

05.05.01

Г19

На правах рукописи

Ганджа

ГАНДЖА СЕРГЕЙ АНАТОЛЬЕВИЧ

ВЕНТИЛЬНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ С АКСИАЛЬНЫМ
МАГНИТНЫМ ПОТОКОМ. АНАЛИЗ, СИНТЕЗ, ВНЕДРЕНИЕ
В ПРОИЗВОДСТВО

Специальность 05.09.01 – Электромеханика
и электрические аппараты

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Екатеринбург – 2012

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Южно-Уральский государственный университет» (Национальный исследовательский университет) на кафедре «Электромеханика и электромеханические системы».

Научный консультант – доктор технических наук, профессор
Воронин Сергей Григорьевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Беспалов Виктор Яковлевич,
доктор технических наук, профессор
Казаков Юрий Борисович,
доктор технических наук, профессор
Пластун Анатолий Трофимович.

Ведущая организация – Федеральное государственное унитарное
предприятие "Всероссийский электротехнический институт им. В.И. Ленина", г. Москва.

Защита диссертации состоится 28 марта 2012 года, в 14¹⁵, на заседании диссертационного совета Д212.285.03 при Уральском федеральном университете имени первого Президента России Б.Н. Ельцина по адресу :г. Екатеринбург, ул. Мира 19, ауд. Э406.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина.

Отзывы в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью просим направлять по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, УрФУ, К-2, ученому секретарю совета.

Автореферат разослан _____ 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д212.285.03
д.т.н., доцент

А.М. Зюзев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность предмета исследования

Электроприводы малой и средней мощности на базе вентильных электрических машин широко используются как в системах общепромышленного применения, так и в изделиях специального назначения (космос, медицина, робототехника, вооружение). Традиционно для этих целей используются вентильные электрические машины с радиальным магнитным потоком. Это объясняется хорошими удельными энергетическими показателями этих электрических машин, отложенной технологией их производства.

В последнее время для этих электроприводов все чаще применяются вентильные электрические машины с аксиальным магнитным потоком (ВМАП). Эти электрические машины активно развиваются, и можно говорить о формировании нового класса вентильных электроприводов, конкурентоспособных с традиционными вентильными электроприводами. Идет процесс перехода от проектирования единичных изделий к разработке промышленного ряда электрических машин этого типа. Приводы этого класса выходят на новый виток своего развития. Мировая и отечественная практика подтверждает эту тенденцию. На кафедре электромеханики и электромеханических систем Южно-Уральского государственного университета, ЗАО НИИ «Уралмет», ООО ГРЦ «Вертикаль», ООО НПП «Привод», ООО НПП «Ветроэнергетические установки» разработаны реальные коммерческие проекты с применением этих электрических машин.

Объяснить активное использование электрических машин этого класса можно следующими причинами:

- в настоящее время интенсивное развитие получило промышленное производство мощных магнитов с большими значениями остаточной индукции и коэрцитивной силы, что позволило сконцентрировать энергию магнитного поля в малых объемах и уменьшить габариты электромеханических устройств;
- современное развитие вычислительных средств и специального программного обеспечения позволяет оптимизировать геометрию ВМАП для эффективного использования занимаемого ими объема. При этом оптимально спроектированные ВМАП в условиях ограничения габарита вдоль оси вращения могут иметь лучшие удельные массогабаритные и энергетические показатели по сравнению с радиальными электрическими машинами;
- современные технологии позволяют сделать ВМАП экономичными при производстве и надежными в эксплуатации.

Следует отметить, что, несмотря на острую необходимость практического внедрения, теоретические исследования по анализу и синтезу электрических машин этого класса носят эпизодический, разрозненный характер. Как правило, разработчики анализируют одну конструкцию для специального привода. Результаты этих исследований достаточно сложно использовать при проектировании другой конструкции. Оптимизации подвергаются только отдельные узлы и детали, например статор или ротор. Методики проектирования слабо ориентированы на разработку систем автоматизированного проектирования и так

называемую сквозную технологию с минимальным объемом документооборота в твердых копиях.

Существующее противоречие между практической потребностью во внедрении и недостаточно развитой теорией анализа и синтеза является основным источником дальнейшего развития электрических машин этого класса, что определяет актуальность научных исследований в этой области.

Степень научной разработанности проблемы.

Оценим состояние теории анализа и синтеза ВМАП к настоящему времени. В эволюции развития электрических машин этого класса следует выделить следующие основные периоды:

1) от изобретения первой электрической машины с аксиальным магнитным потоком Найтом в 1854 г. до конца XIX века. Для этого периода характерно большое разнообразие конструктивных решений и идей. Разработка электрических машин шла в основном на базе эксперимента и опыта без существенного развития теории. Следует отметить вклад в развитие этих машин следующих отечественных и зарубежных ученых: У. Генри, Ч. Уитстона, Ф. Холмса, П. Н. Яблочкива, А. И. Клименко, Л. Пайка, Э. Гаррис, Д. Тюри, И. Зольдмана. К концу этого периода постепенно определяются все основные узлы и детали современных ВМАП;

2) от начала XX века до конца 40-х годов прошлого столетия. Этот период характеризуется постепенным вытеснением этих электрических машин более совершенными в конструктивном отношении и более подходящими для производства и преобразования электроэнергии синхронными и асинхронными машинами обычного исполнения. Тем не менее, ВМАП сохраняет свои позиции в качестве источников питания повышенной и высокой частоты в промышленных установках индукционного нагрева и поверхностной закалки. В этот период сделан первый шаг в области теории расчета ВМАП, предложены первые классификационные схемы. Следует отметить научные исследования следующих ученых: Е. Арнольда, А. Е. Алексеева, В. П. Вологдина, Дж. Уолкера и Р. Поля;

3) от 50-х до 90-х годов XX в. В этот период развития ВМАП резко повысился интерес к бесконтактным электрическим машинам в связи с повышением требований к надежности. Расширяются научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы в области вентильных машин вообще и ВМАП в частности. Теоретические и экспериментальные исследования направляются на совершенствование конструкции, уточнение расчетных методик, улучшение технико-экономических показателей. Вопросами теории, расчета и разработки вентильных машин в этот период занимались многие научно-исследовательские институты и заводы страны: ВНИИЭМ, МЭИ, МАИ, РКИИГА, «Электрик» и ряд других организаций. В этот период опубликовано большое количество работ, посвященных вопросам расчета магнитных полей, параметров и характеристик вентильных машин. Но следует отметить, что развитие теории и практики ограничивалось исследованиями конкретных конструктивных исполнений ВМАП без объединения их в промышленный ряд электрических машин этого класса;

4) новейший период – с начала XXI века по настоящее время. Этот период, характеризуется интенсивным развитием высококачественных магнитов, дальнейшим совершенствованием вычислительной техники, разработкой специальных программных средств по расчету электромагнитных, тепловых полей, трехмерного твердотельного моделирования и моделирования электронных схем. Создается реальная возможность разработки надежных, технологичных и конкурентоспособных ВМАП. Несмотря на сложности экономического развития этого периода, научные исследования по тематике расширяются. Заслуживает внимания работы следующих организаций:

- Ивановский государственный энергетический университет. Ученые Ю.Б. Казаков, Е. Б. Герасимов, А. И. Тихонов, Н.Н. Новиков внесли существенный вклад в методы анализа магнитных и тепловых полей, разработки САПР, методов оптимального проектирования;

- Иркутский государственный технический университет. Ученые С.В. Леонов, А. В. Лялин, О. П. Муравлев, А. Л. Федянин занимались разработкой и исследованием герметичного двигателя дискового типа;

- Краснодарский государственный университет. Следует отметить вклад ученых Б. Х. Гайтова, М. Г. Гудалаева в совершенствование систем летательных аппаратов на базе ВМАП;

- Московский энергетический институт (государственный технический университет). Ученые А. В. Иванов-Смоленский, С.В. Иваницкий, Н.И.Пашков, В. Я. Беспалов, К. Я. Вильданов, В. А. Морозов, В.И. Нагайцев, С. А. Грузков развивают общую теорию расчета электрических машин, методику расчета трехмерных полей, разрабатывают торцевые асинхронные двигатели;

- Московский авиационный институт (государственный технический университет). Особо следует отметить работы А. И. Бертинова, который развивает теорию электрических машин авиационной автоматики, в том числе электрических машин торцевого исполнения;

- Новосибирский государственный технический университет. Ученые Ю. В. Петренко, А. Г. Приступ разрабатывают теорию и методы расчета торцевого двигателя для мотор-колеса;

- Томский политехнический университет. Усилиями ученых Е. В. Буряиной, С. В. Леонова, А. Л. Федянина разрабатываются математические модели и методы расчета торцевых синхронных двигателей;

- Уральский государственный технический университет – УПИ. Ученые А. Т. Пластун, Ф. Н. Сарапулов, С. Е. Миронов, Е. Н. Андреев вносят вклад в разработку конструкции многодисковых торцевых машин, занимаются развитием теории и методов расчета синхронных двигателей с кольцевыми обмотками, разработкой компьютерных моделей линейных индукторных машин.

Из анализа имеющихся публикаций можно сделать следующие основные выводы о состоянии теории анализа и синтеза электрических машин этого класса:

- существуют методики проектного расчета отдельных конкретных конструкций;

- есть научные работы по анализу электромагнитного и теплового состояния конкретных конструктивных исполнений, в том числе и с применением методов конечно-элементного анализа;
- существуют научные работы, посвященные оптимальному проектированию отдельных узлов, например, постоянного магнита, якорной обмотки;
- есть работы, посвященные методике разработки систем автоматизированного проектирования вентильных машин, которые включают в себя трехмерное конструкторское моделирование.

Тем не менее, следует отметить, что все эти исследования носят разрозненный характер для анализа и синтеза отдельных конструктивных исполнений.

В последнее время наметилась тенденция к увеличению числа фаз для повышения надежности. При этом теория коммутации для многофазного исполнения ВМАП недостаточно освещена в научных изданиях и требует дальнейшего совершенствования и развития.

Отсутствует единая теория расчета электрических машин этого класса, которая связывала бы электромагнитную мощность с электромагнитными нагрузками и основными размерами с учетом конструктивных особенностей.

Существующие методики оптимального проектирования предназначены для очень узкого круга проектных задач. Они не обладают достаточной гибкостью и становятся неработоспособными, если возникает проектная ситуация, при которой часть размеров должна быть зафиксирована и исключена из процесса перебора. Отсутствует концепция оптимального проектирования, которая учитывала бы различные проектные ситуации, возникающие на практике.

Остается открытым вопрос выбора метода оптимального перебора независимых переменных, выбора критерия оптимальности.

В открытой печати не представлена методика инженерного проектирования этих машин.

В целом в настоящее время отсутствует теоретическая база, на основе которой можно было бы создать эффективный инструмент анализа и синтеза ВМАП, ориентированный на современные сквозные технологии.

В настоящее время возникла объективная необходимость создания такой теории. **Объектом исследования** при этом будет являться многофазная ВМАП, имеющая различные конструктивные исполнения. **Предметом исследования** являются методы оптимального проектирования электрических машин этого класса.

Основная научная проблема

Проблема разработки ВМАП заключается в следующем.

С одной стороны, ВМАП имеют большое количество конструктивных исполнений. Все исполнения имеют свои особенности, которые влияют на структуру математической модели. Математическая модель должна включать в себя наибольшее количество конструкций для ориентации на создание гибкой САПР. Она должна содержать наиболее широкую линейку конструктивных модификаций. При этом в математической модели для всех конструкций можно выделить общие независимые переменные, которые можно варьировать в процессе оптимизации.

С другой стороны, при проектировании возникает большое количество проектных ситуаций, когда по условиям проектирования геометрические размеры определенных узлов и деталей или могут быть включены в процесс оптимального перебора или могут быть исключены из этого процесса. Эта ситуация типична при модернизации изделия или использовании стандартной комплектации, например, серийных магнитов. При этом оптимизация распадается на уровни: от низшего уровня, где варьируются одна или несколько независимых переменных, до наивысшего уровня, где варьируются все независимые переменные. Необходимо создать линейку оптимизационных уровней.

При совмещении линейки конструктивных модификаций с линейкой оптимизационных уровней можно получить обширную проектную область, которая реализует большое количество практических проектных ситуаций.

Существующие методики не решают эту проблему, так как из проектной области выбирают только один оптимальный вариант для одного исполнения, решая задачу оптимизации одного уровня для одной конструкции.

Основная научная проблема заключается в разработке теоретических основ для создания метода проектирования, позволяющего для различных конструктивных исполнений выполнить оптимизационные расчеты различных уровней, реализуя большое количество возможных проектных ситуаций, в отличие от существующих методик, которые для конкретной конструкции решают оптимизационную задачу одного уровня.

Решение этой проблемы и внедрение результатов этого научного исследования в практику проектирования ВМАП позволят внести значительный вклад в развитие отечественного электромашиностроения, играющего важную роль в экономике и обеспечении обороноспособности страны.

Цель диссертационной работы заключается в разработке теоретических основ анализа и синтеза ВМАП, создании на их базе эффективного инструмента по разработке этих электрических машин и внедрении его в практику проектирования.

