

На правах рукописи

Кузьмичев Роман Валерьевич

**ГЕНЕРАТОР В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПЕРСПЕКТИВНОГО
САМОЛЕТА С ПОВЫШЕННЫМ УРОВНЕМ ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ**

Специальность 05.09.03
Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

МОСКВА – 2012

Работа выполнена на кафедре «Электроэнергетические, электромеханические и биотехнические системы» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)».

Научный руководитель: д.т.н., профессор
Зечихин Борис Семенович

Официальные оппоненты: д.т.н., профессор
Лохнин Вячеслав Васильевич
(МГТУ «МАМИ»)

к.т.н.
Савенко Валерий Ананьевич
(ОАО «Аэроэлектромаш»)

Ведущая организация: ОАО «Научно-производственная корпорация
«Космические системы мониторинга, информационно-управляющие и электромеханические комплексы» имени А.Г. Иосифьяна» (ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ»)

Защита состоится 11 декабря 2012 г. в 13 час. на заседании диссертационного совета Д 212.125.07 в Московском авиационном институте (национальном исследовательском университете) по адресу: 125993, А80, г. Москва, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4, главный административный корпус, зал заседаний ученого совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского авиационного института (национального исследовательского университета).

Автореферат разослан «__» _____ 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.125.07
кандидат технических наук



А.Б. Кондратьев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Актуальность темы.

Мощность авиационных систем электроснабжения (СЭС) постоянно увеличивается, повышается их роль. Это обусловлено тем, что электротехнические устройства выполняют многие функции, которые прежде выполняли гидравлические и пневматические системы, включая запуск авиадвигателей. Планово реализуется концепция создания полностью электрического самолета.

На сегодняшний день справедливо утверждать, что дальнейшее развитие авиационных СЭС будет связано с ростом энергопотребления бортового оборудования, обусловленного:

- возможной реализацией концепции полностью электрического самолета;
- появлением гиперзвуковых и воздушно-космических ЛА с энергоемким оборудованием;
- разработкой новых видов оборудования на новых физических принципах действия.

При этом единичная мощность электрогенераторов новейших самолетов уже достигла сотен кВА и будет продолжать расти. В связи с этим возникает проблема эффективной модернизации облика СЭС для новых ЛА. Оценки показывают, что наиболее эффективной в таких условиях станет СЭС постоянного тока повышенного напряжения (270В или выше).

В качестве преимуществ такой СЭС над традиционными системами электроснабжения переменного тока можно отметить:

- снижение удельной массы СЭС на 25 %;
- снижение массы электронных устройств управления на 40%;
- улучшение качества электроэнергии;
- повышение КПД системы на 25 %;
- отсутствие ограничений по частоте вращения генератора;
- простоту обеспечения параллельной работы генераторов.

Достижение указанных преимуществ – необходимый шаг в повышении энергоэффективности не только авиационной СЭС, но и самолета в целом. Поэтому ведение активных исследовательских работ в этом направлении целесообразно. Такими исследованиями занимались и продолжают заниматься научно-исследовательские институты ВНИИЭМ, НИИАО, ЦАГИ и ЦИАМ; предприятия промышленности АКБ Якорь и Аэроэлектромаш; институты МАИ, МЭИ и МАМИ; а также ВВИА им. Жуковского и другие.

Перспективная система генерирования постоянного тока повышенного напряжения включает в себя регулируемый или нерегулируемый по напряжению

бесконтактный генератор переменного тока нестабильной частоты, приводимый во вращение непосредственно от авиадвигателя или через редуктор, и электронный преобразователь стабильного или нестабильного напряжения генератора переменной частоты в постоянное напряжение, а также электрический фильтр, устраняющий пульсации выпрямленного напряжения.

Существует ряд рациональных вариантов реализации подобной системы генерирования как по конструктивным схемам генераторов и системам их возбуждения, так и по типам электронных преобразователей и фильтров. Каждый из этих вариантов имеет свои преимущества и недостатки. При этом выбор и обоснование наиболее рациональных вариантов реализации принятой системы генерирования, а также её элементов при проектировании самолёта являются весьма актуальными. Основное внимание в диссертации уделяется анализу конструктивных схем и активных зон генераторов, работающих в системе с электронными преобразователями.

Наличие в первичной СЭС электронного преобразователя обуславливает необходимость выполнения компьютерного моделирования канала генерирования сначала для определения выходных параметров электрической машины, а затем для подтверждения заданных выходных характеристик системы «генератор + выпрямитель».

С целью обеспечения возможно лучших массогабаритных и энергетических характеристик генератора требуется не только рассмотрение и выбор наилучших вариантов активной зоны генератора и системы охлаждения, подтверждаемых электромагнитными, тепловыми и прочностными расчетами, но и проведение оптимизационных расчетов геометрии активной зоны машины.

Цель работы.

Целью работы является развитие теории и методов автоматизированного проектирования эффективной системы генерирования перспективного самолета с повышенным уровнем электрификации и разработка уточненной методики расчета электрогенератора системы постоянного тока повышенного напряжения мощностью до нескольких сотен киловатт с непосредственным приводом от авиадвигателя, работающего в системе с электронным преобразователем, с улучшенными массогабаритными и энергетическими показателями.

Задачи работы.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- проанализировать состав потребителей электроэнергии перспективного самолета с повышенным уровнем электрификации;
- рассмотреть перспективные облики авиационных СЭС и обосновать рациональную структуру канала генерирования СЭС;

- на основе аналитических решений, конечно-элементного и имитационного моделирования электромагнитных, механических и тепловых процессов уточнить методику проектирования авиационных генераторов в системе с электронным преобразователем и разработать алгоритм оптимизационного расчета генератора с постоянными магнитами для принятой системы генерирования;

- на основе комплекса расчетного проектирования разработать рекомендации по выбору конструктивных схем и параметров авиационного генератора и электронного преобразователя СЭС постоянного тока повышенного напряжения.

Методы исследований.

Методом исследования является расчётный сопоставительный анализ различных конструктивных схем генераторов на основе аналитических решений и компьютерного моделирования электромагнитных, механических и тепловых процессов генераторов, работающих в системе с электронным преобразователем напряжения, с использованием методических разработок автора.

В работе использованы методы теории поля, расчета электрических и магнитных цепей, прочности, нагрева и охлаждения, методы вычислительной математики и программирования. Анализ магнитных полей в активной зоне выполнен на базе метода гармонического анализа, разработанного на кафедре 310 МАИ.

Объект исследований.

Объектом исследований является система генерирования постоянного тока повышенного напряжения перспективного самолета с повышенным уровнем электрификации на базе синхронного генератора (СГ) с высокоэнергетическими постоянными магнитами (ПМ) с непосредственным приводом от авиадвигателя, работающего в системе с электронным преобразователем (выпрямителем).

Научная новизна.

