технологического процесса. В этом случае проектирование электромеханических преобразователей класса реактивных и индукторных машин выполняется с учетом расширенного диапазона скоростей и моментов нагрузки.

2. Получены обобщённые аналитические зависимости электромагнитного момента в функции углового положения ротора и времени, активной и полной мощностей в функции углового положения ротора и угловой координаты витка обмотки, где они измеряются, для обычной машины, которые могут быть успешно использованы не только для сопоставления разных типов электромеханических преобразователей класса реактивных и индукторных машин, но и для оценки предельных удельных массогабаритных показателей при гармоническом распределении МДС и проводимостей вблизи воздушного зазора.

3. Предложенные аналитические зависимости и упрощенные модели позволили не только оценить предельные возможности конкретных машин, но и определить пути достижения этих показателей. Так был решен ряд частных задач по выбору параметров некоторых типов конструкций электромеханических преобразователей класса индукторных машин. Например, для достижения предельного среднего за период электромагнитного момента в заданных габаритах нужно выбирать амплитуды МДС обмоток примерно одинаковыми, а числа пар полюсов минимизировать. Первое обстоятельство объясняется тем, что обе МДС вносят равный вклад в электромагнитный момент и весовые коэффициенты их амплитуд для достижения максимума должны быть также одинаковыми. Второе обстоятельство объясняется тем, что при увеличении числа пар полюсов обмотки доля тока возбуждения возрастает, что снижает эффективность электромеханического преобразования.

4. Установлено, что в классе синхронных реактивных и индукторных машин процент обмоточной меди относительно электротехнической стали оказывается существенно большим по сравнению с классическими асинхронными машинами. Это соотношение проявляется менее выразительно для электрических машин, приводящих в движение технологические объекты, работающие с существенно неравномерным (“рваным”) характером нагрузки. При таком

соотношении активных материалов наблюдается наибольшее отношение реактансов по продольной и поперечной осям машин в исследуемом классе. С увеличением мощности машины оптимальная доля активной электротехнической стали относительно обмоточной меди возрастает из-за больших электромагнитных нагрузок, допустимых по условиям охлаждения. Это соответствует режиму перегрузки от тока и моменту для машин меньшей мощности.

5. Получена группа зависимостей между величинами воздушного зазора и электромагнитного момента. Анализ этих зависимостей показал, что наибольшее влияние воздушного зазора характерно для машин с двухсторонней зубчатостью и распределенными обмотками на статоре. Наименьшее влияние характерно для синхронных реактивных машин с зубчатым ротором. Предложено физическое обоснование полученных зависимостей, и связано это с разной степенью изменения отношения реактансов по осям исследуемых машин при изменении доли магнитного сопротивления воздушного зазора в зависимости от мощности. Рассмотренные зависимости могут быть успешно использованы на этапе объектно-ориентированного проектирования электрических машин при выборе их класса и типа. Для механизмов металлургического производства и нефтегазового комплекса актуальными оказываются решения с относительно большим воздушным зазором.

6. Выполненная комплексная оптимизация электромеханических преобразователей класса синхронных реактивных и индукторных машин по ряду технико-экономических показателей с учетом объектно-ориентированного подхода позволила оценить эффект от оптимизации для разных типов машин в широком диапазоне мощностей. Показано, что наибольшим номинальным моментом по результатам оптимизации обладает синхронная реактивная машина с двухсторонней зубчатостью, и этот эффект достигает наибольшего значения, равного почти 2-м номинальным значениям момента асинхронного двигателя того же габарита в диапазоне средних и больших мощностей. Связано это с сильной чувствительностью момента к величине воздушного зазора для этого типа машины, а, как известно, доля магнитного сопротивления воздушного зазора в магнитной системе уменьшается с увеличением мощности. Наилучший показатель по отношению кратности перегрузочного момента к кратности перегрузочного тока реализуется в вентильно-индукторной машине, и достигает он наилучших значений (почти 1:1) в том же диапазоне мощностей.

