Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет»

На правах рукописи ВАВИЛОВ Вячеслав Евгеньевич

МЕТОДОЛОГИЯ СОЗДАНИЯ СИСТЕМ ГЕНЕРИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ С МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ ЭНЕРГИИ

05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук

> Научный консультант: доктор технических наук, профессор Исмагилов Флюр Рашитович

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ
ГЛАВА 1 СИСТЕМЫ ГЕНЕРИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ
СОВРЕМЕННЫХ И ПЕРСПЕКТИВНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ.
ПРОБЛЕМЫ СОЗДАНИЯ И ПОСТАНОВКА НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИХ ЗАДАЧ
1.1 Теоретические аспекты и анализ работ и разработок в области
перспективных авиационных СГЭ. Классификация аэрокосмических СГЭ 27
1.2 Электрогенераторы систем генерирования электроэнергии летательных
аппаратов. Тенденции развития и требования к ним
1.2.1 Классификация ЭГ с ВПМ для систем генерирования электроэнергии
летательных аппаратов 48
1.2.2 Высокооборотные ЭМПЭ с ВПМ как частный случай ЭМПЭ с ВПМ СГЭ
ЛА
1.2.3 Теоретические аспекты и вопросы исследований ЭГ с ВПМ в составе СГЭ
ЛА
1.3 Системы управления и стабилизации напряжения систем генерирования
электроэнергии летательных аппаратов 58
1.4 Трансформаторы систем генерирования электроэнергии летательных
аппаратов
1.5 Электродвигатели для систем генерирования электроэнергии летательных
аппаратов
ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 1
ГЛАВА 2 ОБОБЩЕННАЯ СТРУКТУРНАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ
ГЕНЕРИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ 70
2.1 Обобщенная структурная модель СГЭ ЛА на основе ЭМПЭ с ВПМ 70
2.1.1 Обобщенная структурная модель магистрального СГЭ ЛА 71
2.1.2 Критерии эффективности СГЭ ЛА 77
2.1.3 Численный анализ эффективности СГЭ ЛА

2.2 Обобщенная математическая модель электромеханических преобразователей
энергии с высококоэрцитивными постоянными магнитами на упругих
подшипниковых опорах
2.2.1 Взаимовлияние электромагнитных и тепловых процессов
2.2.2 Обобщенная математическая модель ЭМПЭ с ВПМ с учетом
механической модели ЭМПЭ96
2.3 Алгоритм многодисциплинарного проектирования СГЭ 101
2.3.1 Многодисциплинарное создание маломощной СГЭ ЛА 104
2.3.2 Комплексная оптимизация ЭГ с ВПМ и трансформатора ТВУ 106
2.3.3 Многодисциплинарное проектирование агрегатов СГЭ ЛА 111
ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 2 129
ГЛАВА 3 ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ ЭНЕРГИИ С ВЫСОКОКОЭРЦИТИВНЫМИ
ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ
3.1 Математическое описание основного магнитного поля в воздушном зазоре
ЭМПЭ с ВПМ 132
3.2 Математическое описание трехмерного магнитного поля в воздушном зазоре
ЭМПЭ с ВПМ в декартовой системе координат140
3.3 Исследования процессов в ЭМПЭ с ВПМ на основе разработанной
обобщенной математической модели 145
3.4 Влияние эксцентриситета ротора на параметры ЭМПЭ с ВПМ 150
3.5 Зависимость магнитного поля реакции якоря в ЭМПЭ с ВПМ от температуры
ВПМ152
3.6 Исследование влияния температуры ВПМ на внешнюю характеристику ЭМПЭ
с ВПМ 154
3.7 Исследования зависимости температурных коэффициентов ВПМ от
температуры155
3.8 Оценка эффективности разработанной методологии комплексного анализа при
проектировании агрегатов СГЭ ЛА 158
Последовательная методология (ВЭП-40) 159

4
ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 3 160
ГЛАВА 4 ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ЭМПЭ С ВПМ СОВМЕСТНО
С РЕГУЛЯТОРОМ НАПРЯЖЕНИЯ В СОСТАВЕ СГЭ ЛА 162
4.1 Работа ЭМПЭ с ВПМ совместно с управляемым выпрямителем
в составе СГЭ ЛА
4.2 Работа ЭМПЭ с ВПМ в составе СГЭ ЛА совместно с регулятором
напряжения, включенным параллельно167
4.2.1 Исследования магнитного поля реакции якоря для эффективной
реализации работы РН с параллельной стабилизацией 171
4.3 ЭМПЭ с ВПМ с подмагничиванием спинки статора в составе СГЭ ЛА. 178
4.3.1 Исследования регулятора напряжения ЭМПЭ с ВПМ для
подмагничивания спинки статора 178
4.3.2 Выбор эффективного места расположения ДО в ЭМПЭ с ВПМ 180
4.3.3 Влияние числа пар полюсов на глубину регулирования ЭМПЭ с ВПМ
с подмагничиванием спинки статора
4.4 Новый параметрический метод стабилизации напряжения ЭМПЭ с
ВПМ
ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 4 191
ГЛАВА 5 КОРОТКИЕ ЗАМЫКАНИЯ В ЭМПЭ С ВПМ И МЕТОДЫ ЗАЩИТЫ
ОТ НИХ. ЗАДАЧИ ДИАГНОСТИКИ ЭМПЭ С ВПМ 193
5.1 Компьютерное моделирования витковых и междуфазных коротких замыканий
в ЭМПЭ с ВПМ
5.1.1 Методика компьютерного моделирования КЗ в ЭМПЭ с ВПМ с учетом
механических процессов движения ротора
5.1.2 Компьютерное моделирование ЭМПЭ с ВПМ в составе СГЭ ЛА при
различных видах КЗ 197
5.2 Методы защиты от фазных КЗ. Исследования и разработка 202
5.3 Метод защиты от витковых КЗ 211
5.3.1 Отказоустойчивые ЭМПЭ с ВПМ для СГЭ ЛА 214
5.3.2 Исследования способа защиты от витковых КЗ 216

5
ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 5
ГЛАВА 6 ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ И МИНИМИЗАЦИЯ ПОТЕРЬ В
АГРЕГАТАХ СИСТЕМ ГЕНЕРИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ. МЕТОДОЛОГИЯ СОЗДАНИЯ СИСТЕМ
ГЕНЕРИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ С
МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ ЭНЕРГИИ 223
6.1 Потери на вихревые токи и гистерезис в магнитопроводах АСГЭ ЛА 223
6.1.1 Влияние температуры на потери в магнитопроводе элементов СГЭ ЛА 225
6.1.2 Влияние технологии изготовления магнитопроводов АСГЭ на удельные
потери в магнитопроводе
6.1.4 Разработка и экспериментальные исследования магнитопроводов статора
ЭМПЭ с ВПМ из аморфного железа
6.2 Потери на вихревые токи в постоянных магнитах ЭМПЭ с ВПМ 253
6.3 Потери на вихревые токи в механических подшипниках ЭМПЭ с ВПМ 260
6.4 Методология создания систем генерирования электроэнергии летательных
аппаратов с магнитоэлектрическими преобразователями энергии
ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 6
ГЛАВА 7 ВОПРОСЫ ПРАКТИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ СИСТЕМ
ГЕНЕРИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ НА
ОСНОВЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ С
ВЫСОКОКОЭРЦИТИВНЫМИ ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ И ИХ
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
7.1 Экспериментальные исследования электромеханических преобразователей
энергии с высококоэрцитивными постоянными магнитами
7.1.1 Методика экспериментальных исследований
7.1.2 Экспериментальные исследования высокооборотного
электромеханического преобразователя энергии для СГЭ ЛА и серийного
высокооборотного ЭМПЭ для короткоресурсных объектов
7.1.3 Экспериментальные исследования динамики ротора высокооборотного
СГ ЛА для короткоресурсных объектов

7.1.4 Экспериментальные исследования электротехнического комплекса
«магнитоэлектрический генератор – нелинейная нагрузка» 283
7.2 Испытания СГЭ ЛА на основе ЭМПЭ с ВПМ
7.3 Экспериментальные исследования ВЭД с ВПМ для насоса ЭЦН-91 288
ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 7
ЗАКЛЮЧЕНИЕ
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ
Приложение 1. Акт внедрения результатов диссертационной
работы Вавилова В.Е
Приложение 2. Акт внедрения результатов диссертационной
работы Вавилова В.Е
Приложение 3. Акт внедрения результатов
диссертационной работы Вавилова В.Е
Приложение 4. Акт внедрения результатов
исследовательской работы Вавилова В.Е
Приложение 5. Акт внедрения результатов докторской
диссертационной работы Вавилова В.Е. при модернизации установки для
испытания на центробежные (линейные) перегрузки (центрифуга) ИУ-126342
Приложение 6. Акт экспериментальных исследований макета перспективного
высокооборотного (12 000 об/мин) интеллектуального стартер-генератора343
Приложение 7. Протокол испытаний интеллектуального стартер-генератора,
согласно чертежу № 1207.16.1.02.0000 СБ345
Приложение 8. Протокол № ЦП/ 143-П-1116 исследовательских
испытаний макетного образца ПМГ354
Приложение 9. Акт № 42/17-комп.2 от 22.12.17 по результатам испытаний макета
управляемого вентильного электропривода ЭТН-91В в составе насоса ЭЦН-91С
Приложение 10. Протокол экспериментальных исследований макета
интеллектуального стартер-генератора в стартерном режиме
Приложение 11. Протокол испытания трансформатора ТрТСП-10,5-115,
ТРТСПА-10,5-115 с выпрямителем на АО «УАПО»

Приложение 12. Испытания магнитоэлектрического генератора
ГМГ-30/60НЖУ 1205-651119.0000
Приложение 13. Протокол проверки генератора МЭГ-150С
Приложение 14. Акт внедрения результатов
диссертационной работы Вавилова В.Е
Приложение 15. Акт внедрения результатов
диссертационной работы Вавилова В.Е
Приложение 16. Акт внедрения результатов
диссертационной работы Вавилова В.Е
Приложение 17. Протокол испытаний высокооборотного СГ на частотах
до 60000 об/мин
Приложение 18. Результаты экспериментальных исследований высокооборотного
электрогенератора
Приложение 19. Методика расчета надежности создаваемых ЭМПЭ
Приложение 20. Акт внедрения результатов
диссертационной работы Вавилова В.Е

введение

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, решение 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. Согласно ГОСТ Р 54073-2010, СГЭ – это совокупность источников или преобразователей электроэнергии (генераторов, преобразовательных установок рода тока и величины напряжения, аккумуляторов), устройств стабилизации их напряжений и частот, устройств параллельной работы, защиты, управления и контроля, которые обеспечивают производство электроэнергии и поддержание ее характеристик в заданных пределах в точках регулирования при всех режимах работы системы.