Научная новизна исследований состоит в том, что:

- для указанного состава потребителей перспективного самолета с повышенным уровнем электрификации обоснована система электроснабжения постоянного тока мощностью до нескольких сотен кВт на основе генераторов с РЗ магнитами с непосредственным приводом от авиадвигателя с электронными преобразователями;

- разработана имитационная модель системы генерирования, позволяющая связать заданные параметры нагрузки с параметрами электромеханического и электронного преобразователя;

- предложены конструктивные схемы активной зоны статора генератора с РЗ магнитами с $q = 0.25$ и $q = 0.5$, встраиваемого в авиадвигатель, и активной зоны ротора с радиальными магнитами с немагнитными вставками в полюсных наконечниках;

- методом гармонического анализа и конечно-элементного моделирования решена задача магнитного поля в активной зоне с немагнитными вставками, позволяющая определить расчетные коэффициенты магнитной цепи;
- разработана методика автоматизированного расчета СГ с радиальными РЗ магнитами на основе аналитических решений и конечно-элементного моделирования. Разработаны компьютерные модели для данной методики с целью исследования электромагнитных, механических и тепловых процессов в активной зоне СГ;
- разработана программа оптимизации расчета активной зоны генератора с радиальными РЗ магнитами;
- показано, что генератор с РЗ магнитами и электронным преобразователем эффективен в стартерном режиме для электрозапуска авиадвигателей.

Практическая ценность.

Разработаны рекомендации по выбору конструктивных схем генераторов системы генерирования постоянного тока повышенного напряжения как встраиваемых в авиадвигатель, так и вынесенных, приводимых от повышающего редуктора.

Показана принципиальная возможность создания генератора постоянного тока напряжением 270В для СЭС мощностью до нескольких сотен кВт с лучшими удельными массогабаритными и энергетическими показателями, чем у имеющихся авиационных привод-генераторов систем переменного тока.

Разработаны проекты СГ мощностью 150 и 180 кВА с возбуждением от ПМ для встроенного в авиадвигатель варианта исполнения. Разработан проект СГ мощностью 200 кВА с возбуждением от ПМ, вынесенного на коробку самолетных агрегатов авиадвигателя с приводом от редуктора.

Разработанная методика расчета системы генерирования на основе компьютерных технологий может быть использована для расчетов аналогичных СЭС.

Реализация результатов.

Разработанные проекты генераторов, рекомендации, а также методики расчета системы генерирования и оптимизации активной зоны СГ могут быть использованы предприятиями отрасли при разработке систем генерирования и основных источников СЭС постоянного тока напряжением 270В для перспективных самолетов с повышенным уровнем электрификации.

Достоверность полученных результатов.

Достоверность результатов определяется корректным использованием методов математической физики и вычислительной математики, положений теории поля, методов расчета электрических и магнитных цепей, прочности, нагрева и охлаждения

и подтверждается сходимостью результатов исследований с результатами численных и натурального экспериментов.

Апробация работы.

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

1. Всероссийская конференция молодых ученых и студентов «Информационные технологии в авиационной и космической технике – 2008», г. Москва, МАИ, 2008 г.
2. Всероссийская молодежная научно-техническая конференция молодых ученых и специалистов системы среднего и высшего профессионального образования «Молодые ученые – авиастроению России», конкурсная работа, г. Жуковский, 2009 г. (работа отмечена дипломом ОАО «ОАК» за 1-е место)
3. XVI Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика», г. Москва, МЭИ, 2010 г.
4. Научно-практическая конференция молодых ученых, аспирантов и студентов МАИ «Инновации в авиации и космонавтике – 2010», г. Москва, МАИ, 2010 г.
5. XVI и XVII Международный симпозиум «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова, с. Ярополец, 2010 и 2011 гг.
6. XX Международный научно-технический семинар «Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации», г. Алушта, 2011 г.
7. XIV международная конференция «Супервычисления и математическое моделирование», г. Саров, 2012 г.

Публикации.

По теме диссертации опубликованы две научные статьи в журналах «Вестник МАИ» и «Труды МАИ», входящих в перечень научных изданий, рецензируемых ВАК РФ, а также 7 научных работ в трудах конференций, семинаров и симпозиумов.

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, 5-ти глав, заключения, списка литературы и приложения; имеет 140 страниц основного текста, 45 рисунков, 8 таблиц и 102 наименования в списке литературы.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показаны тенденции развития авиационной техники, определены предпосылки реализации концепции полностью электрического самолета, указаны достоинства перспективной системы электроснабжения постоянного тока повышенного напряжения. Обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи диссертационных исследований, определена научная новизна и практическая ценность работы, а также приведены сведения о структуре и объеме работы.

В первой главе определены направления реализации концепции полностью электрического самолета, указаны ее преимущества для авиатранспортных компаний, самолетостроительных и двигателестроительных фирм. Показано влияние повышения уровня электрификации на облик и характеристики СЭС. Сформулированы основные требования к авиационным СЭС. Дан обзор типов существующих и перспективных СЭС с указанием основных преимуществ и недостатков. Проведен анализ состояния развития СЭС в отечественной и зарубежной авиации. Приведены примеры облика СЭС для некоторых современных самолетов, основные структуры и сведения по уровню мощности. Показана перспективность применения системы постоянного тока напряжением 270В со стартер-генераторами.

Во второй главе проведен анализ состава потребителей самолета с повышенным уровнем электрификации. Сформулированы исходные данные для проектирования системы генерирования постоянного тока напряжением 270В, в т.ч. требования по уровню и качеству выходного напряжения, а также режимам работы СЭС. Установлен диапазон мощности основного генератора на уровне 150÷200 кВА.

Дан анализ особенностей вариантов размещения генератора внутри авиадвигателя (встроенное исполнение) и на коробке самолетных агрегатов (вынесенное исполнение). Использование систем генерирования на основе генераторов и стартер-генераторов, встроенных в авиадвигатели, позволяет уменьшить лобовое сопротивление и массу самолета. Пространство внутри авиадвигателя для размещения генераторов может быть выделено на валу компрессора низкого, а при допустимых температурных условиях и на валу компрессора высокого давления. Недостатком системы со встроенным генератором является то, что частота его вращения равна частоте вращения вала авиадвигателя, тогда как использование редуктора позволяет повысить частоту вращения генератора до оптимальной и снизить его массу. Отмечается, что генераторы с возбуждением от постоянных магнитов не обеспечивают возможность развозбуждения при аварийных режимах. Эта функция должна осуществляться дополнительным устройством.

В главе представлены возможные схемы выпрямителей. Наилучшими характеристиками обладают полностью управляемая мостовая схема на тиристорах (рис. 1) и схема импульсного регулирования (рис. 2).

Достоинством варианта на рис. 1 является однократное преобразование энергии. Недостаток – значительная масса дросселя, индуктивность которого определяет пульсации тока в соединительном проводе фильтра. Достоинством варианта на рис. 2 является практически постоянство тока в проводе, соединяющем стабилизатор с выпрямителем. Недостатками являются двукратное преобразование энергии и высокая частота пульсаций токов в дросселе и в первичной цепи стабилизатора. На основании комплексного анализа указанных вариантов схем, в т.ч. с учетом массогабаритных показателей, выбрана полностью управляемая мостовая схема.

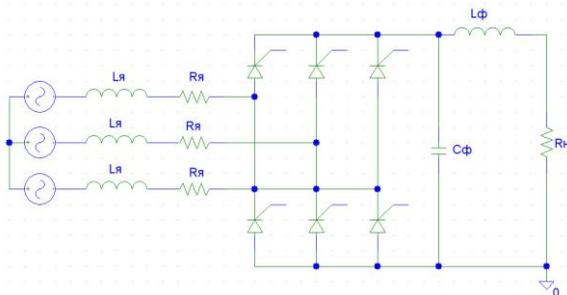


Рисунок 1 – Полностью управляемая мостовая схема.