Для достижения этой цели необходимо последовательно решить следующие задачи:

1. Провести анализ влияния разных типов коммутации ВМАП на электромагнитный момент при произвольном числе фаз якорной обмотки.
2. Провести анализ связи электромагнитной мощности с основными размерами и электромагнитными нагрузками для ВМАП различных конструктивных исполнений и типов коммутации.
3. Разработать математическую модель расчета ВМАП на основе анализа коммутации и электромагнитной мощности.
4. Разработать методику многоуровневой оптимизации на базе математической модели, которая учитывала бы различные проектные ситуации, возникающие на практике.
5. Выбрать метод оптимизации, определить критерии оптимальности для разных уровней оптимизации.
6. На базе проведенных исследований разработать программные средства для анализа и синтеза ВМАП, ориентированные на сквозную технологию.

7. Разработать методику инженерного проектирования.

Данные исследования **дополняют и расширяют** существующую теорию по проектированию электрических машин этого класса.

Возможные подходы к решению проблемы

Поставленную цель можно реализовать, если на базе теоретического анализа разработать программные средства, удовлетворяющие современным требованиям по проектированию изделий электромашиностроения.

Программные средства должны реализовывать широкий спектр проектных ситуаций для большого числа конструктивных исполнений.

Они должны быть ориентированы на так называемые сквозные технологии, которые подразумевают концентрацию в одном рабочем месте функций расчета и конструирования.

Следует понимать, что создание САПР – задача очень сложная и представляет собой перспективу развития, но уже сейчас при разработке методов проектирования ВМАП эти направления необходимо учитывать.

Научная новизна

Впервые в практике проектирования процедура оптимизация геометрии электрической машины разделена на уровни в зависимости от количества варьируемых переменных. Для каждого уровня определены критерии оптимальности и система ограничений. Это позволило разработать проектную систему, реализующую большое количество проектных ситуаций.

Общая математическая модель включает в себя несколько конструктивных исполнений, различные типы коммутации и режимы работы, в отличие от существующих методов, предназначенных для анализа конкретной конструкции.

В математической модели учтено влияние разных типов коммутации на электромагнитную мощность. Аналитические зависимости выведены для произвольного числа фаз. В настоящее время в теории детально исследованы трехфазные системы.

Показана эффективность использования метода покоординатного спуска (Гаусса–Зейделя) при движении к оптимуму с методом Фибоначчи при определении шага для метода оптимального перебора независимых переменных. Данный метод можно рекомендовать для оптимизации электрических машин других типов.

Для разных конструкций строго доказаны оптимальные соотношения между наружным и внутренним диаметрами магнитной системы.

Основные научные результаты и положения, представленные на защите

1. Аналитические зависимости определения коэффициента эффективности якорной обмотки для $(180-180/m)$ -градусной коммутации и 180-градусной коммутации на основе гармонического анализа.

2. Аналитические зависимости определения коэффициента эффективности модели для четырех базовых конструктивных модификаций для $(180-180/m)$ -

градусной коммутации и 180-градусной коммутации на основе гармонического анализа.

3. Аналитические зависимости электромагнитного момента и электромагнитной мощности четырех базовых моделей ВМАП при произвольном числе фаз для (180–180/m)-градусной и 180-градусной коммутации.

4. Математическая модель расчета ВМАП, включающую в себя четыре базовых конструкции, два типа дискретной коммутации, двигательный и генераторный режимы работы.

5. Концепция многоуровневой однокритериальной оптимизации.

6. Оптимальные соотношения габаритных размеров для различных форм магнитов.

7. Методика проектирования ВМАП на основе номограмм.

Указанные научные результаты получены лично автором.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается корректным использованием зарекомендовавших себя на практике методов исследования, сходимостью полученных теоретических результатов с данными испытаний промышленных опытных образцов.

Практическая значимость. Основным практическим результатом проведенных теоретических исследований является разработка программного комплекса анализа и синтеза ВМАП, который показал свою эффективность при разработке ряда коммерческих проектов. Он представляет собой эффективный инструмент проектирования, который позволяет:

- облегчить сложную инженерную работу по проектированию целого класса электрических машин;
- повысить качество проектных работ при сокращении сроков их выполнения;
- сократить число циклов макетирования образцов.

Дополнительно можно отметить следующее практическое значение проведенных исследований:

1) выявлено, что с точки зрения увеличения электромагнитного момента целесообразно увеличивать число фаз для всех типов коммутации;

2) доказано, что для всех моделей наиболее эффективной по развиваемому электромагнитному моменту и КПД является 180-градусная коммутация для любого количества фаз при любом значении полюсной дуги;

3) доказана эффективность метода оптимизации, который сочетает в себе метод покоординатного спуска (Гаусса–Зейделя) и метод Фибоначчи. Данный метод можно рекомендовать для проведения оптимизационных расчетов электромеханических устройств;

4) разработаны инженерные методики расчета ВМАП различных исполнений на основе использования номограмм по выбору основных размеров;

5) разработанный программный комплекс можно использовать для построения законченной САПР для сквозных технологий проектирования электромеханических устройств.

Внедрение результатов работы. Практическая полезность работы заключается в эффективном использовании разработанных программных средств

в конкретных коммерческих проектах, во внедрении их в инженерную практику нескольких предприятий Челябинской области:

1. ООО НПП «Новые технологии» при реализации проекта «Интегрированный малогабаритный высокомоментный привод».
2. ООО НПП «Аэротехнологии» при разработке генератора для беспилотного летательного аппарата.
3. ООО НПП «Ветроэнергетические установки» при разработке генератора для ветроэнергетической установки.
4. ООО НПП «Привод» при разработке генератора для дизель-электрической установки.
5. ЗАО НИИ «Уралмет» при реализации более 50 проектов.

Программный комплекс был использован в инженерной практике компании Empire Magnetics Inc США при прохождении автором зарубежной научной стажировки по программе повышения кадрового потенциала. Программные средства показали свою эффективность при разработке ряда коммерческих проектов фирмы, о чем имеется официальное подтверждение президента компаний.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научно-технических конференциях:

1. Десятая всероссийская научно-техническая конференция «Энергетика: экология, надежность, безопасность», г. Томск, 2005 г.
2. Международная научно-техническая конференция «Состояние и перспективы развития электротехнологии (XII Бенардосовские чтения)», г. Иваново, 2005 г.
3. 25 Российской школы по проблемам науки и технологии, г. Миасс, 2005 г.
4. 35 Уральский семинар по механике и процессам управления, г. Миасс, 2005 г.
5. 5 конференция пользователей программного обеспечения CAD-FEMGMBH, г. Москва, 2005 г.
6. 6 конференция пользователей программного обеспечения CAD-FEMGMBH, г. Москва, 2006 г.
7. 6 международный симпозиум «Перспективы и тенденции развития электротехнического оборудования», г. Москва, 2006 г.
8. 3 международная научно-техническая конференция «Электромеханические и электромагнитные преобразователи энергии и управляемые электромеханические системы», г. Екатеринбург, 2007 г.
9. Первая международная научно-практическая конференция «Ресурсосбережение и возобновляемые источники энергии: экономика, экология, опыт применения», г. Улан-Удэ, 2008 г.
10. 7 международная конференция «Электроэнергетика и электротехника. Проблемы и перспективы», г. Москва, 2009 г.
11. Международная научно-техническая конференция «Состояние и перспективы развития электротехнологии (XVI Бенардосовские чтения)», г. Иваново, 2011 г.
12. На ежегодных научно-технических конференциях преподавателей и сотрудников Южно-Уральского государственного университета на секции технических наук в период с 2003 по 2011 г.

Публикации. Основные теоретические выводы и результаты диссертации изложены в 51 опубликованных работах, в том числе в 15 изданиях, рекомендованных ВАК. 3 статьи опубликованы в ведущих научно-технических журналах США. По результатам диссертационной работы оформлено 2 патента лично автором и один патент на полезную модель с участием четырех соавторов. Лично автору принадлежит разработка вентильного электродвигателя с аксиальным потоком.

Использование в учебном процессе. Разработанная методика проектирования внедрена в учебный процесс кафедры «Электромеханика и электромеханические системы» энергетического факультета Южно-Уральского государственного университета в преподавание курса «Конструкции, методы расчета и проектирования электромеханических устройств и электромеханических преобразователей». В читаемый курс введены разделы по оптимизации, расчету магнитных и тепловых полей, трехмерному моделированию.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из определений используемых научных терминов, основных обозначений и сокращений, введения, шести глав, заключения, списка литературы из 268 наименований, 11 приложений. Работа изложена на 271 странице, из них 214 страниц основного текста. Работа содержит 83 иллюстрации, 345 аналитических выражений, 6 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, проанализировано современное состояние проблемы, определены объект и предмет исследования, сформулирована цель работы, указаны пути ее достижения, определены научная новизна и основные результаты, выносимые на защиту, показана практическая значимость проведенных научных исследований, приведена информация по апробации работы и публикациям, дан краткий обзор содержания диссертации по главам.

Первая глава посвящена анализу влияния разных типов коммутации ВМАП на электромагнитный момент при произвольном числе фаз якорной обмотки. Классификация типов коммутации, рассмотренных в работе, представлена на рис. 1.



Рис. 1. Типы коммутации ВМАП

В главе дан краткий анализ аналоговой коммутации. Указано, что системы векторного управления достаточно хорошо разработаны в теории и реализованы на практике. Они имеют широкую область применения. Это обусловле-

но развитием силовой электроники, позволяющей создавать надежные преобразователи, а также развитием микроэлектроники, способной реализовать алгоритмы управления практически любой сложности. Но отмечена большая трудоемкость реализации этого типа коммутации для нового класса приводов. Ее анализ представляет перспективу дальнейших исследований.

В качестве анализа выбрана дискретная двухполупериодная ($180-180/m$)-градусная коммутация и 180-градусная коммутация при гальванически развязанном питании фаз. Количество фаз может быть произвольным. Этот выбор обусловлен хорошими энергетическими характеристиками и высокими показателями надежности для многофазных ВМАП.

Диаграммы переключения секций для этих типов коммутации представлены на рис. 2 и рис. 3.

Для анализа реальное распределение индукции в воздушном зазоре заменено трапециoidalным распределением с эквивалентной амплитудой, а линейная нагрузка фазы представлена в виде прямоугольников, по ширине равных фазной зоне, а по амплитуде равных средней линейной нагрузке фазы.. Анализ проведен для относительных величин. За базовое значение принята амплитуда индукции и средняя линейная нагрузка на среднем диаметре аксиальной машины.

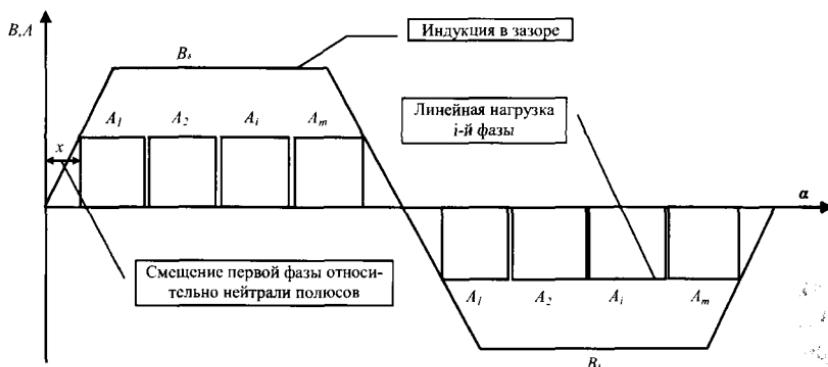


Рис. 2. Диаграмма переключения секций при двухполупериодной ($180-180/m$)-градусной коммутации

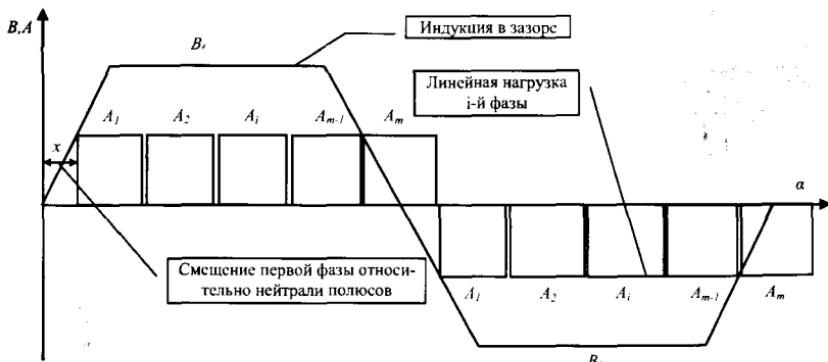


Рис. 3. Диаграмма переключения секций при двухполупериодной 180-градусной коммутации

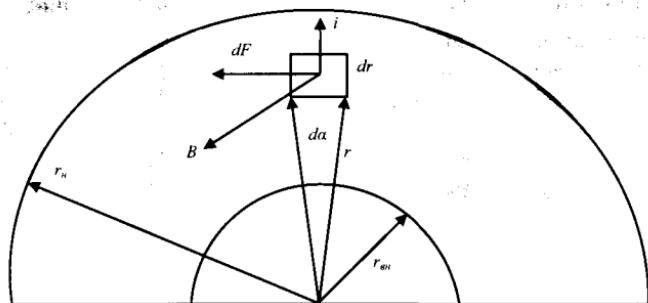


Рис. 4. Эскиз обобщенной аксиальной машины

Обобщенная аксиальная машина представлена в виде диска с током, который пронизывается магнитным потоком (см. рис. 4).

Уравнение элементарного электромагнитного усилия, действующего на бесконечно малый участок обобщенной аксиальной машины, на основании закона Ампера можно записать в следующем виде.

Для элементарного момента можно записать уравнение

$$dM = rdF = Br didr,$$

где B – индукция элементарного участка; di – ток элементарного участка; dr – длина элементарного участка; r – радиус расположения элементарного участка.