В общем виде СГЭ ЛА является самодостаточным, изолированным электротехническим комплексом, который состоит из электромеханического преобразователя энергии (ЭМПЭ), аккумуляторной батареи (АКБ), системы управления (СУ) СГЭ и регулятора напряжения (РН), элементов для преобразования электроэнергии (трансформаторов, статических преобразователей и т. Д.), измерительной системы (ИС) СГЭ и системы обеспечения функционирования СГЭ. СГЭ ЛА может иметь различное агрегатное состояние в зависимости от типа ЛА и его назначения. В диссертации рассматриваются СГЭ ЛА не только для пассажирских, но и для короткоресурсных ЛА, в которых в основном используются высокооборотные ЭМПЭ.

Из-за высокой конкуренции между авиастроительными корпорациями одними из основных критериев при создании СГЭ ЛА являются сроки его реализации и материальные затраты, которые необходимо вложить в разработку того или иного СГЭ ЛА, т.к. именно эти критерии во многом обеспечивают 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 позволяющие подходы, выполнение взаимосвязанных тепловых, электромагнитных и механических расчетов с использованием многодисциплинарных обобщенных математических моделей. При этом данные подходы должны быть аналитическими, т.к. именно аналитические обеспечивают минимальное расчетное метолы 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 высокомощных 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, свойств материалов и энергетических характеристик 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.

Существующая теоретическая база с эмпирическими рекомендациями, полученными на основе исследований традиционных ЭМПЭ, не позволяет эффективное 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. 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.

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.).

Необходимо отметить, что в работе рассматриваются СГЭ ЛА на основе ЭМПЭ с ВПМ с частотой вращения 12 000–24 000 об/мин, предназначенные для пассажирских или грузовых ЛА и СГЭ ЛА и с частотой вращения 30 000– 120 000 об/мин, предназначенные для короткоресурсных ЛА.

разработанности Степень 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. Ю. Β. Зубкова, Б. С. Зечихина, М. Ю. Румянцева, Макаричева, Ф. Р. Исмагилова, И. Х. Хайруллина, A. M. Сугробова, К. Л. Ковалева, В. Т. Пенкина, С. А. Харитонова, 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, K. 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. Халютина, 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. Сарапулова, 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 недостаточно развиты подходы, позволяющие многодисциплинарное 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. Неосвещенными 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 высокомощных 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 многодисциплинарных подходов анализу процессов В перспективных СГЭ И его агрегатах, учете К взаимозависимостей магнитных, тепловых полей и механических процессов в преобразователях СГЭ ЛА, энерговырабатывающих 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 многодисциплинарного 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, трансформаторновыпрямительных 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.

Теоретическая и 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.

На основе полученных в работе научно-технических результатов созданы:

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

15

– 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 «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 (договор АП-ЭМ-09-14-ХГ между ФГБОУ ВПО «УГАТУ» и ОАО «УАПО» и договор между ОАО «УАПО» и ОАО «УАП «Гидравлика», № 89-200-13/2). 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 им. 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 создание 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.

работа Диссертационная выполнена В соответствии С тематикой заказа государственного федеральных органов исполнительной власти: Минобороны России (проект 8.1277.2017/4.6 «Исследования, разработка и преобразователей внедрение перспективных электромеханических ДЛЯ автономных объектов с гибридной силовой установкой», проект 8.287.2014/К «Исследования и разработка высокоэффективного энергетического комплекса для энерговооруженности И энергоэффективности повышения космических аппаратов»); Российского научного фонда (проект 17-79-20027 «Обобщенная теория основополагающих физических процессов в высокотемпературных электромеханических преобразователях энергии, интегрированных в авиационный газотурбинный двигатель», проект 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 SolidWorks для создания твердотельных трехмерных моделей, имитационное моделирование осуществлялось на ПК в среде Matlab Simulink, обработка экспериментальных данных и данных компьютерного моделирования – пакет SplineTool. Также для анализа тепловых процессов MotorCad. При использовался 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, обобщённую 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 многодисциплинарное 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. Исследования 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. Исследования 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

компьютерным моделированием, подтверждаемых результатами методов, 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 конференция научно-техническая международная «Перспективы развития электроэнергетики И оборудования. высоковольтного электротехнического 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 135 научных работ, в том числе 4 монографии, 20 работ в журналах, входящих в перечень ВАК РФ, 8 работ, индексируемых в БД Web of Science, 38 работ, индексируемых в БД Scopus, в том числе 7 работ в изданиях с рейтингом Q1, 13 работ, опубликовано автором единолично, без соавторов. По результатам диссертационной работы получено 15 свидетельств о государственной регистрации программы для ЭВМ, 46 патентов РФ на изобретение, 12 патентов РФ на полезную модель, в том числе 2 патента и 1 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 [1, 5-6, 10, 17-18, 23, 32, 42, 50-51, 116, 129] выполнены автором единолично. В работах [4, 8, 15, 24, 28, 34, 35, 37, 39, 43, 44, 51, 53, 56, 58, 77] соискателем разработаны предлагаемые математические модели, выполнена постановка научной проблемы, разработаны методы и предложены новые конструктивные решения.

ГЛАВА 1 СИСТЕМЫ ГЕНЕРИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ СОВРЕМЕННЫХ И ПЕРСПЕКТИВНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ. ПРОБЛЕМЫ СОЗДАНИЯ И ПОСТАНОВКА НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

Топливная эффективность, аэродинамические, экономические И экологические преимущества, маневренность и функциональные возможности, а также задачи увеличения полезной нагрузки перспективных космических и воздушных летательных аппаратов (ЛА) во многом определяются эффективностью системы электроснабжения (СЭС) ЛА. Это подтвердилось при эксплуатации новейших зарубежных воздушных летательных аппаратов (Boeing 787. AirbusA-380, F-35) и космических аппаратов (NASA Next-Generation Launch Technology (NGLT) Program), а также при создании перспективных отечественных ЛА, таких как широкофюзеляжный дальнемагистральный самолет (ШФДМС) с двигателем ПД-35, Су-57, космических буксиров нового поколения и т.д.

При этом помимо традиционных требований по минимизации массогабаритных показателей СГЭ ЛА, авиастроительными корпорациями в последнее время выдвигаются особые требования по минимизации временных и материальных затрат на проектирование, разработку и внедрение новых СГЭ ЛА. Данные требования обусловлены условиями жесткой рыночной конкуренции и необходимостью создания новых ЛА в кратчайшие сроки.

В работах А. И. Бертинова, Д. Э. Брускина, В. В. Кушнерева, Б. Н. Калугина, В. С. Кулебакина, В. Т. Морозовского, В. Н. Сучкова, Е. В. Волокитиной, С. А. Грузкова, И. А. Лазарева, М. И. Комисара, Б. С. Зечихина, В. А. Балагурова, Ф. Ф. Галтеева, А. Н. Ледовского, Д. А. Бута, А. В. Левина, А. М. Сугробова, W. J. Clardy, W. L. Berry, J. P. DallasB. Adkins, W. Philipp, А. Hossle и др. [1–18] приведены фундаментальные основы проектирования СЭС ЛА, рассмотрено решение оптимизационных задач для выбора оптимального уровня напряжения, рода тока и частоты СЭС ЛА, описаны и исследованы различные типы ЭМПЭ, применяемые в СЭС ЛА.

Расширение функциональной нагрузки на летательные аппараты при одновременном ужесточении норм ICAO по экологическим выбросам ставит задачи развития этих работ в части исследования и разработки СЭС ЛА с

установленной мощностью, превосходящей в разы используемую в ЛА ранее. При этом необходимо учитывать, что создание подобных высокомощных СГЭ ЛА необходимо выполнять в кратчайшие сроки при минимальных материальных затратах.

Важно отметить, что зарубежные авиастроительные концерны, такие как Boeing, RollsRoyce, Airbus, Lockheed Martin [19–23], опережают российские предприятия в части создания высокомощных СЭС ЛА и систем генерирования электроэнергии (СГЭ) ЛА. Рисунок 1.1 иллюстрирует уровень требуемой мощности современных ЛА. Одной из задач данной работы является создание научного задела, способного сократить отставание отечественной промышленности в данной области.

Основным элементом СЭС ЛА, который обеспечивает установленную мощность и эффективность ЛА, является СГЭ.



Рисунок 1.1 – Уровень установленной мощности отечественных и зарубежных ЛА [19–23]

Поэтому задачи создания высокоэффективных СГЭ ЛА, а также их компонентов, обладающих минимальной массой при максимальной надежности и функциональности, являются одними из первоочередных при создании новых ЛА и модернизации существующих.