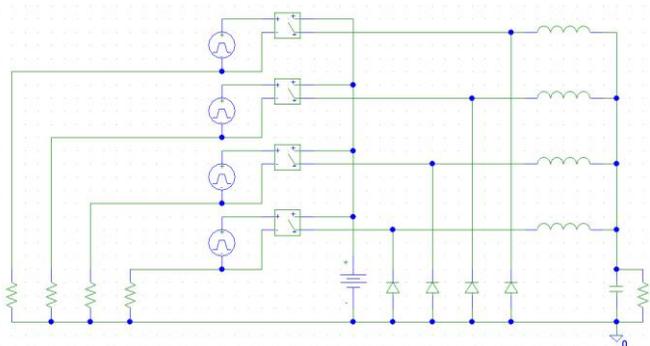


Рисунок 2 – Схема импульсного регулирования.

В главе проанализированы варианты электрических машин, возможных к применению в качестве генераторов системы электроснабжения постоянного тока напряжением 270В. Рассмотрены классические синхронные генераторы с электромагнитным возбуждением, генераторы с возбуждением от высокоэнергетических постоянных магнитов, индукторные и вентильно-индукторные генераторы, а также генераторы с комбинированной системой, объединяющей электромагнитное возбуждение и постоянные магниты.

В главе проанализированы варианты электрических машин, возможных к применению в качестве генераторов системы электроснабжения постоянного тока напряжением 270В. Рассмотрены классические синхронные генераторы с электромагнитным возбуждением, генераторы с возбуждением от высокоэнергетических постоянных магнитов, индукторные и вентильно-индукторные генераторы, а также генераторы с комбинированной системой, объединяющей электромагнитное возбуждение и постоянные магниты.

Авиационный генератор с электромагнитным возбуждением с синхронным возбудителем и подвозбудителем с постоянными магнитами представляет собой агрегат, состоящий из трёх машин, размещённых на одном валу в общем корпусе. Такие генераторы обладают достаточно высокими массоэнергетическими показателями и могут выполняться на мощность в несколько сотен кВА. Недостатком генератора с синхронным возбудителем является отсутствие стартерного режима работы агрегата. Этот недостаток устраняется при использовании асинхронного возбудителя. Однако, при одинаковой мощности основного генератора размеры и масса асинхронного возбудителя больше массы синхронного. Это обусловлено тем, что в номинальном

режиме работы генератора активная зона асинхронного возбудителя переключается с трёх фаз на две и используется лишь на две трети.

Индукторные и вентильно-индукторные генераторы просты по конструкции и надежны в эксплуатации, что обусловлено наличием безобмоточного и практически монолитного ротора и расположением рабочей обмотки на статоре. Помимо этого к их достоинствам следует отнести хорошее регулирование, возможность использовать токи высокой частоты, работоспособность в сложных окружающих условиях. Главными недостатками вентильно-индукторных машин являются увеличенные масса и объем по сравнению с обычными синхронными машинами из-за развитого магнитопровода, необходимого для проведения не только переменной составляющей магнитного потока, но и постоянной. Они практически вдвое тяжелее, чем генераторы с постоянными магнитами при одинаковой частоте вращения.

Генераторы с комбинированным возбуждением из-за наличия осевого магнитного потока имеют худшие массогабаритные показатели чем классические синхронные и ограничены по предельной мощности на уровне порядка 100 кВА. С точки зрения регулирования выходного напряжения они занимают промежуточное положение и могут работать в системе с неуправляемыми выпрямителями, например, в системе резервного электропитания от ВСУ.

Генераторы с возбуждением от высокоэнергетических постоянных магнитов не требуют затрат мощности на возбуждение и имеют поэтому повышенный КПД. Они обладают более высокой механической прочностью, могут иметь мощность до нескольких сотен кВА и меньшую массу по сравнению с вышеперечисленными генераторами. Генераторы с ПМ могут выполняться с большим числом полюсов, что позволяет снизить массу ярма индуктора, якоря и фильтра выпрямителя. Выходное напряжение генераторов с возбуждением от ПМ практически пропорционально изменяющейся частоте вращения, что не является существенным недостатком при наличии управляемого выпрямителя в системе генерирования, т.к. уровень выходного напряжения регулируется величиной угла отпираания тиристорov.

В диссертации предпочтение отдается генераторам с радиальными ПМ. Они обладают более высокой механической прочностью по сравнению с генераторами с тангенциальными ПМ, которые имеют массивные полюсные наконечники и требуют более прочной обоймы для их крепления. Генераторы с тангенциальными ПМ обеспечивают более высокую индукцию в зазоре, но это не всегда приводит к снижению массы магнитной цепи генератора.

На основании результатов анализа различных типов электрических машин для реализации в системе генерирования постоянного тока повышенного напряжения целесообразно использовать синхронный генератор с ПМ, обеспечивающий величину удельной массы генератора порядка 0,25 кг/кВА при КПД 95%.

В третьей главе рассматривается влияние комплекса различных конструктивно-технологических решений и выбора электромагнитных нагрузок на массогабаритные и энергетические показатели генератора и системы генерирования повышенной мощности.

Предельная мощность синхронного генератора снижается при повышении частоты вращения при заданной допустимой окружной скорости $V_{дон}$.

$$S_p = D^2 l \sigma_u n = D^3 \lambda \sigma_u n = 2.16 \cdot 10^5 \frac{V_{дон}^3}{\pi^3 n^2} \lambda \sigma_u \quad (1)$$

где S_p - расчетная мощность генератора, l - длина его пакета, $\lambda = l/D$ - конструктивный коэффициент, σ_u - коэффициент использования, определяемый электромагнитными нагрузками.

При неизменной относительной длине генератора λ это снижение пропорционально квадрату частоты вращения. Повышение предельной мощности генератора возможно за счет увеличения его длины при сохранении диаметра, что приводит к ухудшению условий охлаждения. Для генераторов предельной мощности значения линейной нагрузки A , индукции в зазоре B_δ и плотности тока в обмотке якоря j выбираются максимально допустимыми с учётом перегрузок и системы охлаждения.

РЗ магниты при одинаковом магнитном потоке возбуждения имеют в три-четыре раза меньший объём и массу, чем обмотки возбуждения располагаемые на полюсах ротора. Увеличение числа полюсов $2p$ снижает сечение ярма ротора и статора и массу магнитной системы, но ведёт к росту потерь в стали и снижению КПД генератора. В проектах исследуемых генераторов принято $2p = 8 \div 12$. К снижению массы фильтра выпрямителя ведет также увеличение числа фаз рабочей обмотки. Возможно использовать шестифазную или девятифазную несимметричную обмотку, состоящую из двух или трёх трёхфазных со сдвигом на 20 или 30 эл. градусов.

Электромагнитные нагрузки генераторов A , B_δ и j существенно определяют их габариты. Повышение магнитной индукции в рабочем зазоре и других элементах магнитной цепи снижает массу, но ограничивается насыщением стали. Аналогично повышение линейной нагрузки и плотности тока ведёт к снижению массы генератора. Однако при этом возрастают потери и требуется более интенсивное охлаждение. Наиболее эффективными являются жидкостные системы охлаждения с использованием топлива или масла. В проектах генераторов принята канальная система охлаждения топливом. Определение наилучшего соотношения массы и КПД генератора приводит к задаче многокритериальной оптимизации.

