

На правах рукописи



Калий Валерий Алексеевич

СИСТЕМА РАЗРАБОТКИ
ВЫСОКООБОРОТНЫХ АВИАЦИОННЫХ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ
С ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

Специальность:

05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Москва – 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Научный консультант

Мусин Сергей Миргасович,
доктор технических наук, профессор,
руководитель группы Центра проектирования
Акционерного общества «Технодинамика»

Официальные оппоненты

Костиков Владимир Григорьевич,
доктор технических наук, профессор, начальник
отдела ПАО «НПО «АЛМАЗ»
Захаренко Андрей Борисович,
доктор технических наук, доцент,
начальник отдела общих научно-технических
разработок Акционерного общества
«Корпорация ВНИИЭМ»
Шевлюгин Максим Валерьевич,
доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой «Электроэнергетика
транспорта» Федерального государственного
бюджетного образовательного учреждения
высшего образования "Российский университет
транспорта (МИИТ)"

Ведущая организация

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Национальный исследовательский
университет «МЭИ»

Защита диссертации состоится **29 октября 2019 года** на заседании диссертационного совета Д 212.125.07 в Московском авиационном институте (национальном исследовательском университете) по адресу: г. Москва, Волоколамское шоссе, д.4, корпус 57, аудитория 302.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» и на сайте: <http://www.mai.ru/events/defence>

Ваш отзыв на автореферат в количестве двух экземпляров, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 125993, ГСП-3, А-80, Москва, Волоколамское шоссе, д.4, Ученый совет МАИ.

Автореферат разослан _____ 2019 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 212.125.07,

к.т.н.



В.С. Степанов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Развитие авиационных комплексов гражданского и военного назначения приводит к появлению новых функций, ужесточению требований к безопасности полетов, улучшению надежности воздушных судов. В настоящее время из-за отсутствия современных систем электроснабжения и мощных силовых электрических приводов отечественные летательные аппараты электрифицированы не более чем на 25%. В силу развития электрификации воздушного судна возникает необходимость иметь на борту несколько видов первичных, вторичных, специальных, дополнительных, аварийных систем электроснабжения, различающихся по параметрам и показателям качества электроэнергии. Интеграция этих систем приводит к созданию электроэнергетического комплекса летательного аппарата, предназначенного для обеспечения качественной электроэнергией исполнительных устройств, которые решают задачи, выполняемые ранее неэлектрическими средствами: управление рулевыми поверхностями самолета, электрический запуск авиадвигателей и т.п.

Необходимость в первичных и вторичных системах электроснабжения для летательных аппаратов, различающихся по параметрам и показателям качества электроэнергии, формирует проблему создания первичных источников тока повышенной мощности на основе высокооборотных синхронных генераторов, отличающихся высокими удельными характеристиками с параметрами и показателями качества электроэнергии, удобными для эффективного преобразования в системах электроснабжения бортового многофункционального оборудования. Наиболее остро стоит вопрос о создании мощных первичных источников электроэнергии для «более электрического самолета».

В проблеме создания первичных источников тока на основе высокооборотных синхронных генераторов, отличающихся высокими удельными характеристиками, с параметрами и показателями качества электроэнергии, удобными для эффективного преобразования во вторичных системах электроснабжения, выделяются три основных аспекта, определяющих самостоятельные научно-технические разделы:

1. Создание энергетически эффективных систем электроснабжения переменного тока переменной частоты широкого диапазона.
2. Создание электромеханических преобразователей энергии, обладающих функциями стартера-генератора.
3. Оптимальное проектирование электромеханических преобразователей энергии для достижения энергетической их эффективности в составе системы электроснабжения.

Диссертация посвящена разработке и созданию системы проектирования авиационных генераторов для электроснабжения летательных аппаратов (ЛА) в сфере решения государственной задачи создания высокоэффективных источников для систем электроснабжения перспективных летательных аппаратов. Система проектирования предназначена для обеспечения процессов эскизного, технического и рабочего проектирования авиационных синхронных генераторов с электромагнитным возбуждением. Система разработки генераторов для электроснабжения летательных аппаратов представляет собой совокупность методологий моделирования, расчета, проверки расчетов, анализа и синтеза электромеханических преобразователей, баз данных и баз знаний в виде алгоритмов и программ, аппаратных средств хранения и обработки информации, свода модифицированных производственных иерархических правил и рекомендаций принятия решений.

Степень разработанности темы исследования

На поиск теоретических оснований, методологических решений предметной и объектной сферы настоящей работы решающее воздействие оказали работы отечественных и зарубежных ученых, как в области электротехнических систем, так и других научных направлений.

Теория электрических машин и электрических систем: Е. Арнольд, Б.Л. Алиевский, А.И. Бертинов, Д.Э. Брускин, Д.А. Бут, А.И. Вольдек, И.А. Глебов, К.С. Демирчян, Б.С. Зечихин, А.В. Иванов-Смоленский, Л.К. Ковалев, И.П. Копылов, М.П. Костенко, М.М. Красношапка, А.Н. Ледовский, В.Т. Морозовский, Л.М. Пиотровский, Р. Рихтер, Г.А. Сипайлов, Д. Стреттон, Д. Уайт, И.Д. Урусов.

Методология науки, логика, системология: А.А. Богданов, С.С. Гончаров, А.А. Зиновьев, Д. Клир, А.М. Новиков, К.Ф. Самохвалов.

Подходы и методы к проектированию электрических машин, оценка теплового состояния, переходные процессы: Г.Н. Алюшин, В.А. Балагуров, А.И. Важнов, В.А. Веников, В.А. Винокуров, Я.Л. Витенберг, Ф.Ф. Галтеев, В.Я. Геча, А.А. Горев, О.Д. Гольдберг, Ф.Р. Исмагилов, Ю.Г. Иванишин, Д.Л. Калужский, О.Г. Ключков, К.Л. Ковалев, В.И. Наumenко Л.И. Поспелов, Н.Д. Торопцев, В.П. Шуйский.

Методики проектирования построены на основе опыта методологий Simulink, Matlab, пакета масштабируемых программных решений для поддержки жизненного цикла изделий Teamcenter.

Объект исследования: бесконтактная электрическая машина в составе системы генерирования, рассматриваемая как отдельная система с обратными связями, целевой функционал оценки качества конструкции которой, представляет совокупность значений тактико-технических параметров и технико-экономических показателей.

Предмет исследования: методологии моделирования, расчета, проверки расчетов, анализа и синтеза электромеханических преобразователей энергии в терминах проектирования авиационных высокооборотных синхронных генераторов с электромагнитным возбуждением.

Цель работы

Целью диссертационной работы является разработка методов, алгоритмов и программ, обеспечивающих проектирование источников электрической энергии для современных и перспективных авиационных систем электроснабжения на основе высокооборотных бесконтактных генераторов с электромагнитным возбуждением без привода постоянной частоты вращения, в условиях снижения времени и трудоемкости проектирования.

Реализация поставленной цели достигается решением ряда задач

Решение проблемы создания первичных электромеханических преобразователей электроэнергии высокооборотных синхронных генераторов достигается развитием прикладных аспектов математической физики и теории поля для решения уравнений электродинамики, теории электромеханического преобразования энергии, теории электрических машин, разработкой методов моделирования, созданием электромеханических преобразователей энергии для систем генерирования с учетом достижений в области электротехнических материалов и электронных компонентов.

Достижение сформулированной цели требует решения ряда методических, научно-исследовательских и инженерно-технических задач, основными из которых являются:

1. Разработка концептуального представления проблемы создания первичных источников электроэнергии на основе высокооборотных синхронных генераторов с параметрами и показателями качества электроэнергии, необходимыми для эффективного преобразования на основе проблемно-целевого анализа и моделирования канала генерирования авиационной системы электроснабжения.

2. Определение эффективных подходов к анализу статических и динамических режимов синхронного генератора с электромагнитным возбуждением на основе методик двухуровневого имитационного моделирования.

3. Разработка алгоритмов проектирования синхронных генераторов, в которых обосновано применение методов поиска локальных экстремумов однозначно определенных по критерию оптимальности на разных этапах проектирования.

4. Разработка алгоритмов полного проектирования конструкции синхронного генератора, которые включают упорядоченную совокупность электромагнитных, механико-динамических, гидравлических и тепловых расчетов, проводимых на этапе технического проектирования.

5. Систематизация и обобщение закономерностей этапа технического проектирования электрической машины, в результате которого создается полноценная конструкция на основе 3D-модели. Такой подход позволяет при условии атрибутирования элементов модели перейти к безбумажной технологии проектирования подобных электрических машин.

6. Разработка методологии проведения электромагнитных расчетов электрических машин на основе рационального использования аналитических методик и методов конечно-элементного анализа, включающих:

- концепцию и многоуровневую систему проектирования высокооборотных синхронных генераторов с электромагнитным возбуждением на основе итерационных циклов на этапе технического проектирования;
- аналитические модели показателей и параметров, определяющих энергетическую эффективность высокооборотных синхронных генераторов с электромагнитным возбуждением;
- методику проектирования конструкций высокооборотных синхронных генераторов с электромагнитным возбуждением;
- способы проведения электромагнитных, механико-динамических, гидравлических и тепловых поверочных расчетов.

Система разработки генераторов систем электроснабжения летательных аппаратов решает следующие технические задачи:

- выбор структуры системы электроснабжения по каналности, роду тока, мощности, величинам номинальных параметров и качеству электроэнергии;
- эскизное и техническое проектирование электромеханических преобразователей электроэнергии, авиационных высокооборотных синхронных генераторов с электромагнитным возбуждением;
- опытно-конструкторское проектирование электромеханических преобразователей электроэнергии, авиационных высокооборотных синхронных генераторов с электромагнитным возбуждением, с применением методов оптимального проектирования;
- проверочные и поверочные расчеты в составе опытно-конструкторского проектирования электромеханических преобразователей электроэнергии;
- верификацию математических моделей электромеханических преобразователей электроэнергии, авиационных высокооборотных синхронных генераторов с электромагнитным возбуждением и систем электроснабжения в целом;
- верификацию 3D-моделей электромеханических преобразователей;
- содержание баз данных по нормативно-технической документации, построенной по иерархическому принципу;
- создание рабочей конструкторской документации в составе: конструкторская документация, конструкторская текстовая документация, конструкторская программная документация.

Методология и методы исследований: системные методы, эмпирическое и эвристическое моделирование, теоретико-множественное моделирование. Теоретические исследования проводились с использованием фундаментальных отечественных и зарубежных трудов по теории, методам, методикам проектирования электрических машин, реализованных в проектах авиационных электрических машин на отечественных и зарубежных воздушных судах. Для достижения цели и задач исследования были выполнены специальные теоретические и экспериментальные работы.

Научная новизна работы заключается в разработке научно обоснованных технических решений для обеспечения проектирования энергоэффективных систем генерирования электроэнергии летательных аппаратов нового поколения, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие экономики России и повышению ее обороноспособности.

В диссертационной работе получены следующие новые результаты:

- методика определения главных геометрических размеров высокооборотного синхронного генератора, основанная на применении метода неградиентного случайного поиска с обучением по способу Д.И. Гладкова;
- расчетная допустимая область главных размеров высокооборотного синхронного генератора с электромагнитным возбуждением с номинальной мощностью 250 кВА и выше;
- методика имитационного моделирования режимов работы синхронного генератора, основанная на совместном решении двух типов динамического моделирования;

– методика оптимального проектирования высокооборотного синхронного генератора с электромагнитным возбуждением, основанная на локальном применении параметрических методов поиска однозначно определенного критерия оптимальности на разных этапах проектирования;

– методология оптимального проектирования высокооборотных синхронных генераторов как совокупность упорядоченных методов разработки конструкции на этапе технического проектирования;

– теоретические и экспериментальные данные, подтверждающие основные положения разработанной автором методологии оптимального проектирования высокооборотных генераторов с электромагнитным возбуждением.

Теоретическая и практическая значимость работы

Разработанные методы создают методологию проектирования синхронных авиационных генераторов для систем электроснабжения авиационной техники. Они позволили создать ряд генераторов и стартер-генераторов, сформировать систему их проектирования, отвечающую современным требованиям.

Защищаемые положения:

1. Расчетная модель бесконтактного синхронного генератора с электромагнитным возбуждением с номинальной мощностью 250 кВА для работы в канале системы генерирования тяжелого самолета в диапазоне частот вращения от 10800 до 24000 мин⁻¹ без привода постоянной частоты вращения.

2. Методика определения главных геометрических размеров высокооборотного синхронного генератора, основанная на применении метода неградиентного случайного поиска с обучением, разработанного Д.И. Гладковым.

3. Методика имитационного моделирования режимов работы синхронного генератора, основанная на совместном решении двух типов задач динамического моделирования: связанных геометрических моделей, исследуемых методом конечных элементов и системы дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами.

4. Многоуровневая система проектирования высокооборотных синхронных генераторов с электромагнитным возбуждением на основе итерационных циклов на этапе технического проектирования.

5. Комплекс методик оптимального проектирования высокооборотного синхронного генератора с электромагнитным возбуждением, основанный на локальном применении параметрических методов оптимизации для поиска локального критерия оптимальности в области, заданной ограничениями на разных этапах проектирования.

6. Методология оптимального проектирования высокооборотных синхронных генераторов как совокупность упорядоченных методов разработки конструкции на этапе технического проектирования.

Степень достоверности результатов работы

Полученные результаты строго обоснованы с использованием современного математического аппарата. Достоверность полученных автором результатов подтверждена сравнительным анализом аналитических решений поставленных научных задач с результатами полунатурных и натурных испытаний, внедрением полученных автором решений в конкретные разработки систем электроснабжения воздушных судов, соблюдением правил составления и тестирования вычислительных программ и алгоритмов, метрологическими возможностями оборудования, его аккредитацией в ГОССТАНДАРТе России.

Практическая ценность работы состоит в том, что разработанные методы создают систему проектирования и разработки высокооборотных авиационных синхронных генераторов с электромагнитным возбуждением. Они позволили создать систему генерирования самолета нового поколения Ил-112В и создать экспериментальные образцы генераторов переменного тока переменной частоты с электромагнитным возбуждением для канала генерирования среднемагистрального пассажирского самолета, отвечающие современным требованиям.

Реализация результатов исследования

Основные научно-методические и опытно-конструкторские разработки внедрены в АО «Технодинамика», АО «УАПО», ПАО «Ил», ПАО «Корпорация «Иркут», ПАО «Компания «Сухой» и других научно-исследовательских и производственных организациях РФ при разработке:

– опытного образца высокооборотного синхронного генератора с электромагнитным возбуждением ГСР-40НЧ, обладающего высокими массо-энергетическими удельными характеристиками, для самолета нового поколения Ил-112В в условиях серийного производства АО «УАПО»;

– экспериментального образца высокооборотного синхронного генератора ГСР-90/120 с номинальной мощностью 120 кВА для нового самолета МС-21, который по основным характеристикам не уступает синхронным генераторам американской корпорации Hamilton Sunstrand, которые предварительно устанавливаются на этом воздушном судне;

– полные 3D-модели синхронных генераторов различной мощности во исполнение заказа Министерства промышленности и торговли РФ в течение 2015–2016 гг., включая системы электроснабжения самолетов разработки фирмы «Гражданские самолеты Сухого» типа SSJ;

– технического проекта синхронного генератора с электромагнитным возбуждением с номинальной мощностью 250 кВА, который работает в диапазоне частот вращения от 10800 до 24000 мин⁻¹ и действующих аналогов в России не имеет.

Апробация работы

Основные положения и результаты проведенных исследований докладывались и обсуждались:

– на Международной конференции «Электромеханика, Электротехнологии, Электротехнические материалы и Компоненты», Республика Крым, Алушта, 2014 г.;

– Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 110-летию А.М. Бамдаса, Уфа, 2015 г.;

– Международной конференции «More Electric Aircraft Europe», Hamburg, Germany, 2016;

– Научно-технических конференциях «Электрификация летательных аппаратов», (ИПУ РАН им. А.А. Трапезникова, г. Москва, 2016 г., 2017 г.);

– Всероссийской научно-технической конференции «Научные чтения по авиации, посвященные памяти Н.Е. Жуковского» (Москва, 2017 г., 2018 г.);

– III и IV Всероссийских научно-технических конференциях на базе ЦНИИ ВВС Минобороны России (Люберцы, 2017 г., 2018 г.);

– 17 Международной конференции «Авиация и космонавтика» (МАИ (НИУ), г. Москва, 2018 г.).