Представим индукцию как произведение базовой величины, равной амплитуде индукции в воздушном зазоре, на относительную функцию изменения индукции в пределах полюсного деления.

$$B = B_\delta B(\alpha_{3n}),$$

где α_{3n} – угловая координата в электрических градусах.

По аналогии с индукцией выразим функцию линейной нагрузки на среднем радиусе диска обобщенной аксиальной машины в зависимости от полюсного деления

$$A(x) = A_{cp} A(\alpha_{3n}, x),$$

где A_{cp} – амплитуда линейной нагрузки на среднем радиусе диска; $A(\alpha_{3n}, x)$ – относительная функция изменения линейной нагрузки для i -й фазы в пределах полюсного деления в электрических градусах; x – смещение начала первой фазы относительно нейтрали полюсов.

Электромагнитный момент элементарного участка, который создает i -я фаза

$$dM_i(x) = 2\pi r_{cp} A_{cp} B_\delta B(\alpha_{3n}) A(\alpha_{3n}, x) r dr d\alpha_{3n},$$

Для определения момента i -й фазы возьмем интеграл по поверхности диска обобщенной аксиальной машины

$$\begin{aligned} M_i(x) &= \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} dM_i(x) = 2\pi r_{cp} B_\delta A_{cp} \int_0^{\pi} \int_0^{2\pi} B(\alpha_{3n}) A(\alpha_{3n}) r dr d\alpha_{3n} = \\ &= \frac{\rho}{2} B_\delta A_{cp} D_{cp}^2 L_x \int_0^{\pi} \int_0^{2\pi} B(\alpha_{3n}) A(\alpha_{3n}) d\alpha_{3n}, \end{aligned}$$

где D_{cp} – средний диаметр кольца обобщенной аксиальной машины, L_k – толщина кольца обобщенной аксиальной машины.

За базовое значение момента примем выражение

$$M_0 = \frac{\rho}{2} B_0 A_{cp} D_{cp}^2 L_k.$$

Тогда зависимость относительного момента от смещения якоря относительно индуктора x для i -й фазы будет иметь вид

$$M_i(x) = \int_0^{\pi_m} B(\alpha_{xi}) A(\alpha_{xi}, x) d\alpha_{xi}.$$

Разложим функцию индукции и линейной нагрузки в гармонический ряд. Учтем при этом симметрию кривых относительно координатных осей.

Относительное значение индукции в воздушном зазоре

$$\begin{aligned} B(\alpha_{xi}) &= \sum_{n=1}^k a_n \sin(n\alpha_{xi}); \\ a_n &= \frac{2}{\pi_m} \left(\int_0^{\frac{\pi_m(1-\alpha)}{2}} \frac{2a}{\pi_m(1-\alpha)} \sin(n\alpha_{xi}) d\alpha_{xi} + \int_{\frac{\pi_m(1-\alpha)}{2}}^{\frac{\pi_m(1-\alpha)+\pi_m}{2}} \sin(n\alpha_{xi}) d\alpha_{xi} + \right. \\ &\quad \left. + \int_0^{\frac{\pi_m(1-\alpha)}{2}} \frac{2(1-\alpha)}{\pi_m(1-\alpha)} \sin(n\alpha_{xi}) d\alpha_{xi} \right), \end{aligned}$$

где k – число членов в гармоническом ряду.

Относительное значение линейной нагрузки i -й фазы

$$\begin{aligned} A_i(\alpha_{xi}, x) &= \sum_{n=1}^{k1} (al_{ni}(i, x) \sin(n\alpha_{xi}) + bl_{ni}(i, x) \cos(n\alpha_{xi})); \\ al_{ni}(i, x) &= \frac{1}{\pi_m} \left(\int_{-\pi_m + \frac{\pi_m}{m} + x}^{-\pi_m + (i-1)\frac{\pi_m}{m} + x} (-1) \sin(n\alpha_{xi}) d\alpha_{xi} + \int_{(i-1)\frac{\pi_m}{m} + x}^{i\frac{\pi_m}{m} + x} \sin(n\alpha_{xi}) d\alpha_{xi} \right); \\ bl_{ni}(i, x) &= \frac{1}{\pi_m} \left(\int_{-\pi_m + \frac{\pi_m}{m} + x}^{-\pi_m + (i-1)\frac{\pi_m}{m} + x} (-1) \cos(n\alpha_{xi}) d\alpha_{xi} + \int_{(i-1)\frac{\pi_m}{m} + x}^{i\frac{\pi_m}{m} + x} \cos(n\alpha_{xi}) d\alpha_{xi} \right), \end{aligned}$$

где $k1$ – число членов гармонического ряда; i – номер фазы; m – число фаз;

Результирующий момент будет определяться суммой моментов всех фаз (одна фаза отключена)

$$M_{180-180/m}^*(x) = \sum_{i=1}^{m-1} M_i^*(x).$$

Межтактовый интервал в электрических градусах составит величину $\frac{\pi_m}{m}$.

Среднее значение относительного момента в межтактовом интервале будет равно среднему моменту двигателя, так как электромагнитные процессы в межтактовых интервалах идентичны. Следовательно, среднее значение относительного электромагнитного момента можно определить по формуле

$$M_{\varphi(180-180/m)}^* = \frac{\int_0^{\frac{\pi_m}{m}} M_{180-180/m}^*(x) dx}{\frac{\pi_m}{m}}.$$

Из диаграммы (см. рис. 2) видно, что не все ампервитки вносят одинаковую долю в создание электромагнитного момента. Часть из них находится в зоне сильного магнитного поля с максимальной индукцией, часть — в зоне ослабленного поля и геометрической нейтрали, часть витков отключена от источника. Определим, какая часть среднего относительного момента приходится на один электрический градус полюсного деления. По этому показателю можно судить об эффективности якорной обмотки в целом. Введем этот безразмерный показатель, назовем его коэффициентом эффективности якорной обмотки:

$$K_{\phi(180-180/m)}(\alpha_s, m) = \frac{M^*_{cp(180-180/m)}}{\pi_m}.$$

Графическая зависимость коэффициента эффективности якорной обмотки от числа фаз и коэффициента полюсной дуги для рассматриваемого типа коммутации представлена на рис. 5.

Абсолютное значение среднего момента можно определить, если умножить относительное среднее значение, на базовую величину.

$$M_{cp(180-180/m)} = \frac{\pi}{2} B_s A_{cp} D_{cp}^2 L_x K_{\phi(180-180/m)}$$

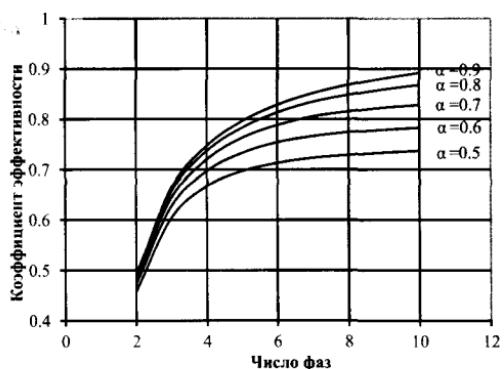


Рис. 5. Коэффициент эффективности для (180-180/m)-градусной коммутации

Зависимость суммарного момента от угла поворота для рассматриваемого типа коммутации (все фазы включены)

$$M_{180}(x) = \sum_{i=1}^m M_{fi}^*(x)$$

Среднее значение момента на межтактовом интервале

$$M_{cp180} = \frac{\frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} M_{180}^*(x) dx}{\frac{\pi}{m}}$$

Коэффициент эффективности якорной обмотки

Анализ зависимостей показывает, что для увеличения эффективности якорной обмотки с точки зрения повышения среднего электромагнитного момента необходимо увеличивать число фаз и коэффициент полюсной дуги.

По аналогии выведены основные зависимости для 180-градусной коммутации.

$$K_{\phi 180}(\alpha_\delta, m) = \frac{M_{cp180}}{\pi}$$

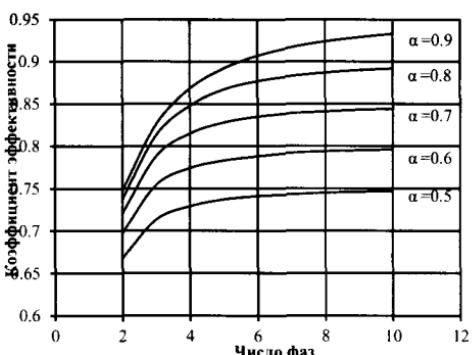


Рис. 6. Коеффициент эффективности для 180-градусной коммутации

Графические зависимости этого коэффициента от коэффициента полюсной дуги и числа фаз представлены на рис.6

Качественный анализ показывает, что 180-градусная коммутация более предпочтительна, так как для любого коэффициента полюсной дуги и числа фаз имеет большее значение коэффициента эффективности якорной обмотки по сравнению со $(180-180/m)$ -градусной коммутацией. Для количественной оценки этого преимущества найдем наиболее типичного коэффициента отношения от числа фаз пред-

ставлена на рис. 7. Кривая показывает, что наибольшее преимущество 180-градусная коммутация имеет при небольшом количестве фаз. При увеличении числа фаз это преимущество теряется.

Аналогичные выводы можно сделать и для других значений полюсной дуги.

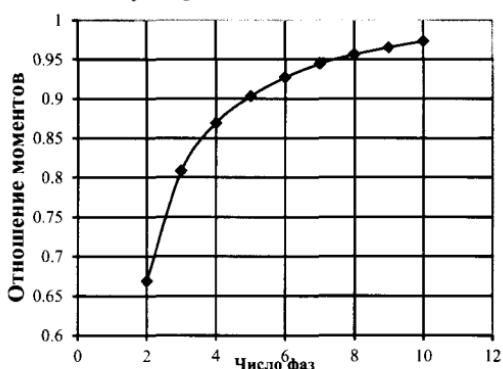


Рис. 7. Отношение электромагнитных моментов

Таким образом, в первой главе проведена классификация типов коммутации, для анализа выбраны два варианта дискретной коммутации при гальванически развязанном питании фаз. Введен новый в практике анализа коммутации коэффициент эффективности якорной обмотки, для которого получены аналитические зависимости. Доказано, что для увеличения электромагнитного момента в одинаковых габаритах и с одинаковыми электромагнитными нагрузками следует увеличивать количество фаз и коэффициент полюсной дуги для обоих типов коммутации. Доказано преимущество 180-градусной коммутации по развивающему электромагнитному моменту.

Вторая глава посвящена анализу электромагнитной мощности ВМАП для различных конструктивных исполнений.

Большое количество конструктивных модификаций ВМАП можно классифицировать по форме активных элементов, создающих электромагнитный момент. Классификация конструкций ВМАП представлена на рис. 8.



Рис. 8. Классификация конструктивных исполнений ВМАП

Разработка расчетных моделей для различных конструкций имеет особенности. В диссертации выделены четыре основных конструктивных исполнения

Электромагнитный момент и электромагнитная мощность для ВМАП с цилиндрическими магнитами и кольцевыми катушками (модель 1).

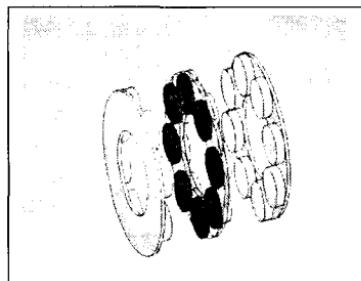


Рис. 9. Объемная модель магнитной системы (модель 1)

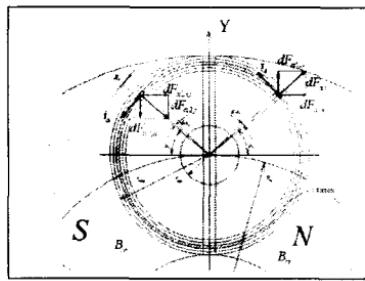


Рис. 10. Эскиз магнитной системы (модель 1)

Конструкция и эскиз магнитной системы для модели 1 представлены на рис. 9, 10. Электромагнитный момент будут создавать только силы, направленные по оси X. Элементарный момент j -того витка:

$$dM_j = dM_{a1j} + dM_{a2j},$$

где $dM_{a1j} = dF_{a1j}(R_{cp} + r_{sq} \sin \alpha_1) = i_a B_{cp} r_{sq} \cos \alpha_1 (R_{cp} + r_{sq} \sin \alpha_1) da_1;$

$$dM_{a2j} = dF_{a2j}(R_{cp} + r_{sq} \sin \alpha_2) = i_a B_{cp} r_{sq} \cos \alpha_2 (R_{cp} + r_{sq} \sin \alpha_2) da_2,$$

здесь dF_{a1j}, dF_{a2j} – элементарные силы, действующие на левую и правую половины витка; R_{cp} – средний радиус кольца магнитной системы; r_{sq} – радиус j -того витка.

Момент j витка

$$M_j = \int_0^{2\pi} (dM_{a1j} + dM_{a2j}) = i_a B_{cp} D_{cp} d_{sq},$$

где D_{cp} – средний диаметр кольца магнитной системы; d_{sq} – диаметр j -того витка.

Максимальный момент фазы

$$M_{\max f \text{ mod1}} = p \sum_{j=1}^{N_f} M_j = i_a B_{cp} D_{cp} d_{sq} p W_c.$$

где W_c – число витков в катушечной секции; d_{kp} – средний диаметр кольца катушечной секции.