7. Решением комплексной задачи оптимизации формы управляющих воздействий класса синхронных реактивных и индукторных машины было определено содержание высших гармоник в оптимальной форме фазного тока. Так, для следующих типов электрических машин: синхронная реактивная машина с зубчатым ротором, синхронная реактивная машина с двухсторонней зубчатостью и индукторная машина с двухсторонней зубчатостью – оптимальная форма тока в фазных обмотках содержала первую и третью гармонику, при этом эффект от оптимизации оценивался 10-ти процентным и 15-ти процентным увеличением среднего значения момента для трехфазных и шестифазных электрических машин соответственно. Такая форма фазного тока для этих типов машин

обусловлена содержанием высших гармоник проводимостей магнитного потока зубчатого ротора, которые полезно взаимодействуют с высшими гармониками фазного тока. В то же время, в вентильно-индукторной машине оптимальная форма тока содержала нулевую гармонику, а также четный ряд гармоник 2, 4, 8, 10 и достигаемый эффект оценивался 30-ти процентным и 35-ти процентным увеличением среднего значения момента для трехфазных и шестифазных машин соответственно. Полученная форма управляющих воздействий объяснена конструктивными особенностями магнитной системы (малое количество зубцов статора и ротора) и переходом к более выгодным в этом случае зубцовым фазным обмоткам. Для FSDC оптимальная форма тока содержала 2, 4 и 6 гармоники, при этом развиваемый электромагнитный момент увеличивался на 13% и 20% для трехфазных и шестифазных машин соответственно, и связано это с особенностями магнитной системы, как и в случае вентильно-индукторной машины, а также с особенностями выполнения обмотки: катушки охватывают пару зубцов, при этом силовые обмотки и обмотки возбуждения сдвинуты по окружности расточки статора друг относительно друга на одно зубцовое деление.

8. Для синхронных реактивных машин с анизотропным ротором оптимизация управляющих воздействий не дала положительных результатов. Здесь наилучшим являлось гармоническое управляющее воздействие для всего диапазона мощностей. Это объяснено конструкцией анизотропного ротора, при которой распределение индукции в зазоре близко к синусоидальному, при этом проводимость ротора менялась при его повороте по гармоническому закону вдоль всей длины воздушного зазора, и высшие гармоники управляющих воздействий не оказывали полезного эффекта.

9. Получила развитие общая теория магнитных потерь для класса синхронных реактивных и индукторных машин, которая включает в себя комплексную математическую модель, дает физическое объяснение и систематизирует особенности локализации этих потерь в рассматриваемом классе электрических машин, а также позволяет систематизировать структуры управления по принципу учета магнитных потерь при формировании управляющих воздействий. В предложенной теории разработана математическая модель исследуемого класса синхронных реактивных и индукторных машин, в которой учитываются потери в активной стали электрических машин. В основу модели положен известный принцип разложения кривой индукции в ряд Фурье с последующим разложением потерь по каждой гармонике, отличающийся их расчетом, представляя магнитную структуру как систему с распределенными параметрами.

10. Проведен анализ и систематизированы сведения по локализации магнитных потерь в классе синхронных реактивных и индукторных машин. Показано, что наибольшая доля потерь в классе синхронных реактивных и индукторных машин – это потери в стали статора (80-98%), обусловленные его перемагничиванием. Выполнена оценка увеличения потерь в стали статора, обусловленных несинусоидальностью кривой индукции в воздушном зазоре, доля которых может достигать 15%. Анализ магнитных потерь в роторе показал, что наибольшие магнитные потери получены для машин с существенной редукцией скорости и

двухсторонней зубчатостью, и связано это с содержанием в кривой индукции большого количества гармоник большой амплитуды.

11. Предложен алгоритм коррекции управляющих воздействий по критерию обеспечения максимального электромагнитного момента с учетом характера распределения магнитных потерь, отличающийся от существующих поиском оптимального угла нагрузки по первой гармонике МДС путем регистрации входной активной мощности при постоянных фазных токах и скорости вращения ротора. Проведенный анализ показал, что коррекцию управляющих воздействий нужно выполнять в электрических машинах, работающих на повышенных скоростях или с повторно-кратковременным характером нагрузки, и объясняется это существенными потерями в стали при перегрузке по току, моменту или скорости, которые в этом случае сильно влияют на систему управления.

12. Предложена методика выбора типа и модификации электрической машины в зависимости от требований технологического процесса. В ее основу положен метод скалярного ранжирования и критерий Парето. Параметрами вектора приняты характеристики электрических машин: величина удельного момента; пульсации момента; величина максимального значения напряжения; прочность ротора машины; возможности перегрузки по моменту; энергоэффективность и КПД; эффективность работы на высоких скоростях и коэффициент мощности. Ограничения на выбор той или иной электрической машины разделены по конструктивному признаку активной части, схемам силовых цепей электрического преобразователя.

