

На правах рукописи



БАВИЛОВ Вячеслав Евгеньевич

**МЕТОДОЛОГИЯ СОЗДАНИЯ СИСТЕМ ГЕНЕРИРОВАНИЯ
ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ
С МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ ЭНЕРГИИ**

Специальность:

05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук**

Уфа – 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет» (ФГБОУ ВО «УГАТУ») на кафедре электромеханики

Научный консультант:

Исмагилов Флюр Рашитович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электромеханики», ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет», г. Уфа.

Официальные оппоненты:

Казаков Юрий Борисович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электромеханики» ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», г. Иваново.

Зубков Юрий Валентинович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Электромеханики и автомобильного электрооборудования», ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», г. Самара.

Смирнов Александр Юрьевич, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Теоретическая и общая электротехника» ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет», г. Нижний Новгород.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва.

Защита состоится «03» апреля 2020 г. в 10⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.288.02 на базе ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» по адресу: 450008, г. Уфа, ул. Карла Маркса, 12, ФГБОУ ВО «УГАТУ».

С диссертационной работой можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» и на сайте www.ugatu.su.

Автореферат разослан « »

20 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.288.02 д.т.н., доцент



А. Ю. Демин

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. Общемировые экономические и экологические проблемы, связанные с повышением энергоэффективности и энерговооруженности автономных объектов (АО) в целом и авиационных и космических летательных аппаратов (ЛА) в особенности, а также вопросы повышения тактико-технических характеристик ЛА до границ физических возможностей становятся на современном этапе развития науки и техники первоочередными задачами, разрешение которых обеспечит масштабное развитие всех отраслей промышленности, повышение обороноспособности РФ и развитие экономики РФ за счет создания новых инновационных продуктов с широкой возможностью экспорта.

Для повышения энерговооруженности, энергоэффективности ЛА в условиях конкуренции авиастроительных корпораций и требований по минимальным срокам создания новых ЛА необходимо обеспечить повышение мощности системы генерирования электроэнергии (СГЭ) при минимизации массогабаритных показателей СГЭ, увеличении его КПД и повышении надежности и при этом минимизировать временные и материальные затраты на создание подобных СГЭ.

На рисунке 1 приведена обобщенная структурная схема СГЭ перспективных АО. В общем виде СГЭ АО является самодостаточным, изолированным электротехническим комплексом, который состоит:

- из электромеханического преобразователя энергии (ЭМПЭ), который выполняет функции электрозапуска первичного источника энергии на борту АО (газовой турбины, авиационного двигателя или двигателя внутреннего сгорания) и является основным источником электроэнергии на борту АО. Поэтому для решения проблемы повышения энерговооруженности АО требуется создание высокоэффективных ЭМПЭ нового поколения, способных обеспечить удельную массу на уровне не более 0,15–0,2 кг/кВт при КПД не менее 95%;
- аккумуляторной батареи (АКБ);
- системы управления (СУ) СГЭ, выполняющей функции обеспечения выходных параметров СГЭ в соответствии с техническими стандартами, диагностики технического состояния СГЭ, управления всеми элементами СГЭ, обеспечивающей взаимодействие элементов СГЭ с системами более высокого уровня;
- элементов для преобразования электроэнергии (трансформаторов, статических преобразователей и т.д.). Во многом именно эти элементы ввиду их массовости и различных параметров определяют энергоэффективность СГЭ;
- измерительной системы (ИС) СГЭ, выполняющей функцию измерения токов, напряжения, температур, вибраций и других необходимых для функционирования АО СГЭ параметров;
- системы обеспечения функционирования СГЭ. В данную систему входят все элементы, обеспечивающие энергоэффективное и надежное функционирование СГЭ, такие как электромагнитные муфты, обеспечивающие механическое разъединение ЭМПЭ и источника первичной энергии; системы магнитного подвеса, которые обеспечивают

эффективность ЭМПЭ, различные электродвигатели, которые обеспечивают функционирование системы охлаждения СГЭ и т.д. Очевидно, что состав системы может значительно видоизменяться в зависимости от области применения АО и условий его эксплуатации.

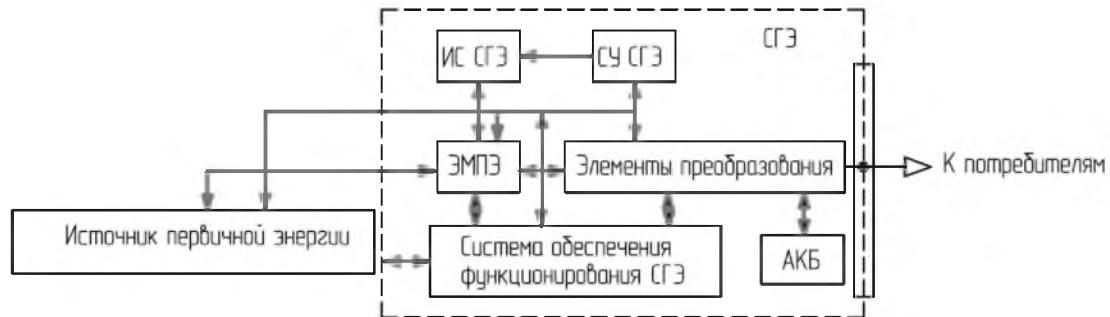


Рисунок 1 – Обобщенная структурная схема СГЭ

Из-за высокой конкуренции между авиастроительными корпорациями одним из основных критериев при создании СГЭ ЛА являются сроки его реализации и материальные затраты, которые необходимо вложить в разработку того или иного СГЭ ЛА. Так как именно этот критерий во многом обеспечивает выведение на рынок и стоимость ЛА. Минимизация временных и материальных затрат при создании СГЭ ЛА достигается минимизацией времени проектирования, минимизацией стоимости технологического цикла изготовления агрегатов СГЭ ЛА и их материалоемкости. Это обеспечивается параллельными взаимосвязанными вычислениями при создании агрегатов СГЭ ЛА, решением оптимизационных задач и созданием методологий для их реализации. При этом для обеспечения параллельных взаимосвязанных вычислений при создании агрегатов СГЭ ЛА необходимо разработать научные подходы, позволяющие выполнение взаимосвязанных тепловых, электромагнитных и механических расчетов с использованием междисциплинарных обобщенных математических моделей. При этом данные подходы должны быть аналитическими, поскольку именно аналитические методы обеспечивают минимальное расчетное время, с последующим уточнением расчетов методами компьютерного моделирования с помощью метода конечных элементов. Подобная идеология позволяет сократить время расчетов и проектирования агрегатов СГЭ ЛА в частности и СГЭ ЛА в целом на 30–50%.

Для реализации всех требований к перспективным СГЭ ЛА очевидно, что необходимо создавать ЭМПЭ (основной энерговырабатывающий узел СГЭ) нового поколения, которые будут обладать минимальными массогабаритными показателями при максимальной мощности и КПД. При этом особой перспективой обладают ЭМПЭ, которые могут интегрироваться без редуктора в силовые установки ЛА (например, на вал низкого или высокого давления авиационного двигателя или на турбину вспомогательной силовой установки). Тенденции последних лет показывают, что наибольшую эффективность для использования в ЛА в качестве источника питания приобретают ЭМПЭ с высококоэрцитивными постоянными магнитами (ВПМ) с частотой вращения ротора от

12 000 до 240 000 об/мин или более высокими частотами вращения ротора, что характерно для короткоресурсных объектов. Эффективность применения ЭМПЭ с ВПМ в ЛА обусловлена тем, что они позволяют получать максимум электрической мощности при минимальной массе электрической машины и достигнуть удельной массы на уровне 0,2–0,25 кг/кВт. ЭМПЭ с ВПМ полностью автономны, и не требуют дополнительной энергии на возбуждение. Частным случаем ЭМПЭ с ВПМ, значительно повышающим эффективность последних, являются высокооборотные ЭМПЭ с ВПМ, которые используются в основном в короткоресурсных объектах совместно с воздушной турбиной на борту ЛА, например в системах турбохолодильных агрегатов (ТХА), комплексных турбокомпрессорных установках (КТУ), турбогенераторных источниках (ТГИ) или при прямом безредукторном соединении со вспомогательной силовой установкой (ВСУ).

Создание высокомоощных ЭМПЭ с ВПМ и СГЭ на их основе при минимальных временных и материальных затратах невозможно осуществить без разработки методологии проектирования и решения задач синтеза и многокритериальной оптимизации геометрических размеров ЭМПЭ с ВПМ, в том числе и высокооборотных, а также синтеза систем СГЭ, создания новых, научно обоснованных конструктивных схем ЭМПЭ с ВПМ и других элементов СГЭ, концепций построения СГЭ ЛА на их основе, без создания методов учета взаимовлияний процессов как в самом СГЭ, так и в его элементах, в том числе взаимовлияний магнитных, тепловых и механических процессов, протекающих в ЭМПЭ с ВПМ.

При этом использование новых материалов в элементах СГЭ с уникальными свойствами, для минимизации материальных затрат при создании СГЭ ЛА, новых конструктивных схем элементов СГЭ и новых требований по их совместному функционированию, а также требований по точности проектирования СГЭ не позволяет в полной мере применять существующую теоретическую базу с эмпирическими рекомендациями, полученными на основе исследований традиционных ЭМПЭ. Известная теоретическая база по электрическим машинам требует расширения и дополнения, в том числе по исследованию нестационарных магнитных полей в ЭМПЭ с ВПМ в трехмерном пространстве, с учетом взаимовлияния температурных полей. Необходимо решить проблемы надежности и повышения энергоэффективности подшипниковых узлов ЭМПЭ с ВПМ, вопросы, связанные с минимизацией потерь на гистерезис и вихревые токи в стали статора, обусловленные высокой частотой его перемагничивания, задачи минимизации тепловыделений в обмотках, задачи обеспечения механической прочности ротора, подвергающегося воздействию значительных центробежных сил, вопросы создания эффективных схем обмоток, в том числе зубцовых, вопросы защиты от короткого замыкания ЭМПЭ с ВПМ, вопросы особенностей роторной динамики ЭМПЭ и т.д.

Исходя из этого, объектом исследований в диссертации является система генерирования электроэнергии перспективных ЛА, состоящая из магнитоэлектрического электромеханического преобразователя энергии, системы стабилизации его напряжения, системы управления СГЭ, элементов преобразования (трансформаторов, трансформаторно-

выпрямительных устройств и т.д.) и системы обеспечения функционирования элементов в СГЭ (электродвигатели, магнитные подшипники, муфты и т.д.).

Степень разработанности темы исследования. Исследованиям высокоэффективных ЭМПЭ посвящены работы В. А. Балагурова, Ф. Ф. Галтеева, А. Н. Ледовского, Д. А. Бута, А. И. Бертинова, А. Б. Захаренко, Я. Б. Данилевича, Ю. М. Красильникова, Л. Б. Ганзбурга, В. Я. Гечи, И. Ю. Кручининой, А. В. Левина, В. В. Лохнина, Ю. Б. Казакова, В. А. Нестерина, А. Ю. Смирнова, Ю. А. Макаричева, Ю. В. Зубкова, Б. С. Зечихина, М. Ю. Румянцева, Ф. Р. Исмаилова, И. Х. Хайруллина, А. М. Сугрובה, К. Л. Ковалева, В. Т. Пенкина, С. А. Харитоновна, J. R. Hendershot, T. J. E. Miller, A. Borisavljevic, A. Nagorny, Z. Q. Zhu, J. Pyrhönen и многих других. Развитию методов расчета систем с постоянными магнитами большое внимание уделяли такие ученые, как А. Б. Альтман, В. К. Аркадьев, Р. Р. Арнольд, А. В. Гордон, Ю. М. Пятин, К. Halbach, R. Ravaund, G. Lemarquand и др.

Исследованиям, оптимизации и синтезу авиационных систем электроснабжения, систем генерирования и агрегатов ЛА посвящены работы Д. Э. Брускина, В. В. Кушнерева, Б. Н. Калугина, В. С. Кулебакина, В. Т. Морозовского, В. Н. Сучкова, Ф. А. Гизатуллина, Е. В. Волокитиной, С. А. Грузкова, И. А. Лазарева, М. И. Комисара, С. П. Халютин, С. Б. Резникова, W. J. Clardy, W. L. Berry, J. P. Dallas, B. Adkins, W. Philipp, A. Hossle и др.

Анализу тепловых процессов и задачам повышения КПД ЭМПЭ посвящены работы Г. А. Сипайлова, Ф. Н. Сарапупова, И. Ф. Филиппова, S. Nategh, L. Zhenguo, F. Deping, G. Jianhong, G. Guobia и т.д.

Вопросы математического и компьютерного моделирования магнитных полей ЭМПЭ в своих трудах отразили Б. К. Буль, О. Б. Буль, В. Я. Беспалов, А. И. Вольдек, О. Д. Гольдберг, В. В. Домбровский, К. С. Демирчян, А. В. Иванов-Смоленский, И. П. Копылов, Ю. Б. Казакова и др.

Анализ публикаций по теме исследований показывает, что в работах отечественных и зарубежных авторов изложены фундаментальные основы разработки и анализа систем электроснабжения (СЭС) и СГЭ ЛА. Но требования авиастроительных корпораций по минимизации времени создания новых ЛА, с минимизацией времени вывода их на рынок, диктуют расширение теории в части методологии и научных подходов, позволяющих добиться минимизации временных и материальных ресурсов при создании перспективных СГЭ ЛА. Кроме того, новые структуры СГЭ с высоконагруженными ЭМПЭ с ВПМ (в том числе с ЭМПЭ с ВПМ, интегрированными в силовую установку) с требованиями по повышению мощности СГЭ, появление новых методов повышения эффективности ЭМПЭ обязывает к дальнейшему развитию теории СГЭ ЛА. Из анализа литературы видно, что на данный момент недостаточно развиты подходы, позволяющие multidisciplinary проектирование полностью всей системы генерирования электроэнергии ЛА с ЭМПЭ с ВПМ с учетом взаимовлияния всех элементов, входящих в него, хотя именно наличие подобных подходов позволяет значительно ускорить процесс создания СГЭ ЛА. В большинстве зарубежных публикаций поставленные задачи решаются либо экспериментальным путем, либо методами компьютерного моделирования. Это, несомненно, имеет значительную

практическую ценность, но затрудняет использование данных результатов при расчетах ЭМПЭ в широком диапазоне мощностей и габаритных размеров. Неосвоенными остаются вопросы создания обобщенной математической модели ЭМПЭ на бесконтактных подшипниковых опорах (БПО), использование которых позволяет повысить ресурс и эффективность СГЭ с ЭМПЭ с ВПМ, мало исследованы взаимовлияния тепловых и электромагнитных полей в ЭМПЭ с ВПМ, не создан обобщенный метод многокритериального выбора материала магнитопровода статора.

Исходя из этого, **научная проблема**, решаемая в диссертации, – развитие теории СГЭ ЛА на основе ЭМПЭ с ВПМ, создание методологии комплексного анализа и разработки систем генерирования электроэнергии летательных аппаратов с магнитоэлектрическими преобразователями энергии. Решение данной крупной научной проблемы обеспечит создание перспективных высокомошных СГЭ ЛА при минимальных затратах времени и средств.