Выразим средний диаметр кольца катушечной секции через толщину кольца магнитной системы

$$d_{kp} = \frac{L_z}{2}.$$

От угла поворота момента фазы меняется по закону косинуса:

$$M_{f \text{ mod1}}(\gamma_{zi}) = M_{\max f \text{ mod1}} \cos(\gamma_{zi}),$$

где γ_{zi} – поворот якоря относительно индуктора в электрических градусах.

Максимальный электромагнитный момент машины для различных вариантов коммутации.

Для (180–180/m)-градусной коммутации

$$M_{\max \text{ mod1}(180-180/m)} = M_{\max f \text{ mod1}} \sum_{i=1}^{m-1} \cos\left(-\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{m} + \frac{\pi}{m}(i-1)\right) = \frac{\pi}{2} A_{cp} B_{cp} D_{cp}^2 L_k K_{\text{mod1}(180-180/m)},$$

где $K_{\text{mod1}(180-180/m)}$ – коэффициент эффективности модели 1 для (180–180/m)-градусной коммутации

$$K_{\text{mod1}(180-180/m)} = \frac{\sum_{i=1}^{m-1} \cos\left(-\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{m} + \frac{\pi}{m}(i-1)\right)}{2m}$$

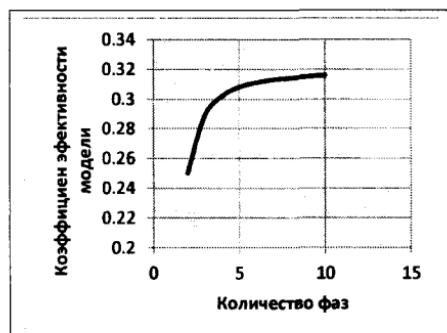


Рис. 11. Коэффициент эффективности модели 1 для (180–180/m)-градусной коммутации

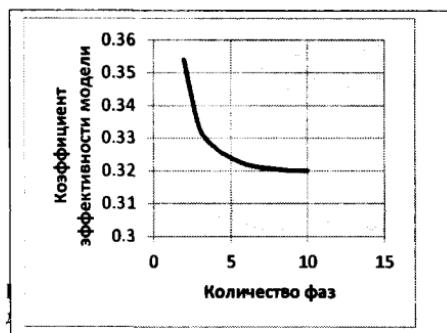


Рис. 12. Коэффициент эффективности модели 1 для 180-градусной коммутации

Графическая зависимость этого коэффициента от числа фаз для (180–180/m)-градусной коммутации представлена на рис. 11.

Для 180-градусной коммутации

$$M_{\max \text{ mod1}(180)} = M_{\max f \text{ mod1}} \sum_{i=1}^m \cos\left(-\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{2m} + \frac{\pi}{m}(i-1)\right) = \frac{\pi}{2} A_{cp} B_{cp} D_{cp}^2 L_k K_{\text{mod1}(180)},$$

где $K_{\text{mod1}(180)}$ – коэффициент эффективности модели 1 для 180-градусной коммутации

$$K_{\text{mod1}(180)} = \frac{\sum_{i=1}^m \cos\left(-\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{2m} + \frac{\pi}{m}(i-1)\right)}{2m}$$

Графическая зависимость этого коэффициента от числа фаз для 180-градусной коммутации представлена на рис. 12.

Физический смысл коэффициентов эффективности модели заключается в определении доли, которую вкладывают фазы в создание максимального момента.

Применение этого коэффициента является новым в практике проектирования ВМАП.

Определим средний электромагнитный момент и электромагнитную мощность для модели 1 ВМАП при различных вариантах коммутации с учетом выведенных выше коэффициентов эффективности.

Для (180–180/m)-градусной коммутации

$$M_{cp\text{modl}(180-180/m)} = \frac{\pi}{2} A_{cp} B_{cp} D_{cp}^2 L_k K_{\text{modl}(180-180/m)} K_{\varphi(180-180/m)},$$

$$P_{zm\text{modl}(180-180/m)} = \frac{\pi}{2} A_{cp} B_{\delta} \omega D_{cp}^2 L_k K_{\text{modl}(180-180/m)} K_{\varphi(180-180/m)},$$

где ω – частота вращения в рад/с.

Для 180-градусной коммутации

$$M_{cp\text{modl}(180)} = \frac{\pi}{2} A_{cp} B_{cp} D_{cp}^2 L_k K_{\text{modl}(180)} K_{\varphi(180)},$$

$$P_{zm\text{modl}(180)} = \frac{\pi}{2} A_{cp} B_{\delta} \omega D_{cp}^2 L_k K_{\text{modl}(180)} K_{\varphi(180)}.$$

Теоретический интерес представляет собой выбор наиболее эффективного типа коммутации для модели 1 при одинаковых электромагнитных нагрузках и в одинаковых габаритах. Для количественной оценки введем коэффициент сравнения коммутаций как отношение электромагнитных мощностей (180–180/m)-градусной коммутации и 180-градусной коммутации:

$$K_{\text{сравнения_ком_модl}} = \frac{P_{zm\text{modl}(180-180/m)}}{P_{zm\text{modl}(180)}} = \frac{K_{\text{modl}(180-180/m)} K_{\varphi(180-180/m)}}{K_{\text{modl}(180)} K_{\varphi(180)}}.$$

Графическая зависимость этого коэффициента от числа фаз приведена на рис. 13.

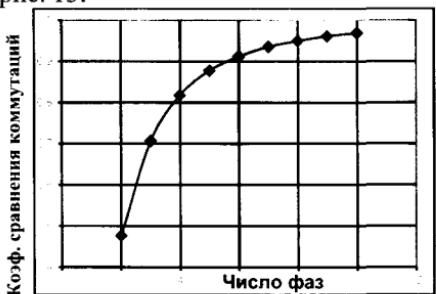


Рис. 13. Зависимость коэффициента сравнения коммутаций для модели 1

Электромагнитный момент и электромагнитная мощность для ВМАП с сегментными магнитами и трапецидальными катушками (модель 2).

Объемная модель магнитной системы этого исполнения представлена на рис. 14. Эскиз магнитной системы представлен на рис. 15.

Анализ зависимости показывает, что для модели 1 180-градусная коммутация имеет преимущество при малом числе фаз. При увеличении числа фаз это преимущество уменьшается.

Аналитические зависимости для этой модели выведены по аналогичной методике. Средний электромагнитный момент и электромагнитная мощность для (180–180/m)-градусной коммутации

$$M_{cp\text{ mod}2/(180-180/m)} = \frac{\pi}{2} A_{cp} B_{cp} D_{cp}^2 L_k K_{\text{mod}2/(180-180/m)} K_{\varphi(180-180/m)}$$

$$P_{sw\text{ mod}2/(180-180/m)} = \frac{\pi^2}{60} A_{cp} B_{cp} n D_{cp}^2 L_k K_{\text{mod}2/(180-180/m)} K_{\varphi(180-180/m)}$$

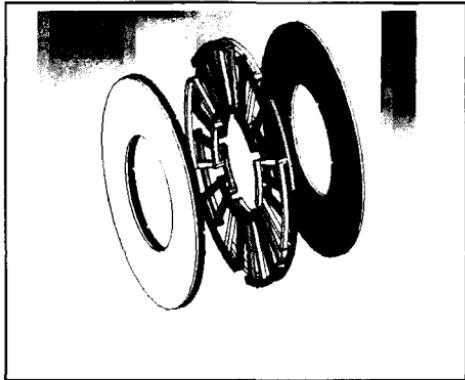


Рис. 14. Объемная модель магнитной системы (модель 2)

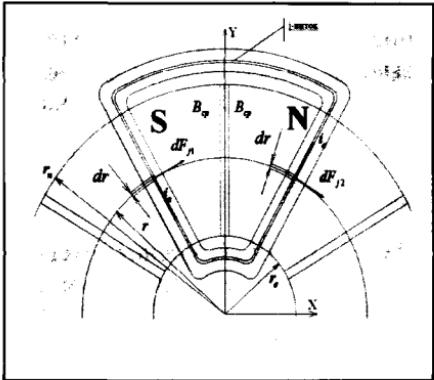


Рис. 15. Эскиз магнитной системы (модель 2)

Для (180–180/m)-градусной коммутации коэффициент эффективности модели 2 (см. рис.16)

$$K_{\text{mod}2/(180-180/m)}(\alpha, m) = \frac{M(\alpha_{cp}, m)_{(180-180/m)\max}}{\frac{\pi}{m}(m-1)},$$

где $M(\alpha_{cp}, m)_{(180-180/m)\max}$ – относительное значение максимального момента якорной обмотки при реальном коэффициенте полюсного перекрытия.

Средний электромагнитный момент и электромагнитная мощность для 180-градусной коммутации (см. рис.17)

$$M_{cp\text{ mod}2/(180)} = \frac{\pi}{2} A_{cp} B_{\delta} D_{cp}^2 L_k K_{\text{mod}2/(180)} K_{\varphi(180)},$$

$$P_{sw\text{ mod}2/(180)} = \frac{\pi}{2} A_{cp} B_{\delta} \omega D_{cp}^2 L_k K_{\text{mod}2/(180)} K_{\varphi(180)}$$

Для 180-градусной коммутации коэффициент эффективности модели определим следующим выражением

$$K_{\text{mod}2/(180)}(\alpha, m) = \frac{M(\alpha_{cp}, m)_{(180)\max}}{M(\alpha_{cp} = 1, m)_{(180)\max}} = \frac{M(\alpha_{cp}, m)_{(180)\max}}{\pi},$$

где $M(\alpha_{cp}, m)_{(180)\max}$ – относительное значение максимального момента якорной обмотки при реальном коэффициенте полюсного перекрытия.

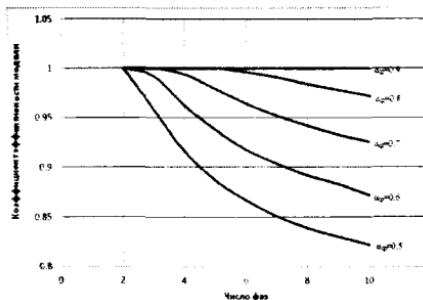


Рис. 16. Коэффициент эффективности модели 2 для (180-180/m)-градусной коммутации

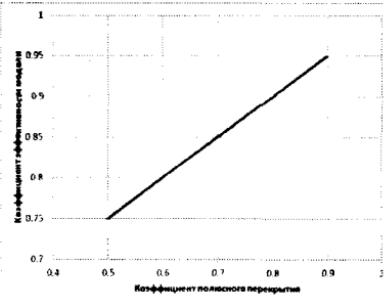


Рис. 17. Коэффициент эффективности модели 2 для 180-градусной коммутации

По аналогии с предыдущим анализом для количественной оценки введем коэффициент сравнения коммутаций как отношение электромагнитных мощностей (180–180/m)-градусной коммутации и 180-градусной коммутации:

$$K_{\text{сравнения_ком_мод2}} = \frac{P_{\text{мод2(180-180/m)}}}{P_{\text{мод2(180)}}} = \frac{K_{\text{мод2(180-180/m)}} K_{\varphi(180-180/m)}}{K_{\text{мод2(180)}} K_{\varphi(180)}}.$$

Графическая зависимость этого коэффициента от числа фаз и коэффициента полюсной дуги приведена на рис. 18. Их анализ показывает, что при одинаковых электромагнитных нагрузках магнитные системы с высоким значением коэффициента полюсного перекрытия имеют преимущество при любом количестве фаз. Графические зависимости коэффициента сравнения коммутаций проходят ниже 1.0. Но для магнитных систем с коэффициентом полюсного перекрытия 0.7–0.5, что весьма характерно для практики, преимущество имеет (180–180/m)-градусная коммутация для числа фаз начиная с 3 и выше.

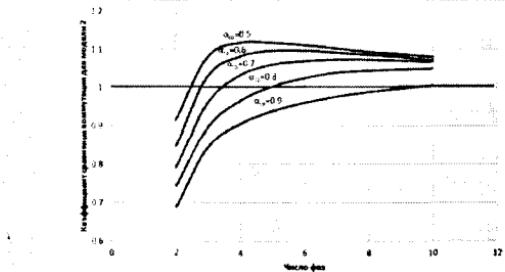


Рис. 18. Зависимость коэффициента сравнения (180-180/m)-градусной коммутации и 180-градусной коммутации для модели 2

С учетом того, что (180–180/m)-градусная коммутация имеет более простую и дешевую техническую реализацию, этот теоретический вывод имеет важное практическое значение.

Электромагнитный момент и электромагнитная мощность для ВМАП с сегментными магнитами и тороидальными катушками (модель 3).

Объемная модель магнитной системы этого исполнения представлена на рис. 19. Эскиз магнитной системы представлен на рис. 20.

Для этой модели аналитические зависимости выведены по методикам, аналогичным вышеприведенным.