13. Получены численные значения критериев выбора, которые показывают эффективность работы электрических машин для электропривода следующих групп механизмов: пилигримовая группа, тяговые применения, механизмы с вентиляторным характером нагрузки. Наибольшую эффективность для механизмов пилигримовой группы имеет синхронная реактивная машина с зубчатым ротором, для тяговых применений – FSDC машина или синхронная реактивная машина с зубчатым ротором, для механизмов с нагрузкой вентиляторного типа – синхронная реактивная машина с анизотропным ротором.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

Научные статьи в изданиях, рекомендуемых ВАК для докторских диссертаций

1. Удельные показатели электропривода с синхронным реактивным двигателем независимого возбуждения / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, К.М. Виноградов, А.Н. Горожанкин // Вестник ЮУрГУ. Серия “Энергетика”. – 2008. – №11 (111), выпуск 9. – С. 52–53.

2. Горожанкин, А.Н. Коммутационные потери в электроприводе с синхронным реактивным двигателем независимого возбуждения / А.Н. Горожанкин // Вестник ЮУрГУ. Серия “Энергетика”. – 2009. – №34 (167), выпуск 12. – С. 56–59.

3. Потери в регулируемых электроприводах при разных законах управления / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, А.Н. Шишков, К.М. Виноградов, А.Н. Горожанкин, А.Е. Бычков // Вестник ЮУрГУ. Серия “Энергетика”. – 2010. – №14 (190), выпуск 13. – С. 47–51.

4. Новые высокомоментные энергосберегающие электроприводы с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, А.Н. Шишков, А.Н. Горожанкин и др. // Известия ТулГУ. Технические науки – 2010. – №3-4. – С. 71 – 76.

5. Синтез системы управления электроприводом с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, А.Н. Шишков, С.П. Гладышев, А.Н. Горожанкин // Вестник ЮУрГУ. Серия “Энергетика”. – 2012. – №37 (296), выпуск 18. – С. 38–41.
6. Пульсации электромагнитного момента в электроприводе с синхронным реактивным двигателем независимого возбуждения / А.Н. Шишков, А.Н. Горожанкин, Т.А. Козина, А.Е. Бычков, Е.В. Белоусов, А.М. Журавлев, Д.А. Сычев // Вестник ЮУрГУ. Серия “Энергетика”. – 2013. – Том 13, №1. – С. 103–110.
7. Тяговый электропривод активного прицепа трубовоза / Ю.С. Усынин, А.Н. Шишков, А.Н. Горожанкин, А.Е. Бычков, Е.В. Белоусов, А.М. Журавлев, Д.А. Сычев // Вестник ЮУрГУ. Серия “Энергетика”. – 2013. – Том 13, №1. – С. 137–143.
8. Моделирование электропривода активного прицепа / Ю.С. Усынин, А.Н. Шишков, А.Н. Горожанкин, А.Е. Бычков, Е.В. Белоусов, А.М. Журавлев, Д.А. Сычев // Вестник ЮУрГУ. Серия “Энергетика”. – 2013. – Том 13, №2. – С. 106–113.
9. Система прямого управления момента в синхронном электроприводе / А.Н. Горожанкин, А.Н. Шишков, Е.В. Белоусов, Д.А. Сычев, С.И. Кинас // Электротехника. – 2014. – №10. – С. 29–32.
10. Динамические показатели активных выпрямителей / М.А. Григорьев, С.И. Кинас, А.Н. Горожанкин, Е.В. Белоусов // Электротехника. – 2014. – №10. – С. 53–55.
11. Параметрическая оптимизация синхронного электропривода с улучшенными массогабаритными показателями / А.Н. Горожанкин, М.А. Григорьев, А.М. Журавлев, Д.А. Сычев // Электротехника. – 2015. – №12. – С. 19–22.
12. Компенсация радиальных усилий в электроприводах с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения / Е.В. Белоусов, А.Н. Шишков, А.Н. Горожанкин, А.Е. Бычков // Электротехника. – 2015. – №12. – С. 35–38.
13. Обобщенная аналитическая математическая модель электромеханического преобразователя как объекта управления / А.Н. Горожанкин, А.А. Грызлов, Е.С. Чупин, Е.С. Хаятов // Вестник ЮУрГУ. Серия “Энергетика”. – 2016. – Том 16, №4. – С. 72–76.
14. Расчет потерь и тепловых режимов работы регулируемых электроприводов переменного тока / А.Н. Горожанкин, А.А. Грызлов, Е.С. Хаятов // Электротехника. – 2017. – №4. – С. 18–21.
15. Способы снижения потерь в электроприводах и повышение электробезопасности при их обслуживании / К.Б. Кузнецов, А.Н. Горожанкин, Т.А. Функ, Ш.Н. Хусаинов, Г.А. Круглов, А.В. Коржов // Электротехника. – 2017. – №4. – С. 26–29.
16. Оптимизация управляющего воздействия в синхронных реактивных и индукторных электроприводах переменного тока / А.Н. Горожанкин, А.А. Грызлов, А.Т. Циркуненко, А.М. Журавлёв // Электротехника. – 2018. – №4. – С. 2–7.
17. Учёт потерь в стали в системах управления синхронными реактивными электроприводами / А.Н. Горожанкин, С.С. Буханов, А.А. Грызлов, М.А. Григорьев // Электротехника. – 2019. – №5. – С. 2–9.
18. Горожанкин, А.Н. Выбор геометрии ротора синхронной реактивной машины для электроприводов стана холодной прокатки труб / А.Н. Горожанкин // Электротехника. – 2020. – №5. – С. 2–7.
19. Горожанкин, А.Н. Алгоритмы и структуры управления электроприводом подачи стана холодной прокатки труб / А.Н. Горожанкин, М.М. Дудкин // Электротехника. – 2020. – №7. – С. 33–39.
20. Горожанкин, А.Н. Оценка эффективности электромеханического преобразования в синхронных реактивных машинах / А.Н. Горожанкин, В.А. Кушнарёв, А.А. Грызлов // Электротехника. – 2021. – №5. – С. 2–7.