Публикации

Основное содержание диссертации изложено в одной монографии и 29 статьях и патентах, из них 11 публикаций в изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки, одна статья в издании, входящего в международную систему цитирования «Scopus», 6 патентов на изобретение.

Личный вклад автора. В диссертации представлены результаты научных исследований, выполненных самим автором или под его непосредственным руководством. Личный вклад состоит в идентификации проблемы и постановке задач исследования, разработке методологии, технических и технологических решений, непосредственном участии в выполнении основного объема теоретических и экспериментальных исследований опытных образцов, системном анализе, обобщении полученных результатов и формулировке выводов, создании опытных образцов, подготовке основных публикаций по выполненной работе.

Структура и объем диссертации

Диссертация изложена на 283 стр. машинописного текста и состоит из введения, четырех глав с выводами, заключения по работе, списка использованной литературы, включающего 135 наименований. Диссертация иллюстрирована 97 рисунками и 43 таблицами.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** сформулированы проблема и цель работы, подлежащие решению. Показана актуальность темы диссертации и степень разработанности темы исследования. Сформулированы научная новизна и практическая ценность работы. Приведены сведения об ее апробации.

Первая глава посвящена анализу концептуального представления проблемы создания первичных источников электроэнергии с параметрами и показателями качества электроэнергии для авиационных систем электроснабжения. Проблема рассматривается в разрезе развития концепции самолета с единым видом энергии второго уровня, для которой наиболее естественным образом подходит электрическая энергия. Исходя из рассмотрения основных проблем в реализации концепции «полного электрического самолета» (ПЭС) в качестве объекта исследования обосновывается выбор бесконтактного высокооборотного синхронного генератора как основного источника электроэнергии системы электроснабжения перспективных самолетов. На основе анализа состояния вопроса определен перечень проблем и задач, подлежащих рассмотрению в данной работе, главной из которых является создание методологии оптимального проектирования высокооборотных синхронных генераторов с электромагнитным возбуждением.

Проведен анализ энергетической концепции современного самолета и разработана концептуальная энергетическая модель летательного аппарата. К первому уровню энергетической концепции относится преобразование химической энергии топлива в тепловую энергию и далее в механическую энергию, необходимую для перемещения ЛА в пространстве. Ко второму уровню относится энергия, отбираемая от маршевого двигателя для функционирования системы электроснабжения, питающей бортовое оборудование, систем гидро- и пневмоэнергии. Распределение энергии второго уровня на 70% осуществляется электрическим путем в нормальном режиме и на 90% в аварийном режиме.

В последние 15 лет, как в Российской Федерации, так и за рубежом ведутся интенсивные работы по исследованию и внедрению на средних, тяжелых транспортных и пассажирских самолетах элементов и систем ПЭС.

Некоторые элементы концепции частично реализованы на новых пассажирских самолетах А-380 и Боинг 787, что позволило существенно повысить эксплуатационные и технико-экономические показатели этих ЛА.

Частичная электрификация оборудования этих ЛА привела к значительному увеличению мощности бортовых источников электрической энергии. Так, на самолете А-380 установленная суммарная электрическая мощность переменного тока достигает 800 кВА, а на Боинг 787 – 1,5 МВА. При этом рост мощности системы электроснабжения, согласно данным технического отчета о перспективном дальнемагистральном самолете Aquila, будет только возрастать. Средняя мощность систем электроснабжения летательных аппаратов имеет тенденцию удваиваться каждые 20 лет (рисунок 1).

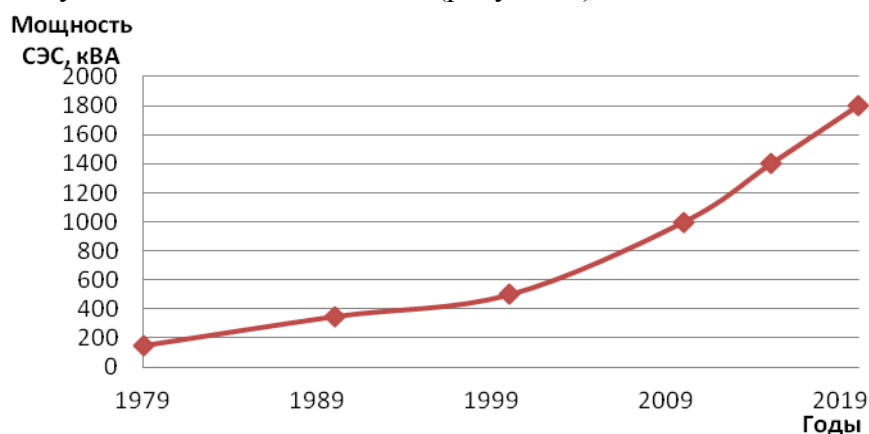


Рисунок 1 – Рост мощности систем электроснабжения ЛА

По всем совокупным результатам проведенных исследований была разработана Государственная программа Российской Федерации «Развитие авиационной промышленности на 2013–2025 годы», в рамках которой проводятся работы по направлению: «Определение технического облика и создание экспериментальных образцов перспективных авиационных систем и агрегатов с опережающим научно-техническим уровнем, обеспечивающим конкурентоспособность перспективных летательных аппаратов в будущем».

Одной из важнейших работ, осуществляемых в соответствии с данной государственной программой, является работа по созданию системы электроснабжения для среднемагистрального пассажирского самолета на основе высокоскоростных генераторов переменного тока с номинальной мощностью не менее 120 кВА с прямым приводом от маршевого двигателя.

Проектирование электрической машины такого типа начинается с установления свойств назначения системы электроснабжения объекта. Суть свойств назначения системы электроснабжения объекта определяется по предназначению летательного аппарата как сложного объекта, которое выражается кортежем:

$$Q_{\text{сэс}} = \sum: \{r^+, r, x, M, N, P, V\}y, \quad (1)$$

где $r^+ \in R^+$ и $r \in R$ – соответственно наборы и допустимые совокупности используемых и создаваемых свойств объекта;

Установление свойств проектируемой системы электроснабжения и ее состояний осуществляется разработкой логико-трансформационных правил:

$$O: \{сэс\}P_i \xRightarrow{U_{kl}(n)} P_j, \quad (2)$$

где P_i – описание необходимого состояния системы;

i – отличительный признак (номер) системы;

P_j – описание текущего состояния системы;

j – отличительный признак (номер) текущего состояния системы;

k – отличительный признак (номер) составного объекта системы;

l – отличительный признак (номер) свойства составного объекта системы;

n – число различных признаков объекта;

U_{kl} – метод (метрика) поверочного наблюдения (расчета) объекта системы.

Общая постановка и решение проблемы настоящей работы состоит в сквозном взаимосвязанном цикле процессов и процедур комплексного проектирования, в отличие от многочисленных аналогов проектирования системы, где данные процедуры рассредоточены по объектам системы.

При проектировании применимы различные величины – метрические, физические, количественные, безусловные, математические. Оцениваемые объекты выражаются через средства естественного языка и величины неметрические, качественные, условные. Формальное описание для вычислений свойств проектируемого объекта системы электроснабжения имеет следующее выражение:

$$O_i = \{(a_i, A_i | i \in N_n), (b_j, B_j | j \in N_m)\}, \quad (3)$$

где N_n, N_m – множество значений натуральных чисел. $(1, 2, 3, \dots, n, \dots, m)$;

a_i, A_i – свойство проектируемого объекта и множество его проявлений;

b_j, B_j – база и множество его элементов.

Содержание задачи структурируется следующим образом:

а) установление необходимого состава числовых и нечисловых областей определений;

б) решение задачи согласования левых и правых границ областей определения;

в) обоснование выбора ведущей области определения, которая является основной базой наблюдения свойств объектов;

г) составление схемы метрического пространства и ее формальное описание;

д) разработка методики вычисления величин избранной предметной области.

Система электроснабжения современных ЛА – типичный пример централизованной системы, где управление качеством энергии производится в ее источнике. А для регламентации взаимных влияний введены ГОСТ Р 54073-2017 [128, 129] в Российской Федерации (ранее ГОСТ Р 54073-2010) и стандарт MIL-STD-704F в США, определяющие качество электроэнергии и основные параметры исполнительных систем как приемников электроэнергии.

Исследования по выбору типа и параметров системы электроснабжения применительно к среднемагистральному самолету типа МС-21 показали, что по совокупности показателей (масса, потери, надежность СЭС) наилучшие характеристики обеспечивают СЭС трехфазного переменного тока переменной частоты 360...800 Гц и СЭС постоянного тока повышенного напряжения 270 В для электроснабжения локальных силовых приводов. На современных самолетах Боинг 787 и А-380 применяются именно эти системы электроснабжения.

В 2015 г. в рамках работ по созданию широкофюзеляжного дальнемагистрального пассажирского самолета (ШФДМС) сформулированы основные требования к его системе электроснабжения.

Система электроснабжения самолета типа ШФДМС является многоуровневой и состоит из следующих подсистем:

- первичной системы генерирования переменным трехфазным током номинальным напряжением 230/400 В переменной частоты 360...800 Гц повышенной мощности (250 кВА на один канал);
- вторичной системы генерирования переменным трехфазным током номинальным напряжением 115/200 В постоянной частоты 400 Гц;
- вторичной системы генерирования (преобразования) постоянным током с номинальным напряжением 270 В;
- вторичной системы генерирования (преобразования) постоянным током номинальным напряжением 27 В;
- электрической сети внешнего (аэродромного) питания;
- первичной системы распределения электроэнергии переменного тока 230/400 В;
- вторичной системы распределения электроэнергии переменного тока 115/200 В;
- вторичной системы распределения электроэнергии постоянного тока 270 В;
- первичной системы распределения электроэнергии постоянного тока 27 В (от аккумуляторных батарей);
- вторичной системы распределения электроэнергии постоянного тока 27 В;
- системы контроля и управления системой электроснабжения самолета.

Анализ СЭС энерговооруженных самолетов показал, что основным источником электроэнергии является канал генерирования, построенный на основе синхронного генератора переменной частоты вращения.

Ограничение по реализуемой удельной мощности интегральных привод-генераторов постоянной частоты вращения на уровне 180...200 кВА при частоте вращения генератора не более 8000 мин⁻¹, привело к тому, что при создании новых авиационных генераторов ведущие зарубежные разработчики отказались от их применения. Для современных самолетов А-380 и Боинг 787 разработаны и серийно выпускаются генераторы переменной частоты вращения, работающие в диапазоне частот 10800...24000 мин⁻¹ (360...800 Гц) с номинальной мощностью до 250 кВА (Hamilton Sundstrand) и 150 кВА (Goodrich).

Этот тип системы генерирования отличаются наибольшим разнообразием возможных технических и технологических решений, как по генератору, так и его системе охлаждения. По научно-технической оценке в ближайшее десятилетие перспективными являются два варианта построения канала генерирования:

– система генерирования электроэнергии на основе синхронного генератора с электромагнитным возбуждением без применения привода постоянной частоты вращения или генератором комбинированного типа.

– система генерирования на основе магнитоэлектрического (неуправляемого или управляемого) генератора с регулированием мощности при последовательном включении статического преобразователя или частичном регулировании, при параллельном включении статического преобразователя.

В качестве основного источника канала генерирования первичной системы электроснабжения применимы следующие электрические машины:

– вентильно-индукторные синхронные генераторы с соотношением зубцов статора и ротора 6/4 с частотой переменного тока до 2400 Гц;

– индукторные генераторы с аксиальным потоком возбуждения при максимальной частоте вращения до 24000 мин⁻¹, с частотой переменного тока до 1600 Гц;

– генераторы с постоянными магнитами с нерегулируемым напряжением переменного тока с максимальной частотой вращения до 24000 мин⁻¹, до 1200 Гц.

– генераторы с электромагнитным возбуждением классического типа (бесщеточные с возбудителем и с вращающимся выпрямителем) со стабилизированным напряжением на максимальную частоту вращения до 24000 мин⁻¹, с частотой переменного тока от 360 до 800 Гц.

Накопленный опыт проектирования показывает, что магнитоэлектрический генератор (МЭГ) по конструкции будет наиболее компактным. По энергетическим характеристикам такой генератор даже на самой низкой частоте вращения превышает 90%, что как минимум на 10% выше, чем у синхронного генератора с электромагнитным возбуждением. В ОАО «АКБ «Якорь» был накоплен уникальный опыт по созданию магнитоэлектрических машин и систем генерирования, спроектированных на их основе. К таким системам можно отнести системы генерирования СГ-ПСПЧ-Д, СГА-ОН (самолеты Ту-204/214), СЭП-4Р, ГС-0,35 (специальная техника) и др. В 2012 г. на этом предприятии был спроектирован экспериментальный образец магнитоэлектрического генератора СГ-90/120НП номинальной мощностью 120 кВА с непосредственным жидкостным охлаждением, масса которого составила 57 кг.

Наилучшими массовыми характеристиками обладает в настоящее время статический преобразователь постоянного тока повышенного напряжения 270 В, спроектированный компанией UTC Hamilton Sundstrand мощностью 130 кВт с автономным жидкостным охлаждением, масса которого составила 60 кг.

Таким образом, суммарная масса работоспособного канала генерирования с номинальной мощностью 120 кВА без учета устройств коммутации, при сложении условной массы генератора СГ-90/120НП и статического преобразователя UTC, составляет в настоящее время 117 кг.

Бесконтактный (бесщеточный) трехфазный генератор с вращающимся выпрямителем состоит из трех электрических машин, установленных на одном валу: основного генератора классической конструкции; обращенного возбудителя; подвозбудителя, который выполнен в виде магнитоэлектрического генератора.

Масса отдельных образцов генераторов такого типа достигает 70 кг (масса канала –75 кг) с учетом встроенной системы охлаждения, что более чем на 20% больше чем аналогичный показатель у магнитоэлектрического генератора. Синхронный трехкаскадный генератор имеет два существенных преимущества:

– выходное напряжение на обмотке якоря соответствует требованиям к качеству электроэнергии без применения дополнительных устройств обеспечения качества электроэнергии;

– масса блока регулирования, защиты и управления не превышает 5 кг.

Таким образом, система генерирования на основе бесконтактного синхронного генератора с вращающимися выпрямителями по массе на 30% меньше, чем масса системы генерирования на основе магнитоэлектрического генератора в области номинальной мощности 120...250 кВА, и отличается минимальной мощностью управления при заданном качестве электроэнергии.

Вторая глава посвящена анализу методов проектировочных, поверочных электромагнитных, тепловых, гидравлических и механических расчетов электрических машин. В этой главе рассмотрены совмещенная численная модель основного генератора и возбудителя авиационного синхронного генератора с электромагнитным возбуждением и методика имитационного моделирования.

Процесс проектирования ЭМ функционально включает электромагнитные, тепловые, механические, вентиляционные расчеты с одновременной разработкой конструкции, удовлетворяющей технологическим требованиям ее изготовления при минимальных затратах материалов и максимальной надежности (рисунке 2). В настоящее время процесс проектирования в качестве одного из этапов включает создание 3D-модели изделия и его составных частей.