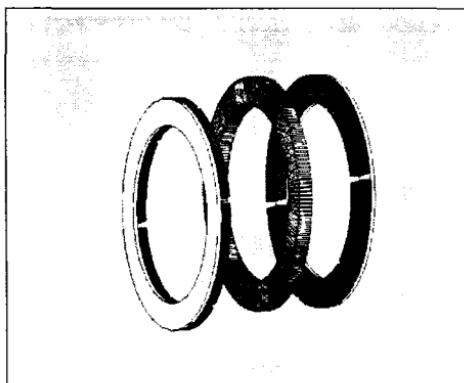


Рис. 19. Объемная модель магнитной системы (модель 3)

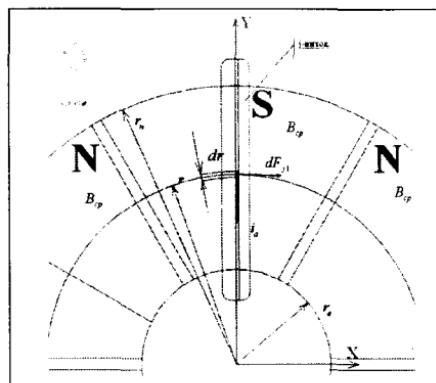


Рис. 20. Эскиз магнитной системы (модель 3)

Средний электромагнитный момент и электромагнитная мощность для (180–180/m)-градусной коммутации

$$M_{cp\text{ mod3}(180-180/m)} = \frac{\pi}{2} A_{cp} B_\delta D_{cp}^2 L_k K_{mod3(180-180/m)} K_{\phi(180-180/m)}$$

$$P_{em\text{ mod3}(180-180/m)} = \frac{\pi}{2} A_{cp} B_\delta \omega D_{cp}^2 L_k K_{mod3(180-180/m)} K_{\phi(180-180/m)}$$

Для (180–180/m)-градусной коммутации коэффициент эффективности модели определим следующим выражением (см. рис.21)

$$K_{mod3(180-180/m)}(\alpha, m) = \frac{M(\alpha_{cp}, m)_{(180-180/m)\max}}{M(\alpha_{cp} = 1, m)_{(180-180/m)\max}} = \frac{2M(\alpha_{cp}, m)_{(180-180/m)\max}}{\frac{\pi}{m}(m-1)}$$

Средний электромагнитный момент и электромагнитная мощность для 180-градусной коммутации

$$M_{cp\text{ mod3}(180)} = M_{max\text{ mod3}(180)} K_{\phi 180} = \frac{\pi}{2} A_{cp} B_\delta D_{cp}^2 L_k K_{mod3(180)} K_{\phi 180}$$

$$P_{em\text{ mod3}(180)} = \frac{\pi}{2} A_{cp} B_\delta \omega D_{cp}^2 L_k K_{mod3(180)} K_{\phi 180}$$

Для 180-градусной коммутации коэффициент эффективности модели определим по уравнению (см. рис.22)

$$K_{mod3(180)}(\alpha, m) = \frac{M(\alpha_{cp}, m)_{(180)\max}}{M(\alpha_{cp} = 1, m)_{(180)\max}} = \frac{2M(\alpha_{cp}, m)_{(180)\max}}{\pi}$$

По аналогии с предыдущим анализом для количественной оценки введем коэффициент сравнения коммутаций для модели 3 как отношение электромагнитных мощностей (180–180/m)-градусной коммутации и 180-градусной коммутации:

$$K_{\text{сравнения комм3}} = \frac{P_{em\text{ mod3}(180-180/m)}}{P_{em\text{ mod3}(180)}} = \frac{K_{mod3(180-180/m)} K_{\phi(180-180/m)}}{K_{mod3(180)} K_{\phi 180}}$$

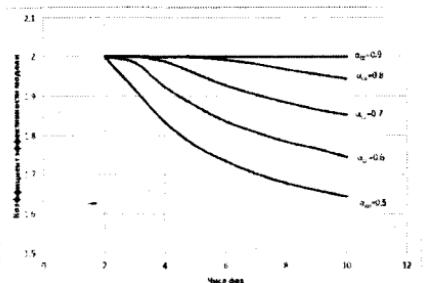


Рис. 21. Коеффициент эффективности модели 3 для (180-180/m)-градусной коммутации

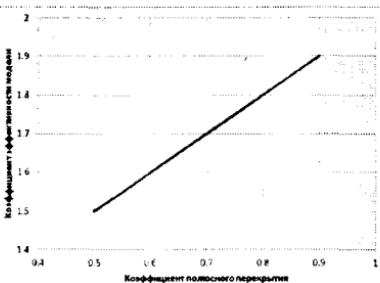


Рис. 22. Коеффициент эффективности модели 3 для 180-градусной коммутации

Поскольку аналитические зависимости коэффициента эффективности для модели 2 и модели 3 кратны 2, то графическая зависимость этого коэффициента от числа фаз для различных значений коэффициента полюсного перекрытия полностью совпадает с кривыми, представленными на рис. 18. Для модели 3 можно сделать выводы, аналогичные выводам для модели 2 в отношении преимущества типов коммутации при изменении числа фаз и коэффициента полюсного перекрытия.

Электромагнитный момент и электромагнитная мощность для ВМАП с сегментными магнитами и зубцовыми якорем (модель 4)

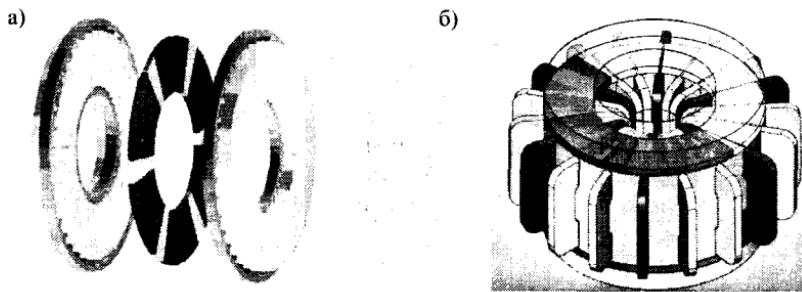


Рис. 23. ВМАП с сегментными магнитами и зубцовыми якорем:
а) с петлевой или волновой обмоткой, б) с тороидальной обмоткой.

Для анализа зубцовой конструкции (см. рис.23) применим известный прием: все амперпроводники расположим равномерным слоем на поверхности якоря в рабочем воздушном зазоре с эквивалентной линейной токовой нагрузкой. Значение индукции в зазоре для этой модели будем считать равными реальной индукции. При принятии этого допущения все аналитические выражения, включая электромагнитный момент, электромагнитную мощность и коэффициенты эффективности модели, будут аналогичны выражениям для модели 3.

Средний электромагнитный момент и электромагнитная мощность для (180-180/m)-градусной коммутации на основании вышеизложенного

$$M_{cp \text{ mod } 4/180-180m} = M_{\max \text{ mod } 4/180-180m} K_{zf(180-180m)} =$$

$$= \frac{\pi}{2} A_{cp} B_o D_{cp}^2 L_k K_{\text{mod } 4/180-180m} K_{zf(180-180m)},$$

$$P_{\text{эмод}4/(180-180/m)} = \frac{\pi}{2} A_{cp} B_{\delta} \omega D_{cp}^2 L_k K_{\text{mod}4/(180-180/m)} K_{\text{эф}(180-180/m)}$$

где $K_{\text{mod}4/(180-180/m)}$ – коэф. эффективности модели, определяемый по рис. 21.

Средний электромагнитный момент и электромагнитная мощность для 180-градусной коммутации

$$M_{cp \text{ mod } 4/(180)} = M_{\max \text{ mod } 4/(180)} K_{\text{эф}180} = \frac{\pi}{2} A_{cp} B_{\delta} D_{cp}^2 L_k K_{\text{mod}4/(180)} K_{\text{эф}180}$$

$$P_{\text{эмод}4/(180)} = \frac{\pi}{2} A_{cp} B_{\delta} \omega D_{cp}^2 L_k K_{\text{mod}4/(180)} K_{\text{эф}180}$$

где $K_{\text{mod}4/(180)}$ – коэф. эффективности модели, определяемый по рис. 22.

Следует отметить, что, несмотря на аналогию с моделью 3, значение средней электромагнитной мощности и электромагнитного момента для модели 4 будут примерно в 4–6 раз выше за счет более высоких значений электромагнитных нагрузок (индукции в зазоре и линейной токовой нагрузки на среднем диаметре якоря).

Сравнение (180–180/m)-коммутации и 180-градусной коммутации по коэффициенту полезного действия для модели 1, модели 2, модели 3 и модели 4

При одинаковых развиваемых электромагнитных мощностях отношение КПД для разных типов коммутации будет пропорционально отношению соответствующих потерь

$$\frac{\eta_{\text{mod}(1,2,3,4)/180}}{\eta_{\text{mod}(1,2,3,4)/(180-180/m)}} = \frac{\Delta P_{\text{mod}(1,2,3,4)/180}}{\Delta P_{\text{mod}(1,2,3,4)/(180-180/m)}} = \frac{K_{\text{эф}180-180/m}^2 K_{\text{mod}(1,2,3,4)/(180-180/m)}^2 (m-1)}{K_{\text{эф}180}^2 K_{\text{mod}(1,2,3,4)/180}^2 m}.$$

На рис. 24 представлена зависимость отношения потерь при (180–180/m)-градусной коммутации к потерям при 180-градусной коммутации для различного количества фаз для модели 1. На рис. 25 представлены аналогичные зависимости для моделей 2, 3, 4.

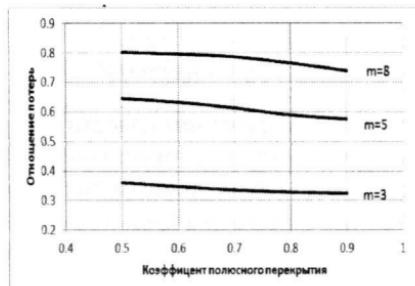


Рис. 24. Зависимость отношения потерь при (180–180/m)-градусной коммутации к потерям при 180-градусной коммутации для различного количества фаз для модели 1

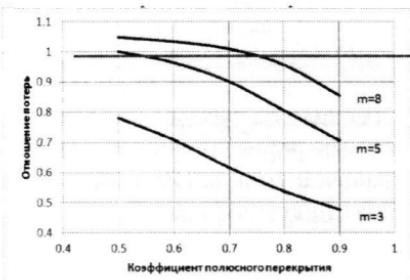


Рис. 25. Зависимость отношения потерь при (180–180/m)-градусной коммутации к потерям при 180-градусной коммутации для различного количества фаз для моделей 2, 3, 4

Все кривые на рис. 24 проходят ниже единицы. Это подтверждает преимущество 180-градусной коммутации по величине потерь при одинаковой развивающейся электромагнитной мощности для модели 1.

Анализ кривых на рис. 25 показывает, что для модели 2, 3, 4 180-градусная коммутация имеет преимущество только при числе фаз менее 5 и определенном диапазоне изменения полюсного перекрытия. При числе фаз более 5 (180–180/m)-градусная коммутация может иметь преимущество, так как электрические потери будут меньше.

Сравнительный анализ конструкций при (180–180/m)-градусной коммутации и 180-градусной коммутации

В работе проведен сравнительный анализ различных конструкций по разрабатываемому электромагнитному моменту для различных типов коммутации, коэффициентов полюсной дуги и числа фаз. Анализ сведен в таблицы, которые удобно использовать в инженерной практике. Пример такой таблицы для трех фаз и 120-градусной коммутации приведен на рис. 26.

Сравнение 3-фазных моделей для 120-градусной коммутации (коэф. пол. дуги 0.8)		Модель, с которой сравнивают			
Модель, которую сравнивают	Модель 1	Модель 1	Модель 2	Модель 3	Модель 4
		1	0.577	0.288	0.113
		1.733	1	0.5	0.195
		3.466	2	1	0.391
		8.87	5.12	2.56	1

Рис. 26. Таблица сравнения моделей

Итогом второй главы является классификация конструктивных исполнений, выбор четырех базовых конструкций и вывод для них аналитических зави-

симостей электромагнитной мощности. Полученные уравнения составляют основу математической модели расчета ВМАП.

В третьей главе приводится разработка математической модели расчета ВМАП.

Математическая модель представляет собой совокупность уравнений и неравенств, которые описывают основные закономерности ВМАП. Математическая модель имеет входные параметры, которые задаются для расчетных уравнений, и выходные параметры, которые получаются по результатам расчета. Входные параметры разделены на три независимые группы:

- константы – параметры, которые не меняются для заданной проектной ситуации. Как правило, это исходные данные технического задания;

- ограничения – параметры, которые нельзя нарушать. В основном это требования технологии.

- независимые переменные – параметры, которые могут варьироваться независимо друг от друга в допустимых пределах. Как правило, это геометрические размеры якоря и индуктора.

Выходными параметрами являются показатели качества, полученные по результатам расчета. Их выбор определяется конкретной проектной ситуацией. Как правило, это коэффициент полезного действия (КПД), масса активных материалов, объем активных материалов, масса постоянных магнитов, стоимость изделия. Графическое изображение математической модели расчета ВМАП представлено на рис. 27.



Рис. 27. Математическая модель расчета ВМАП теристики материала

В качестве **констант** для всех моделей выбраны следующие параметры: номинальная выходная мощность, номинальная частота вращения, номинальное фазное напряжение, число фаз, воздушный зазор, коэффициент заполнения обмотки якоря медью в среднем диаметре кольца магнитопровода; коэффициент формы поля, харак-

постоянного магнита (остаточная индукция, коэрцитивная сила). Дополнительно выбирается тип коммутации. В качестве **независимых переменных** выбраны наружный и внутренний диаметры кольца магнитопровода, высота магнита, высота активного слоя якорной обмотки, число пар полюсов. В качестве **выходных параметров** определены следующие показатели качества: КПД, масса активных частей (масса меди + масса постоянных магнитов + масса железа магнитопровода), масса постоянных магнитов, объем электрической машины, определенный по активным частям. В главе приведен алгоритм и блок-схема расчета всех базовых моделей. В модели учтены все типы коммутации, двигательный и генераторный режимы работы.

В качестве методики расчета постоянного магнита был выбран метод, разработанный на кафедре электромеханики и электромеханических систем ЮУрГУ. В диссертации приводится подробное описание этого метода.