Согласно определению, данному в ГОСТ Р 54073-2017, СГЭ является типичным агрегатным электротехническим комплексом, эффективность которого определяется эффективностью агрегатов, входящих в него [24].

В общем виде, исходя из анализа работ [25–33], а также из практического опыта разработки, СГЭ ЛА может быть представлен в виде обобщенной структурной схемы, приведенной на рисунке 1.2. Согласно данной схеме, СГЭ ЛА является самодостаточным изолированным электротехническим комплексом, который состоит из следующих агрегатов и систем:

– электромеханического преобразователя энергии (ЭМПЭ), который выполняет функции электрозапуска первичного источника энергии на борту ЛА (газовой турбины, авиационного двигателя или двигателя внутреннего сгорания) и является основным источником электроэнергии на борту ЛА. Для повышения энерговооруженности ЛА 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, диагностику 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.);

– измерительных систем (ИС) СГЭ, которые выполняют функцию измерения токов, напряжения, температур, вибраций и других параметров. Тенденцией развития данных систем является возможность работы по неизмеряемым параметрам и встроенным математическим моделям;

– 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 данной системы может значительно видоизменяться в зависимости от области применения АО и условий его эксплуатации.

25



Рисунок 1.2 – Обобщенная структурная схема СГЭ

Основной акцент в настоящей работе делается на исследование, развитие теории и создание принципиально новых отдельных агрегатов (ЭМПЭ нового поколения, трансформаторов, систем магнитного подвеса, электродвигателей), входящих в СГЭ, а также исследование их совместной работы в составе СГЭ, синтез алгоритмов управления и их совместная оптимизация в составе СГЭ для минимизации времени и материальных ресурсов, затрачиваемых на создание СГЭ ЛА.

Важно отметить, что в отличие от работ, посвященных исследованию СЭС ЛА, при исследованиях СГЭ ЛА необходимо учитывать, что на борту может иметься несколько СГЭ, каждый из которых имеет свои параметры и агрегатное строение, при этом агрегаты внутри СГЭ могут иметь частоту и напряжение, отличное от уровня, указанного в ГОСТ Р 54073-2017, но на выходе СГЭ параметры электроэнергии должны соответствовать ГОСТ Р 54073-2017. Это обусловливает многовариантность выбора агрегатного состава СГЭ и позволяет использовать внутри СГЭ высокочастотные агрегаты для минимизации массы, в том числе ЭМПЭ с частотой напряжения 2000 Гц и более, трансформаторы с частотой напряжения 2000 Гц и более, высокочастотные статические преобразователи и т.д. При этом на выходе из СГЭ частота снижается до необходимого уровня с помощью инвертора или выпрямляется, в зависимости от параметров СЭС ЛА.

1.1 Теоретические аспекты и анализ работ и разработок в области перспективных авиационных СГЭ. Классификация аэрокосмических СГЭ

Для развития и обобщения теории СГЭ ЛА представляется целесообразным разработать их классификацию. СГЭ ЛА можно классифицировать по нескольким признакам, рисунок 1.3:

– по частоте вращения первичного источника энергии. В этом случае можно выделить СГЭ ЛА с ЭМПЭ постоянной и переменной частотой вращения ротора. К СГЭ ЛА с постоянной частотой вращения ротора относятся СГЭ, в которых ЭМПЭ соединен с первичным источником энергии через привод постоянных оборотов (например, отечественные приводы постоянных оборотов разработки ОКБ «Кристалл» типа ПГЛ, ДПГЛ или приводы разработки АК «Рубин» типа ГП-27 и модификации). Также к данному типу СГЭ относятся СГЭ с приводом от вспомогательной силовой установки (ВСУ). В СГЭ с переменной частотой вращения ЭМПЭ соединяется с источником первичной энергии через коробку агрегатов или может быть интегрирован на вал силового агрегата, например, на вал высокого или низкого давления авиационного двигателя. При этом частота вращения ротора ЭМПЭ СГЭ, а следовательно, и частота напряжения изменяется в широком диапазоне входных параметров.



Рисунок 1.3 – Классификация СГЭ ЛА

– по назначению СГЭ может быть основным, резервным (вспомогательным), специальным и аварийным. К основным относятся СГЭ, которые эксплуатируются во время всего полета и получают энергию от основных авиационных двигателей; к резервным СГЭ относятся СГЭ с ВСУ. При этом важно отметить, что на ряде ЛА СГЭ ВСУ также может являться основным. К аварийным относятся СГЭ, в которых первичная энергия обеспечивается, например, от ветроколеса. Специальные СГЭ предназначены для обеспечения электроэнергии какого-либо одного потребителя и их приводом могут являться как традиционные первичные источники энергии ЛА, так и различного рода кинетические накопители;

– по уровню напряжения на выходе из СГЭ – уровень напряжения и частота, а также род тока на выходе из СГЭ должен соответствовать ГОСТ Р 54073-2017, при этом внутри элементов СГЭ частота, уровень напряжения и род тока не регламентируются. ГОСТ выделяет следующие стандартизированные уровни напряжения и рода тока:

• переменного трехфазного тока номинальным напряжением 115/200 В постоянной номинальной частоты 400 Гц;

• переменного трехфазного тока номинальным напряжением 230/400 В постоянной номинальной частоты 400 Гц;

• переменного трехфазного тока номинальным напряжением 115/200 В переменной частоты 360-800 Гц:

• переменного трехфазного тока номинальным напряжением 230/400 В переменной частоты 360-800 Гц;

• постоянного тока номинальным напряжением 27 В;

• постоянного тока номинальным напряжением 270 В.

В данную классификацию не входят СГЭ ЛА с гибридной силовой установкой. Так как в них основная мощность СГЭ расходуется на электропитание электродвигателя, который приводит во вращение винты ЛА, и поэтому в данном типе ЛА напряжение и род тока выбирается исходя из параметров электродвигателя. В большинстве случаев в ЛА с гибридной силовой установкой используется напряжение 400–800 В постоянного тока.

На отечественных ЛА используются СГЭ переменного трехфазного тока номинальным напряжением 115/200 В постоянной номинальной частоты 400 Гц,

переменного трехфазного тока номинальным напряжением 115/200 В переменной частоты 360–800 Гц; постоянного тока номинальным напряжением 27 В. Прежде всего это обусловлено тем, что мощность СГЭ, которая используется на отечественных ЛА, не превышает 120 кВт на одну систему генерирования.

При этом зарубежные ЛА, в которых мощность СГЭ составляет 250 кВт, для снижения массы проводов СЭС используют более высокий уровень напряжения – 230/400 В. На рисунке 1.4 приведена СЭС Boeing 787, видно, что самолет имеет 7 СГЭ, выполненных на напряжение 230/400 В. При этом для питания электропривода насосов используется постоянное напряжение 270 В (происходит понижение напряжения и выпрямление) [34].



Рисунок 1.4 – СЭС Boeing 787



Аналогичные подходы используются и на Airbus A380, рисунок 1.5. На данном борту максимальная мощность одной СГЭ составляет 160 кВт [35], полная установленная мощность на борту ЛА составляет 880 кВт. При этом из-за пониженной мощности СГЭ выполнена на напряжение 115/200 В переменного тока плавающей частоты. Данный борт имеет также 7 СГЭ.

Интерес представляет СЭС перспективных зарубежных военных ЛА, таких как F-22 и F-35. В отличие от гражданских ЛА, их СЭС и СГЭ построены с использованием напряжения постоянного тока 270 В. На рисунке 1.6 приведена СЭС F-22. Отличием СЭС F-22 и F-35 является установленная мощность на борту: для F-22 всего 140 кВт, а для F-35 – порядка 700 кВт, причем большая часть электроэнергии расходуется на технологию обеспечения невидимости. На F-22 используются индукторные генераторы. Это обусловлено рядом факторов: при начале реализации программы F-22 (1986–1990 гг.) технологии создания ЭМПЭ с удельными характеристиками 0,2–0,25 кг/кВт (как далее будет показано, такие показатели достигаются в основном только при использовании ЭМПЭ с высококоэрцитивными постоянными магнитами (ВПМ)) находились в начальном состоянии, что не позволяло использовать их в полной мере в серийных ЛА, отсутствовали технологии создания отказоустойчивых ЭМПЭ с ВПМ. Поэтому

разработчикам F-22 при реализации первых ЛА из-за пониженной мощности СЭС и СГЭ пришлось отказаться от радиолокационной станции бокового обзора.



Рисунок 1.6 – СЭС F-22

Развитие в 2000-х гг. технологий создания отказоустойчивых ЭМПЭ с ВПМ, развитие силовой электроники позволило повысить мощность нового истребителя F-35 практически в 5 раз. При этом повышение мощности на F-35 обеспечили отказоустойчивые ЭМПЭ с ВПМ. Мощность магистральных генераторов F-35 в открытых источниках раскрывается, не но известна мошность И тип высокооборотного ЭМПЭ BΠM. с установленного в комплексной турбокомпрессорной установке (КТУ) F-35: 140 кВт при частоте вращения 62 000 об/мин, на выходе СГЭ обеспечивает 270 В постоянного тока. Данный агрегат необходим для аварийного электроснабжения ЛА в случае отказа основных авиационных двигателей. Он выполняет функции ВСУ, аварийной силовой установки и ТХА и, в отличие от ВСУ, способен запускаться на высотах, превышающих 15-20 км. Необходимо отметить, что применение КТУ в F-35 позволило снизить массу ЛА на 400 кг. Генератор КТУ F-35 и агрегат, в котором он установлен, приведены на рисунке 1.7.