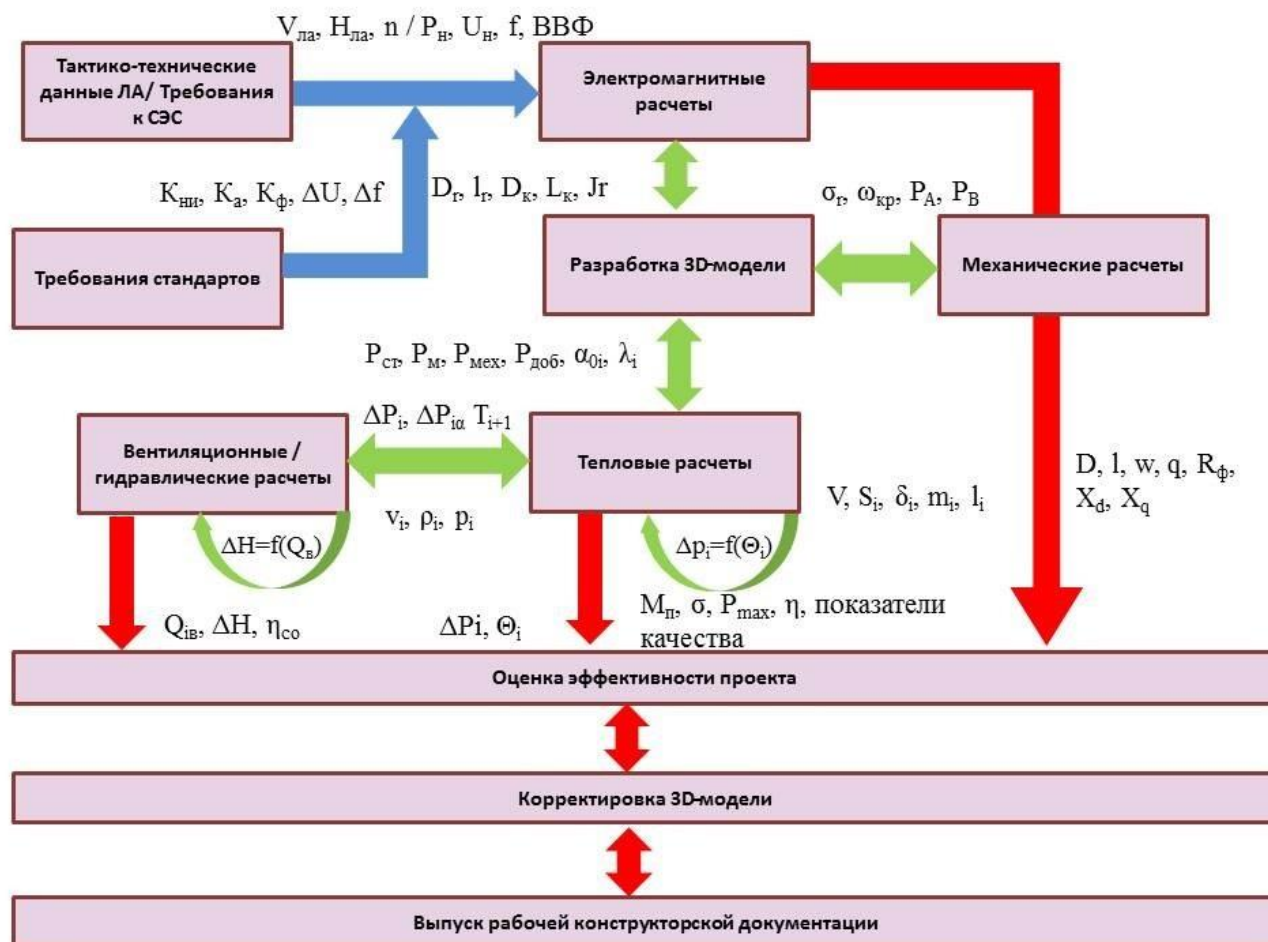


Рисунок 2 – Система проектирования синхронного генератора

При эскизном или техническом проектировании вначале выполняется электромагнитный расчет, состоящий из двух взаимосвязанных этапов – проектировочного расчета и поверочного расчета. В процессе проектировочного расчета выбираем главные размеры, определяем обмоточные данные и другие значимые геометрические размеры машины. Проектировочные расчеты производим с применением аналитических методов по

зависимостям между физическими величинами электрической машины и их геометрической интерпретацией.

В основной программе расчета синхронного генератора (рисунок 3) в качестве ресурсов используются вложенные процедуры — авторские подпрограммы и стандартные процедуры и функции.

Электромагнитный проектировочный расчет основного генератора, однозначно определяет основные геометрические размеры и его обмоточные данные, которые вносим в расчетный формуляр электромашин.

Задачи, связанные с проведением поверочных расчетов, представляют собой математическое моделирование процессов, протекающих в установившихся номинальных режимах работы и переходных процессах.

В основе аналитического расчета магнитной цепи используем закон полного тока для замкнутой магнитной цепи:

$$F_M = \oint \vec{H} d\vec{l}, \quad (4)$$

где F_M – алгебраическая сумма токов;

\vec{H} – вектор напряженности магнитного поля;

$d\vec{l}$ – вектор активного контура.

Методика автоматизированного поверочного расчета представляет собой полевой электромагнитный расчет магнитной системы машины на основе решение системы уравнений Максвелла для синхронных генераторов методом конечных элементов. Для расчета электромагнитного поля методом конечных элементов в плоскости ротора основного генератора составлена численная модель генератора на основе его геометрической модели из проектировочного расчета. Расчет проводим с помощью методологии ANSYS Mechanical APDL. Применительно к синхронному генератору с электромагнитным возбуждением отдельное рассмотрение геометрических моделей основного генератора и возбудителя методами конечных элементов не полностью решает задачу расчета параметров синхронного генератора в целом. Поэтому для полноты расчета электромагнитных параметров и характеристик проектируемого синхронного генератора разработана методика, позволяющая выполнить расчет статических нагрузочных режимов и переходных процессов в связанной гальванически системе «основной генератор – возбудитель» путем одновременного численного моделирования непосредственно в нагрузочном режиме.

Совмещенная численная модель позволяет получать полные динамические и статические характеристики проектируемой машины для всех функциональных режимов работы.

Совмещенная динамическая модель системы с электромеханическим преобразователем энергии для анализа качества переходных процессов представляет собой систему уравнений Парка–Горева для синхронного генератора и возбудителя с вращающимся выпрямителем. Для совместного решения систем уравнений «синхронный генератор – возбудитель с вращающимся выпрямителем» была разработана динамическая модель канала генерирования для автономной системы электроснабжения ЛА в программном пакете Matlab Simulink.

В качестве основного алгоритма регулирования для номинального режима работы генератора принимаем одноканальное пропорционально-интегральное регулирование по отклонению напряжения в точке регулирования. В соответствии с выбранным алгоритмом напряжение возбуждения формируется математической моделью регулятора по следующей формуле, являющейся фактически классическим пропорционально-интегральным регулятором, ПИ-регулятором:

$$U_{\text{возб}} = k_{\text{П}} \cdot (U_0 - U_t) + k_{\text{И}} \cdot \int_{t=0}^t (U_0 - U_t) \cdot dt, \quad (5)$$

где $U_{\text{возб}}$ – напряжение возбуждения возбудителя;

$U_0=115$ В – уставка по напряжению;

U_t – напряжение в точке регулирования в текущий момент времени;
 $k_{II}=0,3$ – коэффициент перерегулирования;
 k_{II} – коэффициент, обратный постоянной времени регулятора.

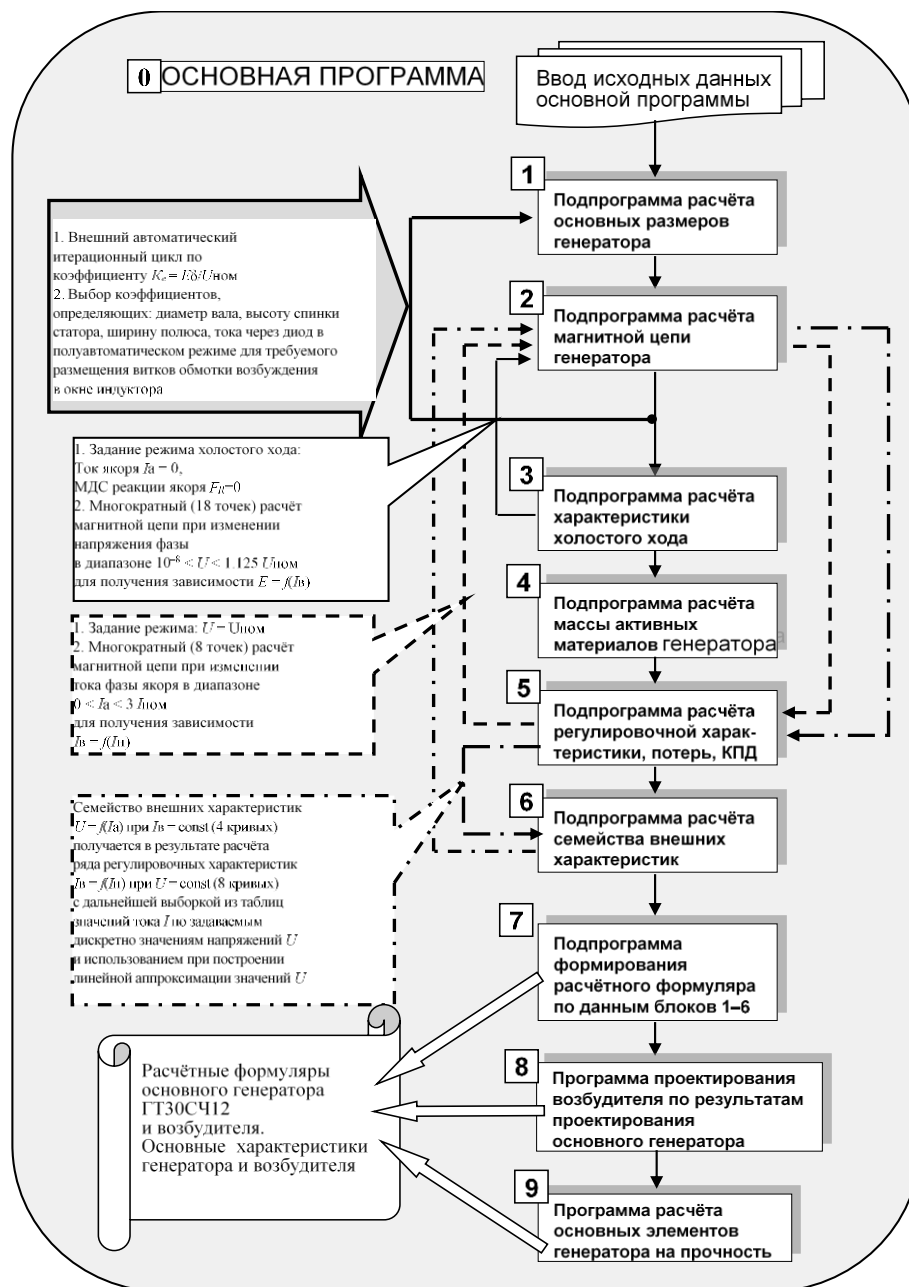


Рисунок 3– Блок-схема алгоритма проектирования

Адекватность модели подтверждена моделированием ряда статических режимов, результаты которого показали высокую степень соответствия как теоретически рассчитанным параметрам, так и данным функциональных испытаний генераторов.

Для получения объективных параметров синхронного генератора с электромагнитным возбуждением на этапе поверочных расчетов использованы имитационные модели электрических машин. Такой подход позволяет существенно сократить ресурсы проекта, необходимые для изготовления и испытаний макетов.

Методика имитационного моделирования предполагает двухуровневое моделирование при проведении поверочных электромагнитных расчетов. В ходе процесса

имитационного моделирования в итерационном цикле применяем два основных типа динамического моделирования: «снизу вверх» (от частного к общему) и «сверху вниз» (от общего к частному).

Реализация подхода «сверху вниз» в среде Matlab Simulink определяется в следующей последовательности:

- 1) описание объекта моделирования (канал генерирования);
- 2) параметрическая схема для моделирования;
- 3) основные режимы для моделирования;
- 4) представление элементов их математическими моделями (системами уравнений);
- 5) функциональная структура модели, принятые упрощения в представлении элементов.

Реализация подхода «снизу вверх» на примере ANSYS:

- 1) описание объекта моделирования (геометрическая модель электрической машины);
- 2) схема системы, в которую входит объект моделирования;
- 3) основные режимы для моделирования;
- 4) используемый метод – метод конечных элементов и описание возможностей модели;
- 5) структура модели, геометрическая модель и модель цепи.

При конструировании электрических машин используем их полные 3D-модели, позволяющие провести точные прочностные расчеты.

Геометрическая 3D-модель определяется как совокупность ограничивающих его поверхностей. Она также структурируется комбинацией конструктивных элементов, таких как призма, конус, пирамида, цилиндр и сфера.

При разработке конструкции синхронного генератора в обязательном порядке производим следующие виды механических расчетов:

- расчет подшипниковых узлов;
- расчет критических частот вращения вала и консольных моментов;
- расчет крутильных колебаний и шлицевых соединений;
- прочностной расчет ступиц и корпуса.

Для расчета частот вращения используем разработанную полную трехмерную модель машины. Расчет выполняем в системе конечно-элементного анализа с учетом податливости корпуса и характера установки на авиационный двигатель – консольное крепление за фланец. При этом трехмерная модель генератора приводится к определенному виду (рисунок 4).

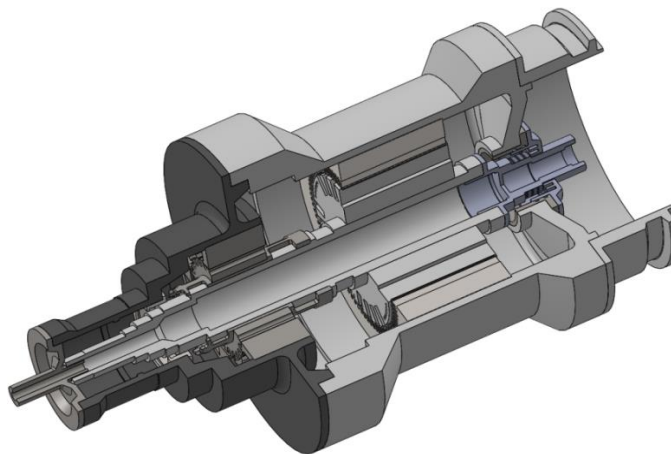


Рисунок 4 – Трехмерная модель генератора для механических расчетов

Проведен анализ методов вентиляционных и гидравлических расчетов. Воздушные системы охлаждения генераторов характеризуются простотой конструктивного исполнения, но обладают существенными ограничениями по температуре нагрева активных элементов, зависящими от высоты H и числа M полета ЛА. Авиационные генераторы снабжаются встроенными вентиляторами (самовентиляция).

Генераторы с жидкостными системами охлаждения (ЖСО) интегральной конструкции с масляным охлаждением путем прокачки специального масла, используемого в гидромеханических приводах (ГП) постоянной частоты вращения, или путем прокачки авиационного топлива в системах с гидролопаточными приводами (ПГЛ) характеризуются усложненной конструкцией, и их система охлаждения требует сложных гидравлических поверочных расчетов.

Метод вентиляционного расчета базируется на решении нелинейной задачи с использованием известных аналогий электрических и вентиляционных (гидравлических) схем замещения (рисунок 5).

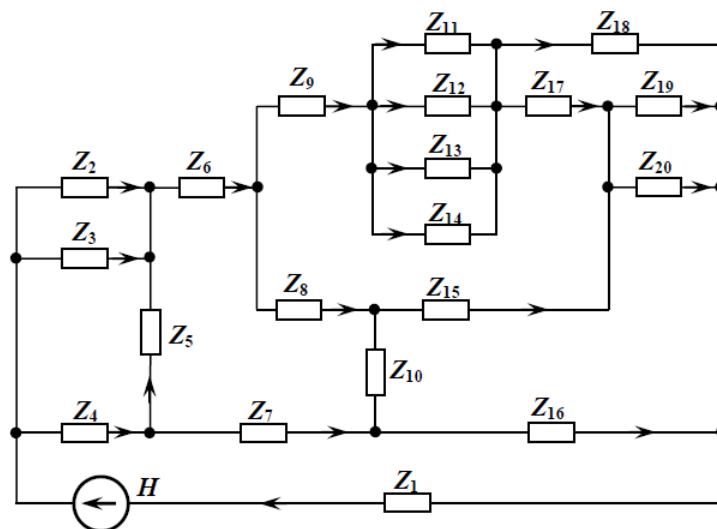


Рисунок 5 – Вентиляционная схема замещения генератора ГСР-20БК

Здесь $Z_1 \dots Z_{20}$ – гидравлические сопротивления ветвей схемы замещения, эквивалентные электрическим сопротивлениям участков электрической цепи. Стрелками указаны условные положительные направления расходов Q_i в каждой i -й ветви (токов электрической цепи).

Источник напора H схемы замещения – эквивалент ЭДС схемы электрической цепи. Каждой ветви с аэродинамическим (гидравлическим) сопротивлением Z_i соответствует падение давления h_i , эквивалентное падению электрического напряжения.

Вентиляционные (гидравлические) цепи являются нелинейными. На практике течение в каналах авиационной электрической машины характеризуется большими числами Re , т.е. имеет место турбулентный режим движения, при котором силы инерции доминируют над силами вязкости, поэтому падения давления имеют следующий вид:

$$h_i = \xi_i \cdot \frac{\rho_i}{2} \cdot v_i^2, \quad (6)$$

где ξ_i – безразмерная величина, называемая коэффициентом гидравлического (аэродинамического) сопротивления канала;

ρ_i – плотность среды в канале, кг/м^3 ;

v_i – средняя скорость движения среды в канале.