Таким образом, в третьей главе разработана математическая модель расчета ВМАП, в которой определены основные аналитические зависимости между электромагнитными величинами, константы, технологические и эксплуатационные ограничения, независимые переменные. Формализованы показатели качества. Математическая модель охватывает широкий круг проектных задач. Она включает в себя основные базовые конструктивные модификации, двигательный и генераторный режимы работы, два типа дискретной коммутации, различные формы постоянных магнитов и обмоточного провода, произвольное число фаз. В дальнейшем эти аналитические зависимости используются в инженерной методике расчета. Математическая модель, реализованная в программной среде Delphi, является основой для разработки системы оптимального проектирования ВМАП, представленной в четвертой главе.

Четвертая глава посвящена разработке системы многоуровневой оптимизации ВМАП различных конструктивных исполнений.

Существующие программные средства, реализованные на практике, осуществляют, как правило, оптимальное проектирование одной конструкции. При этом они привязаны к узкому кругу проектных ситуаций. Эти программы не могут реализовывать оптимальное проектирование различных конструкций для широкого круга проектных ситуаций. По этой причине принято решение не модернизировать существующие программы, а разработать новый программный комплекс, ориентированный на сквозные технологии.

Проанализированы требования к математической модели, основным из которых является универсальность, то есть возможность решать широкий круг инженерных задач. Требование универсальности заставляет включить в математическую модель наибольшее количество конструктивных исполнений ВМАП. Это рассмотренные выше базовые модели и их модификации. Кроме этого, математическая модель должна содержать различные типы коммутации и режимы работы.

Проанализированы требования к системе оптимизации, основным из которых является гибкость, то есть возможность осуществлять для одной и той же конструкции различные уровни оптимизации. Независимыми переменными являются размеры, которые однозначно определяют геометрию изделия. Если при поиске оптимума варьируются все независимые переменные, то решается наиболее сложная задача полной габаритной оптимизации. Но достаточно часто возникают проектные ситуации, при которых некоторые размеры или группа размеров должны быть фиксированными. При этих проектных ситуациях мы имеем более низкие уровни оптимизации.

Задача оптимизации в диссертации решается в постановке однокритериальной оптимизации: для заданных параметров (конкретного исполнения, материалов, исходных данных технического задания), при заданных ограничениях делается перебор независимых переменных по определенному алгоритму, которые определяют геометрию, обеспечивающую экстремальное значение выбранных критериев. Критериев оптимальности может быть несколько, но в за-

висимости от проектной ситуации для оптимизации выбирается один. В качестве критериев оптимальности приняты показатели качества, получившие наибольшее распространение на практике: минимальная масса активных материалов, минимальный объем магнитной системы, минимальная масса постоянных магнитов, минимальная масса якорной обмотки.

Проведен анализ целевых функций. Показан монотонный характер их изменения от независимых переменных, кроме дискретно изменяющегося числа пар полюсов. Дискретно изменяющийся параметр ограничил выбор методов для блока-оптимизатора. В качестве метода оптимизации выбран метод, сочетающий в себе детерминированный метод покоординатного спуска при движении к экстремуму (Гаусса–Зейделя) с методом однопараметрической оптимизации Фибоначчи при выборе длины шага поиска.

В главе определены следующие уровни оптимизации:

- полная габаритная оптимизация;
- габаритная оптимизация при фиксированном числе пар полюсов;
- габаритная оптимизация при фиксированном наружном диаметре;
- габаритная оптимизация при фиксированном внутреннем диаметре;
- габаритная оптимизация при фиксированной наружной длине;
- габаритная оптимизация при фиксированных наружном и внутреннем диаметрах;
- оптимизация при фиксированных наружном, внутреннем диаметрах и наружной длине (в заданных габаритах);
- габаритная оптимизация при заданных размерах постоянного магнита.

Для каждого уровня оптимизации определены система констант, ограничений, независимых переменных и показателей качества.

Проверочный расчет вписался в систему как самый низкий уровень при полностью фиксированных размерах.

В главе определены оптимальные соотношения между наружным и внутренним диаметрами для рассматриваемых моделей и различных форм магнитов.

Разработанная проектная система позволяет реализовывать до 448 проектных ситуаций (16 вариантов оптимизации для 28 конструктивных исполнений).

Таким образом, в четвертой главе проведен анализ требований к методам оптимального проектирования электромеханических систем, на основе этого анализа принято решение о реализации однокритериальной оптимизации. Выбран наиболее эффективный метод перебора независимых переменных, сочетающий в себе метод покоординатного спуска (Гаусса–Зейделя) при движении к оптимуму с методом Фибоначчи при определении шага. Определено понятие уровней оптимизации. Формализованы 8 уровней оптимизации геометрии ВМАП. Для каждого уровня определена система констант, ограничений, независимых переменных и критериев оптимальности. Определены и теоретически доказаны оптимальные соотношения между наружным и внутренним диаметрами для магнитных систем с цилиндрическими, призматическими и сегментными магнитами. На основе проведенного анализа разработана система оптимизации ВМАП, реализующая многоуровневую однокритериальную оптимизацию.

цию для различных конструктивных исполнений. Система позволяет реализовать 448 проектных ситуаций, закрывая практически все потребности реального проектирования ВМАП.

В пятой главе представлена разработка системы анализа ВМАП различных конструктивных исполнений.

Расчетные модели, которые включены в оптимизационный цикл, максимально упрощены из-за экономии времени работы компьютера. Они рассчитывают минимальное количество параметров, не содержат процедур детального расчета электромагнитного поля и поля температур. Анализ теплового состояния очень важен для ВМАП, так как они имеют затрудненный отвод тепла от обмотки якоря, что может привести к ее недопустимому перегреву и размагничиванию постоянных магнитов. Анализ полученных результатов осложняется отсутствием графического объемного изображения спроектированного изделия. Для комплексного подхода к проектированию привода необходим анализ схемотехнических решений.

Следует отметить, что в инженерной практике существуют профессиональные программные средства, которые могут решить перечисленные выше задачи анализа. Они могут быть включены в систему как готовые блоки, адаптированные к результатам многоуровневой оптимизации. В программный комплекс были включены следующие готовые проектные системы:

- Ansys 11 – для расчета магнитных и тепловых полей;
- Solidworks 10 – для трехмерного твердотельного проектирования;
- MicroCap 10 – для анализа схемотехнических решений.

Немаловажным фактором при выборе программных средств послужило наличие на них лицензий, которые имеет Южно-Уральский государственный университет. Это позволило проводить научные исследования в юридически правовом поле.

При анализе стационарного магнитного поля была использована осевая симметрия. В качестве метода выбрано решение задачи в постановке векторного магнитного потенциала. Построение модели, задание свойств объемам, разбиение на конечные элементы, задание граничных условий и решение производится в автоматизированном режиме при помощи встроенного в программу Ansys языка APDL. Исходные данные для расчета передаются в Ansys из основной программы. По результатам расчета определяется рабочий магнитный поток полюса и коэффициент рассеяния. Эти данные возвращаются в основную программу для уточненного расчета рабочих характеристик. Результаты расчета магнитного поля для различных моделей приведены на рис. 28.

Определение температурного состояния ВМАП является одной из наиболее важных составляющих анализа. Для оценки теплового состояния также был использован метод конечных элементов с применением программного пакета Ansys. Анализ для всех моделей проводится по одной плоской тепловой модели. Генерация тепловой модели, разбиение на конечные элементы, задание тепловых нагрузок, граничных условий и решение в программе Ansys проводятся автоматически по исходным данным, которые передаются из основной программы. По результатам расчета рабочая температура обмотки якоря передается обратно в основную программу для уточненного расчета рабочих характеристи-

стик. Фрагменты результатов теплового расчета одного из проектов приведены на рис. 29.

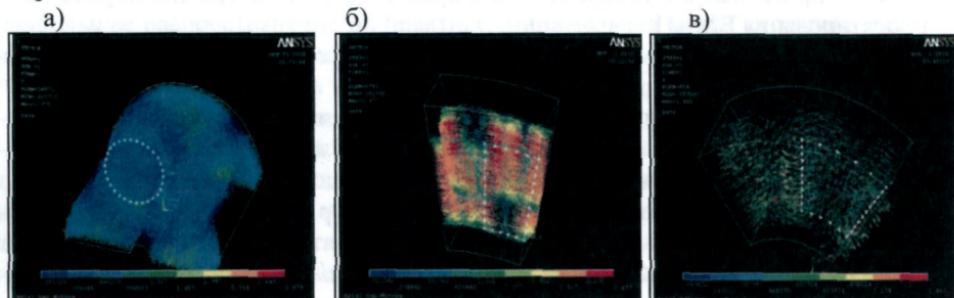


Рис. 28. Результаты расчета магнитного поля: а) – модель 1, б) – модель 2, в) – модель 3.

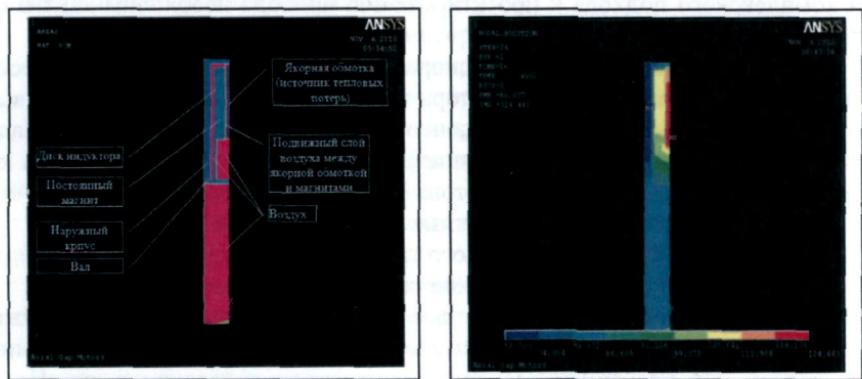


Рис. 29. Расчетная тепловая модель и поле температур ВМАП

Одной из наиболее важных составляющих анализа ВМАП является визуализация геометрии, полученной в результате многоуровневой оптимизации. Построение трехмерных твердотельных моделей выполняет две основные функции. С одной стороны, оно позволяет опытному разработчику обнаружить явные ошибки и оценить качество оптимизации геометрии. С другой стороны, построение этих моделей может являться промежуточным этапом в технологической цепи сквозного проектирования.

Для программирования трехмерных моделей была использована интегрированная среда разработки **Borland Delphi**, в которую встроены командные процедуры для графической среды **Solidworks**. В качестве исходных данных построения принимались геометрические размеры, полученные в результате многоуровневой оптимизации. Сама процедура генерации трехмерной модели реализуется простым выбором опции, которая находится в окне интерфейса разработки ВМАП. Фрагменты построения трехмерных моделей представлены на рис. 30.

Для анализа схемотехнических решений был использован программный комплекс MicroCap. Работа электронного оборудования и электрической машины взаимосвязаны, поэтому в программный комплекс был включен данный

анализ. Следует отметить, что разработка электроники для работы ВМАП представляет собой отдельную профессиональную задачу для специалиста по данному профилю. Так как диссертация направлена в основном на решение проблем, связанных с электрической машиной, то в ней показана только возможность анализа электроники без детального описания. Включение программной среды MicroCAP в процедуру проектирования позволяет повысить качество анализа и сделать его комплексным с учетом взаимного влияния электроники и электрической машины.

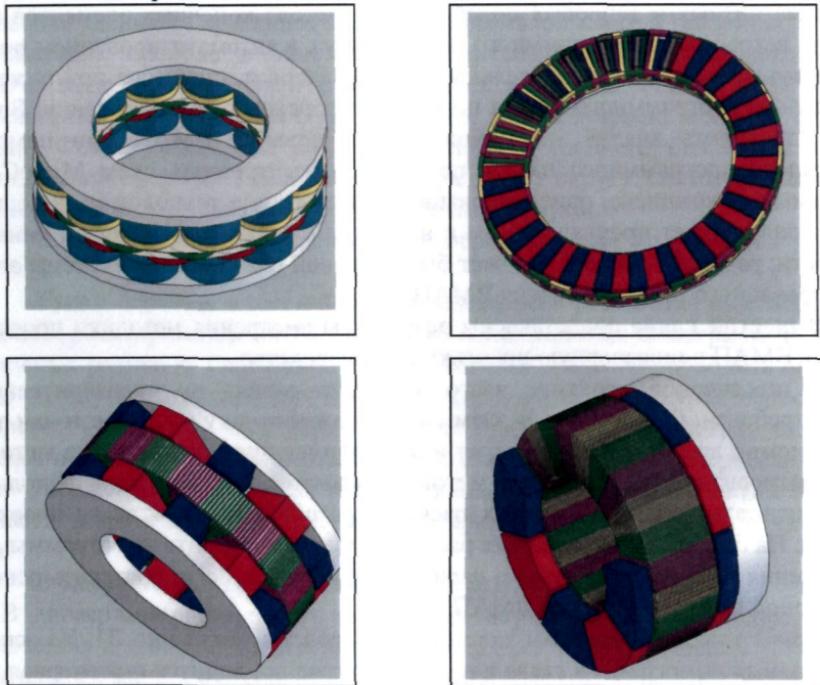


Рис. 30. Трехмерные твердотельные модели, построенные в Solidworks автоматизированным способом

Все описанные процедуры синтеза и анализа ВМАП, а именно: многоуровневая оптимизация для различных конструктивных модификаций, анализ магнитного и теплового полей, построение трехмерных твердотельных моделей, анализ схемотехнических решений были включены в программный комплекс автоматизированного проектирования ВМАП. Программный комплекс был написан на языке высокого уровня **Borland Delphi**. Он работает под управлением операционной системы Windows XP. Программный комплекс ориентирован на сквозную технологию разработки ВМАП и может в качестве составной системы быть включен в системы автоматизированного проектирования более высокого уровня.