Необходимо отметить, что в РФ также активно ведуться разработки ЭМПЭ с ВПМ с частотой вращения ротора 24000 об/мин–96000 об/мин при мощностях от 5 кВт до 300 кВт компанией «Эрга+» (ВЭЛМА) [36]. Сравнительный анализ разработок данный компании и разработок автора приведен далее в главах работы.



Рисунок 1.7 – Электрогенератор F-35

Таким образом, анализ СЭС и СГЭ зарубежных ЛА позволяет сделать вывод, что на перспективных гражданских ЛА с мощностью СГЭ не более 150–160 кВт используется напряжение 115/200 В плавающей частоты, при большей мощности используется напряжение 230/400 В плавающей частоты. На военных ЛА используются каналы постоянного тока 270 В, а также рассматривается применение СГЭ с выходным напряжением 540 В. Использование СЭС повышенного напряжения постоянного тока на борту гражданских ЛА ограничено требованиями безопасности и пожаробезопасности;

– по месту установки ЭМПЭ СГЭ. В данном случае можно выделить интегрированные СГЭ, СГЭ, в которых ЭМПЭ установлены без использования редуктора в ВСУ или на валах авиационного двигателя, и неинтегрированные СГЭ, в них ЭМПЭ установлены на коробке приводов. Особенности реализации подобных ЭМПЭ и СГЭ на их основе рассмотрены далее;

– по способу резервирования: СГЭ может иметь резервную СГЭ или быть отказоустойчивой. При наличии резервной СГЭ в случае отказа элементов СГЭ на резервный канал должны быть переключены все ответственные потребители. При этом ЭМПЭ СГЭ должен выполняться с перегрузочной способностью 150% в течение 5 мин и 200% в течение 5 с. Отказоустойчивая СГЭ не имеет внешнего резервирования, весь резерв обеспечивается внутри СГЭ с помощью специальных технических и алгоритмических решений;

– по обратимости СГЭ или по направленности энергии: СГЭ может быть обратимой (двунаправленной), то есть энергия в СГЭ направляется от силовой установки к СГЭ и обратно, следовательно, СГЭ позволяет осуществлять электрозапуск авиационного двигателя, как например в Boeing 787, или быть

необратимой (однонаправленной), то есть запуск авиационного двигателя осуществляется пневматической системой или с помощью пирозапуска.

Далее представлен анализ работ отечественных и зарубежных авторов в области авиационных СЭС, СГЭ и ЭМПЭ.

Исследованию и развитию авиационных СЭС, СГЭ и ЭМПЭ посвящены множество работ отечественных и зарубежных авторов. Многие из этих работ [5– 9, 35–37] носят фундаментальный характер и являются основополагающими для авиационных ЭМПЭ, СЭС и СГЭ, но на современном этапе уже не могут в полной мере обеспечить теоретическую основу при разработке авиационных СЭС и СГЭ в связи с изменениями тактико-технических характеристик современных ЛА, требований к скоростям их полета и их энерговооруженности. Важно отметить, что практически во всех работах понятие авиационные СЭС и ЭМПЭ рассматриваются неразрывно друг от друга, так как требования к авиационным ЭМПЭ полностью определяются авиационной СЭС.

Одной из основополагающих работ в области СЭС ЛА и СГЭ ЛА является работа В. Т. Морозовского [6]. В данной работе было сформулировано понятие обобщенной структуры СЭС ЛА, под которой понимается некоторая установленная возможность структур систем электроснабжения ЛА, из которых может быть определена наиболее эффективная топология исходя из критериев предпочтения. Для решения данной проблемы в [7] было предложено использование параметрической матрицы, которая формализует некоторые структуры СГЭ:

$$\mathcal{\mathcal{F}} = \begin{vmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & P_{14} & P_{15} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} & P_{24} & P_{25} \\ 0 & 0 & P_{33} & P_{34} & P_{35} \end{vmatrix},$$
(1.1)

где P_{jj} – энерговырабатывающие элементы; P_{ij} – вторичные энергетические узлы.

Полученная матрица (1.1) является одним из эффективных способов синтеза СГЭ ЛА, но при этом она не позволяет в полной мере учитывать использование СГЭ на основе ЭМПЭ с ВПМ и оценивать отказоустойчивость СГЭ, поэтому нуждается в расширении. Разница при использовании ЭМПЭ с ВПМ будет заключаться в новых типах преобразований энергии и новых структурных топологиях СГЭ ЛА.

Также в [6] предложены критерии эффективности СЭС и СГЭ, математически описана полетная масса, которая принимается в виде:

$$M_{\rm пол} = M_0 + k_1 P_{\rm ycr} + k_2 P_{\rm пот}, \qquad (1.2)$$

где $M_{\text{пол}}$ – полетная масса; M_0 , k_1 – функции надежности элементов СГЭ; $P_{\text{уст}}$ – установленная мощность СГЭ; $P_{\text{пот}}$ – потребляемая мощность СГЭ.

Необходимо отметить, что данное выражение лишь косвенно учитывает массу хладагента, необходимого для охлаждения СГЭ, а также не учитывает возможности внутреннего резервирования агрегатов СГЭ, что не позволяет оценивать эффективность современных СГЭ ЛА в полной мере. Для эффективной оценки данное выражение необходимо дополнить характеристиками хладагента, его требуемой массой, а для этого необходимы математические модели, способные учитывать взаимозависимости электромагнитных и тепловых процессов, механических характеристик и т.д.

Подходы, разработанные в [6], являются фундаментальными и основополагающими, но при этом развитие агрегатов СЭС и СГЭ ЛА, появление новых структур (например интегрированных и отказоустойчивых СГЭ), а также развитие методов оптимизации в части эвристических алгоритмов требует расширения и обобщения положений, изложенных в [6]. Кроме того, основы теории, предложенные в [6], в большей степени предназначены для ЭМПЭ с электромагнитным возбуждением. ЭМПЭ с ВПМ в данной работе практически не рассматриваются.

Задачи синтеза СЭС ЛА, а также их оптимизации с выбором критериев и методов по уровню напряжения, частоте и типу тока рассматриваются в работе [7]. Исследуются оптимальные структуры СЭС и СГЭ, приведены решения задач по выбору оптимальной структуры СГЭ от привода постоянных оборотов в двух вариациях с пневматическим приводом и гидравлическим приводом с учетом аэродинамики мотогондолы авиационного двигателя. Показано, что параметры СЭС влияют практически на все летно-технические характеристики ЛА.

В [7] введено понятие множества функциональных операций $\Phi \in \{\varphi_i\}$, при которых возможно определение оптимальной топологии СЭС. Необходимо отметить, что множество функциональных операций СЭС ЛА рассматривается как

сумма функциональных операций СГЭ и системы распределения. Множество возможных вариантов построения СЭС в [7] определяется выражением

$$X_a^{(i)} = \Phi_a^{(i)} \times X_{\varphi_i} \times X_{\varphi_i}^{k_\nu} \times Z_{\varphi_i}^k, \left(\varphi_i \in \Phi_a^{(i)}\right), \tag{1.3}$$

где $X_a^{(i)}$ – множество технических устройств и агрегатов, обеспечивающих *k*-й вариант исполнения φ функциональной операции при *v* сочетаниях детерминированных параметрах этих устройств; *Z* – множество допустимых сочетаний детерминированных параметров этих устройств.

Для оптимизации и синтеза СЭС ЛА в [7] используется обобщенный критерий эффективности СЭС ЛА, при этом остальные критерии используются как набор ограничений. Эффективность СЭС ЛА описывается выражением:

$$K_{\phi,\mathfrak{H}}^{(i)} = f_{\phi,\mathfrak{H}}\left[n_1, K_{q1}(p_{\mathfrak{H}r}, K_{\mathfrak{H}\mathfrak{H}}, Y_{p1}, t); \mathbb{R}; n_N, K_{qN}(p_{\mathfrak{H}r}, K_{\mathfrak{H}\mathfrak{H}}, Y_{pN}, t)\right].$$

$$i = 0, 1, 2; \quad r = 1, 2, \mathbb{R}, m.$$
(1.4)

Согласно данному выражению, эффективность СЭС ЛА и СГЭ ЛА определяется функцией показателей кратности резервирования n_{pk} элементов x_k системы, принадлежащей к выбранной совокупности этих элементов.

Данный обобщенный критерий является эффективным не только для СЭС ЛА, но и для оптимизации СГЭ.

Аналогичные подходы представлены в работах [37–45]. В целом задача оптимизации параметров и характеристик СЭС является одной из основных, которая освещается в литературе. Попытки ее решения различными методами приведены в работах [46–54]. Необходимо отметить, что практически во всех работах отмечается, что наиболее эффективным является использование СЭС ЛА постоянного тока 270 или 540 В, а также СЭС повышенного напряжения 230/400 В переменной частоты. Также важно отметить, что большинство данных работ посвящено задачам внешнего синтеза СГЭ и СЭС по терминологии И. А. Лазарева. В рамках настоящей диссертации исследуются задачи внутреннего синтеза, оптимизации и многодисциплинарного проектирования СГЭ ЛА на основе ЭМПЭ с ВПМ при условиях неопределенностей, вносимых современным уровнем развития СЭС ЛА.