Цель работы – разработка и создание мощных, энергоэффективных и отказоустойчивых СГЭ на основе ЭМПЭ с ВПМ современных и перспективных ЛА при минимальных затратах времени и средств.

Идея работы заключается в использовании междисциплинарных подходов к анализу процессов в перспективных СГЭ и его агрегатах, учете взаимозависимостей магнитных, тепловых полей и механических процессов в энерговырабатывающих преобразователях СГЭ ЛА, разработке новых конструктивных схем агрегатов СГЭ ЛА, использовании новых материалов и технологий, позволяющих их эффективное применение.

Для достижения поставленной цели в работе поставлены и решены следующие **основные задачи**:

1. Разработка обобщенной структурной модели СГЭ ЛА на основе ЭМПЭ с ВПМ с учетом тенденций развития современных ЛА, учитывающей возможности интеграции ЭМПЭ с ВПМ в силовую установку ЛА и позволяющей выполнять исследования СГЭ ЛА при условии многовариантности их построения.
2. Разработка и исследования обобщенной математической модели, описывающей процессы в ЭМПЭ с ВПМ в установившихся и переходных режимах, учитывающей взаимовлияние тепловых, механических и электромагнитных процессов, а также процессов в подшипниковых узлах и влияние эксцентриситета ротора на параметры ЭМПЭ с ВПМ.
3. Многокритериальная оптимизация агрегатов, входящих в СГЭ ЛА по заданным критериям и разработка алгоритма, позволяющего выполнять процесс междисциплинарного проектирования СГЭ ЛА на основе ЭМПЭ с ВПМ.
4. Разработка нового метода обеспечения отказоустойчивости ЭМПЭ с ВПМ в части защиты ЭМПЭ с ВПМ от витковых коротких замыканий, обеспечивающего минимизацию последствий витковых замыканий ЭМПЭ с ВПМ, а также купирование поврежденной катушки или фазы. Разработка методики компьютерного моделирования

процессов при различных видах коротких замыканий (в том числе витковых) в ЭМПЭ с ВПМ.

5. Исследование режимов работы ЭМПЭ с ВПМ совместно с регулятором напряжения в составе СГЭ и оценка эффективности различных способов стабилизации напряжения ЭМПЭ с ВПМ в составе СГЭ ЛА. Разработка методики исследования магнитного поля реакции якоря в программном комплексе Ansys, позволяющей минимизацию временных затрат при компьютерном моделировании ЭМПЭ с ВПМ.

6. Анализ и создание алгоритмов расчета потерь в стали в агрегатах СГЭ при частотах более 400 Гц, выбора материалов и расчета ЭМПЭ, трансформаторно-выпрямительных устройств нового поколения на основе магнитопроводов из аморфного железа, разработка нового метода изготовления магнитопровода статора ЭМПЭ из аморфного железа.

7. Разработка, создание и внедрение новых, научно обоснованных конструктивных схем высокоэффективных агрегатов СГЭ. Экспериментальные исследования характеристик ЭМПЭ с ВПМ в статическом и динамическом режимах и анализ особенностей эксплуатации ЭМПЭ с ВПМ при различных режимах работы СГЭ ЛА.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Предложена методология создания СГЭ ЛА, отличающаяся от известных тем, что учитывает взаимозависимости тепловых, электромагнитных полей агрегатов СГЭ ЛА, возможность совместной комплексной оптимизации характеристик агрегатов СГЭ ЛА и позволяет выполнять процесс многодисциплинарного проектирования СГЭ ЛА на основе ЭМПЭ с ВПМ при минимальных временных и материальных затратах.

2. Разработана обобщенная структурная модель СГЭ ЛА на основе ЭМПЭ с ВПМ с учетом тенденций развития современных ЛА, отличающаяся учетом возможности параллельной реализации нескольких СГЭ ЛА и прямой интеграции ЭМПЭ с ВПМ в силовую установку ЛА, а также многофазности и дублируемость элементов в отказоустойчивых ЭМПЭ с ВПМ СГЭ ЛА и позволяет выполнять исследования СГЭ ЛА при условии многовариантности их построения.

Предложены частные структурные модели для основных и аварийных СГЭ ЛА.

3. Предложен новый метод обеспечения защиты ЭМПЭ с ВПМ от витковых коротких замыканий, отличающийся тем, что учитывается гальваническая, термическая и электромагнитная связь катушек ЭМПЭ с ВПМ и позволяет сохранять работоспособность ЭМПЭ с ВПМ при витковых коротких замыканиях и изолировать одну из фаз или катушек ЭМПЭ с ВПМ.

Доказана возможность обеспечения защиты ЭМПЭ с ВПМ (без дополнительных обмоток на роторе) от витковых коротких замыканий во всех режимах работы.

4. Предложен новый метод гибридной стабилизации напряжения ЭМПЭ с ВПМ, который отличается от известных тем, что позволяет обеспечивать стабилизацию напряжения ЭМПЭ с ВПМ благодаря совокупности теоретических и технических решений в части магнитной системы ротора и магнитопровода статора и при этом не ухудшает

массогабаритные показатели ЭМПЭ с ВПМ в отличие от известных параметрических способов стабилизации напряжения.

5. Разработан метод компьютерного моделирования коротких замыканий ЭМПЭ с ВПМ в программном комплексе Ansys Maxwell, отличающийся от известных тем, что учитывает механические процессы, взаимовлияние геометрических размеров ЭМПЭ с ВПМ и параметров обмотки и позволяет исследования как отдельных типов коротких замыканий, так и их различных комбинаций.

Практическая значимость работы подтверждается 8 актами внедрения результатов на предприятиях и в научных организациях: АО «УАПО» (Уфа), АО «ОКБ Кристалл» (Москва), АО «УНПП «Молния» (Уфа), ФГУП «ЦИАМ» (Москва), ООО «АльфаГидро» (Санкт-Петербург), ООО «Эрга» (Калуга), АО «УППО» (Уфа), а также одним актом внедрения в учебный процесс ФГБОУ ВО «УГАТУ» и др.

1. На основе полученных в работе научно-технических результатов созданы:

- система генерирования электроэнергии ЛА, состоящая электротехнического комплекса генератора МЭГ-100Ч и РН УФЦМ-150 (договор НР 574-15 между ФГБОУ ВПО «УГАТУ» и ОАО «Технодинамика»). Созданная СГЭ предназначена для использования в перспективных ЛА;

- СГЭ, состоящая из генератора ГМЭТСЧ и РН (в интересах ОАО «ОКБ «Кристалл»). Мощность генератора 150 кВт, частота вращения 24 000 об/мин, охлаждение жидкостное, напряжение реализовано методами подмагничивания спинки статора. Объект применения – магистральный генератор перспективных ЛА;

- СГЭ, состоящая из высокооборотного стартер-генератора с магнитопроводом из аморфного железа и его системы управления. Мощность стартер-генератора 120 кВт, частота вращения ротора 50 000 об/мин. КПД – более 98%. Объект применения – перспективная безредукторная ВСУ для перспективных ЛА, в том числе ЛА с коротким жизненным циклом;

- СГЭ, состоящая из высокооборотного стартер-генератора мощностью 20 кВт с частотой вращения ротора 12 000 об/мин и ТВУ, мощностью 10 кВт;

- электротехнические комплексы на основе энергоэффективных электродвигателей с постоянными магнитами и их системой управления для топливных насосов типа ЭЦН-91, используемых в системе охлаждения элементов СГЭ, в интересах АО «УАПО» (Уфа). Электродвигатели предназначены для использования на вертолетах Ми-8;

- электротехнические комплексы на основе энергоэффективных электродвигателей с постоянными магнитами и их системой управления для топливных насосов типа ЭЦН-73, используемых в системе охлаждения элементов СГЭ, в интересах АО «ОКБ Кристалл» (г. Москва);

- разработано техническое задание на СГЭ для авиационного двигателя ПД-35 (планируемый объект применения – ШФМДС), создан и испытан опытный образец СГЭ, состоящий из стартер-генератора и статического преобразователя для авиационного двигателя ПД-35, частота вращения ротора 12 000 об/мин, мощность 250 кВт;

- разработано техническое задание на электрогенератор для межрегионального самолета с гибридной силовой установкой (шифр Электролет). Создан и испытан опытный генератор для межрегионального ЛА с гибридной силовой установкой и его система управления (неуправляемый выпрямитель), частота вращения ротора 12 000 об/мин, мощность 400 кВт;

- стенд на АО «УНПП «Молния» для испытания системы генерирования на основе ЭМПЭ с ВПМ мощностью 15 кВт с частотой вращения 10 400 об/мин для самолета ТУ 204/214.

- высокоскоростной генератор с постоянными магнитами переменной частоты вращения, унифицированный с генератором наземной газотурбинной установки (договоры АП-ЭМ-09-14-ХГ между ФГБОУ ВПО «УГАТУ» и ОАО «УАПО» и № 89-200-13/2 между ОАО «УАПО» и ОАО «УАП «Гидравлика»). Мощность генератора 120 кВА, частота вращения 60 000 об/мин, линейное напряжение 200 В, охлаждение жидкостное. Испытания генератора производились на безредукторной ВСУ ОАО «УАП «Гидравлика». Объект применения – безредукторная ВСУ-120;

- магнитоэлектрический генератор ВМГ (договор ИМА-Интеграция 2 между ФГБОУ ВПО «УГАТУ» и ФГУП «ГосНИИАС»). Мощность генератора 100 кВт, частота вращения ротора 60 000 об/мин, охлаждение жидкостное, объект применения – перспективная безредукторная ВСУ для перспективных ЛА, в том числе ЛА с коротким жизненным циклом;

- отказоустойчивые многофазные электродвигатели с постоянными магнитами и частотным пуском для топливных насосов, используемых в системе охлаждения элементов СГЭ, в интересах ФГУП «ЦИАМ имени П. И. Баранова».

2. Исследованы методы стабилизации напряжения ЭМПЭ с ВПМ и доказано, что применение подмагничивания участков магнитопровода статора позволяет регулирование напряжения до 50%, а не как считалось ранее – до 20%.

3. Разработанные автором алгоритмы и методология позволяют выполнять многодисциплинарное проектирование и создания СГЭ ЛА. Экспериментальная верификация подтвердила возможность ее практического использования для создания перспективных СГЭ.

4. Разработанная технология изготовления магнитопроводов статора из аморфного железа позволила создать высокооборотную электрическую машину мощностью 120 кВт с частотой вращения ротора 60 000 об/мин, удельной массой 0,23 кг/кВт и воздушным охлаждением.

5. Разработаны и рекомендованы к внедрению в промышленность оригинальные конструктивные схемы устройств ЭМПЭ с ВПМ. Данные ЭМПЭ с ВПМ позволили значительно повысить КПД и уменьшить массу СГЭ, топливной системы ЛА, при увеличении их ресурса и надежности.

6. С использованием разработанной математической модели разработаны новые способы управления положением ротора в бесконтактных подшипниковых опорах и

диагностики технического состояния (защищенные патентами РФ на способы: патенты РФ №№ 2518053, 2539690, 2542596, 2549363, 2605692, 2656871). Разработанные способы позволяют повысить точность и быстродействие систем управления положением ротора в бесконтактных подшипниковых опорах, при одновременной минимизации их стоимости.

7. Разработаны экспериментальные стенды и методики экспериментальных исследований, которые могут использоваться для определения характеристик и параметров ЭМПЭ с ВПМ при приемочных и типовых испытаниях.

Диссертационная работа выполнена в соответствии с тематикой государственного заказа федеральных органов исполнительной власти: Минобороны России (проекты 8.1277.2017/4.6 «Исследования, разработка и внедрение перспективных электромеханических преобразователей для автономных объектов с гибридной силовой установкой», 8.287.2014/К «Исследования и разработка высокоэффективного энергетического комплекса для повышения энерговооруженности и энергоэффективности космических аппаратов»); Российского научного фонда (проекты 17-79-20027 «Обобщенная теория основополагающих физических процессов в высокотемпературных электромеханических преобразователях энергии, интегрированных в авиационный газотурбинный двигатель», 16-19-10005 «Создание высокооборотных и сверхвысокооборотных электромеханических преобразователей энергии средней и малой мощности на гибридном магнитном подвесе для аэрокосмической отрасли»); Российского фонда фундаментальных исследований (проект 16-38-60001 «Исследования основополагающих физических процессов, протекающих в гибридных системах магнитной левитации энерговырабатывающего оборудования автономных систем электроснабжения»); Минпромторга России (государственная программа РФ «Развитие авиационной промышленности на 2013–2025 годы» от 14.04.2017 г. № 17411.1770290019.18.013 и государственный контракт от 14.04.2017 г. № 17411.1770290019.18.011; Государственный контракт в рамках государственной программы РФ «Развитие авиационной промышленности на 2013–2025 годы» от 24 июля 2017 года № 17411.1740290019.18.001), а также в рамках научно-исследовательских работ с предприятиями АО «УАПО» (договор 2085/АП-ЭМ-12-17-ХК), АО «КБ Электроприбор» (договор АП-ЭМ-01-17-ХК), АО «ММЗ Знамя» (договор подряда № 1), АО «ОКБ Кристалл» (договоры АП-ЭМ-17-17-ХК, АП-ЭМ-01-18-ХК), АО «Электропривод» (договор 31502807658), ФГУП «ГосНИИАС» (договоры АП-ЭМ-05-18-ХГ, АП-ЭМ-04-18-ХГ), ФГУП «ЦИАМ» (договор 352-058-11-1935/ГК), ООО «АльфаГидро» (договор № 44), ООО «Эрга» (договоры АП-ЭМ-11-14-ХГ, 199-Э/15), АО «ОДК Авиадвигатель» (договор АП-ЭМ-03-18-ХК), АО «Технодинамика» (договоры КР 3264-16, К 2995-16, НР 574-15), ЗАО «ПТФК «ЗТЭО» (договор АП-ЭМ-10-17-ХК) и др.

Методология и методы исследований. Для решения поставленных задач и достижения намеченной цели использованы аналитические методы исследования магнитного поля, в том числе анализ системы уравнений Максвелла для медленно движущихся проводящих сред и уравнения Лапласа в частных производных, методы теории дифференциального и интегрального исчисления, а также постулаты теории

теплопроводности. Анализ электромагнитных сил производился через их объемные плотности. При решении задач многокритериальной оптимизации использовались методы весовых функций, метод Парето. Численные задачи решались в пакетах Maple, Matlab, Matchad, задачи компьютерного моделирования магнитного поля, тепловых процессов, механической прочности и динамики ротора решены методом конечных элементов в пакетах Ansys и Ansoft Maxwell, с использованием пакета Solid Works для создания твердотельных трехмерных моделей, имитационное моделирование осуществлялось на ПК в среде MatlabSimulink, обработка экспериментальных данных и данных компьютерного моделирования – пакет SplineTool. Также для анализа тепловых процессов использовался MotorCad. При разработке программного обеспечения использованы языки высокого уровня (VBA) и пакеты прикладных программ MathCAD, Matlab.