21. Горожанкин, А.Н. Особенности синтеза синхронных реактивных и индукторных электрических машин / А.Н. Горожанкин, А.В. Коржов // Вестник ЮУрГУ. Серия “Энергетика”. – 2022. – Том 22, №2. – С. 81–91.

Научные статьи в изданиях, входящие в систему цитирования Scopus

22. The Electric Drive of a Tram with an Average Floor / Yu.S. Usinin, M.A. Grigorjev, K.M. Vinogradov, A.N. Gorozhankin, S.P. Gladyshev // 2008 SAE International Powertrains, Fuels and Lubricants Congress, Shanghai, CHINA. – Article ID: 2008–01–1828.

23. Weight and Dimensional Parameters of a Power Drive for Electrical Vehicle / U.S. Usinin, M.A. Grigoriev, K.M. Vinogradov, A.N. Gorojankin S.P. Gladyshev // 2009 SAE International, Powertrains, Fuels and Lubricants Meeting, Florence, ITALY. – Article ID: 2009-01-1886.

24. A direct torque control system for synchronous electric drivers / A. Gorozhankin, A. Shishkov, E. Belousov, D. Sychev, S. Kinas // Russian Electrical Engineering. – 2014. – Volume 85, issue 10. – P. 616-618.

25. Dynamic parameters of active rectifiers / M. Grigorev, S. Kinas, A. Gorozhankin, E. Belousov // Russian Electrical Engineering. – 2014. – Volume 85, issue 10. – P. 638-640.

26. Parametric optimization of a synchronous electric drive with im-proved mass and size parameters / A. Gorozhankin, M. Grigorev, A. Zhuravlev, D. Sychev // Russian Electrical Engineering. – 2015. – Volume 86, issue 12. – P. 697-699.

27. Compensation of radial forces in electric drives with a field regulated reluctance machine / E. Belousov, A. Shishkov, A. Gorozhankin, A. Bychkov // Russian Electrical Engineering. – 2015. – Volume 86, issue 12. – P. 712-715.

28. Calculations of the losses and thermal operation conditions for controlled alternating-current drives / A. Gorozhankin, A. Gryzlov E. Khayatov // Russian Electrical Engineering. – 2017. – Volume 88, issue 4. – P. 201-204.

29. Ways to decrease losses in electric drives and improvement of electrical safety during their service / K. Kuznetsov, A. Gorozhankin, T. Funk, S. Khusainov, G. Kruglov, A. Korzhov // Russian Electrical Engineering. – 2017. – Volume 88, issue 4. – P. 209-211.