Выражение (6) принято выражать в виде так называемого закона Аткинсона:

$$h_i = Q_i^2 \cdot Z_i, \quad (7)$$

где Q_i – расход среды в канале, кг/с ;

$Z_i = \frac{\xi_i}{2 \cdot \rho_i \cdot S_i^2}$ – видоизмененный коэффициент аэродинамического сопротивления, называемый аэродинамическим (гидравлическим) сопротивлением, $1/\text{кг м}$;

S_i – площадь сечения канала, м^2 .

Таким образом, в отличие от закона Ома в линейной цепи, эквивалентный ему «закон Ома» гидравлической цепи имеет квадратичную форму.

Если представить выражение (7) в виде:

$$h_i = (Q_i \cdot Z_i) \cdot Q_i = R_i \cdot Q_i, \quad (8)$$

то оно по форме подобно линейному закону Ома, но аэродинамическое (гидравлическое) сопротивление является нелинейной функцией нескольких переменных

$$R_i = f \{v_i, \rho_i, \xi_i(\text{Re}_i)\}. \quad (9)$$

Поэтому задача определения расходов Q_i ветвей решается методом итерационной линеаризации параметров, при реализации которого на каждом шаге итерации решается линейное уравнение с уточнением значений R_i .

На каждом итерационном цикле уточняются значения сопротивлений Z_i с учетом функциональной зависимости (9), которая реализуется путем вычисления заторможенных значений температуры, плотности и давления в каналах. Выход из соответствующих итерационных циклов осуществляется при достижении заданной точности ε вычисления параметров.

Отмечено, что матрично-топологический метод анализа гидравлических и вентиляционных схем дает возможность выявить наиболее «узкие» места систем вентиляции и устранить их, если это возможно, еще на этапе проектировочных расчетов генераторов.

Между вентиляционными и тепловыми процессами физическая взаимосвязь обусловлена, с одной стороны, подогревом воздуха в каналах за счет тепла потерь, выделяемых активными элементами, а с другой — зависимостью потерь от температуры воздуха в каналах машины, а также и температуры окружающей среды.

Последнее обстоятельство необходимо учитывать при моделировании тепловых процессов, т.к. входящий в машину воздух может достигать значительных температур, зависящих от числа M полета. С другой стороны, при изменении высоты полета H_n существенно изменяется плотность ρ_n воздуха, от которой зависит его расход Q и температура подогрева в каналах машины.

Указанные обстоятельства учитываются на этапе составления тепловой схемы замещения:

– тепловая схема замещения представляется в виде замкнутой схемы электрической цепи, что исключает всяческие попытки составления расчетных уравнений в форме, исключающей универсальность ее применения для исследования тепловых процессов различных объектов;

– схема в явном виде содержит источники тока, токи которых эквивалентны тепловым потерям, значения которых в общем случае являются изменяющимися;

– схема в явном виде содержит источники ЭДС, напряжения которых эквивалентны изменяющимся температурам хладагента у соответствующих теплостоков;

– схема содержит псевдоузлы, что требуется для реализации универсальности описания системы уравнений при решении поставленной задачи.

Таким образом, основное внимание при моделировании тепловых процессов в генераторах с жидкостной системой охлаждения уделяется вопросам теплопроводности (передачи тепла в твердом теле), вынужденной конвекции (передача тепла от поверхности обтекаемого твердого тела к жидкости), а также специфическим особенностям процессов «струйного» охлаждения поверхностей.

Для повышения точности расчета необходимо разделить источники потерь и теплопроводящие элементы в объеме машины на более мелкие фрагменты. При этом рационально использовать конечно-элементный анализ, который наиболее эффективно применяется на завершающей стадии проектирования 3D-модели машины. Исходными данными для теплового расчета электрических машин методом конечных элементов являются результаты, полученные при расчетах с помощью схем замещения, и разработанная полная трехмерная модель машины, включая активные части и каналы охлаждения; свойства хладагента и массивных элементов конструкции; мощность потерь в отдельных элементах машины, расход, температура и давление хладагента. В результате

расчета определяется температурное поле в массивных элементах и распределение температур, давления и скоростей течения хладагента в каналах охлаждения электрической машины.

Проведение сквозного расчета трехкаскадного генератора требует наличие достаточных вычислительных мощностей и времени расчета. По этой причине машину разделяем на ряд узлов: основной генератор, возбудитель и диодный блок. После подготовки вычислительных моделей производится моделирование движения хладагента с целью определения гидравлических сопротивлений этих узлов. Полученные результаты являются аналитической увязкой граничных условий по хладагенту. Каждая модель состоит из ряда компонентов: часть статора, часть ротора, их обмотки и держатель (рисунок 6).

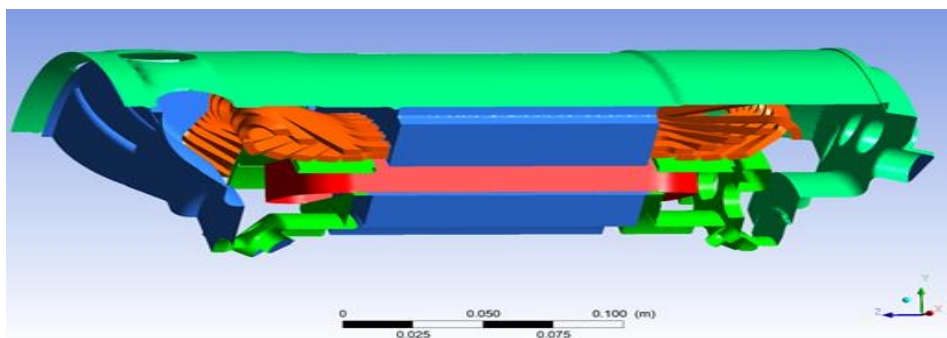


Рисунок 6 – Расчетная область основного агрегата генератора на один полюс

Тепловой расчет проводим в одном итерационном цикле с гидравлическим расчетом генератора с исходными данными из 3D-модели генератора. Гидравлический расчет проводится с целью определения картины течения хладагента в спроектированной конструкции и принятия решения по возможному ее изменению с целью удовлетворения требований теплового расчета генератора по необходимому расходу хладагента.

Третья глава посвящена исследованиям в области разработки методологической базы оптимального проектирования авиационных высокооборотных синхронных генераторов с электромагнитным возбуждением. В этой главе показано, что методологическую базу процесса оптимального проектирования высокооборотных генераторов образует совокупность поисковых методов оптимизации, встроенных в обобщенный алгоритм проектирования на этапе технического проекта. При оптимальном проектировании электрических машин такого типа не удастся ограничиться использованием одного метода оптимизации. Наиболее естественным для решения рассматриваемой задачи является использование параметрических методов упорядоченного перебора, направленного поиска и случайного поиска.

Процесс разработки синхронного генератора подразумевает, что каждому варианту проектируемой машины, определяемому набором тактико-технических показателей, соответствует точка $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ в n -мерном пространстве En . При этом ряд технических, конструктивных, технологических и эксплуатационных требований выступают как функции ограничений, задающие допустимую область изменения параметров G . Представления о качестве проектируемого изделия формализуем с помощью набора критериев оптимальности $\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_n$, которые в свою очередь являются функциями независимых проектируемых параметров:

$$\Phi_j = f_j(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad j=1, k. \quad (10)$$

Показатели и характеристики, на значения которых накладываются определенные условия, являются функциями варьируемых параметров:

$$R_i = R_i(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad i=1, m, \quad (11)$$

где R_1, R_2, \dots, R_m – функции ограничений.

Решение задачи, оптимальное по одному критерию, как правило, не оптимально по другим. Одним из наиболее объективных решений задачи оптимизации является метод выделения ведущего критерия оптимальности и перевод остальных критериев в ограничения с помощью метода штрафных и барьерных функций. Такой подход позволяет выбрать один наиболее важный критерий, и в то же время учесть требования к остальным показателям качества и конструктивным параметрам. Это объясняется тем, что при проектировании авиационных синхронных трехкаскадных генераторов, которые работают в диапазоне частот вращения $10800 \dots 24000 \text{ мин}^{-1}$, должны быть решены, как минимум, две противоречивые задачи, определяющие их конструктивную реализацию:

- разработка генератора с высокой частотой вращения, где основной задачей является обеспечение прочности вращающихся узлов (минимизация размеров, размещение выпрямительных диодов, проектирование вала, обеспечивающего недостижение критических частот вращения, интенсификация охлаждения, установка новых подшипников с повышенной грузоподъемностью на частотах вращения до $25000 \dots 30000 \text{ мин}^{-1}$);

- обеспечение прочности на частоте вращения 24000 мин^{-1} приводит к максимально возможному уменьшению диаметральных размеров машины, но при этом на низких частотах вращения необходимо создавать магнитный поток, который бы индуцировал ЭДС такой величины, при которой напряжение на клеммах составляло 120 В при воздействии двукратной нагрузки, что требует увеличения активного объема прежде всего диаметра ротора.

В процессе оптимального проектирования высокооборотного синхронного генератора создается его 3D-модель, которая подвергается дальнейшим исследованиям на предмет обеспечения собираемости и прочности конструкции. На заключительном этапе определяется тепловое состояние машины и проектируется система охлаждения. Она состоит как из узлов и деталей, входящих непосредственно в конструкцию генератора, также и внешних устройств, размещенных в летательном аппарате.

Оптимизацию конструкции синхронных генераторов с электромагнитным возбуждением осуществляем с целью получения ее минимальной удельной массы.

Полную массу синхронного генератора выразим через конструктивный коэффициент k_k , учитывающий массу конструктивных узлов и деталей. Данный коэффициент для высокоиспользованных электрических машин составляет в среднем $1,5 \dots 1,7$. Масса активных материалов определяем следующим образом:

$$M_a = \gamma_c k_\gamma \pi D_c^2 l, \quad (12)$$

где γ_c – средняя плотность активных материалов в якоре и индукторе;

k_γ – коэффициент, характеризующий заполнение машины по длине якоря;

D_c – диаметр статора по ярму основного генератора;

l – активная длина основного генератора.

Рассмотренные параметры являются основными управляющими параметрами при проектировании, но не единственными. Анализ геометрии синхронной машины электромагнитного возбуждения и методики электромагнитного расчета показывает, что проект активной части машины полностью и однозначно определяет 18 независимых размеров и параметров обмоток: q – число пазов на полюс и фазу; w – число витков в фазе якоря; z – число зубцов по расточке якоря; N_n – число проводников в пазе якоря; L – расчетная длина машины; b_n – ширина прямоугольного паза якоря; h_n – глубина паза якоря; δ – длина рабочего зазора; α – коэффициент полюсного перекрытия; h_{ja} – высота спинки якоря; b_m – ширина полюсного сердечника; h_p – высота полюсного наконечника вдоль оси полюса; h_m – высота полюсного сердечника; h_i – расчетная высота спинки индуктора; N_p – число витков обмотки индуктора на одном полюсе; N_d – число демпферных стержней на полюсе; D_r – диаметр отверстия под демпферный стержень; B_r – толщина демпферного замыкающего листа на торце индуктора.

Высокооборотные синхронные трехкаскадные авиационные генераторы имеют свои особенности: при проектировании фактически необходимо одновременно проводить поиск

оптимальных вариантов двух связанных гальванически и одновременно управляемых электрических машин при различных внешних воздействиях. Эти взаимосвязанные генераторы должны обеспечивать качество установившихся и переходных режимов работы в строгом соответствии с требованиями нормативных документов, и иметь при этом минимальную массу, достаточную для воздействия электромагнитных, тепловых и механических нагрузок при изменении частоты вращения в более чем двукратном диапазоне. Показателями, которые выступают в качестве ограничений в виде барьерных функций, являются показатели безотказности генератора, которые определяются на этапе оптимизации конструкции этой электрической машины в целом при исследовании разработанной ее 3D-модели.

При параметрической оптимизации проектирования высокооборотного генератора важным является выбор методов оптимизации для каждого из этапов локального оптимального проектирования. В настоящее время отсутствуют универсальные методы решения задач рассматриваемого класса. Наиболее целесообразным для решения рассматриваемой задачи является использование поисковых методов оптимизации: методы упорядоченного перебора; методы направленного поиска; методы случайного поиска.

При оптимальном проектировании электрических машин применяем способ объединения критерия оптимальности и ограничений в обобщенный критерий с помощью штрафных и барьерных функций, который дает точные инженерные результаты. Штрафные функции обеспечивают быстрое возвращение в допустимую область, барьерные функции – невозможность выхода из нее.

Задача поиска минимума критерия оптимальности $\Phi(x_1, x_2, \dots, x_n)$ в области, ограниченной системой неравенств, определяется по (11). Переход к обобщенному критерию оптимальности по методу штрафных функций производим с помощью непрерывной функции $Q(x_1, x_2, \dots, x_n)$, удовлетворяющей следующим условиям:

$Q(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0$ на границах и внутри допустимой области;

$Q(x_1, x_2, \dots, x_n) > 0$, если не выполняется хотя бы одно из ограничений.

$$Ri(x) \leq 0. \quad (13)$$

Обобщенным критерием оптимальности, согласно этому методу, является выражение:

$$\Phi^*(x_1, x_2, \dots, x_n) = \Phi(x_1, x_2, \dots, x_n) + sQ(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (14)$$

где s – некоторое положительное число, называемое коэффициентом штрафа, влияющее на сходимость метода.

Решение оптимизационной задачи осуществляется методами направленного и случайного поиска.

Синтез алгоритма проектирования высокооборотного синхронного генератора с электромагнитным возбуждением осуществляет процесс проектирования трехкаскадного высокооборотного бесконтактного синхронного генератора в виде последовательных этапов проектирования, связанных между собой итерационными связями: электромагнитные расчеты, разработка 3D-моделей, компоновка, прочностные расчеты, тепловые и гидравлические (применительно к машинам жидкостного охлаждения). Суть оптимального проектирования сводится к организации этапов таким образом, чтобы однозначно получить наилучший вариант генератора в отношении максимальной мощности, который бы удовлетворял всем предъявленным к нему требованиям, включая заданный уровень надежности при назначенном ресурсе. Окончанием этапа оптимального проектирования должно быть принятие решения на выпуск рабочей конструкторской документации.

Стратегию поиска минимума массы высокооборотного бесконтактного синхронного генератора строим на комбинированном использовании методов параметрической оптимизации. На первом этапе, на котором определяются основные активные размеры и параметры, применяем методы случайного поиска. На последующих этапах оптимизации

конструкции применяем линейные методы направленного поиска, такие как метод последовательного перебора и покоординатного спуска.

Для решения задачи определения первоначального облика основного генератора в рамках работы была разработана критериальная математическая модель определения начальных геометрических размеров ротора синхронного генератора, которая в одном итерационном цикле производит последовательно три расчета, определенных как наиболее важных:

- 1) расчет диаметра и длины бочки ротора;
- 2) расчет на прочность листа ротора;
- 3) упрощенное определение критической частоты вращения.

На следующем этапе проектирования необходимо определить активные размеры синхронного генератора, причем в отличие от традиционного определения активных размеров необходимо найти наиболее приемлемые сочетания размеров для ротора. Для такого поиска можно применить формулу Арнольда

$$D_p^2 l_p = \frac{2P_{\text{ном}}}{k_0 \alpha \omega A B_\delta} \quad (15)$$

где D_p – диаметр ротора;

l_p – длина ротора;

$P_{\text{ном}}$ – номинальная мощность;

k_0 – коэффициент обобщенный;

α – коэффициент полюсного перекрытия;

A – максимально допустимая линейная нагрузка;

B_δ – предварительная индукция в воздушном зазоре.

В результате поиска различных вариантов главных размеров для синхронного генератора мощностью не менее 250 кВА методом прямого перебора было рассмотрено 195951 сочетание, из них 11304 варианта достаточно удовлетворяют требованиям. В то же время при аналогичной оптимизации методом случайного неградиентного поиска с обучением было рассмотрено 12012 вариантов и выбрано 1655 вариантов. При этом условия поиска были одинаковы. Сравнение разных методов поиска оптимальных сочетаний главных размеров высокооборотного синхронного генератора показало, что наиболее эффективным является метод случайного поиска. Для успешного определения оптимальных размеров в методе случайного поиска была увеличена абсолютная точность поиска с 0,0001 до 0,00001 и определены десять возможных вариантов. Из такого количества расчетных вариантов генераторов оптимальный вариант выбирается путем решения двух последующих задач.

Для высокооборотных электрических машин существуют жесткие требования по прочности, поэтому при выборе главных размеров необходимо произвести предварительный прочностной расчет диаметра ротора генератора на максимальной частоте вращения, например 24000 мин⁻¹.