Интересным являются исследования, представленные в диссертации А. А. Галимовой [55], в которой анализируются и выбираются оптимальные

варианты для агрегатных СЭС космических летательных аппаратов. В данной работе отмечается, что одной из перспектив развития аэрокосмических СЭС является использование в них СГЭ с высокооборотными ЭМПЭ (до 60 000 об/мин). В [55] в качестве критерия синтеза используется минимальная полетная масса, при этом качество электроэнергии на борту ЛА является ограничением. Там же приведена обобщенная математическая модель СЭС космических ЛА:

$$\sum_{i=1}^{n} \frac{2721 \cdot 10^{3} S_{i} k_{i}}{A_{i} B_{i} f} + \sum_{j=1}^{m} \left[\frac{240 S_{j}}{f} + N M_{s} + \left[\frac{14, 7 P_{dj}}{f} \right]^{3/4} \right] K_{kj} + \sum_{k=1}^{m} \left[\frac{240 S_{k}}{f} + N M_{s} + \left[\frac{14, 7 P_{dk}}{f} \right]^{3/4} \right] K_{kk} + \sum_{i=1}^{n} G_{i} L_{i} \rightarrow \min$$

$$(1.5)$$

В выражении (1.5) A_i, B_i, f – электромагнитные нагрузки ЭМПЭ СГЭ и частота; K_{kj} – конструктивные коэффициенты. В данной математической модели основная оптимизация СЭС осуществляется по частоте.

В работах [53, 54], а также в рамках НИР «Исследование динамических режимов, способов защиты от перегрузок, оптимизация массогабаритных показателей высокоскоростного магнитоэлектрического генератора и силового электромеханического преобразователя», шифр «ИМА-Интеграция – УГАТУ-ЭМ 2», выполненной при участии автора, используется более простой подход к оптимизации СЭС ЛА, который основан на представлении основных элементов СЭС как функции напряжения. В этом случае математическая модель СЭС и СГЭ не учитывает структуры СЭС, в отличие от рассмотренных выше работ, и позволяет реализовать только упрощенные инженерные расчеты.

Оптимизационная модель [53, 54]:

$$M_{\mathcal{C}} = n_{\mathcal{C}}(M_0 + k_1 U) + n_{\mathcal{D}}(M_0 + k_2 U^{-0.5}) + n_n(M_0 + k_3 U^{-0.5}) + n_{a\kappa\delta}(M_0 + k_4 U) + M_0 + k_5 U^{-2} + k_6 U^{-1}, (1.6)$$

где $n_{_{3n}}$ – количество электроприводов; $n_{_n}$ – количество преобразователей; $n_{_{a\kappa\delta}}$ – количество аккумуляторных батарей; $n_{_2}$ – количество генераторов; $M_{_{3C}}$ – масса элементов системы электроснабжения.

Данная модель может быть представлена в виде модели с учетом эксплуатационных издержек:
$$M_{C \to C} = n_{\varepsilon} (M_0 + k_1 U) + n_{y_0} (M_0 + k_2 U^{-0.5}) + n_n (M_0 + k_3 U^{-0.5}) + n_{z_0} (M_0 + k_4 U) + M_0 + k_5 U^{-2} + k_6 U^{-1} + (q_M P t + q_B G_B t + M_{ox} + M_T) k_n,$$
(1.7)

где $M_M = q_M P t$ – масса топлива, затрачиваемая для создания механической энергии на валу генератора; q_M – часовой расход топлива, затрачиваемый на единицу механической мощности, отбираемой с вала авиационного двигателя; P – мощность генератора, кВт; $M_B = q_B G_B t$ – масса топлива, затрачиваемого на создание компрессором двигателя энергии сжатого воздуха на охлаждение; q_B – часовой расход топлива, затрачиваемый на единицу расхода воздуха; G_B – расход воздуха для функционирования оборудования мощностью P; t – время полета, ч.

В целом необходимо отметить, что для большинства работ, посвященных синтезу, разработке и проектированию СГЭ и СЭС, характерен общий подход: математическая модель системы является набором математических моделей агрегатов, входящих в нее, при этом сами агрегаты в основном являются неоптимизированными или оптимизированными отдельно, не в составе СГЭ. Причем исследований авиационных СГЭ с электромагнитным возбуждением; исследований СГЭ на основе ЭМПЭ с ВПМ в литературе практически не представлено. Поэтому развитие и обобщение теории авиационных СГЭ на основе ЭМПЭ с ВПМ необходимо направить именно на развитие моделей агрегатов, которые входят в общую модель СГЭ. Уточнения должны быть направлены на учет многодисциплинарности процессов в агрегатах СГЭ, создание моделей новых агрегатов с недостижимыми ранее характеристиками. Кроме того, как было показано выше, необходимо расширить структурную модель СГЭ перспективных ЛА на основе ЭМПЭ с ВПМ.

В [56] выполнен анализ зарубежных СЭС ЛА на период до 2017 г. При этом отмечается, что наиболее эффективным будет развитие интеллектуальных СЭС ЛА с повышенным напряжением 540 В постоянного тока, в основе которых будут лежать ЭМПЭ с высококоэрцитивными постоянными магнитами. Аналогичные выводы приведены в [57], а также уделяется внимание созданию отказоустойчивых ЭМПЭ для перспективных СГЭ. Отказоустойчивые СГЭ могут значительно упростить эксплуатацию ЛА и уменьшить ответвления провода СЭС, снизить количество коммутирующей аппаратуры, поэтому очевидно, что перспективные

СГЭ должны быть именно отказоустойчивыми. Под отказоустойчивыми понимается возможность сохранения работоспособности СГЭ при одном любом отказе внутри СГЭ.

Развитие интеллектуальных СЭС ЛА рассматривается в работах [58–60]. В задачи интеллектуальной СЭС входит автоматическая оптимизация потока энергии на борту ЛА и ее перераспределение. Необходимо отметить, что создание интеллектуальных СЭС также накладывает новые ограничения на СГЭ ЛА в части быстродействия, эксплуатации по остаточному ресурсу и новым алгоритмам взаимодействия. Данные тенденции накладывают необходимость введения адаптивности в современные СГЭ ЛА. Поэтому данные тенденции необходимо учитывать при создании СГЭ нового поколения для перспективных ЛА.

В работах [61, 62] представлены исследования СЭС гиперзвуковых ЛА. Из анализа данных работ видно, что СЭС данных ЛА отличается от традиционных только в части внешних воздействующих факторов. То есть результаты настоящего исследования могут быть использованы и при создании гиперзвуковых ЛА. При этом необходимо отметить, что в гиперзвуковых ЛА в качестве энерговырабатывающего элемента должны применяться ЭМПЭ без подвижных частей (магнитогидродинамические или термоэлектрические преобразователи).

В работах О. С. Гуревича (ФГУП «ЦИАМ») [63–65] изложены основные задачи к созданию интеллектуальных интегрированных СЭС ЛА в рамках концепции более электрического двигателя и показано, что эффективным является использование интегрированных, отказоустойчивых СГЭ для перспективных ЛА.

Анализ работ в области авиационных СЭС позволяет сделать вывод о том, СЭС ЛА что современные подразумевают повышенный уровень отказоустойчивости и интеллектуальности. При этом их мощность должна составлять 200–300 кВт на одну СГЭ, масса должна быть минимальной, а уровень напряжения 270–540 В постоянного тока либо 230/400 В переменного тока. Также из анализа работ видно, что отдельные исследования СГЭ, являющейся основным элементом СЭС, в литературе освещены эпизодически и не соответствуют современному уровню развития СЭС и СГЭ ЛА; неосвещенными также остаются вопросы теории СГЭ на основе ЭМПЭ с ВПМ. В основном в литературе решаются задачи либо оптимизации самой СЭС ЛА и выбора топологии ее построения, либо задачи выбора, проектирования и оптимизации ЭМПЭ СГЭ ЛА; также в ряде работ

приведены обобщенные графы СГЭ ЛА и структурные модели СГЭ ЛА, но они нуждаются в расширении. Важно отметить, что большинство работ, посвященных СЭС ЛА, рассматривают ограничения внутри СГЭ ЛА в виде ограничений ко всей СЭС, что значительно снижает возможность эффективного создания СГЭ. Кроме того, подходы, представленные в литературе, позволяют создавать высокомощные СГЭ ЛА, но при этом временные и материальные ресурсы для решения данной задачи будут значительными, что обусловлено необходимостью проведения последовательных итерационных расчетов.

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 позволяюшая выполнять процесс многодисциплинарного методика, проектирования СГЭ ЛА на основе ЭМПЭ с ВПМ, отличающаяся от известных тем, что включает в себя одновременное многодисциплинарное проектирование всех компонентов, входящих в СГЭ, и позволяет осуществлять их совместную оптимизацию. Хотя подобная методика позволила бы обеспечить решение задач робастного проектирования СГЭ ЛА.

Кроме того, из приведенного анализа видно, что существующая теория не позволяет обеспечить создание перспективных СГЭ ЛА на основе ЭМПЭ с ВПМ в минимальные сроки при минимальных материальных затратах.

1.2 Электрогенераторы систем генерирования электроэнергии летательных аппаратов. Тенденции развития и требования к ним

Основным агрегатом СГЭ, отвечающим практически за все его характеристики, является генератор или стартер-генератор (СГ). В работе [5] представлена классификация авиационных электрогенераторов (ЭГ) и

авиационных СЭС, рассмотрены основы проектирования авиационных генераторов постоянного тока с щеточно-коллекторным узлом, с постоянными магнитами марок ЮНДК и Альнико, индукторных ЭГ. При этом ввиду создания новых материалов и конструктивных схем ЭГ теоретические положения, приведенные в этой работе, требуют расширения. Расширение и обобщение теории авиационных и общепромышленных ЭГ были сделаны в работах [66–75], но при этом теоретические и практические рекомендации, приведенные в этих работах, на данном этапе развития авиационного энергомашиностроения также являются не полными.