В главе рассмотрены особенности реализации генератора встроенного исполнения. Актуальная задача повышения электрической прочности обмотки может обеспечиваться при раздельном изготовлении зубцов с катушками подобно обмоткам возбуждения машин постоянного тока с их последующим креплением к статору ма-

шины (рис. 3). При такой конструкции число пазов на полюс и фазу может выбираться дробным и меньшим единицы (например, 0,25 или 0,5).

Такая активная зона на примере СГ с тангенциальными ПМ при числе пар полюсов $p = 6$, числе фаз $m = 3$, числе пазов на полюс и фазу $q = 0,25$ и числе зубцов $z = 2 \cdot p \cdot m \cdot q = 9$ приведена на рисунке 4. В

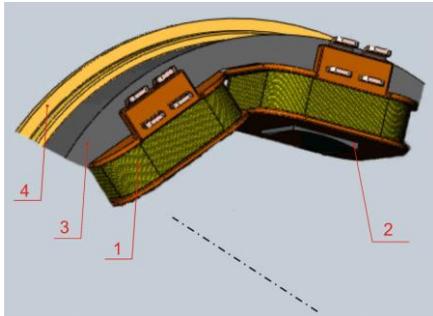


Рисунок 3 - Организация катушечной обмотки.
1 - катушка, 2 - зубец статора, 3 - магнитопровод статора, 4 - корпус.

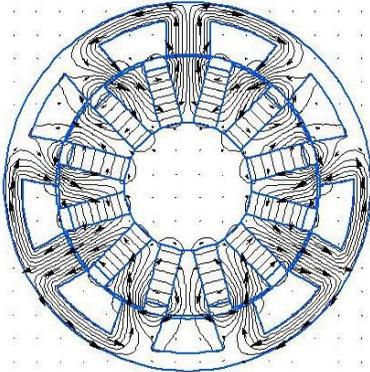


Рисунок 4 - Активная зона СГ с $q = 0,25$

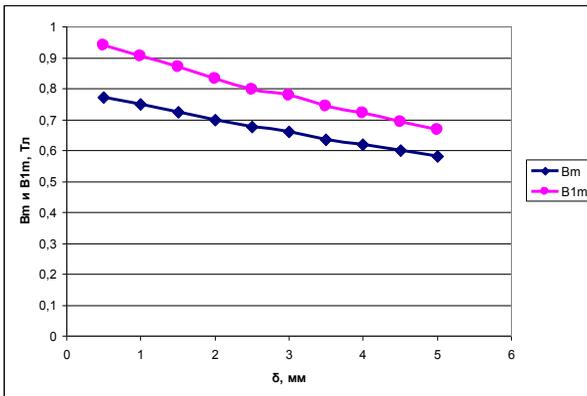


Рисунок 5 - Влияние величины зазора на индукцию в генераторе с ПМ.

главе показано, что для такой геометрии характер изменения магнитного потока в зубце при повороте ротора, а значит и ЭДС, имеет синусоидальную форму.

Другой важной задачей для генератора встроенного исполнения является обеспечение надежного крепления ПМ на роторе. Это возможно при некотором увеличении толщины немагнитного бандажа. Магнитная проницаемость магнита $\mu_{\text{магн}} \approx \mu_0$, поэтому, в отличие от машин с электромагнитным возбуждением, в генераторе с ПМ возрастание суммарного зазора не приводит к значительному падению магнитного потенциала (рис. 5).

Из рис. 5 видно, что при увеличении суммарного немагнитного зазора в десять раз (с 0,5 мм до 5 мм) амплитуда первой гармоники B_{m1} падает лишь на 29%, а максимальное значение индукции B_m в зазоре – на 25%.

В главе предложена уточненная методика расчета генератора на основе коэффициентов магнитной цепи и даны результаты выполнения комплекса расчетного проектирования трех генераторов по этой методике. Она включает расчет главных размеров, электромагнитные, тепловые, прочностные, весовые и энер-

гетические расчеты. В расчетах учтены следующие требования: диапазон частоты вращения $n = (0.65...1) \cdot n_{max}$; работа при номинальной нагрузке – длительно, при полупорной перегрузке – в течение 5 мин и при двойной перегрузке – в течение 5 секунд во всем диапазоне частоты вращения. Результаты расчетов приведены в табл. 1.

Таблица 1

	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
Тип генератора	<i>Встроенный</i>	<i>Встроенный</i>	<i>Вынесенный</i>
Номинальная полная мощность [кВА]	150	180	200
Расчетная частота вращения [об/мин]	8600		16000
Макс. частота вращения [об/мин]	14000		25000
Число фаз [-]	3		
Фазное напряжение [В]	120		
Число пар полюсов [-]	6		4
Частота переменного напряжения [Гц]	860÷1400		1067÷1667
Внутренний диаметр [мм]	180	210	130
Осевая длина пакета [мм]	170	160	260
Конструктивный коэффициент [-]	1,4	1,4	1,75
Масса генератора [кг]	41,3	46,94	52,29
Удельная масса генератора [кг/кВА]	0,275	0,26	0,261
КПД в номинальном режиме [%]	95,8	96,0	96,0

Результаты расчетов подтверждены результатами конечно-элементного моделирования электромагнитных, прочностных и тепловых процессов. На рис. 6÷8 соответственно приведены результаты моделирования для генератора вынесенного исполнения мощностью 200 кВА.

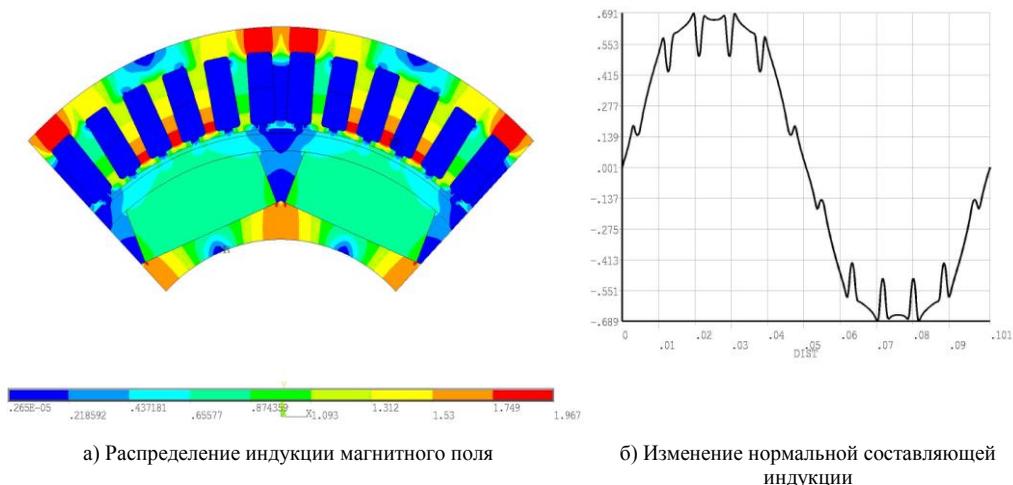
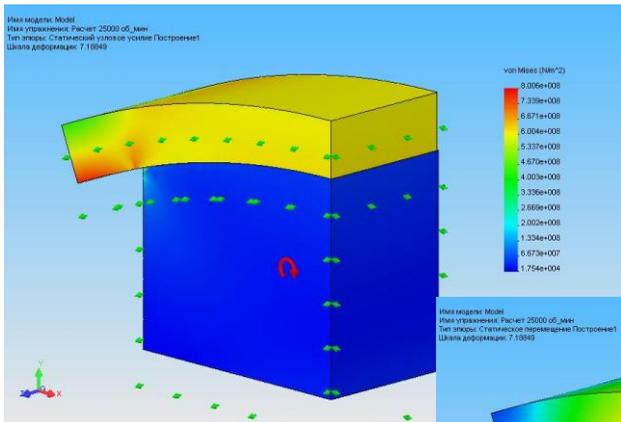
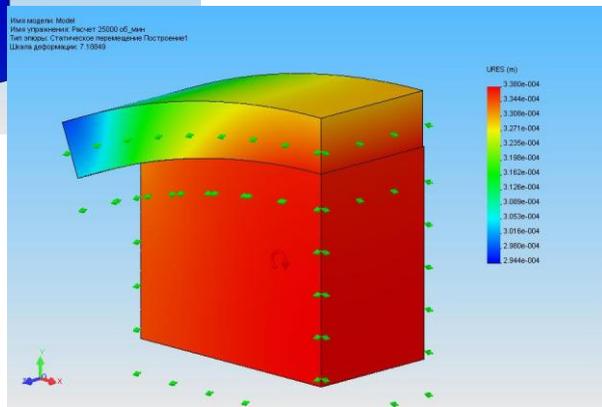