Положения, выносимые на защиту:

1. Методология создания систем генерирования электроэнергии летательных аппаратов с магнитоэлектрическими преобразователями энергии, включающая в себя обобщенную структурную модель СГЭ ЛА на основе ЭМПЭ с ВПМ с учетом тенденций развития современных ЛА, учитывающая возможности интеграции ЭМПЭ с ВПМ в силовую установку ЛА, обобщенную математическую модель, методы стабилизация напряжения ЭМПЭ с ВПМ и защиты от коротких замыканий и позволяющая выполнять исследования СГЭ ЛА при условии многовариантности их построения.
2. Обобщенная математическая модель, описывающая процессы в ЭМПЭ с ВПМ как основного элемента СГЭ ЛА в установившихся и переходных режимах, учитывающая взаимовлияние тепловых, механических и электромагнитных процессов, а также процессов в подшипниковых узлах и влияние эксцентриситета ротора на параметры ЭМПЭ с ВПМ.
3. Многокритериальная совместная оптимизация агрегатов, входящих в СГЭ ЛА, по заданным критериям и методология создания СГЭ ЛА на основе ЭМПЭ с ВПМ, позволяющая одновременное междисциплинарное проектирование всех компонентов, входящих в СГЭ ЛА.
4. Метод обеспечения отказоустойчивости ЭМПЭ с ВПМ в части защиты ЭМПЭ с ВПМ от витковых коротких замыканий, позволяющий минимизировать последствия витковых замыканий ЭМПЭ с ВПМ и методика компьютерного моделирования процессов при различных видах коротких замыканий (в том числе витковых) в ЭМПЭ с ВПМ с учетом механических процессов.
5. Исследований режимов работы ЭМПЭ с ВПМ совместно с регулятором напряжения в составе СГЭ и методика исследования магнитного поля реакции якоря в программном комплексе Ansys, снижающая временные затраты при компьютерном моделировании ЭМПЭ с ВПМ.
6. Исследований потерь в агрегатах СГЭ, алгоритм расчета потерь в стали при частотах более 400 Гц и алгоритм выбора материалов и расчета геометрических размеров ЭМПЭ, трансформаторно-выпрямительных устройств нового поколения, новый метод изготовления магнитопровода статора ЭМПЭ из аморфного железа.

7. Новые, научно обоснованные конструктивные схемы высокоэффективных агрегатов СГЭ. Рекомендации по их проектированию, полученные на основе экспериментальных исследований выходных характеристик ЭМПЭ с ВПМ в статическом и динамическом режимах и анализа особенностей эксплуатации ЭМПЭ с ВПМ при различных режимах работы СГЭ ЛА.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность полученных результатов обусловлена использованием строгих математических методов, компьютерным моделированием, подтверждаемых результатами экспериментальных исследований. Достоверность подтверждена практикой использования предлагаемых решений при расчете и конструировании, создании, выполнении специальных испытаний и внедрении разработанных электромеханических преобразователей энергии на предприятиях АО «УАПО» (Уфа), АО «ОКБ Кристалл» (Москва), АО «УНПП «Молния» (Уфа), ФГУП «ЦИАМ» (Москва), ООО «АльфаГидро» (Санкт-Петербург), ООО «Эрга» (Калуга), АО «УППО» (Уфа), ФГБОУ ВО «УГАТУ» и др. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на международных конференциях, определяющих общемировые тенденции развития отрасли: ICEM 2018 (Греция, 2018), XVII Международная конференция «Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты» (Крым, 2018), SPEDAM (Италия, 2018), IWED, 2018, 2019 (Москва), ICEPDS 2018 (Новочеркасск), IECON, 2016 (Италия), 2017 (Китай), Is the 42, 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IES); World Conference on Intelligent Systems for Industrial Automation, WCIS (Ташкент, 2014), The 38th PIERS (Санкт-Петербург, 2016), XV международная научно-техническая конференция «Перспективы развития электроэнергетики и высоковольтного электротехнического оборудования. Энергоэффективность и энергосбережение» (Москва, 2012) и др.

Некоторые научно-технические результаты получены автором в ходе зарубежной стажировки по программе ОАО «РусГидро» «Инновационные решения в ВИЭ, включая гидроэнергетику» в Бельгии, Германии и Нидерландах, а также в ходе научной стажировки в Bundeswehr University Munich.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 205 научных работ, в том числе 5 монографий, 60 работ в журналах, входящих в перечень ВАК РФ, 58 работ, индексируемых в РИНЦ, 16 работ, индексируемых в БД Web of Science, 60 работ, индексируемых в БД Scopus, в том числе 20 работ в изданиях с рейтингом Q1, 2 учебных пособия, 30 работ, опубликовано автором единолично, без соавторов. По результатам диссертационной работы получено 30 свидетельств о государственной регистрации программы для ЭВМ, 30 патентов РФ на изобретение, 11 патентов РФ на полезную модель, в том числе 5 патентов и 3 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ получено автором единолично, без соавторов.

Опубликованные работы полностью отражают основное содержание диссертационной работы. Все основные положения и результаты, выносимые на защиту, отражены в публикациях автора, приведённых в автореферате: Работы [6–9], [23–27], [48–51]

выполнены автором единолично. В работах [1–5], [10–22], [28–47], [52–73] соискателем разработаны предлагаемые математические модели, выполнена постановка научной проблемы, разработаны методы и предложены новые конструктивные решения.

Соответствие специальности. Диссертация соответствует специальности 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы», поскольку результаты представляют собой законченные научные и технические исследования и разработки в области электротехнических комплексов. В рамках работы решена научная проблема развития теории СГЭ ЛА на основе ЭМПЭ с ВПМ, создание методологии комплексного анализа магнитных, тепловых процессов с учетом требований механической прочности и динамики ротора на основе совместных решений уравнений Максвелла и Фурье.

Диссертация соответствует следующим пунктам специальности 05.09.03:

п. 1. «Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, изучение системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем».

п. 3. «Разработка, структурный и параметрический синтез электротехнических комплексов и систем, их оптимизация, а также разработка алгоритмов эффективного управления».

п. 4. «Исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов и систем в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях».

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 7 глав, заключения, 20 приложений, содержит 337 страниц машинописного текста, список литературы из 339 наименований.

Краткое содержание работы

Во введении обоснована актуальность работы, изложены цели и задачи диссертационной работы, методы решения поставленных задач, показана научная новизна и практическая ценность, сформулированы положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен обзор и анализ работ по созданию СГЭ АО и ЭМПЭ нового поколения. На основе данного обзора сформулированы требования к системам электроснабжения АО, разработана классификация высокооборотных электромеханических преобразователей энергии и рассмотрены области их применения, выявлены конструктивные схемы, которые наиболее полно отвечают задачам создания перспективных СГЭ АО. Из анализа публикаций отечественных и зарубежных авторов выделены направления исследований и развития ЭМПЭ с ВПМ и СГЭ на их основе.

Из представленного анализа научных работ в части СГЭ ЛА видно, что для развития теории СГЭ ЛА, с учетом требований современных и перспективных ЛА, требуется создание обобщенной структурной модели СГЭ ЛА на основе ЭМПЭ с ВПМ, отличающейся от известных тем, что позволяла бы исследовать СГЭ, интегрированные в силовую установку, при условии многовариантности построения СГЭ ЛА. Это позволит одновременное исследование нескольких структур СГЭ ЛА и выбор оптимальной при минимальных

временных затратах. Также в известных теоретических и практических работах не рассмотрена методика, позволяющая выполнять процесс многодисциплинарного проектирования СГЭ ЛА на основе ЭМПЭ с ВПМ, включающая в себя одновременное многодисциплинарное проектирование всех компонентов, входящих в СГЭ, и позволяющая их совместную оптимизацию. Подобная методика позволила бы обеспечить решение задач робастного проектирования СГЭ ЛА.

Из анализа научных работ в части ЭМПЭ с ВПМ для СГЭ ЛА видно, что для минимизации временных и материальных затрат при создании перспективных СГЭ ЛА на основе ЭМПЭ с ВПМ необходимо решить ряд теоретических задач в области ЭМПЭ с ВПМ. В частности, к данным задачам относится создание обобщенной математической модели, описывающей процессы в ЭМПЭ с ВПМ в установившихся и переходных режимах, учитывающей взаимовлияние тепловых, механических и электромагнитных процессов, а также процессов в подшипниковых узлах и влияние эксцентриситета ротора на параметры ЭМПЭ с ВПМ. Кроме того, для расширения использования ЭМПЭ с ВПМ в СГЭ ЛА необходимо решить задачи в части обеспечения отказоустойчивости ЭМПЭ с ВПМ при витковых коротких замыканиях.

Во второй главе разработаны структурные модели для магистрального и вспомогательного СГЭ ЛА. Разработана обобщенная многодисциплинарная модель ЭМПЭ с ВПМ, описывающая процессы в ЭМПЭ с ВПМ как основного элемента СГЭ ЛА в установившихся и переходных режимах, учитывающая взаимовлияние тепловых, механических и электромагнитных процессов. Представлены результаты многокритериальной совместной оптимизации характеристик и геометрических размеров агрегатов, входящих в СГЭ ЛА по заданным критериям и методика, позволяющая выполнять процесс многодисциплинарного проектирования СГЭ ЛА на основе ЭМПЭ с ВПМ, обеспечивающая одновременное многодисциплинарное проектирование всех компонентов, входящих в СГЭ ЛА.

В общем виде математически СГЭ ЛА на основе ЭМПЭ с ВПМ может быть описана как матрица, каждый из элементов которой характеризует какую-либо топологию СГЭ на основе ЭМПЭ с ВПМ. В свою очередь, определенная топология описывается рядом критериев.

Обобщенная матрица СГЭ на основе ЭМПЭ с ВПМ совместно с обобщенной структурой является обобщенной структурной моделью СГЭ ЛА, которая определяет всю совокупность возможных реализаций СГЭ.

Для обеих структур (магистральной и основной) были получены обобщенные матрицы, каждая из которых описывает различные агрегатные состояния СГЭ ЛА.

Каждая из структур СГЭ, входящих в структурную модель, должна оцениваться по ряду критериев для поиска оптимальных решений. Основными критериями, которые определяют эффективность СГЭ, являются его полная полетная масса, надежность и качество электроэнергии на выходе из СГЭ. Также целесообразно при создании перспективных СГЭ ЛА оценивать их эффективность по критериям экономической,

топливной эффективности и экологичности, так как эти требования являются одними из важных, предъявляемых к современным ЛА. На топливную эффективность ЛА при изменении характеристик СГЭ влияют в основном две переменные: полетная масса и габаритные размеры мотогондолы авиационного двигателя.

При междисциплинарном проектировании и оптимизации СГЭ надежность и качество электроэнергии можно отнести не к варьируемым переменным, а к ограничивающим параметрам, тогда эффективность СГЭ – это минимальная масса СГЭ, которая обеспечивается при минимальных размерах мотогондолы ЛА и минимальной стоимости СГЭ в условиях заданной надежности, перегрузочной способности и качества электроэнергии. Для военных ЛА целесообразно при оценке использовать также критерий боевой живучести СГЭ.

Полную полетную массу СГЭ можно представить в следующем виде:

$$M_{\text{полк}} = \sum_{i=1}^{i=n} M_a + \sum_{i=1}^{i=n} M_o + \sum_{i=1}^{i=n} M_{\text{с}} + \sum_{i=1}^{i=n} M_n + \sum_{i=1}^{i=n} M_p,$$

где i – порядковый номер элемента, входящего в структуру Y_1, Y_p ; n – количество элементов структуры Y_1, Y_p (в том числе коробка агрегатов, привод постоянных оборотов); M_a – конструктивная масса агрегатов исследуемой структуры Y_1, Y_p ; M_o – масса хладагента, необходимого для функционирования i -го агрегата структуры Y_1, Y_p ; $M_{\text{с}}$ – масса элементов и смазки, необходимой для функционирования i -го агрегата структуры Y_1, Y_p ; M_n – масса, обеспечивающая реализацию структуры Y_1, Y_p ; M_p – масса элементов, необходимых для обеспечения уровня надежности и отказоустойчивости СГЭ.

В отличие от известных, предложенное выражение полетной массы учитывает зависимости полетной массы от массы коробки агрегатов, массы смазки, необходимой для функционирования агрегатов СГЭ ЛА, и массы элементов, необходимых для обеспечения отказоустойчивости. Это позволяет исследовать перспективные СГЭ ЛА с интегрированными ЭМПЭ на валы авиационного двигателя или ВСУ, а также ЭМПЭ на упругих подшипниковых опорах в составе СГЭ ЛА.

Опуская промежуточные математические преобразования, может быть сформулирован обобщенный математический критерий, определяющий полетную массу СГЭ ЛА. Тогда эффективность той или иной структуры структурной матрицы Y_p, Y может быть определена в виде обобщенного критерия (1).

Так как ЭМПЭ с ВПМ является основным агрегатом СГЭ, который отвечает практически за все характеристики СГЭ, важной задачей для обобщения и развития теории СГЭ ЛА является создание обобщенной модели ЭМПЭ с ВПМ как элемента СГЭ ЛА. Наличие данной математической модели является элементом, позволяющим реализацию методики междисциплинарного проектирования СГЭ ЛА, а также основой для исследования структурной модели СГЭ ЛА, полученной выше. Разрабатываемая

математическая модель позволяет реализацию предложенной идеологии комплексного многодисциплинарного проектирования ЭМПЭ с ВПМ и СГЭ ЛА на их основе в интересах минимизации времени и материальных затрат на создание СГЭ ЛА.

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^{i=n} k_a f(P, B_\delta, I, U, f, \Theta) + f(P(A, t)) + \sum_{i=1}^{i=n} \left(\frac{P_n(f, \Theta)}{c_p \rho \Delta \Theta} + \frac{P_n(IU, \Theta)}{c_p \rho \Delta \Theta} \right) + \\ + \sum_{i=1}^{i=n} M_o(n_o) + \sum_{i=1}^{i=n} M_n + \sum_{i=1}^{i=n} M_p \rightarrow \min \\ P_{уст} = \sum_{i=1}^{i=j} P_{jj}; \quad \frac{P_n(f, \Theta)}{c_p \rho \Delta \Theta} + \frac{P_n(IU, \Theta)}{c_p \rho \Delta \Theta} \leq P_{отв}; \quad p_y(t) \leq p_{узд}(t); \\ U_{выхjj} \in W; \Delta U_{выхjj} \in W; \Delta f_{выхjj} \in W; k_{аэр} \rightarrow \min \end{array} \right. , \quad (1)$$

где $P_{уст}$ – установленная необходимая мощность СГЭ; $P_{отв}$ – максимальные допустимые потери, которые могут отводиться хладагентом; $U_{выхjj}; \Delta U_{выхjj}; \Delta f_{выхjj}$ – выходная частота, выходное напряжение и пульсации выходного напряжения СГЭ; $\Delta k_{аэр}$ – коэффициент аэродинамического сопротивления ЛА из-за изменения габаритов СГЭ ЛА.