В общем виде авиационные ЭГ разделяются на магистральные, аварийные, резервные и специальные. Магистральные генераторы являются основным источником электроэнергии на борту и используются на протяжении всего полета ЛА. К резервным ЭГ относятся ЭГ, которые установлены в ВСУ, на воздушной турбине, КТУ или ТХА. Они используются при отказе магистральных ЭГ, а также при электрозапуске авиационных двигателей, при движении по аэродрому и при ЛА. агрегат (ВСУ, TXA, стоянках Используемый КТУ) определяется необходимостью применения на определенных высотах; для ВСУ характерна высота не более 12,5–13 км (например, ВСУ RE220(RJ) Honeywell). Для резервного электроснабжения на больших высотах используется либо КТУ, либо ТХА. К аварийным генераторам обычно относятся генераторы, которые устанавливаются на ветротурбине, они используются при полном отказе резервных и магистральных ЭГ. Их мощность обычно не превышает 100 кВт, а частота вращения составляет 8000–12 000 об/мин. Специальные ЭГ необходимы для электроснабжения собственных нужд авиационного двигателя или других установок, которые находятся на борту. Они имеют широкий диапазон мощностей и выполняемых функций (от 1 кВт до 1 МВт).

Магистральные и резервные ЭГ устанавливаются на коробке приводов авиационного двигателя и на редукторе ВСУ или иного агрегата. Основной проблемой повышения мощности перспективных СГЭ является ограничение на единичную мощность ЭГ ЛА. Ограничение на единичную мощность магистральных авиационных ЭГ обусловлено рядом факторов, которые в своем большинстве связаны с местом установки ЭГ и типом используемых ЭГ:

40

– при установке авиационных ЭГ на коробке агрегатов авиационного двигателя максимальные геометрические размеры ЭГ ограничиваются размерами мотогондолы, которую разработчики летательных аппаратов стремятся сделать минимальной для повышения аэродинамической эффективности ЛА;

– частота вращения ротора ЭГ, установленного на коробке агрегатов авиационного двигателя, ограничена частотой вращения вала авиационного двигателя, которая не превышает 12 000–18 000 об/мин. С учетом ограниченности размеров это накладывает значительные ограничения на мощность ЭГ. Частота вращения ЭГ ВСУ ограничивается понижающим редуктором ВСУ, который обычно снижает обороты ЭГ до 12 000–18 000 об/мин;

– типом используемых ЭГ. В качестве серийных авиационных ЭГ в основном используются синхронные генераторы с вращающимися выпрямителями, которые сами имеют ограниченную мощность из-за сложности обеспечения механической прочности их ротора и диодных мостов. Данный тип ЭГ уже практически достиг физических пределов их энергетических характеристик.

Поэтому ряд аэрокосмических корпораций и исследовательских учреждений проводят множество работ по отказу от коробки агрегатов авиационного двигателя и редуктора ВСУ и создание интегрированных СГЭ путем интеграции ЭГ на валы авиационного двигателя и вспомогательной силовой установки [76]. В этом случае повышается топливная эффективность летательного аппарата, появляются возможность увеличения единичной мощности ЭГ за счет повышения частоты вращения ротора (в случае ВСУ), возможности увеличения его габаритных размеров (в случае интеграции на валы основного авиационного двигателя). Вместе с тем появляются и ряд значительных проблем, связанных с ЭГ, которые при подобной интеграции необходимо решить. Возрастают требования К отказоустойчивости авиационных ЭГ. Когда ЭГ устанавливаются на коробке агрегатов, они сочленяются с элементами ЭГ через механический разъединитель. В случае отказа одного ЭГ происходит механическое отключение его от коробки агрегатов, при этом отключаются второстепенные потребители энергии, а первостепенные потребители продолжают питаться от рабочего ЭГ. Когда ЭГ интернирован на вал ВСУ или на вал авиационного двигателя, он является одним целым с силовым агрегатом. При этом любое нарушение работы ЭГ (короткое замыкание, механическое заклинивание узлов или появление дополнительных вибраций) приводит к нарушению безопасности всего полета, то есть при подобной интеграции магистральные и резервные ЭГ становятся элементом, который непосредственно несет прямую ответственность за безопасность всего полета. Поэтому обеспечение отказоустойчивости авиационных ЭГ является одним из основных требований, которые предъявляются к интегрированным СГЭ. При этом необходимо учитывать, что обеспечение отказоустойчивости приводит к увеличению массогабаритных показателей ЭГ и усложнению его конструкции.

При интеграции ЭГ на вал ВСУ или авиационного двигателя значительно увеличивается температура окружающей ЭГ среды. Для ВСУ при интеграции температура окружающей среды достигает 180 °C, а при интеграции на вал авиационного двигателя температура окружающей среды может достигать 300 °С. Подобные увеличения температуры накладывают значительные ограничения на материалы, используемые при создании авиационных ЭГ нового поколения, а также накладывают ограничения на их эффективность, в связи с чем возникают требование максимального снижения потерь для минимизации подогрева самого ЭГ и требования по учету взаимозависимостей тепловых и электромагнитных полей при создании и моделировании авиационных ЭГ нового поколения. В литературе подобные математические модели приведены в виде разрозненного необобщенного И материала. поэтому задача подобных создания многодисциплинарных моделей является одной из основных при создании авиационных ЭМПЭ нового поколения.

Кроме данных требований, к авиационным ЭГ нового поколения предъявляются также традиционные требования, такие как:

– высокая перегрузочная способность, что обусловлено возможными пиковыми нагрузками на систему электроснабжения ЛА, которые возникают при выполнении полетного задания. Обычно авиационный ЭГ должен выдерживать 150% от номинальной мощности в течение 5 мин и 200% номинальной мощности в течение 5 с;

– автономность. Работа магистральных и резервных авиационных ЭГ не должна зависеть от наличия на борту постоянного тока или других источников электрической энергии. Именно исходя из этого требования в качестве авиационных ЭГ используются синхронные генераторы с вращающимися

выпрямителями или ЭГ с постоянными магнитами. Для индукторных ЭГ и асинхронных генераторов требуется отдельная энергия на возбуждение;

– устойчивость к механическим воздействиям. Авиационный двигатель и вспомогательная силовая установка в процессе эксплуатации создают крутильные колебания, широкий спектр вибраций, а кроме того, испытывают значительные перегрузки, которые достигают 10–15g. При проектировании авиационных ЭГ нового поколения необходимо принимать конструктивные и проектные меры для противодействия данным явлениям;

– динамические характеристики ротора ЭГ. При интеграции ЭГ на вал авиационного двигателя или на вал ВСУ, ЭГ не имеет собственных подшипников, подшипниками ЭГ являются подшипники силового агрегата. Роторная динамика ЭГ становится частью роторной динамики силового агрегата. Поэтому отдельный анализ роторный динамики ЭГ без учета роторной динамики вала силового агрегата становится бессмысленным. То есть при проектировании и создании авиационных ЭГ нового поколения их роторная динамика должна рассматриваться совместно с роторной динамикой силового агрегата, в который они интегрированы, и при этом необходимо учитывать отрицательную позиционную жесткость, которая создается силами одностороннего магнитного тяжения ЭГ при наличии незначительного эксцентриситета. В целом исследование влияния эксцентриситета ротора на параметры ЭГ с ВПМ в целом и высокооборотных ЭГ с ВПМ в частности является важной задачей, которой практически не уделяется внимание в научных публикациях. Отказ от редуктора в ВСУ позволяет при замене ее подшипников на магнитные или газовые создавать безмасляные, «сухие» ВСУ. Это обеспечивает минимизацию стоимости обслуживания ВСУ и снижает габаритные размеры обслуживающих ее систем. При этом использование газовых или магнитных подшипников также накладывает ограничения на динамику ротора ЭГ и ее влияние на электрические и электромагнитные характеристики ЭГ. Это ставит задачи создания математических моделей ЭГ с учетом не только взаимозависимостей тепловых и электромагнитных полей, но и с учетом влияния подшипниковых опор и роторной динамики на характеристики ЭГ. Ранее такие задачи при создании электротехнических комплексов не ставились, и их решение отсутствует;

– регулируемость. В процессе полета электрическая нагрузка авиационного
ЭГ изменяется во времени, что приводит к изменению выходного напряжения ЭГ,

а при интегрировании ЭГ в силовой агрегат напряжение изменяется с изменением частоты вращения последнего. При этом, в соответствии со стандартами, напряжение в системе электроснабжения ЛА должно изменяться в пределах, установленных в ГОСТ Р 54073-2017, поэтому авиационные ЭГ должны иметь возможность регулирования выходного напряжения;

– минимальная масса и минимальный объем ЭГ. Требования современной аэрокосмической отрасли, предъявляемые к ЭГ нового поколения: удельные показатели на уровне не менее 5 кВт/кг, а для ряда перспективных проектов выдвигаются требования 10–15 кВт/кг. Эти требования вызваны задачами повышения топливной эффективности и требованиями по увеличению полезной нагрузки ЛА. Требования по минимизации объема вызваны ограниченностью размеров полости, в которой должен располагаться авиационный ЭГ. Анализ возможных способов минимизации массы ЭГ показывает, что наиболее эффективным способом является использование в ЭГ с высококоэрцитивными постоянными магнитами новых материалов, новых конструктивных схем, высокоэффективных систем охлаждения и, как частный случай, повышение частоты вращения ротора ЭГ до 60 000 об/мин и более, в особенности для короткоресурсных объектов.

В работах Е. Ganeva [77, 78] на основе оптимизации по ряду критериев (масса, надежность, тепловыделение), с использованием методов весовых коэффициентов и с учетом приведенных выше требований доказывается, что наиболее оптимальным вариантом являются СГЭ ЛА с использованием в качестве электрогенератора СГЭ ЭГ с ВПМ. Аналогичные выводы приведены в работах NASA, которые описывают создание авиационных ЭГ с ВПМ класса МВт, обладающих плотностью мощности 13 кВт/кг при эффективности более 96% [79], The University of Nottingham, который создал ЭГ с ВПМ с плотностью энергии 16 кВт/кг при частоте вращения ротора 30 000 об/мин [80–82], компании Honeywell при создании ЭГ мощностью 140 кВт и частотой вращения ротора 62 000 об/мин для Lockheed Martin Joint Strike Fighter (JSF) [83], Мюнхенского военного университета [84], В. В. Кушнерева [18], ООО «Эрга+» (ВЭЛМА) [36] и других исследователей [85–90].