30. Pulse-vector control of induction and synchronous motors / A. Imanova, A. Gorozhankin, S. Gladyshev // 2017 International Siberian Conference on Control and Communications. – Chelyabinsk, 2017. – Article ID: 7998500.

31. Calculation methods of electric drives and generators based on the field regulated reluctance machine / G. Kruglov, A. Gorozhankin, V. Bepalov // International Conference of Industrial Engineering, applications and manufacturing. – Chelyabinsk, 2017. – Article ID: 8076349.

32. Control-Action Optimization in Synchronous Reluctance and Inductor Alternating-Current Drives / A. Gorozhankin, A. Gryzlov, A. Tsirkunencko, A. Zhuravlev // Russian Electrical Engineering. – 2018. – Volume 89, issue 4. – P. 217-221.

33. Control principles of AC electric drives / G. Kruglov, A. Gorozhankin, V. Buhtoyarov // 17th International Ural Conference on AC Electric Drives. – 2018. – 5 p.

34. High-performance flux-switching DC motors for energy facilities / A.D. Golykov, S.P. Gladyshev, A.N. Gorozhankin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – Vol. 450. – Article ID: 072007. – 7 p.

35. Features of Loss Calculation in Mechatronic Modules on the Basis of Synchronous Reluctance and Induction AC Electric Drives / S.P. Gladyshev, A.N. Gorozhankin, A.D. Golykov // 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2018. – 2018. – Article ID: 8602572. – 6 p.

36. Mechatronic Modules of Traction Electrical Drive / A.D. Golykov, S.P. Gladyshev, A.N. Gorozhankin // 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2018. – 2018. – Article ID: 8602938. – 5 p.

37. Taking Iron Loss into Account in Control Systems of Synchronous Reluctance Electric Drives / A. Gorozhankin, S. Bukhanov, A. Gryzlov, M. Grigorev // Russian Electrical Engineering. – 2019. – Volume 90, issue 5. – P. 357-363.

38. The Choice of the Rotor Geometry of Synchronous Reluctance Machines for Electric Drives for Cold-Rolling Tube Mills / A. Gorozhankin // Russian Electrical Engineering. – 2020. – Volume 91, issue 5. – P. 293-297.

39. Algorithms and Control Systems for Electric Drives of Cold Pipe-Rolling Mills / A. Gorozhankin, M. Dudkin // Russian Electrical Engineering. – 2020. – Volume 91, issue 7. – P. 440-446.

40. Assessment of Electromechanical Conversion Efficiency in Synchronous Reluctance Machines / A.N. Gorozhankin, V.A. Kushnarev, A.A. Gryzlov // Russian Electrical Engineering. – 2021. – Volume 92, issue 5. – P. 233-237.

Патенты на изобретения

41. Пат. 2346376 Российская Федерация, МПК H02K 19/24, H02K 19/06, H02K 1/16. Синхронная реактивная машина / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, К.М. Виноградов, А.Н. Горожанкин, С.А. Чупин – № 2007126685, заявл. 12.07.2007; опубл. 10.02.2009, Бюл. №4.

42. Пат. 2408972 Российская Федерация, МПК H02P 27/04, H02P 25/08, H02P 19/10. Электропривод с синхронной реактивной машиной и способ управления им / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, К.М. Виноградов, А.Н. Горожанкин, А.Н. Шишков, А.Е. Бычков, А.В. Валов – №2009148381/07(071468), заявл. 24.12.2009.; опубл. 10.01.2011, Бюл. № 1

43. Пат. 2408967 Российская Федерация, МПК H 02 K 19/10, H 02 K 19/24, H 02 K 29/03. Синхронная реактивная машина / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, К.М. Виноградов, А.Н. Горожанкин, А.Н. Шишков, А.Е. Бычков, А.В. Валов – №2009146993/07(066964), заявл. 17.12.2009.; опубл. 10.01.2011, Бюл. № 1 (косые пазы)

44. Пат. 2422972 Российская Федерация, МПК H 02 K 19/10, H 02 K 19/24, H 02 K 29/03. Синхронная реактивная машина / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, К.М. Виноградов, А.Н. Горожанкин, А.Н. Шишков, А.Е. Бычков, А.В. Валов – №2009146987/07(066958), заявл. 17.12.2009.; опубл. 27.06.2011, Бюл. № 18 (рифления)

45. Пат. 2510877 Российская Федерация, МПК H02P 27/04. Электропривод с синхронной реактивной машиной / Ю.С. Усынин, А.Н. Горожанкин, А.Е. Бычков, Е.В. Белоусов, А.М. Журавлев – № 2012143554/07, заявл. 11.10.2012; опубл. 10.04.2014, Бюл. №10.