Структура многодисциплинарной математической модели представлена на рисунке 2. Также на рисунке 2 раскрыт метод учета взаимозависимостей в математической модели между различными физическими процессами, протекающими в ЭМПЭ с ВПМ.

На структуре обобщенной математической модели показаны параметры ЭМПЭ с ВПМ, взаимосвязь которых необходимо учитывать для обеспечения полного анализа всех процессов, протекающих в ЭМПЭ с ВПМ. На рисунке 2: UI – внешняя характеристика ЭМПЭ с ВПМ; T – температура активных элементов ЭМПЭ с ВПМ; КГИ – коэффициент гармонических искажений; X – индуктивные сопротивления ЭМПЭ с ВПМ; R – активные сопротивления; ЭМ силы – электромагнитные силы.

Для общности исследуемых процессов при математическом моделировании рассматривается ЭМПЭ на БПО. При данном подходе математическая модель позволяет исследования как ЭМПЭ на механических подшипниках, так и на упругих подшипниковых опорах.

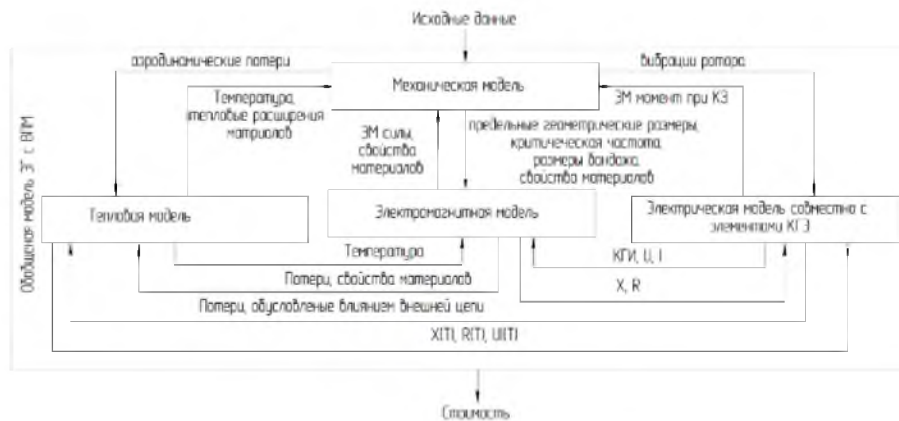


Рисунок 2 – Структурная схема многодисциплинарной математической модели ЭМПЭ с ВПМ

В разрабатываемой математической модели учтены не только взаимовлияние процессов в подшипниковых узлах ЭМПЭ, нагрузке ЭМПЭ и системы управления БПО и ЭМПЭ, но и взаимовлияние тепловых, механических и электромагнитных процессов в активных элементах ЭМПЭ или БПО.

При разработке обобщенной математической модели, описывающей высокооборотные ЭМПЭ на ГМП, рассматривается обобщенная конструктивная схема высокооборотного ЭМПЭ, при этом принимается, что ротор жесткий, недеформируемый на упругих подшипниковых опорах (в качестве упругих подшипниковых опор могут выступать активные магнитные подшипники, газовые подшипники или ГМП), ротор обладает массой m_p , установлен на двух опорах. Статическая неуравновешенность массы ротора характеризуется эксцентриситетом e , динамическая – угловым параметром β .

Для упрощения математических преобразований используются следующие допущения: магнитная проницаемость окружающей среды и воздушного зазора равна магнитной проницаемости вакуума; величина немагнитного зазора намного меньше радиуса его кривизны, кривизна воздушного зазора учитывается введением коэффициента $k_{кр}$; обмотка статора представляется в виде тонкого электропроводящего слоя, распределенного по диаметру расточки магнитопровода статора, влияние лобовых частей учитывается введением коэффициента k_d ; плотность индуцированных токов по толщине тонкого медного слоя постоянна; теплопроводность активных элементов ЭМПЭ постоянна по всем координатным осям (активные элементы ЭМПЭ изотропны); аксиальная составляющая напряженности магнитного поля в торцевых поверхностях ротора равна 0, то есть рассматривается ЭМПЭ бесконечной длины; перемещение ротора измеряется ДПР; температура в воздушном зазоре считается известной.

При разработке математической модели было найдено совместное решение нескольких систем уравнений:

- системы уравнений, описывающих электромагнитные процессы в высокооборотном ЭМПЭ (системой уравнений Максвелла для медленно движущихся сред):
- математической модели, описывающей механическое движение ротора:
- системы уравнений Фурье, описывающей процессы теплообмена.

Опуская промежуточные математические выкладки и допуская, что в направлении оси z ротор жестко закреплен, при совместном решении вышеуказанных систем уравнений имеем:

$$\begin{aligned} \Delta \vec{H}_2 - \mu_0 \sigma \left(\frac{d\vec{H}_2}{dt} - \left(-\vec{H}_2 \operatorname{div} \vec{V} + \left(H_{x2} \frac{\partial \vec{V}}{\partial x} + H_{y2} \frac{\partial \vec{V}}{\partial y} \right) - \left(V_x \frac{\partial \vec{H}_2}{\partial x} + V_y \frac{\partial \vec{H}_2}{\partial y} \right) \right) \right) \\ = -\mu_0 \sigma \left(\frac{d\vec{H}_1}{dt} - \left(-\vec{H}_1 \operatorname{div} \vec{V} + \vec{H}_1 \operatorname{grad} \vec{V} - \vec{V} \operatorname{grad} \vec{H}_2 \right) \right). \end{aligned} \quad (2)$$

В (2) изменения вектора скорости в декартовых координатах определяется исходя из системы, описывающей механическое движение ротора, но при этом для полного описания

всех взаимозависимостей и создания обобщенной математической модели ЭМПЭ с ВПМ необходимо получить решения для магнитного поля ЭМПЭ с ВПМ с учетом тепловых процессов (используется расчетная схема, рисунок 3). Данная задача решена в главе 3 диссертации.

Также на данном этапе в обобщенную математическую модель вводится взаимозависимость электромагнитных и тепловых полей. При этом более удобно оперировать векторным потенциалом магнитного поля. Математическое описание постоянных магнитов представляется в виде зависимости коэрцитивной силы ВПМ, остаточной индукции и намагниченности:

$$\vec{B} = \mu\mu_0 (\vec{M} + \vec{H}). \quad (3)$$

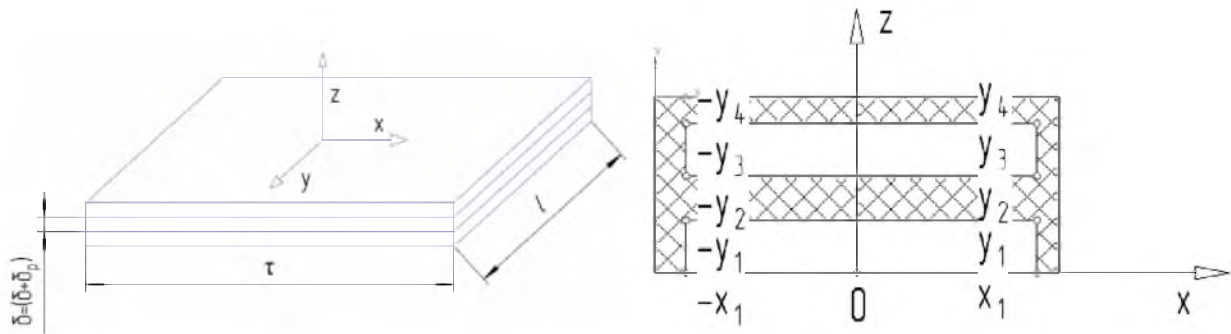


Рисунок 3 – Расчетная схема ЭМПЭ с ВПМ

Тогда намагниченность ВПМ в зависимости от температуры представляется в виде:

$$\vec{M}(x, y, \Theta_{PM}) = \frac{B_{r0}^2(x, y) \left(1 - \frac{k_{Br}(\Theta_{PM} - 20)}{100}\right)^2}{\mu_0^2 H_{c0}(x, y) \left(1 - \frac{k_{Hc}(\Theta_{PM} - 20)}{100}\right)} - H_{c0}(x, y) \left(1 - \frac{k_{Hc}(\Theta_{PM} - 20)}{100}\right), \quad (4)$$

где $B_r(\Theta)$, $H_c(\Theta)$ – действующие значения остаточной индукции и коэрцитивной силы ПМ соответственно; B_{r0} , H_{c0} – значение остаточной индукции и коэрцитивной силы ПМ, указанные в технических характеристиках соответственно; Θ_{PM} – температура ПМ; k_{Br} – температурный коэффициент по остаточной индукции; k_{Hc} – температурный коэффициент по напряженности, $\vec{M}$ – вектор намагниченности ВПМ; μ – магнитная проницаемость ВПМ.

При анализе взаимовлияния тепловых и магнитных полей рассматриваются магнитное и тепловое поля. При этом рассматривается расчетная схема, рисунок 3 (слева). Для упрощения анализа рассматривается задача в двухмерной постановке с представлением реальной схемы ЭМПЭ в виде нескольких расчетных областей, для каждой из которых решаются уравнения Максвелла и уравнения Фурье:

– для зоны I (зона обмотки) для трехмерного поля уравнение Фурье представляется в виде

$$-\frac{q_{всш}}{\lambda_{cu}} = \frac{\partial^2 \Theta_{Cu}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Theta_{Cu}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Theta_{Cu}}{\partial z^2}, \quad (5)$$

где Θ_{cu} – температура обмотки; q_{vci} – удельная мощность теплоты обмотки; λ_{cu} – теплопроводность тела.

Так как рассматривается область I, заданная токовым слоем, то уравнения векторного потенциала для зоны I с учетом взаимозависимости тепловых и магнитных полей имеет вид:

$$\frac{j_z}{\lambda_{cu}\sigma} \left(\frac{1}{\mu_0} \frac{\partial^2 A_z}{\partial x^2} + \frac{1}{\mu_0} \frac{\partial^2 A_z}{\partial y^2} \right) = \frac{\partial^2 \Theta_{cu}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Theta_{cu}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Theta_{cu}}{\partial z^2}. \quad (6)$$

Таким образом, выражение (6) показывает взаимозависимость магнитных и тепловых полей. При этом, вводя в выражение (6) вектор скорости и раскладывая его по координатам, выявляется зависимость параметров ЭМПЭ от механических процессов ротора (колебаний, вибраций и т.д.), как это было показано выше. Также выражение (6) демонстрирует связь законов электромагнетизма, описанных уравнениями Максвелла и уравнений теплопроводности (уравнениями Фурье).

Для решения уравнения (6) целесообразно использовать граничные условия третьего рода для температурных полей и метод разделения переменных. В этом случае для уравнения Фурье можно записать следующее:

$$\frac{\partial \Theta_{cu}}{\partial x} + \frac{\alpha}{\lambda_{cu}} \Big|_{x=x_1} = 0; \quad \frac{\partial \Theta_{cu}}{\partial y} + \frac{\alpha}{\lambda_{cu}} \Big|_{y=y_4} = 0.$$

Благодаря симметричности теплового поля:

$$\frac{\partial \Theta_{cu}}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0; \quad \frac{\partial \Theta_{cu}}{\partial y} \Big|_{y=0} = 0,$$

где α – коэффициент теплоотвода для поверхности охлаждения.

Далее представляется целесообразным рассмотреть зону III (ВПМ). Учитывая, что в зоне III имеет место намагниченность постоянных магнитов, а также в постоянных магнитах наводятся вихревые токи, которые создают потери в них, то для зоны III (ВПМ) уравнение для векторного потенциала с учетом температурной зависимости намагниченности может быть представлено в виде

$$\frac{1}{\mu_0} \frac{\partial^2 A_z}{\partial x^2} + \frac{1}{\mu_0} \frac{\partial^2 A_z}{\partial y^2} = -j_{zpm} + \frac{\partial M(\Theta_{PM})_x}{\partial y} - \frac{\partial M(\Theta_{PM})_y}{\partial x}. \quad (7)$$

Уравнение Фурье для зоны III:

$$-q_{vpm} = \lambda_{pmx} \frac{\partial^2 \Theta_{PM}}{\partial x^2} + \lambda_{pmy} \frac{\partial^2 \Theta_{PM}}{\partial y^2} + \lambda_{pmz} \frac{\partial^2 \Theta_{PM}}{\partial z^2}, \quad (8)$$

где Θ_{PM} – температура ВПМ; q_{vci} – удельная мощность теплоты ВПМ; $\lambda_{pmx}, \lambda_{pmy}, \lambda_{pmz}$ – теплопроводность ВПМ по различным осям.

При формировании уравнения (7), а также при его решении необходимо учитывать, что ВПМ обладает температурной анизотропией. Для ВПМ на основе сплава SmCo теплопроводность по осям может отличаться в 2–4 раза, для NdFeB – более чем в 5 раз.

Тогда обобщенная взаимозависимость магнитных и тепловых полей, с учетом требований прочности для зоны III имеет вид

$$\begin{aligned}
& \lambda_{pmx} \frac{\partial^2 \Theta_{PM}}{\partial x^2} + \lambda_{pm y} \frac{\partial^2 \Theta_{PM}}{\partial y^2} - \frac{j_{zpm}}{\sigma_{PM} \mu_0} \frac{\partial^2 A_z}{\partial x^2} - \frac{j_{zpm}}{\sigma_{PM} \mu_0} \frac{\partial^2 A_z}{\partial y^2} + \\
& + \frac{j_{zpm}}{\sigma_{PM} \mu_0} \frac{\partial M(\Theta_{PM})_x}{\partial y} + \frac{j_{zpm}}{\sigma_{PM} \mu_0} \frac{\partial M(\Theta_{PM})_y}{\partial x} = 0.
\end{aligned} \tag{9}$$

Из выражения (9) видно, что зона III, в отличие от зоны I, имеет крайне сложную взаимозависимость температурных и магнитных полей. Данная сложность характеризуется сложным процессом, который вызван изначальным влиянием намагниченности на температуру ВПМ, которая в последующем влияет на намагниченность, что, в свою очередь, влияет на температуру ВПМ и т.д. Данные процессы могут продолжаться множество раз, до достижения установившегося температурного режима.

Таким образом, совокупность полученных выражений является обобщенной математической моделью ЭМПЭ с ВПМ, которая позволяет одновременно учитывать взаимозависимость тепловых, электромагнитных и механических процессов.

Для обобщения и развития теории перспективных СГЭ ЛА при условии минимизации временных и материальных затрат на проектирование СГЭ ЛА важной задачей является разработка методологии создания перспективных СГЭ ЛА. Для решения данной задачи был разработан алгоритм и методология создания СГЭ ЛА.