Основными преимуществами ЭГ с ВПМ являются:

– минимальная масса (как отмечалось выше, при условиях интенсификации охлаждения и достижения максимальной частоты вращения ротора ЭГ с ВПМ достигается удельная масса в перспективе до 10 кВт/кг, для сравнения: генератор ГТ120НЖЧ12К (наиболее перспективный ЭГ с электромагнитным возбуждением отечественного производства) имеет плотность энергии при интенсивном охлаждении 3,75 кВт/кг [33]. При участии автора были созданы ЭГ с ВПМ с плотностью энергии 5–7 кВт/кг;

– высокая надежность, простота конструкции, по оценке В. В. Кушнерева [18], регулируемый ЭГ с ВПМ, работающий совместно с выпрямителем, имеет интенсивность отказов на уровне 40×10⁶ 1/ч, когда ГТ120НЖЧ12К имеет аналогичный показатель на уровне 60×10⁶ 1/ч;

возможность достижения высоких частот вращения ротора, что _ ИХ обеспечивает возможность прямой интеграции (без редуктора) В Подобный подход вспомогательную силовую установку ЛА. позволяет значительно упростить ВСУ ЛА и уменьшить эксплуатационные затраты не менее чем на 30%;

– простота реализации стартерного пуска авиационного двигателя. Функция электрозапуска авиационного двигателя предусмотрена практически на всех современных зарубежных ЛА (Boeing 787, AirbusA-380, F-35) и перспективных отечественных ЛА.

Использование ЭГ с ВПМ позволяет создавать электрические машины большой единичной мощности. Это особенно необходимо и важно для реализации концепций более электрического самолета и полностью электрифицированного самолета, а также для создания гибридных силовых установок перспективных ЛА (проект Rolls-Royce совместно с компанией YASA; проект «Электролет», ФГУП «ЦИАМ» – при участии автора был разработан ЭГ с ВПМ мощностью 400 кВт). мощность, полученная c серийных авиационных ЭГ с Максимальная электромагнитным возбуждением, для отечественных изделий не превышает 120 кВт, для зарубежных – 250 кВт. Электрогенератор мощностью 250 кВт установлен на Boeing 787. В литературе имеется только одно упоминание о ЭГ с электромагнитным возбуждением попытке создания авиационного мощностью 1 МВт компанией Honeywell [91].

Аналогичная ситуация имеет место с индукторными ЭГ. В целом индукторные ЭГ являются перспективным решением для некоторых типов СГЭ ЛА незначительной мощности, в том числе они используются на F-22, но их массогабаритные показатели и ограничения по достигаемой мощности, а также быстроходности, значительно уступающие ЭГ с ВПМ, ограничивают их применение в перспективных СГЭ ЛА.

В то же время ЭГ с ВПМ мощностью от 300 кВт до 1 МВт и более активно используются в различных отраслях зарубежной промышленности. Так, компанией Calnetix созданы генераторы на постоянных магнитах мощностью от 300 кВт до 1 МВт. Аналогичные разработки ведут компании Siemens AG; Korea Electrotech ResInst; Honeywell INTINC; Nissan Motor; Mitsubishi Electric Corp; Gen Electric; HitachiLTD, Radam, Electrodynamicsinc., Calnetixcorp., Synchrony, Burgi Engineers LLC, Aircraftpartscorp, Goodrich и т.д.

В целом зарубежные компании и научные центры возлагают основные перспективы именно на ЭГ с ВПМ и активно используют их на различных ЛА, в том числе на новейшем истребителе 5 поколения F-35. В отечественных ЛА ЭГ с ВПМ используется на самолете ТУ-204 (генератор ГСА-30 и преобразователь ПЧА), но удельные характеристики данного ЭГ значительно уступают зарубежным аналогам и современным требованиям (при номинальной мощности 15 кВт, перегрузочной – 30, данный ЭГ имеет массу 32,5 кг). Частным случаем авиационных ЭГ с ВПМ, способным значительно повысить их эффективность, являются высокооборотные ЭГ с ВПМ, основным применением которых на ЛА являются ВСУ, ТХА или турбогенераторный источник (ТГИ).

Необходимо отметить, что при использовании высокооборотных ЭГ с ВПМ с частотой вращения ротора 50 000–60 000 об/мин минимальная частота напряжения внутри СГЭ составит не менее 1000 Гц, поэтому исследование применения подобных ЭГ без статического преобразователя для авиационных СГЭ невозможно. Также очевидно, что использование подобных ЭГ приводит к значительному повышению частоты напряжения внутри СГЭ, при этом параметры ГОСТ на выходе из СГЭ будут обеспечиваться статическим преобразователем.

Вместе с тем существует ряд видимых сложностей, которые оппоненты использования ЭГ с ВПМ в СЭС ЛА озвучивают как непреодолимые:

– сложность обеспечения защит ЭГ при аварийных режимах работы (коротком замыкании, перегрузках и т.д.). В целом решение этой проблемы в мировом сообществе найдено: используются высокоиндуктивные электрические машины и ограничение токов короткого замыкания. В последующих главах будут детально рассмотрены пути решения данной проблемы, предложены и исследованы новые технические решения;

– сложность управления и стабилизации выходного напряжения ЭГ с ВПМ в составе СГЭ при изменении нагрузки, обеспечение качества a также ГОСТ Ρ электроэнергии системы генерирования согласно 54073-2017 «Системы электроснабжения самолетов и вертолетов. Общие требования и нормы качества электроэнергии». При полете ЛА в зависимости от режима работы его силовой установки и этапа выполнения полетного задания количество работающих бортовых приемников, а следовательно, и нагрузка генератора ЛА изменяется в широких пределах, что приводит к снижению или повышению же напряжения. Согласно ГОСТ Р 54073-2017, напряжение СЭС ЛА должно оставаться стабильным.

В генераторах с электромагнитным возбуждением при изменении нагрузки величина магнитного потока в воздушном зазоре регулируется за счет изменения тока обмотки возбуждения, что обеспечивает стабильность напряжения. В ЭГ с ВПМ ввиду того, что магнитный поток в воздушном зазоре ЭГ создается постоянными магнитами, управлять и стабилизировать его выходное напряжение методами, аналогичными методам управления генераторами с электромагнитными возбуждением невозможно. Отечественными и зарубежными учеными, в том числе при участии автора, были разработаны различные технические решения данной проблемы: подмагничивание спинки статора, применение магнитных шунтов, использование статического преобразователя полной мощности.

Помимо ЭГ с ВПМ перспективным решением для СГЭ ЛА является использование ЭГ, основанных на явлении сверхпроводимости. Данный тип ЭГ детально исследован в работах Л. К. Ковалева, К. Л. Ковалева, В. Т. Пенкина, Я. Б. Данилевича, Л. И. Чубраевой и др. [93–98]. В ближайшей перспективе, без использования криогенного топлива, ЭГ такого типа пока не находят применения в ЛА, но при этом развитие технологий сверхпроводников и увеличение их рабочей

47

температуры, возможно, позволит их использование в будущем. В настоящей работе данные ЭГ не рассматриваются.

Из анализа научных работ в части ЭМПЭ с ВПМ для СГЭ ЛА видно, что для повышения мощности, энергоэффективности и отказоустойчивости СГЭ на основе ЭМПЭ с ВПМ современных и перспективных ЛА при одновременной минимизации массогабаритных показателей агрегатов СГЭ, а также для развития теории авиационных СГЭ ЛА необходимо решить ряд теоретических задач в области ЭМПЭ с ВПМ. В частности, к данным задачам относятся создание обобщенной математической модели, описывающей процессы в ЭМПЭ с ВПМ в установившихся и переходных режимах в декартовых и цилиндрических учитывающей координатах, 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.

Также необходимо выполнить исследования совместной работы ЭМПЭ с ВПМ с регулятором напряжения в составе СГЭ и оценить эффективность различных способов стабилизации напряжения ЭМПЭ с ВПМ в составе СГЭ ЛА.

1.2.1 Классификация ЭГ с ВПМ

для систем генерирования электроэнергии летательных аппаратов

Как видно из представленного анализа, наиболее эффективным ЭМПЭ для реализации перспективных СГЭ ЛА являются ЭГ с ВПМ. При этом классификация данных ЭГ в литературе приведена, но она требует расширения с учетом современных тенденций развития СГЭ, также отсутствует классификация высокооборотных ЭМПЭ. Поэтому важно для развития и обобщения теории авиационных СГЭ ЛА произвести классификацию ЭГ с ВПМ в частности, а также классификацию высокообортных ЭМПЭ в целом.

В общем случае высокооборотные ЭМПЭ могут быть классифицированы по принципу действия, конструктивным особенностям, частоте питающей сети или вырабатываемого выходного напряжения, конструктивным особенностям статора (зубчатый статор или беспазовый статор), характеру движения активного элемента, режиму работы и т.д.

Торцевые или дисковые ЭМПЭ с ВПМ могут являться перспективными для систем электроснабжения ракетной и космической техники ввиду малых аксиальных размеров. В частности, торцевые ЭМПЭ применялись в генераторном блоке ракеты Н1 [99]. Обзор конструкций и перспективы применения дисковых ЭМПЭ представлены в работе [100].