46. Пат. 2541359 Российская Федерация, МПК G01L 3/22, G01L 5/00, G01L 5/10, H02P 25/08, H02P 6/08. Устройство и способ измерения электромагнитного момента в электроприводе с синхронной реактивной машиной / Ю.С. Усынин, А.Н. Шишков, А.Н. Горожанкин, Т.А. Козина, А.М. Журавлев, Д.А. Сычев – № 2013142466/07, заявл. 17.09.2013; опубл. 10.02.2015, Бюл. №4.

47. Пат. 2711097 Российская Федерация, МПК H02P 9/04, F02N 11/14, B60W 10/06. Стартер-генератор с дифференциальным электроприводом и способ управления стартер-генератором / Ю.С. Усынин, С.А. Чупин, А.Н. Шишков, Н.В. Савостеев, М.М. Дудкин, А.Е. Бычков, А.Н. Горожанкин, Т.А. Функ – № 2019107107, заявл. 12.03.2019; опубл. 15.01.2020.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

48. Свид. 2016660590 о государственной регистрации программы для ЭВМ. Программа расчета коэффициентов релейных регуляторов системы прямого управления моментом синхронного реактивного двигателя / А.Н. Шишков, А.Н. Горожанкин, Д.А. Сычев, Е.В. Белоусов – № 2016618000, заявл. 21.07.2016; зарегистр. 16.09.2016

49. Свид. 2016660107 о государственной регистрации программы для ЭВМ. Программа расчета влияния насыщения магнитной системы на пульсации электромагнитного момента синхронного реактивного двигателя / М.А. Григорьев, А.Н. Горожанкин, Д.А. Сычев – № 2016617990, заявл. 21.07.2016; зарегистр. 06.09.2016

50. Свид. 2016660106 о государственной регистрации программы для ЭВМ. Программа расчета оптимальной геометрии магнитопроводящих вставок ротора синхронного реактивного двигателя / М.А. Григорьев, А.Н. Горожанкин, Д.А. Сычев – № 2016617991, заявл. 21.07.2016; зарегистр. 06.09.2016

51. Свид. 2016660495 о государственной регистрации программы для ЭВМ. Программа расчета оптимального соотношения объема электротехнической стали магнитопровода и меди обмоток в синхронном реактивном двигателе / А.Н. Горожанкин, Д.А. Сычев, Е.В. Белоусов – № 2016617992, заявл. 21.07.2016; зарегистр. 16.09.2016

52. Свид. 2016660496 о государственной регистрации программы для ЭВМ. Программа расчета геометрических размеров статора в функции максимального электромагнитного момента синхронного реактивного двигателя / М.А. Григорьев, А.Н. Горожанкин, Д.А. Сычев – № 2016617994, заявл. 21.07.2016; зарегистр. 16.09.2016

53. Свид. 2012611914 о государственной регистрации программы для ЭВМ. Программа расчета электрических потерь в вентильном преобразователе / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, А.Н. Шишков, А.Е. Бычков, А.Н. Горожанкин, Е.В. Белоусов – №2011619898, заявл. 21.12.2012.; зарегистр. 20.02.2012

54. Свид. 2011617185 о государственной регистрации программы для ЭВМ. Программа расчета мгновенных значений фазных токов комплекса «Вентильный преобразователь – двигатель» / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, А.Н. Шишков, А.Е. Бычков, А.Н. Горожанкин Е.В. Белоусов – №2011615634, заявл. 26.07.2011.; зарегистр. 15.09.2011

55. Свид. 2011617186 о государственной регистрации программы для ЭВМ. Программа расчета переходных процессов быстродействующих систем электроприводов / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, А.Н. Шишков, А.Е. Бычков, А.Н. Горожанкин, Е.В. Белоусов – №2011615635, заявл. 26.07.2011.; зарегистр. 15.09.2011

Другие научные статьи:

56. Автономный генератор на базе синхронной реактивной машины независимого возбуждения / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, К.М. Виноградов, А.Н. Горожанкин // Труды 14 международной научно-практической конференции “Электроприводы переменного тока”, Екатеринбург, 13–16 марта, 2007: сб. науч. тр. междунар. конференц. – Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2007. – С. 73–75.