Рисунок 6 - Моделирование электромагнитной системы.



а) эпора механических напряжений



б) эпора перемещений

Рисунок 7 - Результаты механического расчета обоймы ротора.

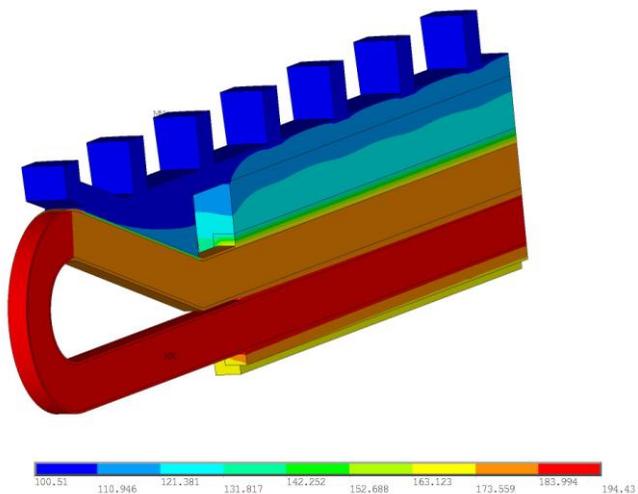


Рисунок 8 - Результаты теплового расчета при номинальной нагрузке.

Полученные результаты моделирования подтверждают величину расчетной ЭДС генератора 160.7 В, свидетельствуют об эффективности выбранной канальной системы охлаждения топливом с расходом 0.6 кг/сек и корректности выбора толщины титановой обоймы, равной 4 мм.

В четвертой главе изложены порядок, ход и результаты оптимизации генератора, выполненной с целью улучшения массогабаритных показателей. Целевой функцией является минимум массы, механический и тепловой расчеты формируют функциональные ограничения, метод оптимизации – метод покоординатного спуска. Разработана методика оптимизации, блок-схема которой представлена на рисунке 9.



Рисунок 9 – Блок-схема оптимизации

Оптимизационные расчеты проводились для генератора мощностью 200кВА вынесенного исполнения, рассчитанного в третьей главе. В ходе оптимизации рассмотрены четыре конструктивные схемы ротора, представленные на рисунке 10. Первая схема (рис. 10 а) с немагнитной титановой обоймой соответствует конструктивной схеме ротора генератора, для которой выполнен базовый расчет.

В работе проведены исследования целесообразности перехода от титановой обоймы к обойме из градиентного материала, в обычном состоянии магнитного, в котором тепловым путем формируются немагнитные зоны. Такая конструкция показана на второй схеме (рис. 10 б). Также исследованы способы снижения индуктивного сопротивления поперечной реакции якоря. ЭДС поперечной реакции якоря $E_{яq}$

негативно влияет на угол размагничивания ψ машины и снижает величину напряжения генератора (рис. 11).

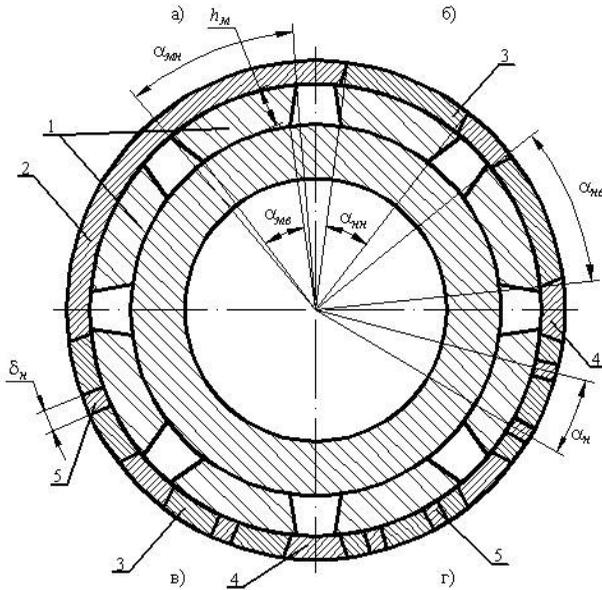


Рисунок 10 - Конструктивные схемы ротора оптимизируемого СГ.

а) с немагнитной титановой облоймой, б) с облоймой из градиентного материала; в) с облоймой из градиентного материала и немагнитным промежутком под центром полюса; г) с облоймой из градиентного материала и двумя симметричными немагнитными промежутками под полюсом; 1 - редкоземельный постоянный магнит КС25ДЦ-240; 2 - немагнитная титановая облойма; 3 - магнитный полюсный наконечник облоймы из градиентного материала; 4 - немагнитный межполюсный промежуток облоймы из градиентного материала; 5 - немагнитная вставка облоймы из градиентного материала.

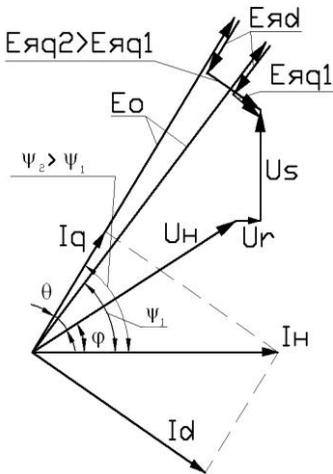


Рисунок 11 – Векторная диаграмма СГ

Предложены конструкции с одной немагнитной вставкой под центром полюса (третья схема – рис. 10 в) и двумя симметричными вставками относительно оси полюса (четвертая схема – рис. 10 г).

Оптимизационные расчеты проведены для всех схем. Приняты постоянные параметры и параметры оптимизации. Для первой схемы количество параметров оптимизации равно трем, для второй – пяти, для третьей – шести, для четвертой – семи.

Для оптимизации генератора была реализована программа, в которой параметры оптимизации варьируются по методу покоординатного спуска.

Порядок расчетов следующий: сначала вычисляется необходимая толщина облоймы ротора, затем определяются расчетные коэффициенты магнитных полей возбуждения и реакции якоря, а также значение магнитной индукции в зазоре в режиме холостого хода, далее выполняется итерационный процесс определения геометрических размеров активной зоны, и затем рассчитывается масса активных элементов, масса генератора и его удельная масса.