Следует отметить, что программные среды Ansys, Solidworks, MicroCap встроены в программный комплекс, но являются самостоятельными програм-

ными блоками, в которых специалисты по профилю могут проводить детальные исследования.

Практика эксплуатации программного пакета при реализации конкретных проектов показала, что он в полной мере удовлетворяет предъявляемым к нему требованиям по гибкости, универсальности, точности расчета.

Таким образом, в пятой главе разработан программный комплекс для проектирования ВМАП различных конструктивных исполнений, который позволяет осуществлять оптимизационные расчеты различных уровней, проводить анализ магнитных и тепловых полей на базе метода конечных элементов при помощи встроенного программного пакета Ansys, в автоматизированном режиме строить трехмерные твердотельные модели якоря и индуктора при помощи встроенного программного пакета по конструкторскому моделированию Solid-works, проводить анализ электронного оборудования ВМАП при помощи встроенного программного пакета по анализу электронных схем MicroCAP. Программный комплекс, ориентированный на сквозную технологию, в полной мере удовлетворяет предъявляемым к нему требованиям по гибкости, универсальности, точности расчета и может быть основой для создания системы автоматизированного проектирования ВМАП.

В шестой главе представлены результаты внедрения методики проектирования ВМАП в инженерную практику и производство.

В инженерной практике часто возникает задача по предварительной оценке требований заказчика. В этом случае разработчику удобно с точки зрения экономии времени и трудозатрат иметь упрощенную инженерную методику проектирования. Инженерную методику можно построить, если использовать результаты оптимизационных расчетов разработанной системы проектирования. На базе оптимизационных расчетов можно построить номограммы для определения основных размеров и параметров, которые могут составить основу инженерной методики расчета ВМАП.

Пример таких номограмм для модели 2 представлен на рис. 31. На основе рассчитанных номограмм в главе в виде алгоритма приводится инженерная методика расчета ВМАП для всех базовых моделей.

Разработка программного комплекса была инициирована практической потребностью. В главе приведены наиболее характерные реальные коммерческие проекты, которые показывают эффективность использования разработанного программного комплекса.

Среди них:

1) проект «Мобильная группа дистанционного наблюдения». Одной из технических задач при реализации проекта была разработка бортового питания БПЛА на базе электрогенератора, работающего от тягового двигателя внутреннего сгорания (ДВС). Заказчиком проекта выступило ЗАО «Кыштымский радиозавод». В качестве генератора в проекте используется ВМАП модели 1. Проект получил грант по линии Фонда содействия развитию малого и среднего бизнеса в научно-технической сфере по Уральскому федеральному округу. Он включен в каталог «Инновационный потенциал Челябинской области»;

2) проект «Генератор для ветроэнергетической установки с вертикальной осью вращения». Задача проекта заключалась в разработке серии электриче-

ских генераторов для ветроэнергетических установок с вертикальной осью вращения мощностью 1.0-30.0 кВт. Заказчиком проекта выступила американская корпорация Empire Magnetics Ins. В качестве генератора в проекте используется ВМАП модели 2. По проекту был изготовлен ряд ветроэнергетических установок с применением описанного программного комплекса. На рис. 32 изображен генератор и ветроэнергетическая установка 3 кВт.

3) проект «Интегрированный малогабаритный высокомоментный привод». Основная цель проекта заключалась в разработке мотор-редуктора с большим удельным крутящим моментом при малой массе и габаритах. В разрабатываемом приводе в качестве исполнительного двигателя используется ВМАП модели 3. Заказчиком данного проекта является ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет». Данный проект получил грант по линии Фонда содействия развитию малого и среднего бизнеса в научно-технической сфере по Уральскому федеральному округу. Он имеет награды на отечественных выставках с международным участием.

В главе определены дальнейшие перспективные направления развития ВМАП.

Таким образом, в шестой главе представлена разработка инженерной методики проектирования ВМАП на основе использования номограмм по выбору основных размеров. Они позволяют для базовых моделей проводить оперативную оценку конструкций для проектов, что повышает конкурентоспособность разработок на рынке инженерного труда. Эффективность программного комплекса подтверждена при использовании его в реальных коммерческих проектах. Определены дальнейшие перспективные направления развития ВМАП в области теоретических исследований и практической инженерной деятельности.

В заключении изложены основные результаты работы:

В диссертационной работе содержатся научно доказанные теоретические положения анализа и синтеза нового класса электромеханических устройств – вентильных машин с аксиальным магнитным потоком. В результате расширена существующая теоретическая база по проектированию электрических машин этого класса. На основе теоретических исследований разработан и внедрен в производственную инженерную практику программный комплекс многоуровневой оптимизации для анализа и синтеза широкого круга конструктивных исполнений ВМАП. Решенная проблема позволяет внести значительный вклад в развитие отечественного электромашиностроения, играющего важную роль в экономике и обеспечении обороноспособности страны.

На основании выполненных теоретических и экспериментальных исследований автором получены следующие основные результаты:

1. Введен и теоретически обоснован новый в практике проектирования вентильных машин показатель – коэффициент эффективности якорной обмотки. На основе гармонического анализа получены аналитические зависимости этого показателя для (180–180/m)-градусной коммутации и 180-градусной коммутации при произвольном числе фаз. По данному показателю проведен сравнительный анализ двух типов дискретной коммутации с гальванически развязанными фазами. Доказано преимущество по развивающейся электромагнитной мощ-

ности 180-градусной коммутации перед (180–180/m)-градусной коммутацией. Показана целесообразность увеличения числа фаз для увеличения электромагнитного момента и КПД для обоих типов коммутации.

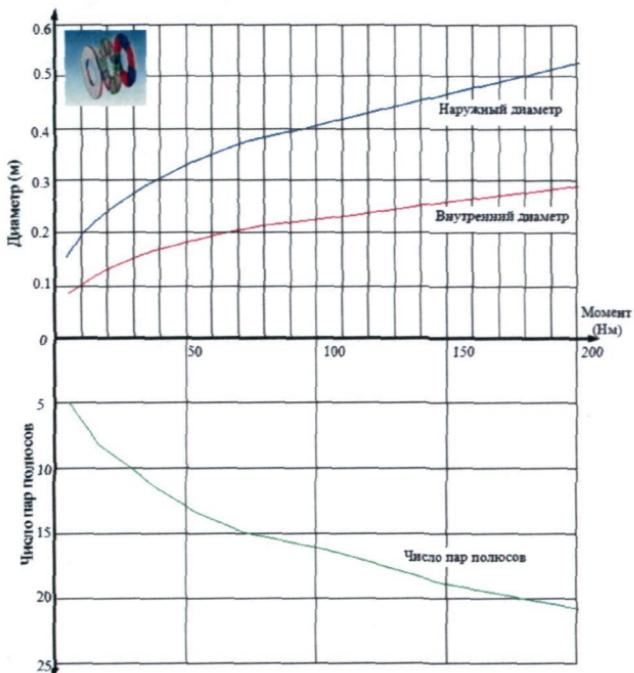


Рис. 31. Номограммы выбора основных размеров для модели 2

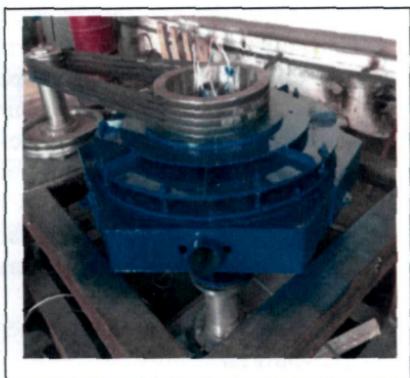


Рис. 32. Генератор и ветроэнергетическая установка 3 кВт

2. Проведена классификация конструктивных исполнений ВМАП. Определены четыре базовые конструкции. Введен и теоретически обоснован новый в практике проектирования ВМАП коэффициент эффективности модели. Для базовых конструкций получены аналитические зависимости электромагнитного

момента и электромагнитной мощности ВМАП для произвольного числа фаз, (180–180/m)-градусной и 180-градусной коммутации. На основе этих зависимостей проведен сравнительный анализ эффективности трех базовых конструкций по развивающему электромагнитному моменту для различных типов коммутации и числа фаз. Результаты анализа сведены в таблицы, позволяющие количественно определить преимущество одной модели над другой, что очень удобно на практике для выбора конструкции.

3. На базе полученных зависимостей электромагнитной мощности разработана математическая модель расчета ВМАП. Определены константы, ограничения, независимые переменные и критерии, необходимые для разработки системы оптимального проектирования. Модель включает в себя широкий круг конструктивных исполнений и режимов работы. Логическая структура расчета, оформленная в виде алгоритма и блок-схемы, обладает научной новизной.

4. Разработана система многоуровневой однокритериальной оптимизации ВМАП, основу которой составила математическая модель. Определены уровни оптимизации от поверочного расчета до полной габаритной оптимизации. Для каждого уровня определена система независимых переменных и критериев оптимальности. Введение в проектную систему оптимизации нескольких уровней является новизной в теории оптимального проектирования электромеханических систем. На основе анализа выбран эффективный метод перебора независимых переменных, сочетающий в себе метод покоординатного пуска (Гаусса–Зейделя) при движении к оптимуму с методом Фибоначчи при определении шага. Метод рекомендован для оптимизационных задач электромеханики.

5. Определены и теоретически доказаны оптимальные соотношения между наружным и внутренним диаметрами для магнитных систем с цилиндрическими, призматическими и сегментными магнитами.

6. На базе проведенных теоретических исследований коммутации, электромагнитного момента и электромагнитной мощности, логической структуры расчета и многоуровневой оптимизации разработан программный комплекс по проектированию ВМАП, позволяющий как синтезировать конструкции, так и проводить их анализ. Комплекс включает в себя 448 проектных ситуаций, что позволяет выполнить практически любой реальный проект без изменения структуры проектной системы. В комплекс встроены профессиональные пакеты, позволяющие проводить детальный анализ магнитного поля, теплового состояния, визуализацию результатов проектирования в виде трехмерных твердотельных моделей, анализ схемотехнических решений. Разработанный комплекс может быть основой для САПР, реализующей сквозную технологию проектирования ВМАП.

7. На основе оптимизационных расчетов разработана инженерная методика проектирования ВМАП с использованием nomogramm по выбору основных размеров. Номограммы разработаны для всех базовых конструкций.

8. Доказана эффективность разработанного программного комплекса анализа и синтеза ВМАП при реализации реальных коммерческих проектов. Комплекс внедрен в инженерную практику реального производства промышленных предприятий Челябинской области, что документально подтверждено актами внедрения. Он позволяет облегчить сложную инженерную работу по проекти-

рованию целого класса электроприводов, повысить качество проектных работ при сокращении сроков их выполнения, сократить число циклов макетирования образцов.

9. Определена перспектива дальнейшего развития теории и практики проектирования ВМАП. Основные ее направления в области теории: разработка законченной САПР для сквозной технологии проектирования, решение много-критериальной задачи оптимизации, решение связанной задачи для совместного анализа магнитных и тепловых полей, разработка конструктивного ряда. В области инженерного проектирования намечены следующие направления: разработка конструкций многосекционных ВМАП, конструктивное интегрирование электроники в электромеханическую часть, разработка многофазных приводов, разработка ВМАП различных климатических исполнений.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК

1. Ганджа, С. А. Генератор для автономных источников питания / С. А. Ганджа // Вестн. Юж.-Урал. гос. ун-та. Сер. «Энергетика». – 2005. – Вып. 6. – № 9. – С. 100–102.
2. Ганджа, С. А. Особенности построения системы автоматизированного проектирования вентильных машин с аксиальным зазором / С. А. Ганджа // Вестн. Юж.-Урал. гос. ун-та. Сер. «Энергетика». – 2007. – Вып. 8. – № 20. – С. 19–23.
3. Ганджа, С. А. Асинхронизированный синхронный генератор с системой управления / С. А. Ганджа // Вестн. Юж.-Урал. гос. ун-та. Сер. «Энергетика». – 2008. – Вып. 9. – № 23. – С. 17–21.
4. Ганджа, С. А. Оптимальное проектирование электроприводов на базе вентильных электрических машин с аксиальным зазором / С. А. Ганджа // Вестник Юж.-Урал. гос. ун-та. Серия «Энергетика». – 2009. – Вып. 12. – № 34. – С. 68–72.
5. Ганджа, С. А. Анализ электромагнитной мощности для различных конструктивных исполнений вентильных машин с аксиальным потоком / С. А. Ганджа // Вестник Юж.-Урал. гос. ун-та. Серия «Энергетика». – 2010. – Вып. 12. – № 34. – С. 58–62.
6. Ганджа, С. А. Применение асинхронизированных синхронных генераторов для автономных и сетевых ветроэнергетических установок / С. А. Ганджа // Альтернативная энергетика и экология. – 2010. – № 1. – С. 25–28.
7. Ганджа, С. А. Оптимальное проектирование вентильных электрических машин с аксиальным магнитным потоком для ветроэнергетических установок малой мощности / С. А. Ганджа // Альтернативная энергетика и экология. – 2011. – № 10. – С. 78–83.
8. Ганджа, С. А. Анализ коммутации вентильных машин с аксиальным потоком для произвольного числа фаз якорной обмотки / С. А. Ганджа // Вестник Юж.-Урал. гос. ун-та. Серия «Энергетика». – 2011. – Вып. 13. – № 35.