57. Статор синхронного реактивного двигателя независимого возбуждения / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, К.М. Виноградов, А.Н. Горожанкин // Электротехнические системы и комплексы: межвуз. сб. науч. тр. – Магнитогорск: МГТУ, 2007. – С. 114–117.

58. Бесконтактные электроприводы и генераторы с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, К.М. Виноградов, А.Н. Горожанкин, С.А. Чупин // Труды 5 международной (16 Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу (АЭП 2007), Санкт-Петербург, 18–21 сент., 2007. СПб: СПбГПУ, 2007. – С. 192–194.

59. Новые высокомоментные энергосберегающие электроприводы с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, К.М. Виноградов, А.Н. Горожанкин // Электроэнергетика и автоматизация в металлургии и машиностроении: сб. науч. тр. междунар. конференц. – Магнитогорск, 2008. – С. 156–162.

60. Электропривод с синхронным реактивным двигателем независимого возбуждения для трамвая с пониженным уровнем пола / Ю.С. Усынин, С.А. Чупин, М.А. Григорьев, К.М. Виноградов, А.Н. Горожанкин // Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты: сб. науч. тр. XII междунар. конференц. – Алушта, 2008. – С. 286.

61. Возможности и перспективы электроприводов с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, К.М. Виноградов, А.Н. Горожанкин // Наука и технологии. Труды XXVIII Российской школы. – М.: РАН, 2008. – Том 2. – С. 113–122.

62. Методика расчёта электродвигателей и генераторов на базе синхронной реактивной машины независимого возбуждения / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, К.М. Виноградов, А.Н. Горожанкин, А.Е. Бычков // Электротехнические системы и комплексы: межвуз. сб. науч. тр. – Магнитогорск: МГТУ, 2009. – Выпуск 17. – С. 43–47.

63. Экспериментальное определение потерь в электроприводе с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, К.М. Виноградов, А.Н. Горожанкин, А.Е. Бычков // Электротехнические системы и комплексы: межвуз. сб. науч. тр. – Магнитогорск: МГТУ, 2009. – Выпуск 17. – С. 48–53.

64. Основы теории электропривода с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения / Ю.С. Усынин, С.А. Чупин, М.А. Григорьев, А.Н. Шишков, А.Н. Горожанкин, Е.В. Белоусов, А.Е. Бычков, А.М. Журавлев // Труды VII Международной (VIII Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу: ФГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2012. – С. 31–34.

65. Обзор регулируемых электроприводов с традиционными и новыми электрическими машинами / А.Н. Горожанкин // Наука ЮУрГУ: материалы 67-й научной конференции. Секции технических наук. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2015. – С. 1025–1032

66. Моделирование системы прямого управления моментом для синхронного электропривода / А.Н. Горожанкин, Д.А. Сычев // Современное состояние и перспективы развития технических наук: сб. статей международной научно-практической конференции. – Уфа: АЭТЕРНА. – 2015. – С. 15-19.

67. Параметрическая оптимизация синхронного электропривода с улучшенными массогабаритными показателями / А.Н. Горожанкин, Д.А. Сычев, Е.С. Хаятов // Наука и современность: сб. статей международной научно-практической конференции. – Уфа: АЭТЕРНА. – 2015. – С. 15-17.

Работы [2, 18-20, 37] выполнены автором единолично. В работах, написанных в соавторстве, автору принадлежит 70 % от общего объема научных публикаций, а именно: в [1, 3-17] – общая постановка проблем и задач оптимизации, разработка обобщенных математических моделей; в [21-36 и 38-67] – ведущая роль в постановке задач исследования (или в разработке объектов интеллектуальной собственности), обоснования математических моделей и методов решения.

Горожанкин Алексей Николаевич

**РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ СИНХРОННЫХ РЕАКТИВНЫХ И
ИНДУКТОРНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН**

Специальность 2.4.2 – «Электротехнические комплексы и системы»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Издательский Центр Южно-Уральского государственного университета

Подписано в печать _____.____.2023. Формат 60×84 1/16. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 2,5. Уч. -изд. л. 2,0. Тираж 100 экз. Заказ _____.

Отпечатано в типографии Издательского Центра ЮУрГУ
454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76.