Варьируемым параметром при расчетах определен внутренний диаметр листа ротора под вал, в случае если заранее не определены опоры, и/или фактические физические свойства материала ротора. Задача сводится к определению запаса прочности на разрыв для расчетных вариантов диаметров роторов под действием центробежных сил, как от собственной массы листа, так и под действием внешнего нагружения со стороны вала.

$$N_{\text{ц}} = \left(\frac{2\pi n}{60}\right)^2 M_p R_{\text{и}} \quad (16)$$

где $N_{\text{ц}}$ – центробежная сила;

M_p – масса листа ротора приведенная;

$R_{\text{и}}$ – радиус инерции.

Суммарное напряжение, возникающее под действием центробежной силы, определяется путем отношения центробежной силы к площади сечения ротора S_p , коэффициент запаса – отношением предела прочности выбранного материала σ_e к рассчитанному напряжению σ_p .

Коэффициент запаса $K_{\text{зап}}$ должен быть не менее 2 для номинальной частоты вращения и 1,4...1,5 – для заданной максимальной частоты вращения ротора.

$$\sigma_p = \frac{N_{\text{ц}}}{S_p} \quad (17)$$

$$K_{\text{зап}} = \frac{\sigma_{\text{в}}}{\sigma_p} \quad (18)$$

Последним этапом определения главных размеров основного генератора из выбранных ранее возможных соотношений является упрощенный расчет критической частоты бочки ротора в условных опорах. Данный расчет проводим по следующей формуле:

$$n_{\text{кр}} = \frac{60}{2\pi} \sqrt{\frac{M_p/y_p}{M_p/g}} \quad (19)$$

где M_p – масса листа ротора;

y_p – статический прогиб вала.

Наилучшим вариантом по результатам предварительного расчета критических частот расчетных вариантов синхронных генераторов считаем тот, у которого данный параметр наибольший. После выбора главных размеров производим точный электромагнитный расчет машины, в результате которого определяем все активные размеры и основные характеристики.

Методология оптимального проектирования высокооборотных синхронных генераторов с электромагнитным возбуждением основанную на трех принципах:

1. Полная конструкция электрической машины создается на этапе технического проектирования. Этот принцип позволяет в любом проекте два пути изготовления изделия – либо по традиционной технологии через выпуск рабочей конструкторской документации, либо по «безбумажной» технологии.

2. Оптимальное проектирование изделия исходя из ранее изложенных свойств авиационных электрических машин. Реализация этого принципа осуществляется путем поиска наилучшего локального критерия оптимальности с помощью достижения локальных оптимумов на каждом из этапов проектирования изделия.

3. Единство составных частей. В этом случае на всех этапах проектирования, включенных в единый алгоритм, соблюдается принцип наследования свойств составных частей объекта, полученных на более ранних этапах разработки.

Методы проектирования представляют собой последовательность выполнения в определенном порядке взаимосвязанных действий. Методы проектирования, конструирования, поиска оптимальных вариантов достаточно подробно изложены в предыдущих параграфах. Здесь же необходимо отметить, что наиболее важным и основным методом, используемым в настоящей методологии, является итерационный подход на всех этапах проектирования машины. При этом рассмотренная ранее система проектирования синхронного генератора за счет внедрения новой методологии преобразуется к виду, приведенному на рисунке 7.

В алгоритм проектирования вводится этап имитационного моделирования, позволяющий оценивать статические и динамические показатели качества проектируемой машины. При этом итерационными циклами охвачены электромагнитные расчеты, имитационное моделирование и разработка 3D-модели. В состав итерационных циклов как совокупного процесса проектирования неотъемлемо входят тепловые и вентиляционные расчеты. Таким образом, согласно разработанной методологии, проектирование высокооборотного синхронного генератора производится с учетом максимального рассмотрения всех физических процессов, протекающих в машине такого типа.

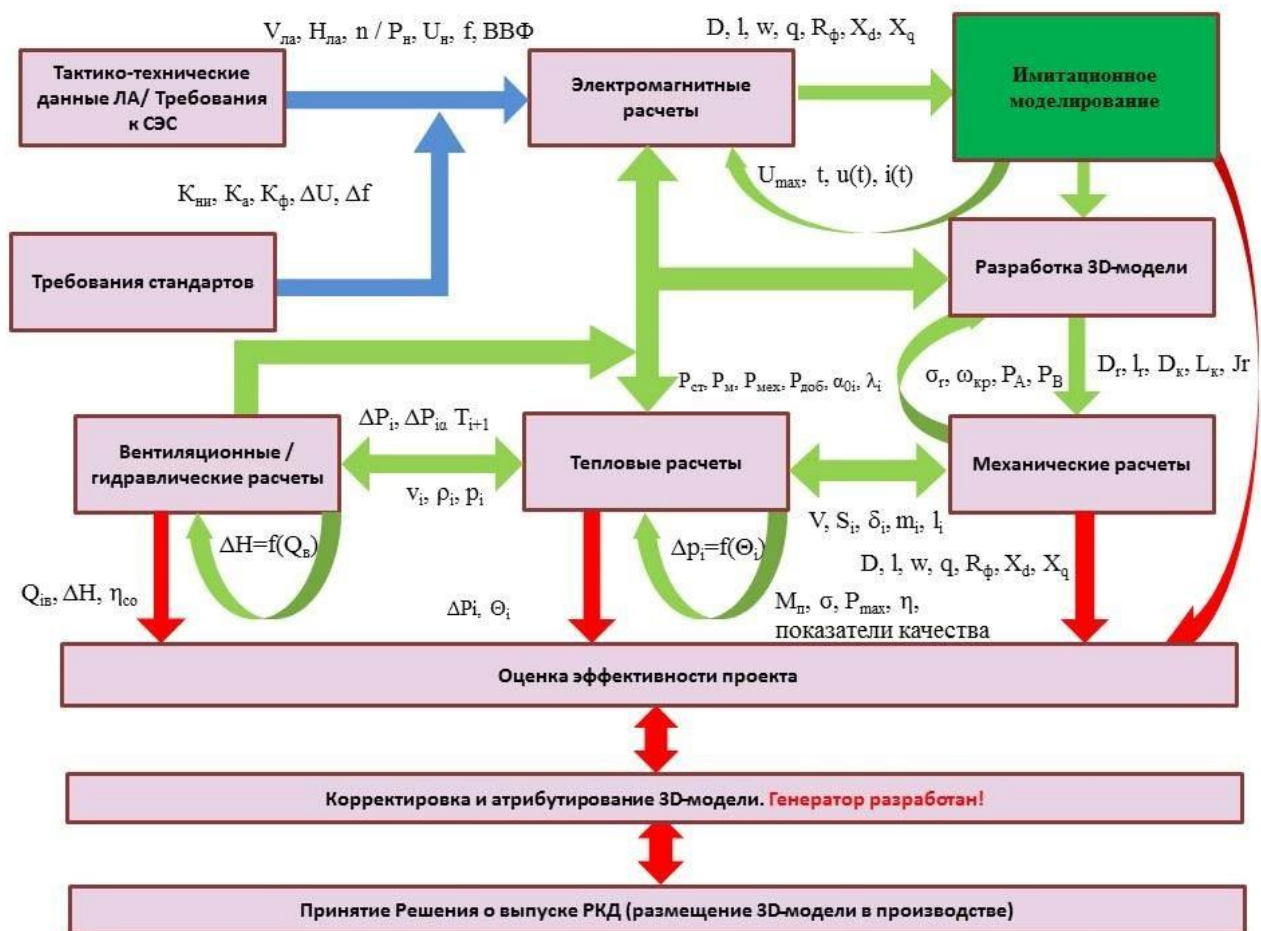


Рисунок 7 – Система проектирования высокооборотного синхронного генератора

Обобщенный алгоритм разработки, основанный на методологии оптимального проектирования высокооборотного синхронного генератора с электромагнитным возбуждением, приведен на рисунке 8. В данном виде этап эскизного проектирования исключается с целью сокращения сроков разработки. Этап рабочего проектирования также может быть исключен, либо частично введен в этап технического проектирования. Поставку материалов для рабочего проектирования в этом случае осуществляем по данным 3D-модели.

Технический проект нового трехкаскадного высокооборотного генератора согласно разработанной методологии начинается с анализа требований технического задания и нормативной документации, определения критериальной модели системы, в которой он применяется исходя из этих требований, и выбора критерия оптимальности, далее назначение вектора управляемых параметров. Затем осуществляется параметрический поиск оптимального варианта основного генератора (рисунок 9) с коррекцией штрафных и барьерных функций. Каждая итерация состоит из проектировочного и поверочного электромагнитных расчетов. Поверочный расчет оптимального варианта заканчивается расчетом его статических характеристик, определением механической прочности активных элементов и обязательным динамическим моделированием в составе канала генерирования.

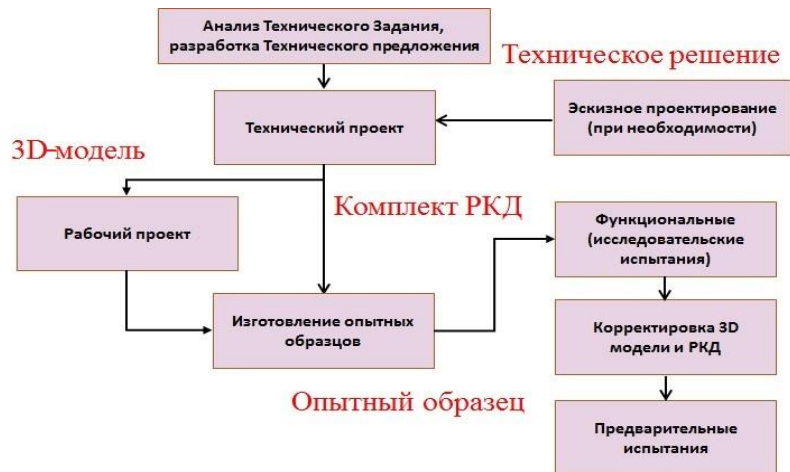


Рисунок 8 – Этапы проектирования электрической машины до присвоения литеры О₁

В то же время бесконтактный трехкаскадный синхронный генератор имеет отличительную особенность: одновременно проектировать два генератора – основной генератор и возбудитель, параметры проектирования которого полностью определяются характеристиками основного генератора и параметрами вращающегося выпрямителя. Обобщенный алгоритм проведения электромагнитных расчетов двух взаимосвязанных генераторов приведен на рисунке 10. Окончательно решение о завершении электромагнитных расчетов системы «основной генератор – возбудитель» заканчивается динамическим моделированием с помощью разработанной методики двухуровневого имитационного моделирования, предполагающего моделирование при проведении поверочных электромагнитных расчетов.

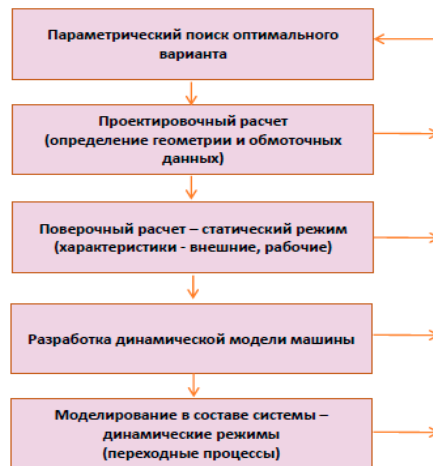


Рисунок 9 – Последовательность проектирования активной зоны электрической машины

Разработка 3D-модели высокооборотного синхронного генератора на этапе технического проектирования выполняется с обязательным проведением в одном итерационном процессе механических, гидравлических и тепловых расчетов, выполняемых в соответствии с представленными методами, при этом приоритетными будут те расчеты, которые получены численными методами конечно-элементного анализа в силу высокой их точности. Структурная схема алгоритма этапа разработки 3D-модели машины приведена на рисунке 11.



Рисунок 10 – Обобщенный алгоритм электромагнитных основного генератора и возбудителя

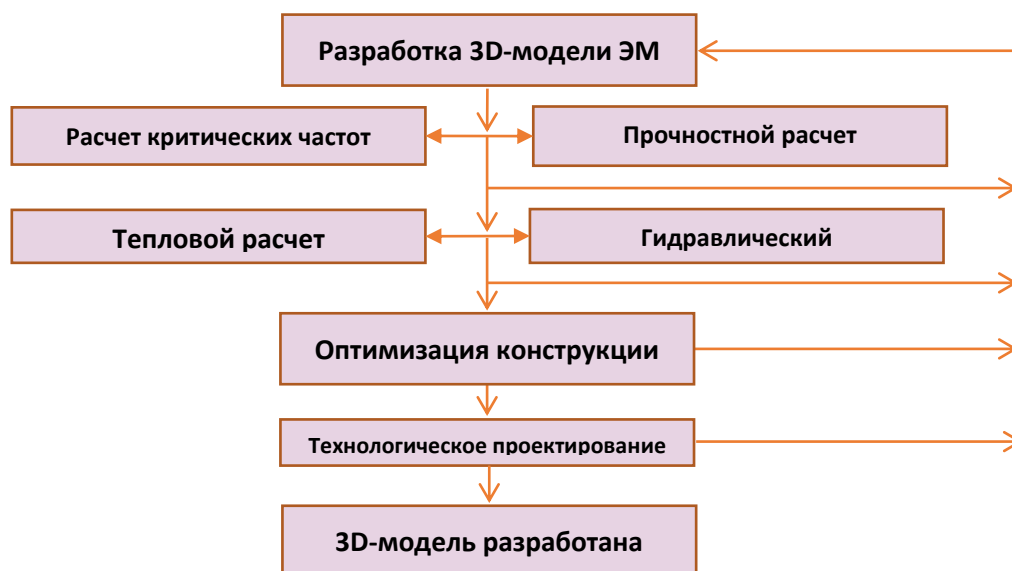


Рисунок 11 – Структурная схема алгоритма 3D-моделирования генератора

Заключительным этапом технического проекта после верификации 3D-модели является расчет надежности спроектированной машины. Целью данного расчета является получение показателей безотказности синхронного генератора и отдельных его узлов.

В результате оптимального проектирования создаем 3D-модель высокооборотного синхронного генератора, по параметрам которой выпускается рабочая конструкторская документация и осуществляется изготовление опытных образцов изделия.

Таким образом, суть разработанной методологии проектирования состоит из двух взаимосвязанных решений – поиска оптимального варианта синхронного генератора на каждом из этапов проектирования, включая этап разработки конструкции путем 3D-моделирования и имитационного моделирования режимов работы с помощью разработанной геометрии машины для анализа динамических и статических характеристик ее работы в составе системы генерирования.

Четвертая глава посвящена практическому проектированию высокооборотных синхронных генераторов с электромагнитным возбуждением различной мощности,

разрабатываемых в рамках НИР, НИОКР и ОКР для современных и перспективных отечественных ЛА.

Синхронный генератор ГСР-40НЧ оптимальной конструкции предназначен для использования в качестве основного источника в системе электроснабжения переменной частоты на новом самолете Ил-112В. Элементы разработанной методологии оптимального проектирования высокооборотного синхронного генератора с электромагнитным возбуждением были впервые применены при проектировании этого генератора. Отличительной особенностью нового генератора по сравнению с серийными генераторами ГТ40ПЧ8Б(В) является возможность работать в режиме номинальной мощности при частоте вращения 6500 мин^{-1} и двукратной перегрузке 80 кВА в течение 5 с при частоте вращения 7600 мин^{-1} . Серийный синхронный генератор ГТ40ПЧ8Б не обеспечивает такие условия.

На этапе проведения электромагнитных расчетов было реализовано семь итераций проектирования методом покоординатного спуска. Результаты расчетов показали, что генератор обеспечивает необходимые и достаточные тепловые параметры и требования механической прочности в полном соответствии с техническим заданием. Первый опытный образец генератора ГСР-40НЧ был изготовлен в условиях серийного производства АО «УАПО». (рисунок 12).

На заключительном этапе проектирования, в соответствии с принятой методологией проектирования, была произведена окончательная параметрическая оптимизация конструкции генератора методом перебора определенных для этой цели геометрических параметров в 3D-модели машины.