9. Ганджа, С. А.. Разработка системы многоуровневой оптимизации для вентильных электрических машин с аксиальным магнитным потоком / С. А. Ганджа // ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2011. – № 12.

10. Ганджа, С. А. Анализ влияния коммутации на электромагнитный момент для вентильных машин с аксиальным магнитным потоком при произвольном числе фаз якорной обмотки / С. А. Ганджа // Вопросы электромеханики. – 2011. – № 12.

11. Ганджа, С. А. Выбор коммутации для вентильных машин с аксиальным магнитным потоком при произвольном числе фаз якорной обмотки / С. А. Ганджа // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2011. – № 6.– С. 15–20.

12. Ганджа, С. А. Разработка системы синтеза для вентильных электрических машин с аксиальным магнитным потоком / С. А. Ганджа // Энергетик. – 2012. – № 1.

13. Ганджа, С. А. Разработка системы анализа вентильных электрических машин с аксиальным магнитным потоком / С. А. Ганджа // Энергетик. – 2012. – № 1.

14. Ганджа, С. А. Инженерная методика проектирования вентильных электрических машин с аксиальным магнитным потоком на основе номограмм по выбору основных размеров / С. А. Ганджа // Энергетик. – 2012. – № 2.

15. Ганджа, С. А. Оптимальное проектирование вентильных электрических машин с аксиальным магнитным потоком / С. А. Ганджа // Вопросы электромеханики. – 2012. – № 1.

Патенты по теме диссертации

1. Пат. 2015606 Российская Федерация, МПК H 02 K 5/22. Электродвигатель / Ганджа С. А.; заявитель и патентообладатель С. А. Ганджа. – № 5039128/07; заявл. 21.04.92; опубл. 30.06.94.

2. Пат. 2030059 Российская Федерация, Н 02 К 5/04. Электродвигатель/ Ганджа С. А.; заявитель и патентообладатель С. А Ганджа. – № 5030007/07; заявл. 28.02.92; опубл. 27.02.95.

3. Пат. на полезную модель 56524 Российская Федерация, МПК F 16 H1/00. Мотор-редуктор / Ганджа С. А., Федоров В. Б., Кулешов В. В., Смирнов В. А. - № 2006115854/22; заявл. 11.05.06; опубл.10.09.06.

Ганджа С. А в патенте принял творческое участие по разработке вентильного двигателя с аксиальным зазором

Статьи в зарубежных научных изданиях

1. Gandzha, S. A. Axial gap or axial flux motors come in a few basic configurations / S. A. Gandzha, R. L. Halstead // E-drive (magazine of electric motor and drive technology). – 2011. – № 12. – www.e-driveonline.com.

2. Gandzha, S. A. Axial gap motor design program / S. A. Gandzha, R. L. Halstead // Machine design (by engineers for engineers). – 2011. – № 12. – www.Machine design.com.

3. Gandzha, S. A. Optimal design of brushless axial gap electric machines for low power windmills / S. A. Gandzha, R. L. Halstead // Design World (engineering solution for product manufactures). – 2012. – № 1. – www.designworldonline.com.

В указанных статьях Гандже С. А. принадлежит описание разработанного им программного комплекса по оптимальному проектированию вентильных машин с аксиальным магнитным потоком.

Статьи в сборниках трудов и периодических изданиях

1. Ганджа, С. А. Математическая модель вентильного многосекционного моментного двигателя на основе агрегированных переменных / С. А. Ганджа // Исследование автоматизированных электроприводов, электрических машин и вентильных преобразователей : темат. сб. науч. тр. ; Челяб. политехн. ин-т. – Челябинск. 1984. – С. 8–13.
2. Ганджа, С. А. Подсистема оптимизации вентильного многосекционного моментного двигателя / С. А. Ганджа // Исследование автоматизированных электроприводов, электрических машин и вентильных преобразователей : темат. сб. науч. тр. ; Челяб. политехн. ин-т. – Челябинск, 1984. – С. 13–21.
3. Лифанов, В. А. Номограммы выбора геометрии вентильного момента постоянного тока / В. А. Лифанов, С. З. Зильберман, С. А. Ганджа. – Челябинск : ЦНТИ, Информационный листок, 1984.
4. Лифанов, В. А. Инженерная методика расчета призматических постоянных магнитов из закритических магнитотвердых материалов / В. А. Лифанов, С. З. Зильберман, С. А. Ганджа. – Челябинск : ЦНТИ, Информационный листок, 1984.
5. Лифанов, В. А. Пульсации электромагнитного момента многофазных вентильных моментных двигателей постоянного тока с целым числом пазов на полюс и фазу // В. А. Лифанов, Г. Н. Мармелеев, С. А. Ганджа, С. З. Зильберман // Исследование автоматизированных электроприводов, электрических машин и вентильных преобразователей : тематический сборник научных трудов. – Челябинск : ЧПИ, 1985. – С. 3–11.
6. Ганджа, С. А. Оптимизация параметров вентильного моментного двигателя постоянного тока : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.09.01 / С. А. Ганджа. – Свердловск, 1985. – 22 с.
7. Ганджа, С. А. Генератор для ветроэнергетических установок // Энергетика: экология, надежность, безопасность : материалы докл. Однинадцатой Всероссийской научно-технической конференция, 7–9 декабря 2005 г. – Томск, 2005. – С. 84–87.
8. Ганджа, С. А. Вентильные электрические машины постоянного тока с аксиальным зазором. Анализ и синтез / С. А. Ганджа // Сборник трудов Пятой конференции пользователей программного обеспечения CAD_FEMGmbH, 21–22 апреля 2005 г. – М., 2005. – С. 372–376.
9. Ганджа, С. А. Многоуровневая оптимизация вентильных электрических машин постоянного тока с аксиальным воздушным зазором (ВМАЗ) / С. А. Ганджа // XXV Российская школа по проблемам науки и технологий, посвященная 60-летию Победы (г. Миасс, 21–23 июня 2005 г.) / Межрегион. совет по науке и технол. – Миасс, 2005. – С. 57.

10. Ганджа, С. А. Некоторые проблемы разработки САПР вентильных машин с аксиальным зазором / С. А. Ганджа // XXV Российская школа «Итоги диссертационных исследований» : сб. науч. тр. ; Рос. акад. наук. – М., 2005.
11. Ганджа, С. А. Оптимизация параметров вентильных электрических машин постоянного тока с аксиальным воздушным зазором / С. А. Ганджа // Состояние и перспективы развития электротехнологии (XII Бенардосовские чтения) : тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф., 1–3 июня 2005 г.; Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2005. – Т. 2. – С. 82.
12. Ганджа, С. А. Разработка системы автоматизированного проектирования вентильных машин с аксиальным зазором / С. А. Ганджа // XXV Российская школа «Итоги диссертационных исследований» : сб. науч. тр. ; Рос. акад. наук. – М., 2005. – С. 378–385.
13. Ганджа, С. А. Генератор для ветроэнергетических установок / С. А. Ганджа // Энергетика: экология, надежность, безопасность : материалы докл. Одиннадцатой Всероссийской научно-технической конференции, 7–9 декабря 2005 г. – Томск, 2005. – С. 84–87.
14. Ганджа, С. А. Моделирование вентильного электродвигателя постоянного тока с электромагнитной редукцией / С. А. Ганджа // Сб. трудов Шестой конференции пользователей программного обеспечения CAD_FEMGmbH (20–21 апреля 2006 г.). – М., 2006. – С. 358–360.
15. Ганджа, С. А. Расчет магнитного поля постоянных магнитов стартер-генератора для автономных источников электроснабжения / С. А. Ганджа, А. В. Ерлышева // ЭЛМАШ-2006: Перспективы и тенденции развития электротехнического оборудования : тр. симпозиума: в 2 т. ; Шестой междунар. симпозиум, Москва, 2–6 октября 2006 г. – М., 2006. – Т.2. – С. 111–115.
16. Ганджа, С. А. Моделирование вентильного электродвигателя постоянного тока с электромагнитной редукцией / С. А. Ганджа // Сб. трудов Шестой конференции пользователей программного обеспечения CAD_FEMGmbH (20–21 апреля 2006 г.). – М., 2006. – С. 358–360.
17. Ганджа, С. А. Применение программного комплекса Ansys для анализа вентильных электрических машин постоянного тока с аксиальным зазором / С. А. Ганджа, М. С. Свиридов, А. А. Бедекер // Сб. трудов Шестой конференции пользователей программного обеспечения CAD_FEMGmbH (20–21 апреля 2006 г.). – М., 2006. – С. 361–363.
18. Ганджа, С. А. Расчет магнитного поля в вентильных электрических машинах постоянного тока с аксиальным зазором / С. А. Ганджа // Электромеханические и электромагнитные преобразователи энергии и управляемые электромеханические системы : тр. III Междунар. науч.-техн. конф., Екатеринбург, 27–29 сентября 2007 г. ; Урал. гос. техн. ун-т-УПИ. – Екатеринбург, 2007. – С. 89–91.
19. Ганджа, С. А. Анализ магнитного поля стартер-генератора комбинированного возбуждения / С. А. Ганджа // Электромеханические и электромагнитные преобразователи энергии и управляемые электромеханические системы : тр. III Междунар. науч.-техн. конф., Екатеринбург, 27–29 сентября 2007 г. ; Урал. гос. техн. ун-т-УПИ. – Екатеринбург, 2007. – С. 73–76.

20. Ганджа, С. А. Экологически чистый возобновляемый источник электрической энергии ветроэнергетическая установка 10 кВт / С. А. Ганджа, Е. С. Мастиюкина // Инновационные разработки малого бизнеса Челябинской области ; М-во экон. развития Челяб. обл. – Челябинск, 2007. – Вып. 2.
21. Ганджа, С. А. Дизель-стартер-генераторная установка с высокими массоэнергетическими показателями ДСГУ8-П/28.5-2-М1 / С. А. Ганджа // Инновационный потенциал. Челябинская область : кат. ; М-во экон. развития Челяб. обл. – 2008. – С. 30.
22. Ганджа, С. А. Асинхронизированный синхронный генератор с системой управления для ветроэнергетической установки 10 кВт / С. А. Ганджа // Ресурсосбережение и возобновляемые источники энергии : экономика, экология, опыт применения : по материалам I Междунар. науч.-практ. конф., г. Улан-Удэ, 2008г. : Прил. к журн. «Вестник Междунар. акад. наук экологии и безопасности жизнедеятельности». – СПб. ; Чита, 2008. – Т. 13. – № 3. – С. 117–120.
23. Ветроэнергетическая установка 10 кВт : отчет о НИР (заключ.) : по гос. контракту № 4956р/7317 / рук. Ганджа С. А. – М., 2008. – № ГР 15019.7451229854.07.1.001.9.
24. Ганджа, С. А. Разработка программного комплекса многоуровневой оптимизации вентильных машин с аксиальным зазором / С. А. Ганджа // ЭЛМАШ-2009 : Электроэнергетика и электротехника. Проблемы и перспективы : тр. симпозиума : в 2 т. ; VII Междунар. науч.-техн. конф., Москва, 22–25 сентября 2009 г. – М., 2009. – Т. 1. – С. 164–167.
25. Ганджа, С. А. Применение асинхронизированных синхронных генераторов для ветроэнергетических установок / С. А. Ганджа // ЭЛМАШ-2009 : Электроэнергетика и электротехника. Проблемы и перспективы : тр. симпозиума : в 2 т. ; VII Междунар. науч.-техн. конф., Москва, 22–25 сентября 2009 г. – М., 2009. – Т. 1. – С. 168–170.
26. Ганджа, С. А. Разработка программного комплекса для оптимального проектирования вентильных машин с аксиальным магнитным потоком / С. А. Ганджа // Электромеханика. Электротехнические комплексы и системы : межвузовский сборник научных трудов (Уфимский государственный авиационный технический университет). – Уфа, 2011.
27. Ганджа, С. А. Сравнительный анализ различных конструкций вентильных машин с аксиальным магнитным потоком / С. А. Ганджа // Электромеханика. Электротехнические комплексы и системы : межвузовский сборник научных трудов (Уфимский государственный авиационный технический университет). – Уфа, 2011.
28. Ганджа, С. А. Вентильные электрические машины с аксиальным магнитным потоком. Анализ, синтез, внедрение в производство // Состояние и перспективы развития электротехнологии : XVI Бенардосовские чтения : тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф., 1–3 июня 2011 г. ; Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2011. – Т.2. – С. 62.
29. Ганджа, С. А. Анализ влияния коммутации на электромагнитный момент для вентильных машин с аксиальным магнитным потоком при произвольном числе фаз якорной обмотки. / С. А. Ганджа // Вопросы электромеханики. – 2012. – № 2.

30. Ганджа, С. А. . Сравнительный анализ различных конструктивных исполнений вентильных машин с аксиальным магнитным потоком по развивающейся электромагнитной мощности. / С. А. Ганджа // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2012. – № 2.

В работе [3] автору принадлежит концепция применения номограмм для расчета геометрии вентильных моментных двигателей. В работе [4] автору принадлежит методика расчета коэффициента рассеяния. Он разработал форму номограмм и выполнил их расчет для различных исполнений вентильных моментных двигателей. В работе [5] автору принадлежит методика расчета пульсаций электромагнитного момента для произвольного числа фаз. В работе [15] автору принадлежит постановка задачи и построение расчетной модели. В работе [20] автору принадлежит разработка конструкции ветрогенератора.