Результаты расчета третьей конструктивной схемы показали явную нерациональность располагать немагнитный промежуток под центром полюса, так как это снижает основную гармоническую индукции поля возбуждения, что при сохранении суммарной величины магнитного потока через рабочий зазор значительно ухудшает массовые характеристики генератора. Для остальных схем оптимизационный расчет дает некоторый эффект по снижению массы генератора и определяет наилучшие геометрические размеры индуктора. Полученные значения удельной массы генераторов приведены в табл. 2.

Таблица 2.

	Базовый до оптимизации	Первая схема после оптимизации	Вторая схема после оптимизации	Четвертая схема после оптимизации
Удельная масса, кг/кВА	0,261	0,221	0,222	0,214

Таким образом, по результатам оптимизации можно видеть, что четвертая схема генератора является наилучшей за счет эффективного использования симметричных немагнитных вставок в полюсных наконечниках.

Результаты оптимизационных расчетов были проверены моделированием магнитного поля в активной зоне генератора с учетом реальной зубчатой поверхности статора и насыщения элементов магнитопровода генератора. На рис. 12 приведена форма магнитного поля в режиме перегрузки.

В результате получены малые рассогласования, отмечено хорошее совпадение результатов конечно-элементного моделирования и оптимизационного расчета. Так, например, для четвертой схемы расчетная ЭДС генератора по результатам моделирования составляет 146,6В, а по результатам расчета оптимизационной программой – 152,9 В. Рассогласование при этом составляет 4,1%.

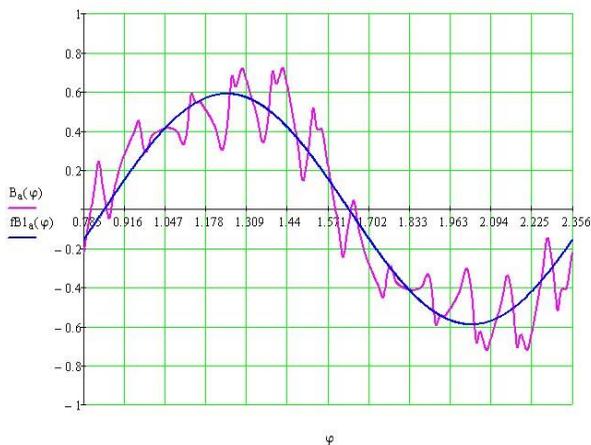


Рисунок 12.

В главе представлено решение задачи магнитного поля в активной зоне синхронной машины с радиальными ПИМ и обоймой с чередующимися магнитными и немагнитными промежутками с произвольным количеством немагнитных промежутков в полюсном наконечнике под полюсом.

Решение задачи позволяет определить расчетные коэффициенты магнитной цепи машины для электромагнитного расчета: коэффициент формы поля возбуждения k_f , коэффициент формы ЭДС k_B , коэффициент потока возбуждения k_Φ , коэффициенты реакции якоря по продольной и поперечной оси k_{ad} и k_{aq} и расчетный коэффициент полюсного перекрытия α_i . На рисунке 13 представлена расчетная модель активной зоны генератора в полярной системе координат.

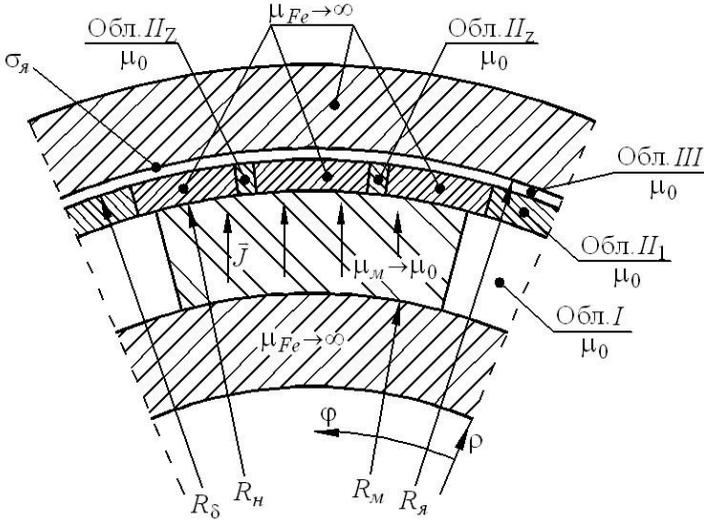


Рисунок 13 – Расчетная модель.

В соответствии с методом гармонического анализа сложная область активной зоны представлена совокупностью простых однородных частичных областей:

- областью радиальных постоянных магнитов $I = \left\{ \begin{array}{l} R_M \leq \rho \leq R_H \\ 0 \leq \varphi \leq \alpha_\tau \end{array} \right\}$;
- областями немагнитных промежутков в обойме $II_z = \left\{ \begin{array}{l} R_H \leq \rho \leq R_\delta \\ \beta_z \leq \varphi \leq \beta_z + \alpha_z \end{array} \right\}$, где $z = \overline{1, Z}$, Z - количество немагнитных промежутков на полюсном делении, β_z и α_z - соответственно смещение и угловая ширина немагнитного промежутка с номером z ;
- областью рабочего зазора $III = \left\{ \begin{array}{l} R_\delta \leq \rho \leq R_\alpha \\ 0 \leq \varphi \leq \alpha_\tau \end{array} \right\}$.

В частичной области I магнитостатическое поле описывается системой уравнений

$$\{rot\vec{H} = 0 \quad div\vec{B} = 0 \quad \vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{J})\}, \quad (2)$$

а в частичных областях II_z ($z = \overline{1, Z}$) и III – системой уравнений

$$\{rot\vec{H} = 0 \quad div\vec{B} = 0 \quad \vec{B} = \mu_0\vec{H}\}. \quad (3)$$

Вводя векторный магнитный потенциал \vec{A}

$$\{rot\vec{A} = \vec{B} \quad div\vec{A} = 0\}, \quad (4)$$

переходим для частичной области I от решения системы уравнений (2) к решению внутренней краевой задачи Неймана для уравнения Пуассона

$$\Delta A = -\mu_0 [rot\vec{J}]_z, \quad (5)$$

а для частичных областей II_z ($z = \overline{1, Z}$) и III – от решения системы уравнений (3) к решению внутренней краевой задачи Неймана для уравнения Лапласа

$$\Delta A = 0. \quad (6)$$

В результате решения данных уравнений получены выражения:

$$\begin{aligned} A_I(\rho, \varphi) = & Const + \rho \sum_{n=1,3,\dots}^{N \rightarrow \infty} [A_n \cos(np\varphi)] + \\ & + \sum_{n=1,3,\dots}^{N \rightarrow \infty} \left[\frac{P_n R_M (\rho/R_n)^{np} + (\rho/R_n)^{-np}}{np} \cos(np\varphi) \right] - \\ & - \sum_{n=1,3,\dots}^{N \rightarrow \infty} \left[\frac{R_n (\rho/R_M)^{np} + (\rho/R_M)^{-np}}{np} \left([F_n^{(lc)} + P_n] \cos(np\varphi) + F_n^{(ls)} \sin(np\varphi) \right) \right], \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} A_{II}^{(z)}(\rho, \varphi) = & Const + C_z \ln \rho + \sum_{k=1}^{K \rightarrow \infty} \left[\left(\frac{\Psi_{kz}^{(1)} R_H [\rho/R_\delta]^{\alpha_{kz}} + [\rho/R_\delta]^{-\alpha_{kz}}}{\alpha_{kz} R_{II}^{\alpha_{kz}} - R_{II}^{-\alpha_{kz}}} - \right. \right. \\ & \left. \left. - \frac{\Psi_{kz}^{(2)} R_\delta [\rho/R_H]^{\alpha_{kz}} + [\rho/R_H]^{-\alpha_{kz}}}{\alpha_{kz} R_{II}^{\alpha_{kz}} - R_{II}^{-\alpha_{kz}}} \right) \cos(\alpha_{kz}(\varphi - \beta_z)) \right], \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned}
A_{III}(\rho, \varphi) = Const + \sum_{n=1,3,\dots}^{N \rightarrow \infty} \left[\frac{R_{\delta} [\rho/R_{я}]^{np} + [\rho/R_{я}]^{-np}}{np R_{III}^{np} - R_{III}^{-np}} \times \right. \\
\left. \times \left(F_n^{(2c)} \cos(np\varphi) + F_n^{(2s)} \sin(np\varphi) \right) \right] - \mu_0 \sum_{n=1,3,\dots}^{N \rightarrow \infty} \left[\frac{R_{я} [\rho/R_{\delta}]^{np} + [\rho/R_{\delta}]^{-np}}{np R_{III}^{np} - R_{III}^{-np}} \times \right. \\
\left. \times \left(\sigma_n^{(c)} \cos(np\varphi) + \sigma_n^{(s)} \sin(np\varphi) \right) \right], \quad (9)
\end{aligned}$$

где $R_I = R_M/R_H$, $R_{II} = R_H/R_{\delta}$, $R_{III} = R_{\delta}/R_{я}$, $\alpha_{kz} = k\pi/\alpha_z$, p – число пар полюсов.

Неизвестные коэффициенты в формулах (7), (8), (9) определены из условия равенства на границах раздела частичных областей нормальных составляющих индукции, что соответствует равенству тангенциальных производных векторного магнитного потенциала, а также из условия равенства нулю магнитного потока через замкнутую поверхность, ограничивающую магнитные промежутки обмотки.

Таким образом, получено аналитическое решение рассматриваемой задачи магнитного поля. Его достоверность подтверждена методом конечных элементов в результате компьютерного моделирования геометрии активной зоны.

На основании данного решения получены выражения для определения расчетных коэффициентов машины. Выражения приведены в главе.

В пятой главе приведены результаты численного и натурального экспериментов, подтверждающие достоверность предлагаемых расчетных методик.

Проведено моделирование работы канала генерирования СЭС постоянного тока напряжением 270В в составе «генератор-выпрямитель» с целью подтверждения работоспособности системы, подтверждения возможности обеспечения рассчитанным генератором требуемых уровней выходной мощности и напряжения системы генерирования для номинального и перегрузочных режимов, а также подтверждения возможности регулирования выходного напряжения изменением угла отпирания тиристорov. Модель показана на рис. 13. Она включает модели генератора, выпрямителя, блока управления, нагрузки и блок задания параметров.

В результате исследований установлено, что спроектированный генератор обеспечивает требуемый уровень напряжения при номинальной нагрузке и перегрузках при заданном диапазоне частоты вращения (рис. 14 а). Кроме того, результаты моделирования подтверждают возможность системы регулировать уровень выходного напряжения изменением угла отпирания тиристорov (рис. 14 б). Пунктирная кривая соответствует $\alpha_{тип}=0$ (при этом $U_{вых}=500В$), а сплошная – $\alpha_{тип}$, необходимому для достижения требуемого уровня напряжения 270В.

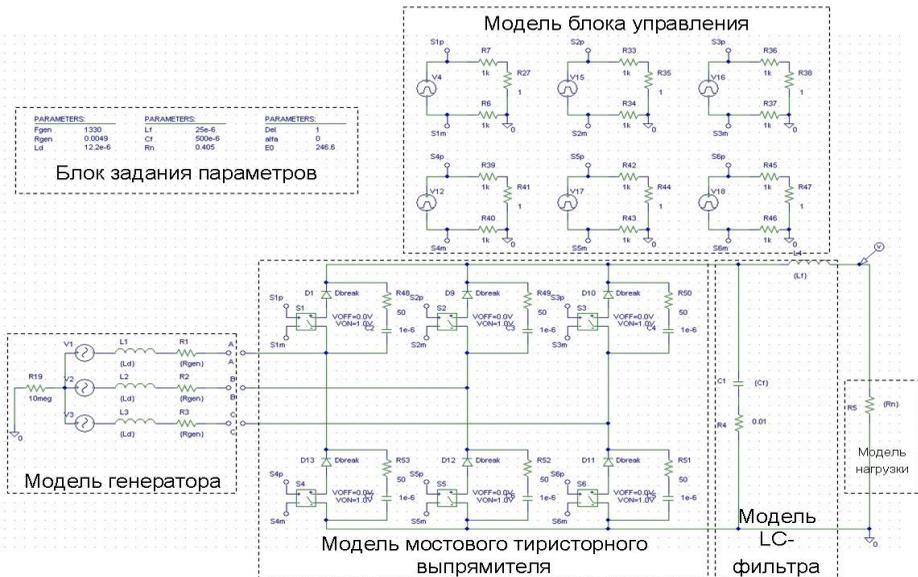
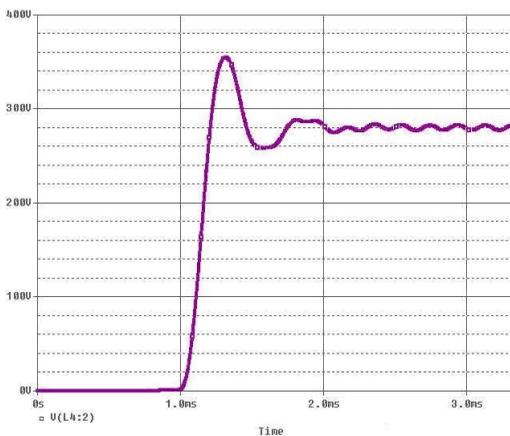
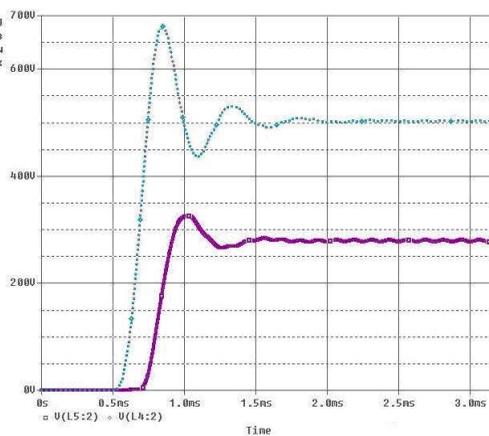


Рисунок 13 - Модель канала системы генерирования.



а) Выходное напряжение системы



б) Регулирование выходного напряжения системы

Рисунок 14.

В главе проведена проверка справедливости предлагаемой методики проектирования генератора посредством сравнения характеристик существующего генератора типа ГТ-90 (рис. 15) и генератора с аналогичными параметрами, рассчитанного по методике. В таблице 3 дано сравнение результатов по массе и КПД, а на рис. 16 приведены внешняя характеристика генератора, рассчитанного по методике, и результаты испытаний генератора ГТ-90.