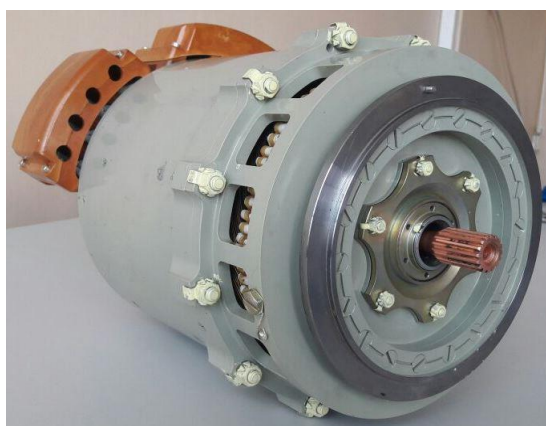


Рисунок 12 – Опытный образец синхронного генератора ГСР-40НЧ

Поиск оптимальных вариантов осуществлялся итерационными циклами, в состав которых были внесены прочностные расчеты всей машины методом конечных элементов. Результаты оптимизации конструкции приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты оптимизации конструкции ГСР-40НЧ

Деталь	Исходная масса, кг	Полученная масса, кг	Разность, кг	Примечание
Корпус 8Е8.034.244	1,789	1,525	0,264	Уменьшена длина на 10 мм
Щит 8Е8.054.160	2,040	1,778	0,262	Изменена конструкция
Щит 8Е8.054.169	1,362	1,237	0,125	
Фланец 8Е8.230.667	0,871	0,612	0,259	30ХГСА заменен на ВТ6
Цапфа 8Е8.216.018	0,808	0,427	0,381	30ХГСА заменен на ВТ6; уменьшена длина на 16мм
Цапфа 8Е8.216.019	0,462	0,251	0,211	30ХГСА заменен на ВТ6
Статор возбuditеля 8Е6.667.488	1,322	1,230	0,092	Уточнен вес обмотки статора
Гайки 8Е8.939.157,				30ХГСА заменен на ВТ6

Деталь	Исходная масса, кг	Полученная масса, кг	Разность, кг	Примечание
8E8.939.159 и втулка 8E8.220.414	0,234	0,130	0,104	
Масса генератора, кг	33,5	31,802	1,698	

Таким образом, в результате оптимизации конструкции синхронного генератора ГСР-40НЧ дополнительно снизилась масса машины на 1,7 кг относительно предыдущих достижений.

Генератор ГСР-90/120 высокооборотный синхронный трехкаскадный предназначен по программе импортозамещения для самолетов типа МС-21. Диапазон частот вращения 10800...24000 мин⁻¹. Номинальные значения выходных параметров генератора: напряжение фазное 115 В; частота 360...800 Гц; мощность 120 кВА; число фаз 3; коэффициент мощности 0,8...1,0 (отстающий); соединение фаз – звезда с выведенной нейтралью на корпус; порядок чередования фаз – прямой А-В-С.

После детального анализа требований для генератора ГСР-90/120 была выбрана классическая конструкция, принятая для бесконтактных трехкаскадных синхронных генераторов с вращающимися выпрямителями и имеющая следующие особенности:

- концентрическое многослойное расположение элементов машины;
- бифилярный характер обмоток с четным количеством (по числу полюсов) катушек обмоток с чередующимися направлениями намотки.

Эти особенности конструкции приводят к тому, что такая электрическая машина не является восприимчивой к воздействиям высокочастотной энергии. Исходя из требуемой прочности бочки ротора на максимальной частоте вращения был выбран индуктор неявнополюсной конструкции.

В соответствии с разработанной методологией проектирование генератора осуществлялось путем параметрического поиска оптимального варианта основного генератора. При этом в ходе расчета варьировались такие параметры как число пазов на полюс и фазу в пределах от 4 до 8 с шагом 0,5 и величина рабочего зазора – в пределах от 0,75 до 1,5 мм. По результатам проектировочного электромагнитного расчета был разработан эскиз расточки основного генератора и проведены поверочные расчеты для частоты вращения 10800 мин⁻¹ (таблица 2). Поверочные расчеты наиболее сложных в магнитном отношении режимов работы для наименьшей рабочей частоты показали, что активного объема основного генератора достаточно для их реализации. Для исследования глубины регулирования напряжения спроектированной машины были рассчитаны регулировочные характеристики ГСР-90/120 (рисунок 13).

Таблица 2 – Поверочный расчет при частоте вращения 10800 мин⁻¹

Параметр	Номинальный режим	135 кВА	180 кВА	3-кратное КЗ
Напряжение фазы U_n , В	120,0	120,0	120,0	0
Ток фазы статора, I_f , А	333,3	375,0		1000,0
Мощность полная, кВА	120	135,0	180,0	0,0
Сумма основных потерь, кВт	9,683	11,67		31,572
КПД, %	90,8	90,3	88,4	-
Ток возбуждения I_v , А	56,7	62,2	80,5	79,8
Плотность тока возбуждения, А/м ²	31,75	34,56	44,4	44,33
Напряжение возбуждения U_v , В	83,9	90,8	112,0	123,3

Гармонический состав напряжения холостого хода для предельных частот вращения приведен на рисунке 14. Видно, что наиболее важные гармонические 3, 5 практически подавлены, амплитуда 7-й практически составляет 1,5 В. Значение 11 гармонической составляющей не превышает 2,5 В на максимальной рабочей частоте вращения 24000 мин⁻¹.

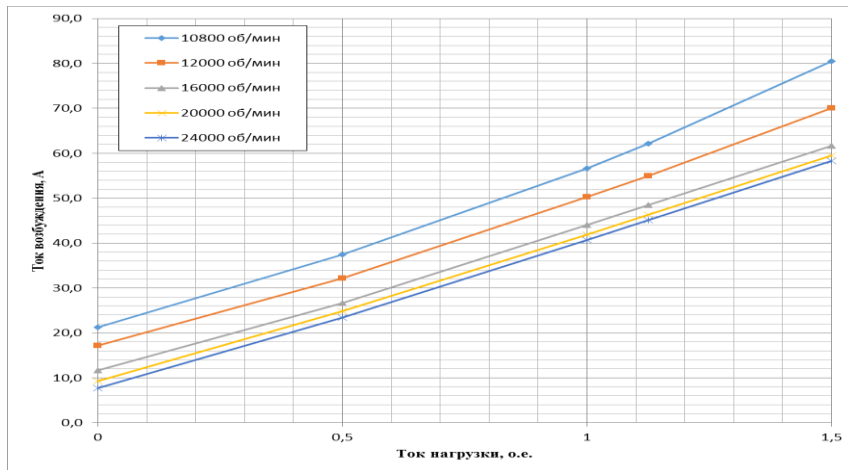


Рисунок 13 – Расчетные регулировочные характеристики основного генератора ГСП-90/120

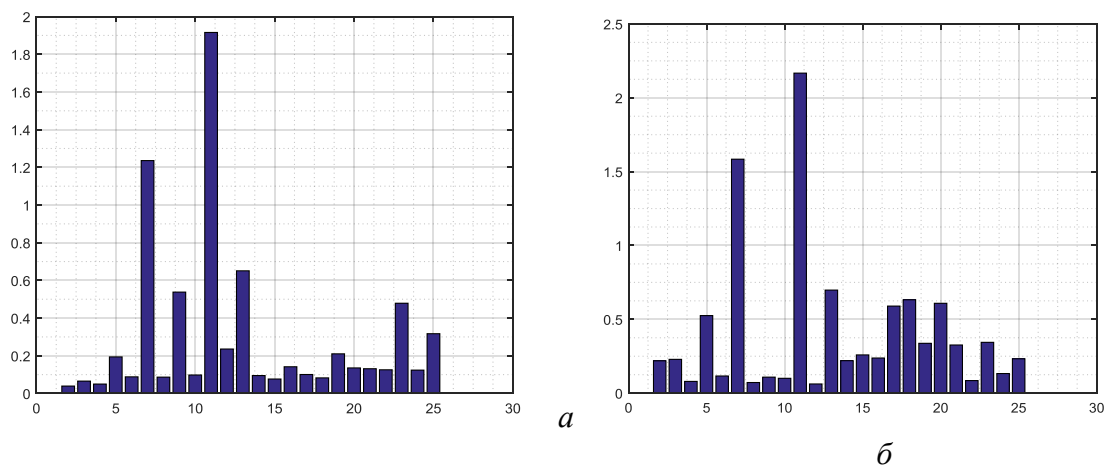


Рисунок 14 – Расчетные амплитуды высших гармонических составляющих напряжения холостого хода, В: $n = 10800 \text{ мин}^{-1}$ (а); $n = 24000 \text{ мин}^{-1}$ (б)

Для анализа динамических характеристик генератора ГСП-90/120 при проведении поверочных расчетов применялась методика имитационного моделирования, которая предполагает двухуровневое моделирование. Динамическое моделирование для первого уровня осуществлялось для следующих режимов работы: начальное возбуждение – холостой ход – номинал – двукратная перегрузка для частоты вращения 10800 мин^{-1} (рисунок 15).

Для более точного определения параметров переходных процессов, особенно в части длительности их протекания, было проведено моделирование включения генератора на номинальную нагрузку с помощью совмещенной численной модели «основной генератор – возбудитель», которая работает в модели второго уровня.

Результаты моделирования с помощью совмещенной модели показали, что длительность переходного процесса не превышает $0,07 \text{ с}$, а максимальная амплитуда напряжения не снижается ниже 80 В , т.е. спроектированный синхронный генератор ГСП-90/120 по своим качественным показателям соответствует отечественным и зарубежным стандартам.

Результаты моделирования «сверху вниз» в программном пакете Matlab Simulink и «снизу вверх» на совмещенной численной модели основного генератора и возбудителя показали, что спроектированный генератор полностью соответствует заданным требованиям в части статических и динамических характеристик.

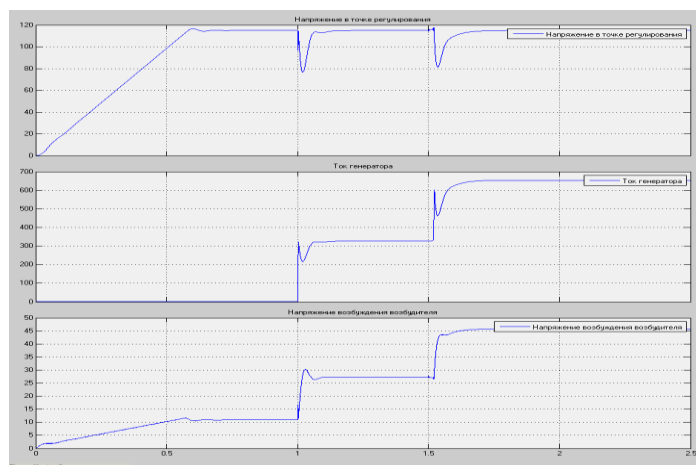


Рисунок 15 – Переходные параметры генератора ГСР-90/120 при частоте вращения 10800 мин^{-1} при выходе на нагрузку

Исследования механических характеристик экспериментального образца высокооборотного генератора ГСР-90/120 на критических частот вращения показали, что вблизи верхней границы рабочих частот вращения существует резонансная изгибная частота колебаний, равная 19335 мин^{-1} .

Для повышения частоты колебаний ротора без изменения размеров активных материалов было выделено два основных механизма – повышение жесткости опор или повышение жесткости ротора. Наиболее простым в этом случае является изменение конструкции корпуса, так как жесткость опор в первую очередь связана с жесткостью корпуса. В связи с этим был перепроектирован корпус генератора без изменения конструкции активных элементов и перекомпоновки составных частей.

В заключение технического проектирования экспериментального образца ГСР-90/120 были произведены гидравлический и тепловой расчеты разрабатываемого генератора ГСР-90/120. Для гидравлического расчета в качестве исходных данных использовалась геометрическая модель ротора согласно разработанной 3D-модели (рисунок 16). На этом рисунке показан внутренний объем вала, заполненный маслом, и вектора скорости масла на выходе из форсунок (на валу размещено шесть поясов из форсунок по три штуки в каждом), по которым можно оценить факел распыления.

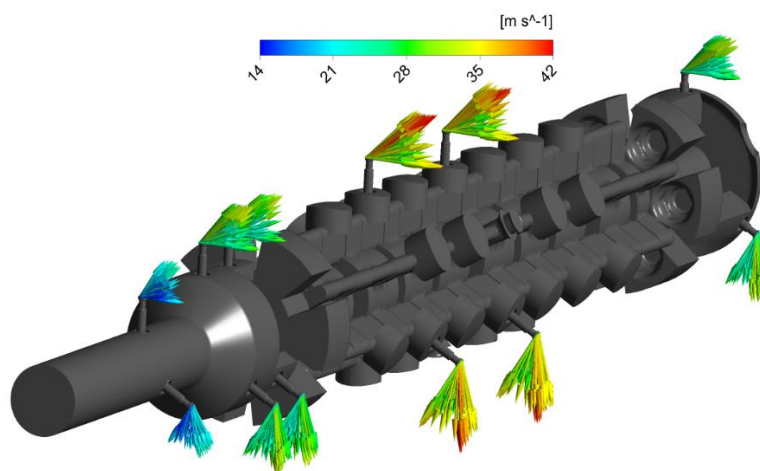


Рисунок 16 – Распределение векторов скорости на срезе сопла жиклера ротора

По результатам расчета было установлено, что при частоте вращения 10800 мин^{-1} для обеспечения общего расхода масла через генератор 39,95 л/мин, необходимое давление на входе в вал составляет 3,95 атм.

При разбрызгивании масла через форсунки реализуется сложный режим течения (рисунок 17). У струи на начальном участке образуется стержневой режим течения, поток масла имеет ярко выраженное ядро с отрывом мелких капель на границах. На определенном расстоянии от среза сопла реализуется снарядный режим, струя распадается на части, характер этого процесса зависит от формы сопла, физических свойств рабочих тел, их относительной скорости, начальной турбулентности струи. Лобовые части обмотки находятся между внутренним и наружным держателями, за счет этого они экранированы от непосредственного воздействия струй, что предохраняет обмотки от возможной эрозии электрической изоляции.

При данной картине обтекания были получены распределения коэффициента теплоотдачи к маслу на поверхностях элементов. Средние значения коэффициентов теплоотдачи по поверхности лобовых частей обмотки равны примерно $1500 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Для расчетов температур в элементах генератора использовались граничные условия 3-го рода. Результаты теплового расчета в виде полей температур элементов представлены на рисунке 18. Максимальная температура (237°C) реализуется в пазовых частях обмотки, лобовые части имеют температуру ниже за счет непосредственного охлаждения маслом.

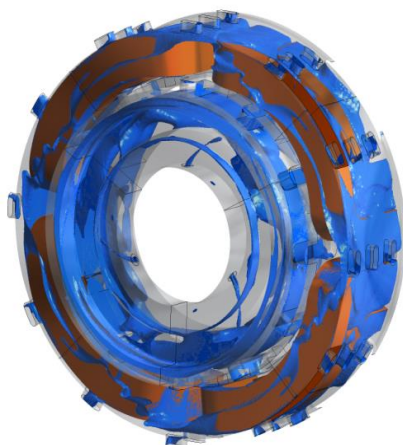


Рисунок 17 – Картина растекания масла в элементах индуктора основного генератора

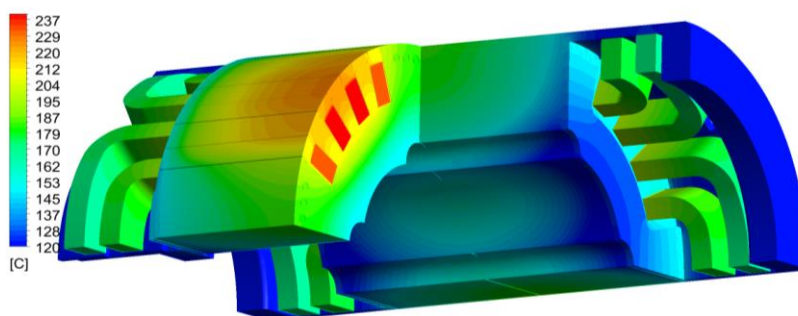


Рисунок 18 – Поле температур элементов ротора основного генератора, вид со стороны разреза

При использовании провода ПНЭТП с температурным индексом 220 его ресурс составит 5000...8000 ч, при использовании ПНЭТП-Д с температурным индексом 240 ресурс

достигает 20000 ч. и суммарное время работы генератора в перегрузочном режиме не превышает 88,5 ч.

Тепловые и гидравлические расчеты экспериментального образца ГСР-90/120 показали, что в полученном объеме тепловая мощность достигает предельных значений в самых нагруженных элементах – обмоточных проводах в индукторе основного генератора. В результате, имеем вывод, что полученные размеры генератора ГСР-90/120 являются близкими к минимально достаточным размерам, обеспечивающим реализацию устойчивого теплового состояния машины во всех режимах ее работы. Поэтому после окончания тепловых и гидравлических расчетов 3D-модель синхронного генератора ГСР-90/120 была зафиксирована, и этап технического проектирования завершен.