Разработанная методология создания СГЭ ЛА состоит из 14 шагов, каждый из которых подразумевает проведение в том числе и итерационных расчетов по различным методикам и математическим моделям как известных, так и разработанных в рамках диссертационной работы. Первым шагом является ввод основных параметров и ограничений при проектировании СГЭ. Необходимо отметить, что создание и проектирование авиационной СГЭ является жестко формализованным процессом, который в значительной степени ограничен условиями технического задания и стандартами. Поэтому все шаги в предлагаемой методологии ограничиваются именно техническим заданием и ГОСТ 54073-2017. Вторым шагом методологии является выбор из структурной матрицы Y_p , Y_1 структур СГЭ и их агрегатной реализации, которые удовлетворяют поставленным ограничениям. В том числе определяется тип ЭГ, тип преобразователей и ТВУ для СГЭ. Это предоставляет возможность на первоначальных этапах проектирования СГЭ производить оптимизацию уровня и частоты напряжения ЭГ, преобразователя и ТВУ с учетом того, что они являются агрегатами одного СГЭ. Известные методологии создания авиационных каналов генерирования ограничены в подобных подходах. В предложенной методологии изначально оптимизируется система по ряду критериев, и это позволяет получить оптимальный канал генерирования, а не отдельные оптимальные компоненты канала генерирования. Кроме того, использование на выходе из методологии обобщенного критерия позволяет выбрать оптимальную структуру СГЭ, которая перед сравнением различных структур будет уже являться оптимальной. Оптимизация агрегатов в предлагаемой методологии проводится с помощью генетических алгоритмов по критерию минимальных массогабаритных показателей, минимальных тепловыделений и минимальных гармонических искажений в

системе. Так как поставленная оптимизационная задача является многокритериальной, многопараметрической, то ее решение осуществляется при помощи метода Парето. В результате данной оптимизации определяется оптимальное напряжение внутри СГЭ и исходя из этого уже проектируется ЭГ, статический преобразователь и трансформатор ТВУ. На выходе решения данной задачи формируется матрица, которая содержит оптимальное напряжение СГЭ, оптимальную частоту внутри канала СГЭ, а также полученные при этих оптимальных величинах массовые характеристики, показатели гармонических искажений и КПД. То есть результаты оптимизации на данном этапе являются функцией ограничения для многодисциплинарного проектирования ЭГ и трансформатора ТВУ. После каждого этапа многодисциплинарного проектирования отдельного объекта СГЭ проверяется оптимальность СГЭ в целом, и если СГЭ не оптимальна, то производятся итерационные расчеты. Количество итерационных расчетов определяется сходимостью получаемых результатов. Именно подобный подход обеспечивает оптимальность всей СГЭ по окончании алгоритма.

Необходимо отметить, что основным элементом предлагаемой методологии является многодисциплинарная модель ЭГ с ВПМ, которая должна учитывать взаимозависимость тепловых, электромагнитных и механических процессов, а также структурная модель СГЭ ЛА, которая позволяет математическую формализацию возможных структур СГЭ ЛА (приведена выше), а также оптимизационная функция, позволяющая оценивать эффективность той или иной структуры СГЭ ЛА (выражение (1)). Именно многодисциплинарность обеспечивает минимизацию времени проектирования, так как расчеты ведутся совместно.

Следующим шагом методологии является процесс многодисциплинарного проектирования статического преобразователя, трансформатора и ТВУ. Многодисциплинарное проектирование трансформатора и ТВУ в целом заключается в проведении взаимосвязанных электромагнитных и тепловых расчетов.

После этого производится полное моделирование СГЭ при совместной работе всех агрегатов и оценивается его выходное качество электроэнергии, гармонический состав и соответствие канала генерирования стандартам. Также оценивается электромагнитная совместимость внутри канала. После этого производится анализ следующей возможной структуры СГЭ и выбор оптимальной, исходя из предложенного критерия эффективности СГЭ ЛА. По результатам данного шага принимается решение о создании прототипа СГЭ и его испытаний

Третья глава посвящена исследованиям разработанной математической модели ЭМПЭ с ВПМ. При этом рассматривалось решение как в декартовой, так и в цилиндрической системе координат. Причем в декартовой системе координат решение было получено в трехмерной постановке. Изначально рассматривается первичное магнитное поле, создаваемое постоянными магнитами. Поскольку в рабочем зазоре δ отсутствуют токи, то магнитное поле в зазоре описывается уравнением Лапласа в частных производных.

Немагнитный зазор ЭМПЭ с ВПМ принимается в виде

$$\delta = (\delta_b + \delta_6)k_\delta, \quad (10)$$

где δ – немагнитный зазор между статором и ротором, включая толщину бандажа, обеспечивающего прочность ротора; коэффициенты k_μ и k_δ учитывают зубчатость статора.

Поле на поверхности ВПМ задается в виде нормальной составляющей напряженности:

$$H_{z0} = H_{z0} \cos q_1 x \cos q_2 y. \quad (11)$$

Исходя из этого, решение ищется в виде:

$$H_z = (C_1 \operatorname{sh} q_3 z + C_2 \operatorname{ch} q_3 z) \cos q_1 x \cos q_2 y, \quad (12)$$

$$H_x = (C_3 \operatorname{sh} q_3 z + C_4 \operatorname{ch} q_3 z) \sin q_1 x \cos q_2 y, \quad (13)$$

$$H_y = (C_3 \operatorname{sh} q_3 z + C_4 \operatorname{ch} q_3 z) \cos q_1 x \sin q_2 y, \quad (14)$$

где $q_1 = \frac{\pi}{\tau}$, $q_2 = \frac{\pi}{l}$, $q_3 = \sqrt{q_1^2 + q_2^2}$, $\tau = \frac{\pi D}{2p}$ – полюсное деление ЭМПЭ; l – активная длина ротора; D – диаметр ротора.

Из начальных условий определяются постоянные интегрирования

при 1) $z = 0$;

при 2) $z = \delta$, $y C_1 \operatorname{ch} q_3 \delta + y C_2 \operatorname{sh} q_3 \delta = 0$, $C_1 = -C_2 \operatorname{th} q_3 \delta$.

С учетом условия непрерывности магнитного поля можно получить постоянные интегрирования:

$$C_4 = -C_1 \frac{q_3}{q_1 + q_2}, \quad C_3 = -C_2 \frac{q_3}{q_1 + q_2} = -C_2 \frac{\sqrt{q_1^2 + q_2^2}}{q_1 + q_2}.$$

Тогда составляющие трех векторов напряженности поля имеют вид:

$$H_z = H_{z0m} (\operatorname{ch} q_3 z - \operatorname{th} q_3 \delta \operatorname{sh} q_3 z) \cos q_1 x \cos q_2 y, \quad (15)$$

$$H_x = -H_{z0m} \frac{q_3}{q_1 + q_2} \operatorname{ch} q_3 z (\operatorname{th} q_3 \delta - \operatorname{th} q_3 z) \sin q_1 x \cos q_2 y, \quad (16)$$

$$H_y = -H_{z0m} \frac{q_3}{q_1 + q_2} \operatorname{ch} q_3 z (\operatorname{th} q_3 \delta - \operatorname{th} q_3 z) \cos q_1 x \sin q_2 y. \quad (17)$$

Также была рассмотрена картина первичного магнитного поля с учетом кривизны воздушного зазора ЭМПЭ с ВПМ при холостом ходе, при этом ввиду того, что токи в немагнитном зазоре отсутствуют, магнитное поле в зазоре описывается уравнением Лапласа в цилиндрических координатах в частных производных.

При решении поставленной задачи используются обычные допущения, не вносящие в результаты значительной погрешности: магнитная проницаемость стали сердечника, а также стали вала равна бесконечности, магнитная проницаемость воздушного зазора равна магнитной проницаемости вакуума; аксиальная составляющая напряженности магнитного поля в торцевых поверхностях ротора равна 0, то есть рассматривается ЭМПЭ бесконечной длины; токи в бандажной оболочке ротора отсутствуют и зубчатость магнитопровода статора не учитывается; температура вала ЭМПЭ равна температуре окружающей среды; обмотка

статора представляется в виде тонкого электропроводящего слоя, распределенного по диаметру расточки магнитопровода статора.

Исходя из вышеизложенных допущений, появляется возможность сформулировать граничные условия для решения уравнений Лапласа:

$$H_\varphi \Big|_{r=\frac{D_{\text{ВПМ1}}+\delta}{2}}=0, \quad H_\varphi \Big|_{r=\frac{D_{\text{ВПМ1}}}{2}}=k_\varphi \frac{J}{4\pi\mu_0} \sin \varphi, \quad H_r \Big|_{r=\frac{D_{\text{ВПМ1}}}{2}}=k_r \frac{J}{4\pi\mu_0} \cos \varphi,$$

$$H_z \Big|_{z=0}=0, \quad \frac{\partial H_z}{\partial z} \Big|_{z=0}=0, \quad H_z \Big|_{z=l}, \quad \frac{\partial H_z}{\partial z} \Big|_{z=l}=0.$$

При этом, согласно граничным условиям, поставленная задача вырождается в двухмерную краевую задачу для уравнения Лапласа внутри кольца с радиусами $0,5D_{\text{ВПМ1}}$ и $0,5D_{\text{ВПМ1}} + \delta$.

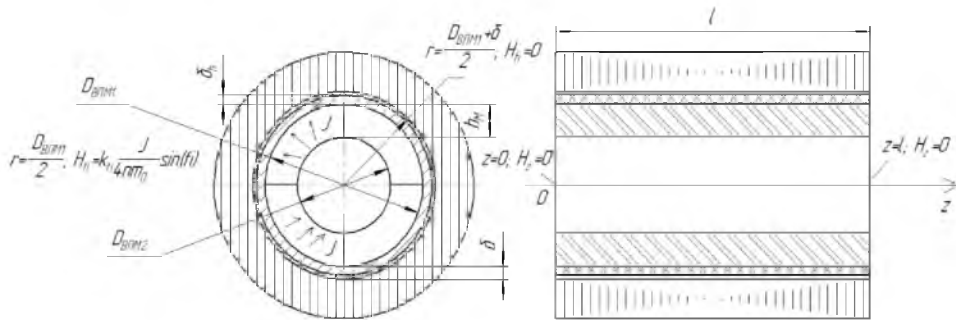


Рисунок 4 – Расчетная схема ЭМПЭ с ВПМ

Геометрические параметры определяются согласно рисунку 4. В результате решения уравнений Лапласа в цилиндрических координатах были получены математические описания радиальной и тангенциальной составляющих магнитного поля в воздушном зазоре ЭМПЭ с ВПМ с учетом тепловых процессов и механической прочности бандажной оболочки ротора. Выражение (19) характеризует радиальную составляющую магнитного поля.

$$H_\varphi(r, \varphi) = k_\varphi \frac{1}{4\pi\mu_0} \left[B_r \left(1 - \frac{k_{Br}(\Theta_{\text{ВПМ}} - 23)}{100} \right) - H_{c\mu_0} \left(1 - \frac{k_{Hc}(\Theta_{\text{ВПМ}} - 23)}{100} \right) \right] \times$$

$$\times \frac{2\pi\tau \left(\frac{D_{\text{ВПМ1}}^2}{8} + \frac{D_{\text{ВПМ1}}\delta}{2} + \frac{\delta^2}{2} - \frac{r^2}{2} \right)}{\pi\delta(D_{\text{ВПМ1}} + \delta)r} \sin \varphi. \quad (18)$$

Для проверки адекватности разработанной математической модели, а также эффективности предложенных методов комплексного анализа полей и сравнение их с существующими, было произведено компьютерное моделирование трехмерного магнитного поля в воздушном зазоре ЭМПЭ с ВПМ методом конечных элементов, с учетом тепловых и механических процессов, рисунок 5, а–в. Результаты компьютерного моделирования подтвердили адекватность разработанной математической модели, выявленные взаимозависимости между электромагнитными, тепловыми и механическими процессами. Также было установлено, что расхождение между решениями в цилиндрических и декартовых координатах имеет место при воздушных зазорах более 4 мм.

Далее, используя полученные решения для магнитного поля в зазоре ЭМПЭ с ВПМ и тензор напряжений Максвелла, были проведены исследования эксцентричного ротора ЭМПЭ с ВПМ на БПО. При этом силы, воздействующие на эксцентричный ротор, определялись с помощью тензора напряжений Максвелла:

$$F_x = -\frac{1}{2\mu_0} \oint_l \left[(B_{\text{эф}}^2 - B_{\text{эр}}^2) \cos \alpha + 2B_{\text{эф}} B_{\text{эр}} \sin \alpha \right] r(\alpha) d\alpha, \quad (19)$$

$$F_y = -\frac{1}{2\mu_0} \oint_l \left[(B_{\text{эр}}^2 - B_{\text{эф}}^2) \sin \alpha + 2B_{\text{эф}} B_{\text{эр}} \cos \alpha \right] r(\alpha) d\alpha, \quad (20)$$

где F_x, F_y – силы действующие на эксцентричный ротор; B_ϕ, B_r – радиальная и тангенциальная составляющие магнитной индукции в немагнитном зазоре ЭМПЭ; μ_0 – магнитная проницаемость вакуума; α – угол.

По результатам исследований было установлено, что тяговые усилия подшипниковых опор в случае применения магнитных или газовых подшипников должны иметь запас по своим силовым характеристикам превышающим номинальный в 1,44 раза.

Исследования были выполнены как аналитическими методами, так и методами компьютерного моделирования в программном комплексе Ansys Maxwell. Важно отметить, что полученные результаты компьютерного моделирования не значительно расходятся с результатами аналитического расчета. Расхождение не превышает 10–12%.

На основе анализа предложенной математической модели были разработаны новые способы управления ротором на магнитных подшипниках, диагностики состояния ЭМПЭ с ВПМ, а также реализованы методы на их основе:

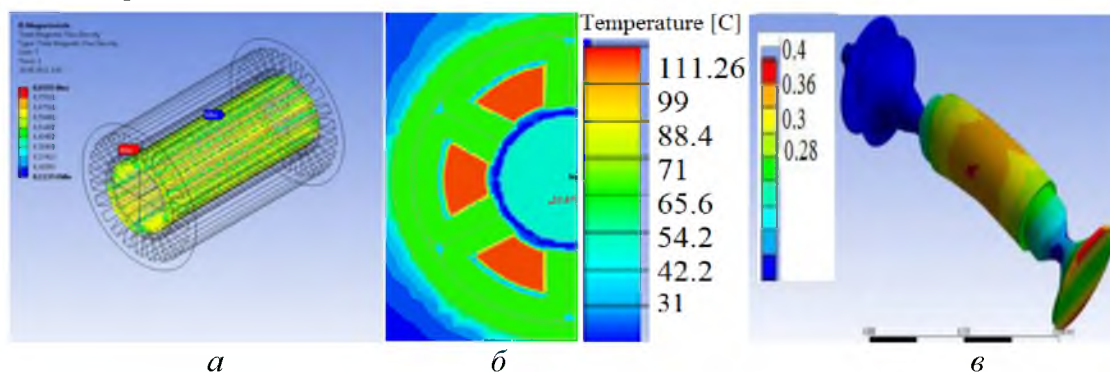


Рисунок 5 – *а* – результаты моделирования трехмерного магнитного поля в воздушном зазоре ЭМПЭ с ВПМ; *б* – результаты моделирования трехмерного теплового поля в воздушном зазоре ЭМПЭ с ВПМ; *в* – результаты моделирования механических процессов в ВЭМПЭ с ВПМ

- Способ бессенсорного управления положением ротора в бесконтактных подшипниках (патент РФ № 2539690).
- Способ и устройство управления положением ротора в магнитных подшипниках (патент РФ № 2518053).
- Способ диагностирования электрической машины (патент РФ № 2542596).