	ГТ-90	Расчет генератора по методике
Масса активных материалов, кг	23,35	24,7
КПД, %	96,4	94,8

Рисунок 15 – Генератор ГТ-90.

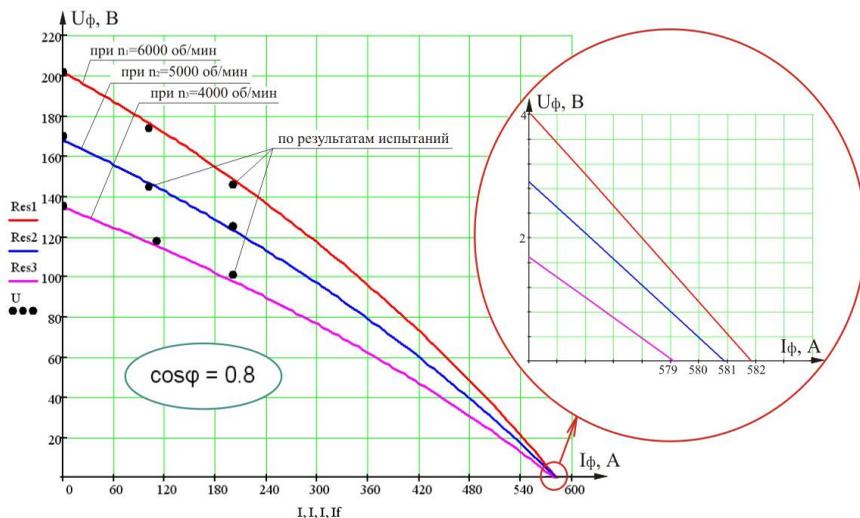


Рисунок 16 – Внешняя характеристика и результаты испытаний.

Данные табл. 3 и рис. 16 показывают высокую степень сходимости результатов (в пределах 5-7%), что свидетельствует о достоверности предлагаемой расчетной методики проектирования.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Обоснована структура канала генерирования СЭС постоянного тока напряжением 270В для самолета с повышенным уровнем электрификации, в которой генератор переменного тока мощностью 100...300 кВА, приводимый во вращение непосредственно от авиадвигателя, работает в составе с мостовым тиристорным выпрямителем. Показана целесообразность использования генератора в стартерном режиме для электрозапуска авиадвигателей;

2. Создана имитационная модель канала генерирования СЭС постоянного тока напряжением 270В. Она позволяет соотнести выходные параметры нагрузки системы постоянного тока с выходными параметрами генератора, а также подтвердить работоспособность системы генерирования с уже рассчитанными генератором и выпрямителем при различных частотах вращения приводного вала генератора и величинах потребляемого тока;

3. В качестве генераторов целесообразно применение синхронных машин с постоянными магнитами, которые превосходят другие типы машин по энергетическим и массогабаритным показателям и позволяют достичь величину удельной массы на уровне $m_{уд} = 0.25$ кг/кВА при конструктивном коэффициенте $k_{констр} = 1.75$;

4. Показано, что рациональным числом полюсов рассматриваемого СГ является $2p = 8 \dots 12$, а использование шести- и девятифазных несимметричных обмоток якоря при числе пазов на полюс и фазу $q = 2$ и 3 позволяет повысить электрическую частоту напряжения с целью снижения массы выходного фильтра;

5. Для статора СГ с ПМ, встроенного в авиадвигатель, предложена конструктивная схема активной зоны с числом пазов на полюс и фазу, меньшим единицы (например, $q = 0.25$ или $q = 0.5$), и обмотками катушечного типа;

6. На основе сопоставительного анализа конструкций роторов с немагнитными и биметаллическими обоями предложена конструктивная схема активной зоны СГ с ПМ с ферромагнитными наконечниками и немагнитными вставками;

7. Решена задача магнитного поля в активной зоне СГ с радиальными ПМ и обоймой с произвольным количеством чередующихся магнитных и немагнитных промежутков. Показано, что для снижения индуктивного сопротивления поперечной реакции якоря целесообразно использование двух немагнитных вставок;

8. Разработана методика автоматизированного расчетного проектирования генератора для СЭС постоянного тока повышенного напряжения, для которой созданы компьютерные модели для исследований электромагнитных, механических и тепловых процессов. С ее применением показано, что для рассматриваемого уровня мощности достижимы следующие показатели генераторов: для генератора встроенного исполнения при частоте вращения $8500 \div 14000$ об/мин удельная масса $0,27$ кг/кВА при КПД 96%, для генератора вынесенного исполнения при частоте вращения $16000 \div 25000$ об/мин удельная масса $0,25$ кг/кВА при КПД 96%;

9. Разработана методика и составлена программа оптимизационного расчета активной зоны генератора, позволяющие улучшить его массогабаритные показатели на $10 \div 15\%$;

10. Достоверность предложенных методик и созданных компьютерных моделей подтверждена численными и натурным экспериментами.

Основные результаты диссертации изложены в следующих публикациях:

1. Кузьмичев Р.В., Левин Д.В., Мисютин Р.Ю., Зечихин Б.С. Авиационные генераторы повышенной мощности // Вестник МАИ. – 2011 г. – т. 18. №6.
2. Журавлев С.В., Зечихин Б.С., Кузьмичев Р.В. Авиационные генераторы постоянного тока повышенного напряжения. XX Международный научно-технический семинар «Современные технологии в задачах управления, автоматики и обработки информации». Тезисы докладов. – Пенза.: Изд-во ПГУ – 2011 г.
3. Кузьмичев Р.В., Зечихин Б.С. Генератор системы электроснабжения полностью электрифицированного самолета. XVI Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». Тезисы докладов. Том 2. – М.: МЭИ. 2010 г.
4. Кузьмичев Р.В., Ситин Д.А., Степанов В.С. Исполнительные механизмы петлеобразной формы // Труды МАИ. № 45. – 2011 г.
5. Кузьмичев Р.В. Генератор в системе электроснабжения самолета с повышенным уровнем электрификации. Всероссийская молодежная научно-техническая конференция молодых ученых и специалистов системы среднего и высшего профессионального образования «Молодые ученые – авиастроению России». Конкурсная работа. Жуковский. 2009 г.
6. Кузьмичев Р.В. Перспективная авиационная система генерирования. Научно-практическая конференция молодых ученых, аспирантов и студентов «Инновации в авиации и космонавтике – 2010». Тезисы докладов. – М.: МАИ. – 2010 г.
7. Ситин Д.А., Кузьмичев Р.В., Непейвода И.М. Проектирование стартер-генератора для самолета с повышенным уровнем электрификации. Всероссийская конференция молодых ученых и студентов «Информационные технологии в авиационной и космической технике – 2008». Тезисы докладов. – М.: МАИ. – 2008 г.
8. Кузьмичев Р.В., Панько К.С., Самсонович С.Л., Степанов В.С. Оценка вариантов реализации приводной системы створок грузоотсека перспективных летательных аппаратов с повышенным уровнем электрификации. Материалы XVI Международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова. – Ч.: ГУП «ИПК «Чувашия» – 2010 г.
9. Крылов Н.В., Кузьмичев Р.В., Самсонович С.Л., Степанов В.С. О выборе функциональной схемы электромеханического привода складывания крыла палубного самолета. Материалы XVII Международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова. Том 1. – М.: ООО «ГР-принт». – 2011 г.