В дальнейшем по 3D-модели был разработан комплект рабочей конструкторской документации 8ЕЗ.117.079. По этой документации были изготовлены для проведения исследований два экспериментальных образца ГСР-90/120 (рисунок 19). Полная масса сухого генератора с корпусом, изготовленным из сплава АК-6, составила 56,0 кг.

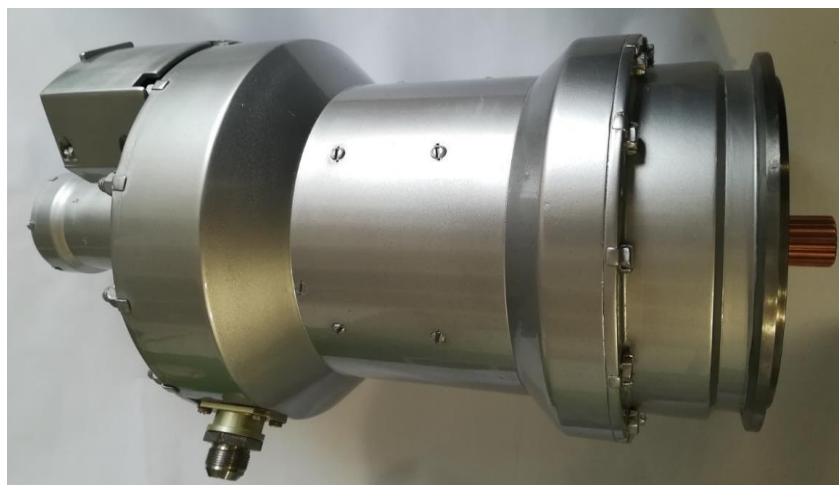


Рисунок 19 – Экспериментальный образец ГСР-90/120 № 180101

В заключение для получения объективной оценки разработанного экспериментального образца высокооборотного синхронного генератора ГСР-90/120 был проведен сравнительный анализ удельных массовых показателей с современными синхронными генераторами такого типа. Основные параметры авиационных синхронных генераторов переменной частоты вращения сведены в таблицу 3.

Таблица 3 – Сравнительные параметры синхронных генераторов

Тип генератора	Мощность $S_{ном}/ S_{max}$, кВА	Диапазон частот вращения для S_{max} , мин ⁻¹	Кратность частоты вращения K_n	Масса сухого генератора M_g , кг	Удельная масса, кг/кВА	Материал корпуса
ГТ90НЖЧ12КВ	90/120	11760...12240	1,04	32,5	0,27	Магний
ГТ90НМ	90/180	9600...14400	1,5	48	0,27	Магний
GOODRICH	150/240	11100...23100	2,08	60,8	0,25	Магний
Honeywell for MC-21	120/180	10800...24000	2,22	53,7	0,30	Алюминий
Hamilton Sundstrand for MC-21	120/180	10800...24000	2,22	58,7	0,33	Алюминий
ГСР-90/120	120/180	10800...24000	2,22	56,0	0,31	Алюминий типа АК-6

Анализ таблицы 3 показывает, что разработанный синхронный генератор ГСР-90/120 при кратности частоты вращения 2,2 по удельной массе несколько уступает генератору Honeywell for MC-21, но практически соответствует удельной массе нового синхронного генератора для MC-21 (0,33 кг/кВА), которые поставляет компания UTS Hamilton Sundstrand. Таким образом, практическая реализация разработанной методологии проектирования высокооборотных трехкаскадных синхронных генераторов показала, что с ее помощью можно создавать авиационные генераторы, не уступающие по массе и другим характеристикам лучшим образцам генераторов такого типа, созданных мировыми лидерами отрасли, включая UTS Hamilton Sundstrand и GOODRICH.

В параграфе «**Оптимальное проектирование генератора ГТ250НЖ24**» приводятся результаты проектирования синхронного генератора, по своим характеристикам не уступающего генератору, применяемому в настоящее время на новом пассажирском самолете Боинг 787.

Аналогов электрических машин такого типа в нашей стране нет, поэтому было принято инициативное решение провести техническое проектирование высокооборотного синхронного генератора с электромагнитным возбуждением на номинальную мощность 250 кВА.

Основные технические требования для проектирования генератора были приняты варианты конфигурации системы электроснабжения для перспективного широкофюзеляжного дальнемагистрального пассажирского самолета с учетом опыта применения принципиально новой системы электроснабжения на самолете Боинг 787. В результате для проектирования были сформированы основные технические требования: напряжение фазное 230 В; частота 360...800 Гц; диапазон частот вращения 10800...24000 мин⁻¹ номинальная мощность 250 кВА; максимальная мощность – не менее 375 кВА (длительность 5 с); число фаз 3; коэффициент мощности 0,8...1,0 (отстающий); соединение фаз – звезда с выведенной нейтралью на корпус; порядок чередования фаз – прямой А-В-С.

Генератор получил наименование ГТ250НЖ24 – генератор трехфазный, мощность 250 кВА, нагнетательно жидкостное охлаждение, максимальная частота вращения 24000 мин⁻¹.

Исходя из достижений отечественных технологий, был произведен дополнительный расчет с помощью метода случайного поиска, при котором управляющими параметрами были определены следующие размеры: активная длина ротора, число пазов на полюс и фазу; величина рабочего зазора. В качестве функционала была принята масса активных материалов машины, в качестве ограничений – относительное реактивное сопротивление по оси *d*, максимальная мощность на возбуждение и электромагнитный коэффициент полезного действия. Результаты поиска оптимального варианта приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Уточнение вариантов синхронного генератора ГТ250НЖ24

№	Диаметр расточки, мм	Длина воздушного зазора, мм	Диаметр ротора, мм	Число пазов на полюс и фазу	Активная длина, мм	Линейная нагрузка, А/см	Мощность возбуждения, кВт	Хдогн (10800)	Макт, кг	КПД, %
1	168	1,3	165,4	5	145	823,78	103,99	4,53	57,28	81,40
2	168	1,5	165,0	6	130	988,54	77,03	3,87	54,78	86,83
3	178	1,3	175,4	6	160	466,50	30,12	2,02	65,48	86,80
4	178	1,3	175,4	7	140	544,25	40,50	2,36	58,51	85,56
5	178	0,9	176,2	7	133	544,25	40,45	3,06	55,06	86,11

Анализ результатов расчетов, приведенный в таблице 4, показывает, что наименьшей массой активных материалов обладает вариант № 2 (54,78 кг). Однако у этого варианта есть

два существенных недостатка – высокое значение линейной нагрузки и повышенная мощность возбуждения (77,03 кВт). Первый показатель требует интенсификации системы охлаждения – увеличения количества жиклеров и повышения расходно-напорных характеристик насоса откачки. Второй показатель увеличивает мощность по сравнению с другими вариантами в 1,5...2,5 раза, а значит, приведет к увеличению габаритных размеров возбuditеля и, как следствие, массы всего генератора.

Сравнительный анализ показывает, что вариант генератора № 5 по линейной нагрузке не превышает аналогичных значений серийных синхронных генераторов ГТ120НЖЧ12 с частотой вращения 12000 мин^{-1} и может использовать аналогичную систему встроенных жиклеров, разработанных для этих машин. По электромагнитным динамическим характеристикам новый генератор соответствует экспериментальному генератору ГСР-90/120, поэтому в составе канала генерирования для регулирования напряжения может использоваться блок регулирования защиты и управления БРЗУ-115ПЧ. Этот факт существенно сократит стоимость и сроки разработки системы генерирования мощностью 250 кВА с повышенным напряжением 230 В.

Для этой же конструкции ротора основного генератора был выполнен прочностной расчет вариантов пакета ротора для сплава 49K2ФА2 и сплава VACODUR S Plus. Предел текучести для указанных материалов составляет 345 и 800 МПа соответственно. В результате расчетов (рисунок 20) можно сделать однозначный вывод о том, что выбранные главные размеры обеспечивают прочность ротора неявнополюсной конструкции с закрытыми пазами при частоте вращения 24000 мин^{-1} при применении сплава VACODUR S Plus с запасом прочности 1,514.

Проведенные исследования показали, что выбранные главные размеры основного генератора, воздушный зазор и параметры обмотки позволяют спроектировать генератор мощностью 250 кВА с наиболее минимальной удельной массой.

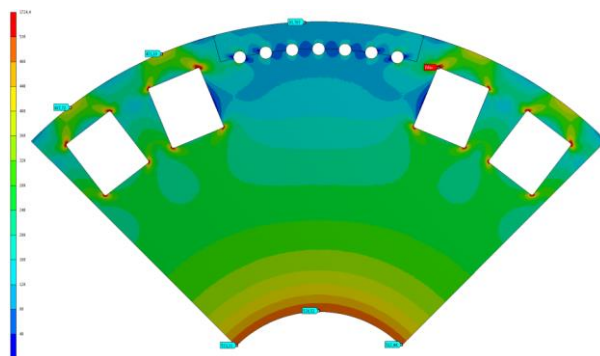


Рисунок 20 – Распределение механических напряжений в индукторе основного генератора с закрытыми пазами при 24000 мин^{-1}

Энергетические характеристики расчетной модели генератора для частот вращения 12000 мин^{-1} (400 Гц) и 24000 мин^{-1} (800 Гц) приведены в таблицах 5–7. Видим, что при увеличении частоты перемагничивания стали при увеличении частоты переменного тока с 360 до 800 Гц, потери в стали снижаются с 3,17 до 2,3 кВт. Это связано с тем, что индукция в зубцах и спинке якоря при увеличении частоты вращения снижается с 1,83 до 0,85 Тл. Магнитная цепь машины в этом случае не насыщена, что является преимуществом данной машины.

Таблица 5 – Энергетические характеристики генератора

Параметр	Значение $f=360 \text{ Гц}$	Значение $f=800 \text{ Гц}$
Потери в меди обмотки возбуждения, Вт	16590,0	11932,0
Потери в меди якоря, Вт	6079,1	6943,4
Потери в стали якоря, Вт	3172,0	2309,5
Механические потери, Вт	4500	12500
Суммарные потери, Вт	33375,0	33800,0
Полная мощность, Вт	283375,5	28380,0

Параметр	Значение $f=360$ Гц	Значение $f=800$ Гц
Коэффициент мощности	1,0	1,0
Активная мощность, Вт	250000	250000
КПД, %	88,2	88,0

В статических режимах мощность, необходимая для возбуждения возбудителя, не превышает 300 В, ток возбуждения не превышает 10 А. Этот показатель позволяет для отработки регулирования напряжения генератора использовать регуляторы типа БРЗУ-115ПЧ, БРЗУ115ВА2С, что сокращает длительность испытаний.

Поверочные расчеты спроектированного подвозбудителя для крайних частот вращения были проведены с помощью метода конечных элементов. Внешние характеристики, полученные в результате расчета, приведены на рисунке 21. Из графиков видно, что данная машина с применением магнитов на основе сплава неодима железа и бора типа НмБ310 спроектирована с некоторым запасом.

Таблица 6 – Энергетические характеристики возбудителя

Параметр	Значение $f=1080$ Гц	Значение $f=2400$ Гц
Потери в меди обмотки возбуждения, Вт	104,34	59,1
Потери в меди якоря, Вт	521,3	375,0
Потери в стали якоря, Вт	1478,0	1077,5
Суммарные потери, Вт	2318,2	2022,1
Полная мощность, Вт	11535,0	8652,8
КПД, %	79,9	76,6

Таблица 7 – Энергетические характеристики подвозбудителя

Параметр	Значение $f=1440$ Гц	Значение $f=3200$ Гц
Потери в меди якоря, Вт	128	143
Потери в стали якоря, Вт	48	155
Пульсационные потери в индукторе, Вт	50,7	168
Суммарные потери, Вт	128,55	467
Полная мощность, Вт	952	1192
Коэффициент мощности	1,0	1,0
КПД, %	76,25	60,9

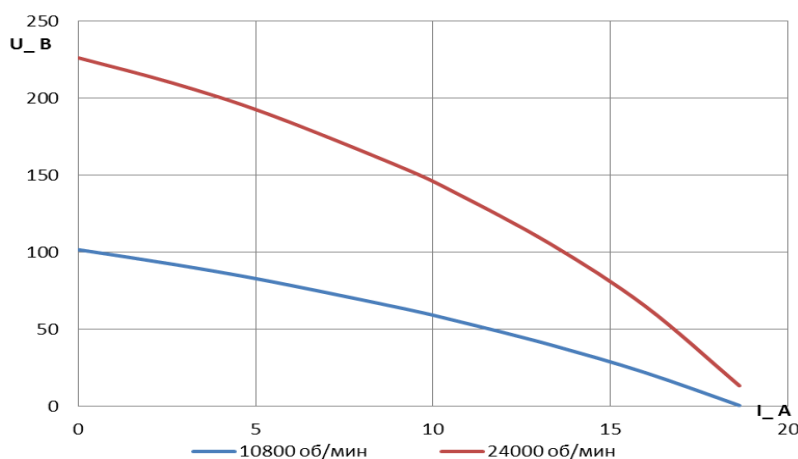


Рисунок 21 – Внешние характеристики подвозбудителя

Синхронный генератор ГТ250НЖ24 построен на основе традиционных подходов к конструированию авиационных трехкаскадных серийных генераторов. Основным конструктивным отличием нового генератора является консольное расположение как подвозбудителя, так и возбудителя за задним подшипником. Такое расположение в условиях высоких частот вращения позволяет более равномерно нагружать передний и задний

подшипники и, следовательно, увеличить их срок службы и ресурс всего синхронного генератора.

Вал по аналогии с генератором ГСР-90/120 выбран полым и большого диаметра – 80 мм. Материал деталей вала – сталь типа 30ХГСА или титановый сплав типа ВТ-14. Вал является разборным по конструкции, что обеспечивает установку в него блока вращающихся выпрямителей. Соединение вала с приводом производится через выходной вал, на котором нарезаны эвольвентные шлицы с модулем 1,5 мм. От осевого перемещения выходной вал фиксируется разрезным пружинным кольцом, установленным в проточки выходного вала и вала ротора.

Система охлаждения генератора – жидкостная, распылительного типа, разработанная по аналогии с генераторами ГСР-90/120. Подача охлаждающего масла к распылительным жиклерам на валу ротора производится через внешний трубопровод к входному штуцеру и далее, в полость вала. 3D-модель высокооборотного синхронного генератора повышенной мощности ГТ250НЖ24 приведена на рисунке 22.

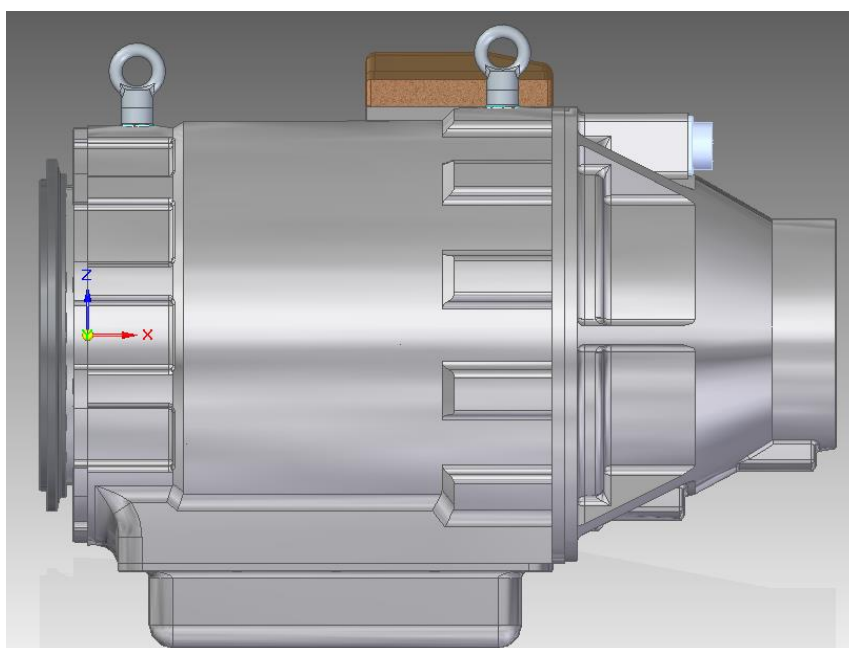


Рисунок 22 – 3D-модель синхронного генератора ГТК250НЖ24

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В диссертационной работе решена проблема создания системы проектирования высокооборотных синхронных генераторов с электромагнитным возбуждением, отличающихся высокими удельными характеристиками с параметрами и показателями качества электроэнергии, удобными для эффективного преобразования в первичных системах электроснабжения и питания бортового многофункционального оборудования, имеющая существенное значение для эффективного применения авиационной техники. Приведены научно обоснованные технические решения по созданию авиационных высокооборотных синхронных генераторов повышенной мощности, внедрение которых вносит значительный вклад в повышение эффективности эксплуатации воздушных судов государственной и гражданской авиации России.