- Способ прохождения критических частот вращения в электромеханическом преобразователе энергии (патент РФ № 2605692).
- Способ управления положением ротора электрической машины на бесконтактных подшипниках (варианты) и электрическая машина для его реализации (патент РФ № 2656871).

Четвертая глава посвящена исследованиям режимов работы ЭМПЭ с ВПМ совместно с регулятором напряжения в составе СГЭ и оценке эффективности различных способов стабилизации напряжения ЭМПЭ с ВПМ в составе СГЭ ЛА. Также в данной главе разработана методика исследования магнитного поля реакции якоря в программном комплексе Ansys, позволяющая минимизацию временных затрат при компьютерном моделировании ЭМПЭ с ВПМ. На основе исследований при непосредственном участии автора был разработан и апробирован на практике новый метод параметрического управления и стабилизации напряжения ЭМПЭ с ВПМ. Суть данного метода заключается в том, что магнитопровод ЭМПЭ с ВПМ на этапе проектирования выполняется с такими геометрическими размерами, при которых достигается его насыщение на холостом ходу генератора (на предложенный метод получен патент №2637767 «Способ стабилизации выходного напряжения магнитоэлектрического генератора»). Искусственное насыщение магнитопровода осуществляется до такого значения магнитной индукции, при котором за счет увеличения магнитодвижущей силы (МДС) спинки статора и снижения МДС воздушного зазора напряжение холостого хода генератора близко к номинальному и разница между номинальным напряжением и напряжением холостого хода не превышает 5 В.

Для оценки эффективности предложенного способа были проведены его экспериментальные исследования на разработанном при участии автора магнитоэлектрическом генераторе МЭГ-100Ч. Для этого была разработана компьютерная модель насыщенного МЭГ-100Ч и проведена ее экспериментальная верификация. Экспериментальные исследования и компьютерное моделирование доказали возможность реализации и эффективность предлагаемого способа.

Пятая глава посвящена исследованию и разработке способов защиты ЭМПЭ с ВПМ от витковых коротких замыканий. В рамках главы предложен новый метод защиты ЭМПЭ с ВПМ (защищен патентом РФ 2691735) от витковых коротких замыканий и проведены его аналитические, компьютерные и экспериментальные исследования. Предложенный метод отличается тем, что учитывается гальваническая, термическая и электромагнитная связь катушек ЭМПЭ с ВПМ и позволяет сохранять работоспособность ЭМПЭ с ВПМ при витковых коротких замыканиях и изолировать одну из фаз или катушек ЭМПЭ с ВПМ. Произведены теоретические исследования данного метода и доказана возможность обеспечения защиты ЭМПЭ с ВПМ (без дополнительных обмоток на роторе) от витковых коротких замыканий во всех режимах работы. Также разработана методика компьютерного моделирования процессов при различных видах коротких замыканий (в том числе витковых) в ЭМПЭ с ВПМ, с учетом механических процессов. На основании предложенной методики

проведены исследования различных типов коротких замыканий, выявлены их диагностические критерии.

Шестая глава посвящена исследованию потерь в агрегатах СГЭ, на основе которых разработан алгоритм проектирования ЭМПЭ с ВПМ с магнитопроводом статора из аморфного железа, заключающийся в учете нелинейных магнитных и температурных свойств аморфного железа, особенностей изготовления магнитопроводов ЭМПЭ с ВПМ из аморфного железа, а также особенностей коэффициента заполнения магнитопровода. Получены функции аппроксимации зависимости удельных потерь в магнитопроводе статора от частоты при частотах более 400 Гц. С использованием предложенных теоретически основ и метода был реализован экспериментальный образец мощностью ЭМПЭ с ВПМ мощностью 120 кВт с магнитопроводом из аморфного железа. Необходимо отметить, что использование аморфного железа позволило снизить потери в магнитопроводе статора на гистерезис и вихревые токи в 3–4 раза.

Обобщая результаты исследований, приведенные в диссертационной работе, появляется возможность сформировать методологию создания систем генерирования электроэнергии летательных аппаратов с магнитоэлектрическими преобразователями энергии, которая представляет собой набор методик, обобщенных матриц и обобщенных математических моделей, разработанных в предыдущих главах.

Предлагаемая методология состоит из 6 основных блоков, каждый из которых детально раскрыт в главах диссертации. В 1 блоке вводятся основные параметры СГЭ ЛА и на основе обобщенных структурных матриц формируется структура СГЭ ЛА. Обобщенные структуры приведены в главе 2. Блок 2 посвящен созданию ЭМПЭ с ВПМ как основного энерговырабатывающего элемента с использованием предложенной обобщенной математической модели. В рамках данного блока также выполняется выбор материала статора и его проектирование (блок 3, раскрыт в главе 6), выбор способа защиты от КЗ (блок 4, раскрыт в главе 4) и выбор подшипниковых опор (блок 5, раскрыт в главе 3).

После чего происходит выбор РН (раскрыт в главе 6) и проектирование прочих агрегатов СГЭ (блок 6, раскрыто в главе 6). По результатам выполнения всех блоков, согласно предложенной методологии, появляется возможность создания высокоомощного СГЭ ЛА на основе ЭМПЭ с ВПМ с учетом всех технологических и технических особенностей при минимальных затратах времени и средств.

Седьмая глава посвящена внедрению в промышленность ЭМПЭ с ВПМ и СГЭ на их основе. В главе представлены результаты экспериментальных исследований серийных и экспериментальных (разработанных при непосредственном участии автора) ЭМПЭ с ВПМ, а также агрегатов СГЭ ЛА (электродвигателей для топливных насосов, трансформаторов для трансформаторно-выпрямительных устройств и т.д.). Также приведены исследования полной модели СГЭ, содержащей ЭМПЭ с ВПМ, трансформаторно-выпрямительное устройство и нагрузочные модули. Задачей экспериментальных исследований, представленных в данной главе, является верификация разработанной теоретической базы и методологии проектирования на серийных и экспериментальных ЭМПЭ с ВПМ и СГЭ на их основе, а

также экспериментальные исследования влияния нелинейной нагрузки на выходные характеристики СГЭ с магнитоэлектрическим генератором, и подтверждение данных имитационного моделирования, а также исследования совместной работы системы управления и защит на характеристики ЭТК с высокооборотным ЭМПЭ. Кроме того, в данной главе приведено сравнение созданных высокооборотных ЭМПЭ с ВПМ и СГЭ на их основе для короткоресурсных объектов с выпускаемыми серийно высокооборотными ЭМПЭ для короткоресурсных объектов и показаны преимущества предложенных научных положений и результатов диссертации.

На основе изложенной в диссертации теории, методик и новых технических решений при участии автора были созданы ЭМПЭ с ВПМ и их системы управления для различных СГЭ ЛА. Все приведенные высокооборотные ЭМПЭ и реализованные на их основе СГЭ прошли стендовые испытания (АО «УАПО», АО «ОКБ Кристалл», УАП «Гидравлика», ФГУП «ЦИАМ», АО «СЭГЗ» и др.). Акты внедрения и протоколы испытаний являются приложениями диссертации.

Для проверки методологии проектирования СГЭ, а также теории СГЭ была разработана и испытана СГЭ для перспективных ЛА, состоящая из высокооборотного ЭМПЭ (разработан при участии автора) и трансформаторно-выпрямительного устройства ТВУ (разработано при участии автора). Испытания СГЭ проводились в нормальных климатических условиях. На стенде производилось снятие осциллограмм напряжения в фазах ЭМПЭ, а также исследовались процессы внутри СГЭ при разгоне ротора от 0 до 12 000 об/мин при холостом ходе и полной нагрузке.

Из сравнения данных результатов видно, что предлагаемая методология обеспечивает не более 10–12% расхождения с данными эксперимента. Причем этот результат получен как для СГ, так и для ТВУ и всего СГЭ в целом. Сходимость была обеспечена при сравнениях электромагнитных, тепловых и механических расчетов с результатами электромагнитных, тепловых и механических процессов при эксперименте. Также выбранная методология показала высокую сходимость с результатами измерения потерь. То есть по трем независимым характеристикам предлагаемая в диссертации методология показала высокую сходимость. Все это подтверждает высокую эффективность предложенной методологии.

В целом важно отметить, что все экспериментальные исследования созданных образцов ЭМПЭ и элементов СГЭ показали высокую сходимость с теоретической базой, приведенной в диссертации, и позволили создать образцы техники, которые превосходят по своим массогабаритным характеристикам, энергетическим показателям и коэффициенту полезного действия зарубежные аналоги. Результаты испытаний и описания созданных образцов приведены в диссертации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований:

1. Создана методология комплексного анализа магнитных, тепловых процессов с учетом требований механической прочности и динамики ротора на основе совместных решений уравнений Максвелла и Фурье, что позволило осуществить разработку проектов,

комплектов конструкторской документации и опытных образцов перспективных, мощных СГЭ ЛА при снижении времени проектирования в 2 раза и повышении энергоэффективности СГЭ ЛА на 1–1,5%.

2. Разработана обобщенная структурная модель СГЭ ЛА на основе ЭМПЭ с ВПМ с учетом тенденций развития современных ЛА, отличающаяся от известных возможностью параллельной реализации нескольких СГЭ ЛА и прямой интеграции ЭМПЭ с ВПМ в силовую установку ЛА. Предложенная модель учитывает многофазность и дублируемость элементов в отказоустойчивых ЭМПЭ с ВПМ СГЭ ЛА, позволяет выполнять исследования СГЭ ЛА при условии многовариантности их построения и обеспечивает минимизацию временных и материальных затрат при создании перспективных СГЭ ЛА. На основе обобщенной структурной модели предложены частные структурные модели для основных и аварийных СГЭ ЛА, которые являются основой методики многодисциплинарного проектирования СГЭ ЛА.

3. Разработана обобщенная многодисциплинарная математическая модель, отличающаяся от известных тем, что учитывает взаимовлияние тепловых, механических и электромагнитных процессов, а также процессов в подшипниковых узлах и влияние эксцентриситета ротора на параметры ЭМПЭ с ВПМ и позволяет обеспечить минимизацию временных и материальных затрат при проектировании СГЭ ЛА на основе ЭМПЭ с ВПМ.

4. Для СГЭ ЛА на основе ЭМПЭ с ВПМ мощностью 16 кВт и выходным напряжением 27 В была произведена комплексная оптимизация ЭГ с ВПМ и ТВУ с помощью генетических алгоритмов и метода Парето и показано, что минимальная масса при минимальных тепловыделениях имеет место при двух уровнях линейных напряжений внутри СГЭ: 140 и 260 В при выходном напряжении 27 В. При этом напряжение 260 В обеспечивает минимальные токи не только в ЭГ с ВПМ и трансформаторе ТВУ, но и в соединительных проводах между ними, что позволяет уменьшить объем соединительных проводов.

Была решена задача комплексной оптимизации агрегатов внутри СГЭ ЛА мощностью 16 кВт и напряжением 27 В при фиксированном напряжении и частоте вращения ротора ЭГ с ВПМ (задача сводилась к выбору числа пар полюсов ЭГ с ВПМ, числа пазов на полюс и фазу ЭГ с ВПМ (Q) с учетом характеристик трансформатора ТВУ) и показано, что оптимальным для рассматриваемых численных параметров является СГ с числом пазов, равным 72 и числом полюсов, равным 6, с частотой напряжения 600 Гц.

5. Путем обобщения и развития известных и разрабатываемых в диссертации математических моделей, структурных матриц, методик проектирования и подходов к созданию агрегатов СГЭ ЛА предложена методология создания СГЭ ЛА, позволяющая выполнять процесс многодисциплинарного проектирования СГЭ ЛА на основе ЭМПЭ с ВПМ, которая включает в себя одновременное многодисциплинарное проектирование всех компонентов, входящих в СГЭ, и позволяет проводить их совместную оптимизацию. Для верификации предложенной методологии было произведено многодисциплинарное проектирование, создана и испытана СГЭ ЛА мощностью 16 кВт. Предложенная методология показала высокую точность (расхождение с экспериментом составило не более

10–12%). На примере маломощной СГЭ ЛА доказано, что с использованием предлагаемой методологии можно создавать СГЭ ЛА, обладающие по сравнению с серийным СГЭ (генератор ГСА-15 и блока ПЧА) сравнимой расчетной надежностью при более низких массогабаритных показателях.

6. Приведено описание процесса проектирования с используемой методологией СГЭ с ЭГ с ВПМ мощностью 150 кВт. Разработана модель первичного магнитного поля в воздушном зазоре ЭМПЭ с ВПМ в цилиндрических (двухмерная задача) и декартовых координатах (трехмерная задача), на основе исследований которой установлены:

- рациональная относительная длина ротора ЭМПЭ с ВПМ при $l/D > 3$, при которой тангенциальная составляющая напряженности магнитного поля в воздушном зазоре минимальна, а нормальная составляющая максимальна, то есть рассеивание магнитного потока при указанной относительной длине будет минимальным;

- для ВПМ марки NdFeB при увеличении температуры с 70 до 140 градусов радиальная составляющая магнитного потока снижается на 25–35%. В ЭМПЭ с ВПМ целесообразно применять ВПМ NdFeB в тех случаях, когда их температура не превышает 80°C, в других случаях предпочтительно применение ВПМ Sm₂Co₁₇ –с точки зрения обеспечения энергетических характеристик;

- расхождение между расчетной внешней характеристикой с учетом температурного влияния и без учета температурного влияния при трехкратной перегрузке может достигать 20%. При этом видно, что температура ВПМ приводит к изменению характера внешней характеристики ЭМПЭ с ВПМ, она приобретает нелинейный, экспоненциальный характер;

- зависимость температурных коэффициентов ВПМ от температуры ВПМ имеет нелинейный характер. Нелинейный характер температурных коэффициентов был определен на основе экспериментальных данных и учитывается в обобщенной математической модели.

7. Предложен новый метод гибридной стабилизации напряжения ЭМПЭ с ВПМ, который отличается от известных тем, что магнитопровод статора ЭМПЭ с ВПМ выполняется насыщенным относительно рабочей точки на 25% в режиме холостого хода и при этом в процессе эксплуатации из-за частичной демагнетизации ПМ под действием температуры и размагничивающего действия реакции якоря происходит его разнасыщение, что позволяет обеспечивать стабилизацию напряжения ЭМПЭ с ВПМ благодаря совокупности теоретических и технических решений в части магнитной системы ротора и магнитопровода статора и при этом не ухудшает массогабаритные показатели ЭМПЭ с ВПМ в отличие от известных параметрических способов стабилизации напряжения.

8. Предложена методика исследования магнитного поля реакции якоря в программном комплексе Ansys и исследовано ее влияние на магнитное поле реакции якоря как на воздействующий фактор различных характеристики ЭМПЭ с ВПМ. Установлено, что:

- при увеличении установившейся температуры ЭМПЭ с ВПМ на 50–60°C происходят существенные изменения магнитного поля в воздушном зазоре ЭМПЭ с ВПМ. Другими словами, для обеспечения надежного и точного регулирования и управления

напряжением ЭМПЭ с ВПМ конденсаторы РН и дроссели должны быть рассчитаны с учетом температурных режимов работы ЭМПЭ с ВПМ. В противном случае, как видно из полученных результатов, неучет температурного режима работы ЭМПЭ с ВПМ приведет к нехватке мощности РН для стабилизации напряжения в широком диапазоне изменения нагрузок.

– существует оптимальная величина воздушного зазора, при которой регулируемость и управляемость ЭМПЭ с ВПМ, то есть изменение магнитного поля в воздушном зазоре под действием реакции якоря будет максимальным.

9. Предложен новый метод обеспечения защиты ЭМПЭ с ВПМ от витковых коротких замыканий, отличающийся учетом гальванической, термической и электромагнитной связи катушек ЭМПЭ с ВПМ и позволяющий сохранять работоспособность ЭМПЭ с ВПМ при витковых коротких замыканиях с изоляцией одной из фаз или катушек ЭМПЭ с ВПМ. Произведены теоретические исследования данного метода и сформулированы научные подходы для его реализации. Доказана возможность обеспечения защиты ЭМПЭ с ВПМ от витковых коротких замыканий во всех режимах работы. Произведена оценка увеличения массогабаритных показателей ЭМПЭ с ВПМ при использовании предлагаемой защиты от витковых коротких замыканий.

10. Предложена и разработана методика компьютерного моделирования коротких замыканий ЭМПЭ с ВПМ с учетом механических процессов ротора, позволяющая исследовать не только отдельные типы коротких замыканий, но и их различные комбинации. С помощью разработанной методики были проведены исследования коротких замыканий в ЭМПЭ с ВПМ на примере электрогенератора СГЭ ЛА МЭГ-100Ч и установлено следующее:

– при двухфазном коротком замыкании в ЭМПЭ с ВПМ с исследуемыми численными параметрами происходит бросок электромагнитного момента, превышающего номинальный в 2,5 раза. Электромагнитный момент имеет затухающий характер и по истечении 20 мс снижается более чем в 1,5 раза. Кроме того, он имеет знакопеременный характер и отличается по форме от характеристик электромагнитного момента, полученного при трехфазных КЗ (при двухфазном КЗ имеет место появление четных гармоник в токе);

– при однофазном коротком замыкании амплитуда тока в короткозамкнутой фазе увеличивается в два раза, при этом в работоспособных фазах ток увеличивается на 10–15%. Электромагнитный момент ЭМПЭ имеет пульсирующий характер с амплитудой пульсаций 40 Нм и постоянной составляющей 20 Нм. То есть максимальный электромагнитный момент составляет 80 Нм. Характер изменения электромагнитного момента незатухающий. Постоянная составляющая электромагнитного момента создается работоспособными фазами.

11. Предложен метод защиты ЭМПЭ с ВПМ в составе СГЭ ЛА от трехфазных коротких замыканий (патент РФ № 2644586 «Способ управления системой защиты магнитоэлектрического генератора от короткого замыкания»), отличающийся от известных тем, что при фазных коротких замыканиях на замкнутую фазу коммутируется дополнительная индуктивность, роль которой выполняет обмотка подмагничивания. Проведены экспериментальные и компьютерные исследования данного метода, которые

позволили установить, что для генератора МЭГ-100Ч ток трехфазного короткого замыкания без использования методов защиты составляет 1614 А. Это более чем в три раза превышает номинальное значение – 432 А. При однофазном КЗ ток в замкнутой фазе без использования методов защиты составляет 1773 А, что также более чем в три раза превышает номинальное значение. При использовании предложенного метода ток короткого замыкания снижается в 5–7 раз.

12. Разработаны способы защиты от фазных коротких замыканий с помощью полупроводниковых размыкателей (патент РФ № 2582593 «Система защиты магнитоэлектрического генератора от короткого замыкания и способ управления системой» и патент РФ № 2498473 «Устройство защиты магнитоэлектрического генератора от короткого замыкания (варианты)»). Предложенные способы были оформлены в интересах ФГУП «ГосНИИАС» и АО «УАПО» и использовались при создании генераторов МЭГ-100Ч и ВМГ-120.

13. Предложен алгоритм проектирования ЭМПЭ с ВПМ с магнитопроводом статора из аморфного железа, заключающийся в учете нелинейности магнитных и температурных свойств аморфного железа, особенностей изготовления магнитопроводов ЭМПЭ с ВПМ из аморфного железа, а также особенностей коэффициента заполнения магнитопровода.

14. Проведены исследования различных технологий изготовления магнитопроводов статора, в результате которых установлено:

- что при лазерной резке без термообработки (ТО) при индукции 1,2 Тл и частоте 400 Гц удельные потери составляют 33 Вт/кг. При этом ТО согласно ТУ позволяет снизить данные потери до 19 Вт/кг. Важно отметить, что после ТО удельные потери при 400 Гц и индукции 1 Тл соответствуют ТУ на сталь электротехническую 2421 с толщиной листа 0,18 мм (14 Вт/кг). При ЭО удельные потери при частоте 400 Гц и индукции 1,2 Тл составляют 22 Вт/кг, при этом ТО позволяет их также снизить до 19 Вт/кг (на 14%). То есть в образцах, полученных с помощью ЛР без ТО, удельные потери на 33% больше по сравнению с образцами, полученными с помощью ЭО без ТО;

- ТО позволяет обеспечить удельные потери в образцах, полученных с помощью ЛР на уровне ТУ, на используемый магнитомягкий материал;

- с увеличением частоты перемагничивания до 200 Гц удельные потери в магнитопроводах, полученных с помощью ЭО с ТО и без ТО, становятся практически одинаковыми. Для исследуемого случая это наблюдается при 2000 Гц.

15. Разработаны, исследованы и рекомендованы к внедрению новые, научно обоснованные конструктивные схемы высокоэффективных агрегатов (ЭГ, ЭД, трансформаторов) СГЭ. Проведены экспериментальные исследования высокооборотных ЭМПЭ в статическом и динамическом режимах и выполнен анализ особенностей эксплуатации высокооборотных ЭМПЭ в различных режимах работы.

Таким образом, в результате обобщения исследований, приведенных в диссертационной работе, сформирована методология создания систем генерирования

электроэнергии летательных аппаратов с магнитоэлектрическими преобразователями энергии, которая представляет собой набор методик, обобщенных матриц и обобщенных математических моделей, разработанных в главах диссертации. Предложенная методология приведена в виде структурной схемы, учитывающей все взаимосвязи процесса проектирования СГЭ ЛА, что позволяет минимизировать временные и материальные затраты. Цель работы достигнута, а поставленная научная проблема решена.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в следующих работах:

Монографии

1. Исмагилов, Ф.Р. Основы проектирования высокооборотных электромеханических преобразователей энергии с высококоэрцитивными постоянными магнитами: монография / Ф.Р. Исмагилов, И.Х. Хайруллин, В.Е. Вавилов – М.: Инновационное машиностроение, 2016. – 223 с.
2. Bolvashenkov I. Fault-Tolerant Traction Electric Drives: Reliability, Topologies and Components Design / Bolvashenkov I., Herzog H.-G., Ismagilov F., Vavilov V., Khvatskin L., Frenkel I., Lisnianski A. Springer, Singapore, 2019. – 107 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-981-13-9275-7>.
3. Исмагилов, Ф.Р. Сверхвысокооборотные электромеханические системы: монография / Ф.Р. Исмагилов, И.Х. Хайруллин, В.Е. Вавилов, В.В. Айгузина – М.: Инновационное машиностроение, 2018. – 193 с.
4. Исмагилов, Ф.Р. Электромеханические системы с высококоэрцитивными постоянными магнитами: монография / Ф.Р. Исмагилов, А.А. Герасин, И.Х. Хайруллин, В.Е. Вавилов. – М.: Машиностроение, 2014. – 262 с.
5. Исмагилов, Ф.Р. Магнитомягкие и магнитотвердые материалы для перспективных электромеханических преобразователей энергии и электрических аппаратов: монография / Ф.Р. Исмагилов, В.Е. Вавилов, В.И. Бекузин. – М.: Инновационное машиностроение, 2018. – 193 с.

Публикации, индексируемые в БД Scopus и Web of Science

6. **Вавилов, В.Е.** Hybrid magnetic bearing with axial displacement of the annular magnets / В.Е. Вавилов // Russian Engineering Research. – 2015. – Vol. 35, No. 3. – P. 181–184.
7. **Вавилов, В.Е.** Integrated High-Temperature Starter-Generator for Aerospace Vehicles. Testing of a Scaled-Size Prototype / В.Е. Вавилов // International Review of Aerospace Engineering (IREASE). – 2017. – Vol. 10, №1. – P. 24–30.
8. **Вавилов, В.Е.** Selecting the Rotor's Magnetic System in Electromechanical Energy Converters with Highly Coercive Permanent Magnets / В.Е. Вавилов // Russian Engineering Research. – 2018. – Vol. 38, No. 4. – P. 256–259.
9. **Вавилов, В.Е.** Influence of Rotor Eccentricity in Ultrahigh-Speed Electrical Machines on Their Characteristics / В.Е. Вавилов // Russian Engineering Research. – 2018. – Vol. 38, No. 8. – P. 617–622.

10. **Вавилов, В.Е.** Application of hybrid magnetic bearings in aviation starter-generators / В.Е. Вавилов, Ф.Р. Исмагилов, И.Х. Хайруллин, М.Б. Гумерова // International Review of Electrical Engineering. – 2014. – Vol. 9, № 3. – P. 506–510.
11. **Вавилов, В.Е.** Electromagnetic processes in the rotor shroud of a High-Speed Magneto-Electric generator under sudden Short-Circuit / Ф.Р. Исмагилов, И.Х. Хайруллин, В.Е. Вавилов // International Review of Electrical Engineering. – 2014. – Vol. 9, № 5. – P. 913–918.
12. **Вавилов, В.Е.** Mathematical model of high-frequency electromechanical energy transducer with high-coercitive permanent magnets / Ф.Р. Исмагилов, И.Х. Хайруллин, В.Е. Вавилов, А.М. Якупов // IAENG International Journal of Applied Mathematics. – 2016. – 46:3, IJAM_46_3_02. – P. 1–9.
13. **Вавилов, В.Е.** Research of the magnetic field of high-speed magnetoelectric generator / Ф.Р. Исмагилов, В.Е. Вавилов // International Review of Electrical Engineering. – 2016. – Vol. 11, № 2. – P. 136–141.
14. **Вавилов, В.Е.** Transients in Ultra-High-Speed Generators of Micro-Sized Gas Turbines / Ф.Р. Исмагилов, В.Е. Вавилов, И.И. Ямалов, В.В. Айгузина // Progress In Electromagnetics Research M. – 2017. – Vol. 59. – P. 123–133.
15. **Вавилов, В.Е.** Topology evaluation of a slotless high-speed electrical machine with stator core made of an amorphous alloy for the aerospace industry / Ф.Р. Исмагилов, В.Е. Вавилов, В.И. Бекузин, В.В. Айгузина // International Review of Aerospace Engineering (IREASE). – 2017. – Vol. 10, № 3. – P. 131–139.
16. **Вавилов, В.Е.** Magnetic-System Topology Selection for the High-Speed Electrical Machine with Interior Permanent Magnets / Ф.Р. Исмагилов, В.Е. Вавилов, В.В. Айгузина // Elektrotehniški Vestnik. – 2017. – Vol. 84, № 4. – P. 181–188.
17. **Вавилов, В.Е.** On the Interaction of Temperature and Magnetic Field in Electromechanical Energy Converters with Permanent Magnets / Ф.Р. Исмагилов, В.Е. Вавилов, И.И. Ямалов // Engineering Letters. – 2017. – Vol. 25, № 4. – P. 416–423.
18. **Вавилов, В.Е.** Improving The Efficiency Of Electrical High-RPM Generators With Permanent Magnets And Tooth Winding / Ф.Р. Исмагилов, В.Е. Вавилов, Р.Д. Каримов // Progress In Electromagnetics Research M. – 2018. – Vol. 63. – P. 93–105.
19. **Вавилов, В.Е.** Multidisciplinary Design of Ultra-High Speed Electric Machines / Ф.Р. Исмагилов, Н. Ужегов, В.Е. Вавилов, В.И. Бекузин, В.В. Айгузина // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 2018. – Vol. 33, № 3. – P. 1203–1212.
20. **Вавилов, В.Е.** Super high-speed electric motor with amorphous magnetic circuit for the hydrogen fuel cell air supply system / Ф.Р. Исмагилов, В.Е. Вавилов, А.Х. Минияров, Р.Р. Уразбахтин // International Journal of Hydrogen Energy. – 2018. – Vol. 43, No. 24. – P. 11180–11189.
21. **Вавилов, В.Е.** Influence of Rotor Eccentricity in Ultrahigh-Speed Electrical Machines on Their Characteristics / В.Е. Вавилов // Russian Engineering Research. – 2018. – Vol. 38, № 8. – P. 617–622.

22. **Вавилов, В.Е.** New method of optimal design of electrical rotating machines / Ф.Р. Исмагилов, В.Е. Вавилов, В.В. Айгузина, В.И. Бекузин // Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science. – 2017. – Vol. 5, № 3. – P. 479–487.

Публикации в журналах перечня ВАК РФ

23. **Вавилов, В.Е.** Расчет магнитного поля реакции якоря высокооборотного магнитоэлектрического генератора методами компьютерного моделирования / В.Е. Вавилов // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2016. – № 3 (545). – С. 25–29.

24. **Вавилов, В.Е.** Методология проектирования высокооборотных генераторов для микротурбинных установок / В.Е. Вавилов // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – 2016. – Т. 146, № 3. – С. 16–23.

25. **Вавилов, В.Е.** Выбор магнитной системы ротора электромеханических преобразователей энергии с высококоэрцитивными постоянными магнитами / В.Е. Вавилов // Вестник Машиностроения. – 2018. – № 1. – С. 26–29.

26. **Вавилов, В.Е.** К вопросу проектирования гибридных магнитных подшипников // Известия высших учебных заведений / В. Е. Вавилов // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2017. – Т. 60, № 4. – С. 19–25.

27. **Вавилов, В.Е.** Новая конструкция однополярных магнитных подшипников // Известия высших учебных заведений / В.Е. Вавилов // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2018. – № 6. – С. 19–25.

28. **Вавилов, В.Е.** Определения влияния статического эксцентриситета на устойчивость гибридного магнитного подшипника / И.Х. Хайруллин, Ф.Р. Исмагилов, В.Е. Вавилов // Вестник УГАТУ. – 2012. – Т. 16. – С. 147–150.