В работе получены следующие основные результаты:

1. Разработана концептуальная основа системного комплексного решения проблемы создания электромеханических преобразователей энергии летательных аппаратов нового поколения путем применения технологий имитационного моделирования и раскрытия

механизмов внутренних потенциальных свойств высокооборотных синхронных генераторов, интеллектуальных систем поверочных расчетов авиационных систем электроснабжения.

Основные положения сводятся к следующему:

1.1 На основе развития концепции «более электрического самолета» определена проблема и сформулированы новые задачи системного улучшения качества систем электроснабжения путем создания информационно-технической системы разработки мощных источников электрической энергии на основе синхронных генераторов с электромагнитным возбуждением, которая включает интеллектуальную подсистему поверочных расчетов авиационных систем электроснабжения.

1.2 На основе системного подхода сформулирована многоплановая задача согласования летно-технических, эксплуатационно-технических свойств систем электроснабжения и методологически обоснованы направления создания мощных электромеханических преобразователей энергии воздушных судов путем реализации требуемых свойств авиационных систем электроснабжения по улучшению удельных массо-энергетических характеристик.

1.3 Результатом оптимального проектирования высокооборотных синхронных генераторов является полная их конструкция в 3D-модели с установленными атрибутами элементов модели, что позволило перейти к применению интеллектуальных систем проектирования и методологий электрических машин.

2. Разработаны и углублены ориентированные на практическое применение теоретические основы и методы комплексного системного обеспечения разработки мощных источников электрической энергии на основе синхронных генераторов с электромагнитным возбуждением, базирующиеся на формализации систем электроснабжения как технических систем, задач и методов поверочных расчетов с высокой степенью достоверности.

2.1 На основе системного подхода сформулированы задачи выбора рациональных технических решений трехкаскадных генераторов с электромагнитным возбуждением и исследованы алгоритмы и методы проектирования трехкаскадных генераторов с электромагнитным возбуждением, включая электромагнитные, тепловые, гидравлические и механические расчеты, отличающиеся степенью детализации параметров, геометрии машины, а также временем расчета.

2.2 Получены условия разрешения задачи обеспечения точности поверочных расчетов электрических машин, основанные на совместном использовании аналитических и полевых расчетов.

2.3 Выявлены и оценены закономерности электромагнитных процессов, протекающих в высокооборотных авиационных синхронных генераторах переменного электрического тока, создание которых возможно только с помощью подходов и методов оптимального проектирования.

2.4 Обоснована процедура имитационного моделирования, которая предполагает двухуровневое моделирование с помощью совмещенной численной модели основного генератора и возбудителя, включенной в итерационный цикл с имитационно-динамической моделью на основе уравнений Парка–Горева.

2.5 На основе системного подхода разработан метод учета функциональных и конструктивных ограничений, накладываемых в процессе проектирования высокооборотных синхронных генераторов как на управляемые параметры, так и на промежуточные величины с помощью штрафных и барьерных функций специального вида, что позволяет использовать методы безусловной оптимизации.

2.6 Разработана аналитическая модель целевого функционала оценки качества высокооборотного синхронного генератора с электромагнитным возбуждением, представляющая собой совокупность рациональных значений технических параметров генератора, наиболее значимым из которых являются удельная мощность или обратная ей величина – удельная масса, и предложен минимизированный набор независимых

управляемых параметров, полностью описывающих технический облик электрической машины.

2.7 Разработана методология оптимального проектирования высокооборотного синхронного генератора, основанная на общепринятых принципах и методах проектирования электрических машин, которая определяет технический проект как основной этап разработки изделия. Методология содержит два взаимосвязанных процесса – поиск оптимального варианта синхронного генератора на каждом из этапов проектирования и имитационное моделирование режимов работы с помощью разработанной геометрии машины для анализа качества ее работы в составе системы генерирования.

3. В прикладных задачах основное внимание уделено разработке и реализации новых технологий имитационного моделирования; методам поиска рациональных и оптимальных технических решений; разработке и созданию методологий моделирования и проектирования электрических машин, позволяющих создавать системы генерирования электрической энергии воздушных судов нового поколения.

3.1 На основе методологии оптимального проектирования для воздушных судов государственной и гражданской авиации созданы:

- опытный образец высокооборотного синхронного генератора с электромагнитным возбуждением ГСР-40НЧ для самолета нового поколения Ил-112В, обладающий высокими массо-энергетическими удельными характеристиками;

- экспериментальный образец высокооборотного синхронного генератора ГСР-90/120 с номинальной мощностью 120 кВА для нового самолета типа МС-21, который по основным характеристикам не уступает синхронным генераторам американской корпорации Hamilton Sundstrand, предварительно устанавливаемым на этом воздушном судне;

- полные 3D-модели синхронных генераторов различной мощности во исполнение заказа Министерства промышленности и торговли РФ в течение 2015–2016 гг., включая системы электроснабжения самолетов, разработки фирмы «Гражданские самолеты Сухого» типа SSJ;

- технический проект синхронного генератора с электромагнитным возбуждением с номинальной мощностью 250 кВА и максимальной мощностью 500 кВА, который работает в диапазоне частот вращения от 10800 мин⁻¹ до 24000 мин⁻¹. Данная электрическая машина действующих аналогов в России не имеет.

3.2 Разработана система проектирования высокооборотного синхронного генератора переменного тока переменной частоты широкого диапазона, позволяющая:

- однозначно определять допустимую область основных размеров активных элементов конструкции синхронного генератора с электромагнитным возбуждением для максимальной частоты вращения, которая составляет не менее 24000 мин⁻¹;

- создавать высокооборотные синхронные генераторы с удельной массо-энергетической характеристикой не более 0,25 кг/кВА, что достигнуто в конструкции генератора ГТ250НЖ24 и не уступает аналогичной электрической машине Hamilton Sundstrand Corporation, установленной на маршевых двигателях самолета Боинг 787;

- осваивать производство высокооборотных синхронных генераторов с электромагнитным возбуждением практически на любом серийном предприятии, производящем серийно электрические машины других типов.

3.3 Результаты исследований подтверждают возможность решения задач по созданию систем генерирования электроэнергии в централизованных и децентрализованных авиационных системах электроснабжения с заданным качеством.

Практическая реализация системы оптимального проектирования высокооборотных синхронных генераторов, теоретико-методические основы их разработки и реализации в условиях создания воздушных судов нового поколения подтверждает их актуальность, научную значимость и высокую эффективность.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Рецензированная монография:

1. **Калий, В.А.** Биротативный генератор для противообледенительной системы винтовентилятора: монография [Текст] / В.А. Калий, А.В. Резниченко, М.С. Савченко, С.М. Мусин; под ред. Мусина С.М. – Уфа: УГАТУ, 2015. – 100 с.

Научные труды, опубликованные в изданиях и журналах, входящих в международную систему цитирования «Scopus»:

2. Kaliy, V., Musin, S., Shapkin, V., Kuklev, E., Nikonov, V., Kamzolov, S., Konyaev, E. Heat exchange models in aviation starter-generator with combined excitation (2018) International Journal of Civil Engineering and Technology, 9 (7), статья №IJCIET_09_07_176, pp. 1641-1651.

Научные труды, опубликованные в рекомендованных ВАК научных изданиях и журналах:

3. **Калий, В.А.** Совмещенная численная модель основного генератора и возбудителя авиационного синхронного генератора с электромагнитным возбуждением [Текст] / В.А. Калий, А.С. Щупаков / Научный журнал Вестник УГАТУ, 2016, № 4(74). – Уфа. 2016. - с. 80-83.

4. **Калий, В.А.** Математическое моделирование процессов сжигания топлива в перспективных ГТУ при высокой температуре [Текст] / М.С. Савченко, В.А. Калий, С.А. Белов / Электронный журнал «Современные проблемы науки и образования» № 4, 2013.

5. **Калий, В.А.** Выбор методов проектирования и теоретические расчеты высокотемпературных камер сгорания [Текст] / В.А. Калий, С.А. Белов, А.В. Резниченко / Электронный журнал «Современные проблемы науки и образования» № 4, 2013.

6. **Калий, В.А.** Имитационное моделирование преобразователей электроэнергии для определения их параметров на этапе поверочного расчета [Текст] / В.А. Калий / Научно-технический журнал «Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ», Т. 151, № 2. – М.: АО «Корпорация ВНИИЭМ», 2016 г. - с 3-7.

7. **Калий, В.А.** Электромагнитный расчет магнитоэлектрического двигателя с удельной мощностью не менее 5 кВт/кг [Текст] / В.А. Калий / Электротехнические и информационные комплексы и системы, № 2, т. 12, 2017. - Уфа: УГНТУ, 2017. - с.16-20.

8. **Калий, В.А.** Современные проблемы разработки технической и эксплуатационной документации на авиационную технику в рамках управления жизненным циклом изделия [Текст] / А.С. Газов, Н.Е. Зайкина, В.А. Калий, К.А. Кушев, М.С. Савченко / Вестник УГАТУ, 2017, т.21, №4(78). – Уфа: УГАТУ, 2017. – с.97-103.

9. **Калий, В.А.** Анализ испытаний нового трансформаторно-выпрямительного устройства ТВУ-9К [Текст] / В.А. Калий, И.В. Зарембо, А.В. Резниченко, Р.В. Ровнейко / Электротехнические и информационные комплексы и системы, №4, т.13, 2017. – Уфа: УГНТУ, 2017. – с.5-9

10. **Калий, В.А.** Моделирование процессов теплообмена в авиационном стартер-генераторе с комбинированным возбуждением [Текст] / В.А. Калий, С.М. Мусин, Д.А. Ситин, А.С. Семенов / Авиационная промышленность №1/2018. – М.: НИАТ, 2018. – с.4-7.

11. **Калий, В.А.** Модели процессов теплообмена в авиационном стартер-генераторе с комбинированным возбуждением [Текст] / В.А. Калий, С.М. Мусин, Д.А. Ситин, А.С. Семенов / Авиационная промышленность №2/2018. – М.: НИАТ, 2018. – с.7-15.

12. **Калий, В.А.** Электромагнитная совместимость системы электроснабжения самолета Ил-114-300 [Текст] / В.А. Калий, С.М. Мусин / Научный Вестник ГосНИИ ГА, №24(335)/2018. – М.: ГосНИИ ГА, 2018.

13. **Калий, В.А.** Авиационный стартер-генератор ближне-среднемагистрального самолета [Текст] / В.А. Калий, С.М. Мусин, А.В. Резниченко / Авиационная промышленность №1/2019. – М.: НИАТ, 2019. – с. 7-9.

Статьи в сборниках и трудах конференций:

14. **Калий, В.А.** Перспективные типы морских погружных электрических двигателей открытого исполнения [Текст] / В.А. Калий, М.С. Савченко, А.С. Гавзов / Сборник докладов МНПК «ВОКОР-2012», Санкт-Петербург, 2012. – с. 112 – 120.

15. **Калий, В.А.** Выбор конструктивной схемы униполярного гребного электродвигателя и анализ системы компенсации реакции якоря [Текст] / В.А. Калий, М.С. Савченко / Сборник докладов Всемирной морской технологической конференции ВМТК-2012. - Санкт-Петербург, 2012. - с. 103 – 109.

16. **Калий, В.А.** Вопросы построения автономной системы электроснабжения на основе магнитоэлектрического генератора [Текст] / М.С. Савченко, В.А. Калий, С.А. Белов / Сборник докладов ВМТК «Электропитание-2012». - Санкт-Петербург, 2012. – с. 201 – 209.

17. **Калий, В.А.** Основные направления развития судовых электроэнергетических установок [Текст] /В.А. Калий, М.С. Савченко /Сборник докладов ВМТК-2012. - Санкт-Петербург, 2012. – с. 151 – 157.
18. **Калий, В.А.** Современные тенденции развития авиационных генераторов переменного тока [Текст] /В.А. Калий/ Труды XV Международной конференции «Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и Компоненты», Республика Крым, Алушта, 2014. - с. 204-206.
19. **Калий, В.А.** Синхронный ГЭД с электромагнитной редукцией. Методика расчета [Текст] / НБКД М.597-2012. - М.: ОАО ПГ «Новик», 2013. – 120 с.
20. **Калий, В.А.** Применение линейных погружных вентильных электродвигателей [Текст] /Электротехнические комплексы и системы: Материалы всероссийской научно-практической конференции, посвященной 110-летию А.М. Бамдаса. – Уфа: УГАТУ, 2015. с. 152–156.
21. **Калий, В.А.** О применении методов случайного поиска при оптимальном проектировании электрических машин [Текст] /Электротехнические комплексы и системы: Материалы всероссийской научно-практической конференции, посвященной 110-летию А.М. Бамдаса. – Уфа: УГАТУ, 2015. – с. 105–111.
22. Kuderko Dmitry, Shirmanov Vladimir, Kaliy Valery Energy system “electric” aircraft - concept, technology, practice. More Electric Aircraft Europe, Hamburg, Germany 2016.
23. **Калий, В.А.** Определение начальных размеров авиационного высокооборотного синхронного генератора с помощью неградиентного метода случайного поиска Гладкова Д.И. [Текст] /В.А. Калий /Труды научно-технической конференции «Электрификация летательных аппаратов».- М.: 2016. - с.252-257.
24. **Калий, В.А.** Электротехническая совместимость бортового авиационного оборудования как внешний воздействующий фактор [Текст] / С.М. Мусин, В.А. Калий /Материалы XIV Всероссийской научно-технической конференции «Научные чтения по авиации, посвященные памяти Н.Е. Жуковского». Сборник докладов. – М.: Издательский дом Академии им. Н.Е. Жуковского, 2017. – 59 с.

Патенты:

25. **Пат. № 2522750 Российская Федерация, МПК В63Н23/24.** Тихоходный гребной электродвигатель с возбуждением от высококоэрцитивных магнитов непосредственного жидкостного охлаждения с электроснабжением и управление от частотного преобразователя [Текст] / Белов С.А., Калий В.А., Попелнуха Г.В., Савченко М.С. - № 2017615616; заявл. 26.12.12; опубл. 20.07.14.
26. **Пат. 2017616334 Российская Федерация, программа для ЭВМ.** Программа СРКГ [Текст] / Калий В.А., Щупаков А.С.; заявитель и патентообладатель АО «Технодинамика». - № 2017615616; заявл. 17.04.17; опубл. 06.06.17.
27. **Пат. 2562906 Российская Федерация, МПК H02K 5/12.** Компенсатор погружного линейного электродвигателя [Текст] / Калий В.А., Савченко М.С., Резниченко А.В., Скварский П.А. - 2014121828; заявл. 29.05.14; опубл. 17.08.15.
28. **Пат. 150254 Российская Федерация, МПК H02P 9/04 B60L 11/08 B63H 21/00 B63H 21/14, B63H 21/06.** Устройство электропитания постоянным током автономного транспортного судна [Текст] / Калий В.А., Савченко М.С., Резниченко А.В., Скварский П.А. - 2014121830; заявл. 29.05.14; опубл. 29.12.14.
29. **Пат. 145258 Российская Федерация, МПК H02K 5/12.** Погружной линейный электродвигатель [Текст] / Калий В.А., Савченко М.С., Резниченко А.В., Скварский П.А. - 2014121824; заявл. 29.05.14; опубл. 21.12.14.
30. **Пат. RU 165187 U1 Российская Федерация МПК H02K 3/52 H02K 3/04 H02K 1/24.** Индукторный генератор с комбинированным возбуждением [Текст] / Калий В.А., Ситин Д.А., Мисютин Р.Ю., Панихин М.В., Вирясов С.С., Черкасов К.А.; заявитель и патентообладатель АО «Технодинамика». - 2015156675; заявл. 29.12.15; опубл. 22.03.17.

Работы [6, 7, 18, 19, 20, 21, 23] выполнены автором единолично. В работах [1-5, 8-18, 22, 24-30], написанных в соавторстве, автору принадлежат от 75% до 85% общего объема представленного материала, а именно, общая постановка проблем и задач исследований, методов их решения, обоснование математических моделей, конструкций, технологий для процесса конструирования авиационных электрических машин.