29. **Вавилов, В.Е.** Алгоритм управления гибридными магнитными подшипниками по внешнему магнитному полю / В.Е. Вавилов, А.А. Герасин, Ф.Р. Исмагилов, И.Х. Хайруллин // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2013. – № 5. – С. 126–131.

30. **Вавилов, В.Е.** Определение коэффициента полюсного перекрытия быстроходных магнитоэлектрических машин с высококоэрцитивными цилиндрическими магнитами / Ф.Р. Исмагилов, И.Х. Хайруллин, В.Е. Вавилов // Электричество. – 2013. – № 11. – С. 51–53.

31. **Вавилов, В.Е.** Математическая модель синхронного генератора с учетом процессов в подшипниковых опорах / Ф.Р. Исмагилов, И.Х. Хайруллин, В.Е. Вавилов // Известия академии наук. Энергетика. – 2014. – № 2. – С. 136–142.

32. **Вавилов, В.Е.** Методика критериального выбора материала магнитопровода статора электромеханических преобразователей энергии / Ф.Р. Исмагилов, И.Х. Хайруллин, В.Е. Вавилов // Труды ВНИИЭМ. Вопросы Электромеханики. – 2014. – Т. 139. – С. 11–16.

33. **Вавилов, В.Е.** Коэффициент полезного действия высокоскоростных электромеханических преобразователей энергии с высококоэрцитивными постоянными магнитами / Ф.Р. Исмагилов, И.Х. Хайруллин, В.Е. Вавилов // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2015. – № 538. – С. 12–19.

34. **Вавилов, В.Е.** Оценка влияния характера нелинейной нагрузки на высшие гармонические составляющие тока в бесконтактных магнитоэлектрических генераторах / В.Е. Вавилов, Д.Р. Фаррахов, Ф.Р. Исмагилов, И.Х. Хайруллин, Р.А. Гайсин // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2015. – № 4 (540). – С. 27–31.
35. **Вавилов, В.Е.** Особенности проектирования высокооборотных электромеханических преобразователей энергии с высококоэрцитивными постоянными магнитами, работающих в кратковременном режиме / В.Е. Вавилов, Ф.Р. Исмагилов, И.Х. Хайруллин, Р.Д. Каримов // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2015. – № 6 (542). – С. 45–53.
36. **Вавилов, В.Е.** Исследование магнитных систем ротора высокоскоростных электромеханических преобразователей энергии / Ф.Р. Исмагилов, И.Х. Хайруллин, В.Е. Вавилов, Е.А. Полихач // Электротехника. – 2016. – № 4. – С. 16–20.
37. **Вавилов, В.Е.** Сверхвысокооборотные электромеханические преобразователи энергии. Тенденции развития и перспективы использования / Ф.Р. Исмагилов, И.Х. Хайруллин, В.Е. Вавилов // Электротехника. – 2016. – №10. – С. 18–23.
38. **Вавилов, В.Е.** Гибридный метод управления напряжением магнитоэлектрического генератора / В.Е. Вавилов, А.А. Герасин, Ф.Р. Исмагилов, И.Х. Хайруллин, Д.Р. Фаррахов // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2017. – № 2. – С. 114–120.
39. **Вавилов, В.Е.** Интеллектуальный стартер-генератор для системы электроснабжения летательного аппарата с повышенным постоянным напряжением / М.А. Киселев, Ф.Р. Исмагилов, В.Е. Вавилов, Д.Ю. Пашали, Н.Л. Бабилова // Электротехника. – 2018. – № 1. – С. 3–7.
40. **Вавилов, В.Е.** Сверхвысокооборотный стартер-генератор с магнитопроводом из аморфного железа для беспилотного летательного аппарата / В.Е. Вавилов, О.А. Юшкова, Ю.В. Рахманова, Ю.В. Афанасьев, Н.К. Потапчук // Электротехника. – 2018. – № 1. – С. 16–21.
41. **Вавилов, В.Е.** Высокооборотный магнитоэлектрический генератор повышенной мощности / Ф.Р. Исмагилов, И.Х. Хайруллин, В.Е. Вавилов // Электротехника. – 2018. – № 6. – С. 51–56.
42. **Вавилов, В.Е.** Обоснование целесообразности применения аморфной стали в магнитопроводах трансформаторно-выпрямительных устройств летательных аппаратов / Ф.Р. Исмагилов, В.Е. Вавилов, Д.В. Гусаков, А.А. Меднов // Электричество. – 2018. – № 5. – С. 8–15.
43. **Вавилов, В.Е.** Перспективный магнитоэлектрический генератор для системы электроснабжения летательных аппаратов с повышенным постоянным напряжением 270 В / Ф.Р. Исмагилов, В.Е. Вавилов, Н.Г. Тарасов // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2017. – № 2. – С. 2–7.
44. **Вавилов, В.Е.** О выборе технологии изготовления статора мелкосерийных и опытных электромеханических преобразователей энергии с учетом магнитных потерь /

Ф.Р. Исмагилов, Н.Ю. Львов., В.Е. Вавилов, Т.А. Львовский, В.И. Бекузин // Электричество. – 2019. – № 4. – С. 44–50.

45. **Вавилов, В.Е.** Эффективные топологии беспазовой высокоскоростной электрической машины для аэрокосмической отрасли / Ф.Р. Исмагилов, В.Е. Вавилов, В.И. Бекузин, В.В. Айгузина // Электротехника. – 2019. – № 4. – С. 19–24.

46. **Вавилов, В.Е.** Оптимизация высокотемпературного стартер-генератора обращенной конструкции для летательных аппаратов / Ф.Р. Исмагилов, В.Е. Вавилов // Электротехника. – 2019. – № 5. – С. 39–44.

47. **Вавилов, В.Е.** Математическая модель системы генерирования электроэнергии летательных аппаратов на основе генератора с постоянными магнитами / В.Е. Вавилов, Ф.Р. Исмагилов // Авиакосмическое приборостроение. – 2019. – № 5. – С. 34–45.

Патенты, свидетельства о регистрации программ для ЭВМ

48. Управляемый магнитный подшипник на постоянных магнитах и способ управления им: пат. 2563884 Рос. Федерация: МПК H02K7/09, F16C32/04 / Вавилов В.Е.; патентообладатель Вавилов В.Е. – № 2013156206; заявл. 17.12.2013; опубл. 27.09.2015, Бюл. № 27.

49. Линейный магнитоэлектрический генератор с магнитными подшипниками (Варианты): пат. 135861 Рос. Федерация: МПК H02K35/02 / Вавилов В.Е.; патентообладатель Вавилов В.Е. – № 2013131215; заявл. 08.07.2013; опубл. 20.12.2013, Бюл. № 35.

50. Гибридный магнитный подшипник с компенсацией осевых сил: пат. 135378 Рос. Федерация: МПК F16C32/04 / Вавилов В.Е.; патентообладатель Вавилов В.Е. – № 2013131216; заявл. 08.07.2013; опубл. 10.12.2013, Бюл. № 34.

51. Трехмерная модель генератора с высококоэрцитивными постоянными магнитами: св-во о гос. рег-и прог. для ЭВМ 2013619379 / Вавилов В.Е.; правообладатель Вавилов В.Е. – № 2013619379; заявл. 17.10.2013; опубл. 20.01.2014.

52. Высокоскоростная магнитоэлектрическая машина с вертикальным валом: пат. 2475928 Рос. Федерация: МПК H02K21/22, H02K7/09 / Хайруллин И.Х., Исмагилов Ф.Р., Пашали Д.Ю., Вавилов В.Е.; патентообладатель ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет». – № 2011124650; заявл. 16.06.2011; опубл. 20.02.2013, Бюл. № 5.

53. Устройство защиты магнитоэлектрического генератора от короткого замыкания (варианты): пат. 2498473 Рос. Федерация: МПК H02H7/06 / Герасин А.А., Чуянов Г.А., Исмагилов Ф.Р., Хайруллин И.Х., Афанасьев Ю.В., Пашали Д.Ю., Вавилов В.Е., Охотников М.В.; патентообладатель ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет». – № 2012134419; заявл. 10.08.2012; опубл. 10.11.2013, Бюл. № 31.

54. Система жидкостного охлаждения статора электрических машин автономных объектов: пат. 2513042 Рос. Федерация: МПК H02K9/193, H02K1/20 / Хайруллин И.Х., Исмагилов Ф.Р., Афанасьев Ю.В., Охотников М.В., Вавилов В.Е.; патентообладатель ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет». – № 2013102090; заявл. 16.01.2013; опубл. 20.04.2014, Бюл. № 11.

55. Способ и устройство управления положением ротора в магнитных подшипниках: пат. 2518053 Рос. Федерация: МПК H02K7/09, F16C32/04, G05B11/36 / Исмагилов Ф.Р., Хайруллин И.Х., Пашали Д.Ю., Вавилов В.Е., Охотников М.В., Бойкова О.А.; патентообладатель ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет». – № 2012142438; заявл. 04.10.2012; опубл. 10.06.2014, Бюл. № 16.

56. Способ бессенсоного управления положение ротора в бесконтактных подшипниках: пат. 2539690 Рос. Федерация: МПК H02K7/09, F16C32/04 / Исмагилов Ф.Р., Хайруллин И.Х., Вавилов В.Е. Гайсин Р.А.; патентообладатель ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет». – № 2014102552; заявл. 27.01.2014; опубл. 27.01.2015, Бюл. № 3.

57. Роторная система магнитоэлектрической машины: пат. 2555100 Рос. Федерация: МПК F01D15/10, F01D5/08, H02K1/32, H02K1/28, H02K1/27 / Исмагилов Ф.Р., Хайруллин И.Х., Вавилов В.Е.; патентообладатель ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет». – № 2014109787; заявл. 13.03.2014; опубл. 10.07.2015, Бюл. № 19.

58. Способ торможения ротора электрической машины на магнитных подшипниках: пат. 2549363 Рос. Федерация: МПК H02K7/09, H02P9/08, H02P3/00 / Исмагилов Ф.Р., Хайруллин И.Х., Вавилов В.Е.; патентообладатель ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет». – № 2014102427; заявл. 24.01.2014; опубл. 27.04.2015, Бюл. № 12.

59. Способ разгрузки подшипников электромеханических преобразователей энергии: пат. 2557333 Рос. Федерация: МПК F16C39/06 / Исмагилов Ф.Р., Хайруллин И.Х., Вавилов В.Е.; патентообладатель ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет». – № 2014111529; заявл. 25.03.2014; опубл. 20.07.2015, Бюл. № 20.

60. Способ прохождения критических частот вращения в электромеханическом преобразователе энергии: пат. 2605692 Рос. Федерация: МПК F16C32/04, H02K7/09, H02K5/24 / Исмагилов Ф.Р., Хайруллин И.Х., Вавилов В.Е., Тарасов Н.Г.; патентообладатель ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет». – № 2015152918; заявл. 09.12.2015; опубл. 27.12.2016, Бюл. № 36.

61. Интегрированный высокотемпературный стартер-генератор и способ управления им: пат. 2583837 Рос. Федерация: МПК H02K21/02, H02K21/12, H02K19/36 / Исмагилов Ф.Р., Хайруллин И.Х., Вавилов В.Е., Каримов Р.Д., Тарасов Н.Г., Минияров А.Х.; патентообладатель ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет». – № 2015100634; заявл. 12.01.2015; опубл. 10.05.2016, Бюл. № 13.

62. Магнитоэлектрический генератор и способ стабилизации его выходного напряжения: пат. 2597888 Рос. Федерация: МПК H02K21/02, H02P9/14 / Исмагилов Ф.Р., Хайруллин И.Х., Вавилов В.Е., Фаррахов Д.Р.; патентообладатель ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет». – № 2015139630; заявл. 17.09.2015; опубл. 20.09.2016, Бюл. № 26.

63. Способ управления стартер-генератором, интегрированным в газотурбинный двигатель, при коротком замыкании: пат. 2630285 Рос. Федерация: МПК F02C7/26 / Исмагилов Ф.Р., Хайруллин И.Х., Вавилов В.Е., Каримов Р.Д.; патентообладатель ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет». – № 2016123552; заявл. 14.06.2016; опубл. 06.09.2017, Бюл. № 25.

64. Беспазовый синхронный генератор с интегрированным магнитным подвесом: пат. 2647490 Рос. Федерация: МПК H02K7/09, H02K19/36 / Исмагилов Ф.Р., Хайруллин И.Х., Вавилов В.Е., Минияров А.Х., Меднов А.А.; патентообладатель ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет». – № 2016141874; заявл. 25.10.2016; опубл. 16.03.2018, Бюл. № 8.

65. Способ управления положением ротора электрической машины на бесконтактных подшипниках (варианты) и электрическая машина для его реализации: пат. 2656871 Рос. Федерация: МПК H02K7/09, F16C32/04 / Исмагилов Ф.Р., Хайруллин И.Х., Вавилов В.Е., Каримов Р.Д.; патентообладатель ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет». – № 2017115303; заявл. 28.04.2017; опубл. 07.06.2018, Бюл. № 16.

66. Сверхвысокооборотный микрогенератор: пат. 2656869 Рос. Федерация: МПК H02K21/22, H02K7/08, H02K5/167, H02K5/20 / Исмагилов Ф.Р., Хайруллин И.Х., Вавилов В.Е., Каримов Р.Д.; патентообладатель ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет». – № 2017114843; заявл. 26.04.2017; опубл. 07.06.2018, Бюл. № 16.

67. Гомополярный магнитный подшипник для высокоскоростных электрических машин: пат. 2660447 Рос. Федерация: МПК H02K7/09 / Исмагилов Ф.Р., Вавилов В.Е., Минияров А.Х., Саяхов И.Ф.; патентообладатель ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет». – № 2017131623; заявл. 08.09.2017; опубл. 06.07.2018, Бюл. № 19.

68. Способ диагностирования электрической машины: пат. 2542596 Рос. Федерация: МПК G01R31/34 / Исмагилов Ф.Р., Вавилов В.Е., Хайруллин И.Х.; патентообладатель ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет». – № 2013151715/28; заявл. 20.11.2013; опубл. 20.02.2015, Бюл. № 5.

Личный вклад. Работы [6–9], [23–27], [48–51] выполнены автором единолично. В работах [1–5], [10–22], [28–47], [52–68] соискателем разработаны предлагаемые математические модели, выполнена постановка научной проблемы, разработаны методы и предложены новые конструктивные решения.

Публикации отражают содержание диссертационной работы: по главе 1 – [1–4, 8, 16, 25, 36, 37]; по главе 2 – [1–4, 12, 17, 19, 22, 31, 39, 43, 46, 47]; по главе 3 – [1–4, 6, 10, 13, 21, 26–30, 48–52, 54–60, 64–68]; по главе 4 – [23, 34, 35, 53, 62]; по главе 5 – [2, 7, 11, 14, 61, 63]; по главе 6 – [1–5, 18, 32, 33, 40, 41, 45]; по главе 7 – [1, 24].

Соискатель



В. Е. Вавилов