Также для развития космических систем определенными перспективами является использование в высокооборотных магнитоэлектрических демпфирующих элементах ВПМ на основе сплава *NdFeB* и *SmCo*, так как это позволит в значительной степени повысить их энергетические характеристики. Исследования применения высокооборотных систем в космических аппаратах проведены при непосредственном участии автора при выполнении задания № 8.287.2014/К на выполнение научно-исследовательской работы в рамках проектной части государственного задания в сфере научной деятельности.

Для развития альтернативной энергетики, а также судовых и транспортных систем (железнодорожных составов), представляет интерес применение однокоординатных и многокоординатных колебательных ЭМПЭ с ВПМ. Теоретические и экспериментальные исследования по данным преобразователям проведены при участии автора и изложены в работах [101–103], а также разработаны способы мониторинга местоположения грузов и их состояния на основе анализа вырабатываемого многокоординатным ЭМПЭ с ВПМ напряжения.

Интерес представляют высокоскоростные ЭМПЭ, в которых рабочим телом является жидкая или газообразная среда. Особенный интерес представляют подобные ЭМПЭ при использовании энергии взрывных волн, скорость которых может достигать нескольких тысяч м/с. Они могут найти эффективное применение в атомной промышленности, а также при создании и эксплуатации детонационных двигателей и гиперзвуковых ЛА.

Для развития корабельных и автомобильных систем электроснабжения актуальным является применение высокоскоростных линейных ЭМПЭ с ВПМ в качестве основных генераторов системы электроснабжения, приводом для которых служит двигательная установка. Особенности таких установок описаны в работах [101–103].

Непосредственно ЭГ с ВПМ в общем виде могут быть классифицированы по типу обмоток, типу подшипников, типу статора, типу магнитной системы ротора, типу бандажа ротора, способу регулирования стабилизации напряжения (рассмотрены в главе 4). Классификация ЭГ с ВПМ для аэрокосмического применения приведена на рисунке 1.8.



Рисунок 1.8 – Классификация ЭГ с ВПМ

ЭГ с ВПМ и зубцовой обмоткой обладают более низкой габаритной длиной из-за уменьшенных размеров лобовых частей, в ряде случае длина может быть снижена до 30%, но при этом имеют более низкие обмоточные коэффициенты. Кроме того, из-за пространственных гармоник в постоянных магнитах и бандаже ротора наводятся значительные вихревые токи, которые могут привести к перегреву ВПМ. На рисунке 1.9 приведено распределение потерь в ЭГ с ВПМ мощностью 120 кВт в зависимости от типа обмотки, полученное на основе расчетов автора. В целом из-за пространственных гармоник зубцовые обмотки при использовании в высокооборотных ЭГ мощностью более 30–40 кВт требуют использования дополнительных методов для снижения данных потерь. Поэтому проблема потерь на вихревые токи в ЭГ с ВПМ требует дополнительных исследований.



Рисунок 1.9 – Распределение потерь в ЭГ с ВПМ мощностью 120 кВт с частотой вращения ротора 60 000 об/мин; распределенная обмотка (*справа*), зубцовая обмотка (*слева*)

Необходимо отметить, что создание отказоустойчивых ЭГ с ВПМ без использования зубцовых обмоток не представляется возможным.

Исследования особенностей применения зубцовых обмоток в ЭГ с ВПМ получены при участии автора в работах [104, 105].

Особенности использования различных типов подшипниковых опор рассмотрены автором в работах [106–108], беспазовые и пазовые конструкции рассмотрены в работах [109–111]. Технология бандажирования ротора является одной из ключевых при создании ЭГ с ВПМ, так как она обеспечивает

механическую прочность ЭГ и возможность его эксплуатации на номинальных частотах вращения ротора. Технология бандажирования рассмотрена в работах [110–116].

1.2.2 Высокооборотные ЭМПЭ с ВПМ как частный случай ЭМПЭ с ВПМ СГЭ ЛА

Высокооборотные ЭМПЭ с ВПМ с частотами вращения 30 000–60 000 об/мин в составе СГЭ ЛА используются в основном в двух направлениях: это создание короткоресурсных объектов (ракет, беспилотных ЛА, самолетов-мишеней) и перспективным направлением развития высокооборотных ЭМПЭ с ВПМ при использовании в СГЭ ЛА является применение их в безредукторных ВСУ.

Высокооборотные ЭМПЭ для СГЭ короткоресурсных объектов. В короткоресурсных объектах (КО) в качестве источников механической энергии применяются маховики, турбины, работающие на сжатом воздухе, или применяется прямой отбор механической энергии от турбореактивного двигателя. Особенностью источников механической энергии на борту КО является высокая частота вращения первичного источника (30 000–60 000 об/мин). Поэтому в СГЭ КО в основном используются высокооборотные ЭМПЭ коммутаторного типа, индукторные ЭМПЭ, ЭМПЭ комбинированного возбуждения или ЭМПЭ с ВПМ.

Высокооборотные ЭМПЭ коммутаторного типа работают на принципе периодического изменения магнитного потока. Ротор у ЭМПЭ данных представляет собой ферромагнитное тело с явно выраженными полюсами. При этом на статоре располагаются либо обмотки возбуждения, либо постоянные магниты. Высокобортные ЭМПЭ данного типа успешно эксплуатируются при частотах до 60 000 об/мин при мощности до 5 кВт. ЭМПЭ коммутаторного типа применяются, например, в самолете-мишени МQM-74С. ЭМПЭ данного типа высокой обладают належностью И достаточно высокими удельными характеристиками. Недостатком данных ЭМПЭ являются значительные потери в роторе и обусловленные ими перегревы. Кроме того, ЭМПЭ коммутаторного типа в основном выполняются однофазными. В ЭМПЭ коммутаторного типа частота вращения ограничена механическими свойствами применяемых на роторе ферромагнитных материалов, которые значительно уступает титану,

Инконелю 718, применяемым в качестве бандажных оболочек высокооборотных ЭМПЭ с ВПМ.

Индукторные ЭМПЭ также применяются в КО при частотах вращения ротора до 60 000 об/мин. Они используются в КО изделие «36» [112] при максимальной частоте вращения 54 000 об/мин и мощности 2,7 кВт, масса данного ЭГ составляет 7 кг. Кроме того, также известен высокооборотный индукторный генератор мощностью 30 кВт с частотой вращения ротора 60 000 об/мин, разработанный под руководством А. М. Русакова (ГВИ-30). Достоинством данных ЭМПЭ являются высокая надежность, но при этом они обладают более низкими удельными характеристиками, по сравнению с ЭМПЭ с ВПМ и имеют более низкий КПД, обусловленный аэродинамическими потерями и потерями в роторе на вихревые токи. Также данный тип ЭМПЭ имеет более низкий коэффициент использования магнитного потока.

В КО находят применение ЭМПЭ комбинированного возбуждения с частотой вращения 50 000–60 000 об/мин и мощностью до 10 кВт. Они используются в самолетах-разведчиках Fieebrand, изделие «95» (мощность комбинированного ЭМПЭ составляет 2,7 кВт, частота вращения ротора 45 000 об/мин при массе 5,1 кг) и т.д. Данные ЭМПЭ построены на принципах совмещения ЭМПЭ с ВПМ и электрических машин с электромагнитным возбуждением. Достоинствами данных ЭМПЭ являются их высокая надежность и простота регулирования, но при этом они обладают высокими массогабаритными показателями.

Необходимо отметить, что из-за непродолжительного жизненного цикла КО, к их ЭМПЭ не предъявляются высокие требования по ресурсу и основным показателям, которые определяют выбор ЭМПЭ. Для СГЭ КО основным критерием являются массовые характеристики, поэтому наиболее эффективным является применение ЭМПЭ с ВПМ.

Высокооборотные ЭМПЭ с ВПМ применяются в самолетах-разведчиках USD-502, в составе двигателя ТЈ-100, на изделии «64М», в различных типах ракет земля–воздух и т.д. Они, по сравнению с рассмотренными выше типами ЭМПЭ, обладают минимальными массогабаритными показателями. Например, ЭМПЭ с ВПМ для изделия «64М» при частоте вращения 48 500 об/мин имеет массу 2 кг при мощности 2,5 кВт. Что практически в 2 раза ниже по сравнению с аналогичным ЭМПЭ комбинированного возбуждения и в 3 раза ниже, чем у ЭМПЭ индукторного

типа. Высокоборотные ЭМПЭ серийно выпускаются компаниями Honeywell [83], ООО «Эрга+» (ВЭЛМА) [36], Thales и др.

В таблице 1.1 приведено сравнение различных ЭМПЭ для СГЭ КО по критериям механической прочности ротора (максимальный диаметр ротор при частоте 60 000 об/мин), удельным характеристикам и КПД. Стоит отметить, что само понятие КПД не является важным критерием при выборе типа ЭМПЭ для СЭС КО, но оно влияет на потребное количество хладагента, необходимого для охлаждения ЭМПЭ с ВПМ, поэтому КПД было введено в сравнение. При этом использовались данные [112] и расчетные методики, приведенные в работах [115, 116] для оценки механической прочности роторов.

Из таблицы 1.1 видно, что используемые серийные ЭМПЭ с ВПМ обладают значительными преимуществами по сравнению с аналогами, которые в том числе достигаются применением новых материалов для обеспечения механической прочности ротора (карбоновых волокон, сплава Инконель 718 и т.д.).

Необходимо отметить, что достигнутые массогабаритные характеристики серийных высокооборотных ЭМПЭ с ВПМ (производимых Honeywell [83], ООО «Эрга+» (ВЭЛМА) [36], Thales И дp) для СГЭ КО не являются удовлетворительными для создания перспективных летательных аппаратов, что обусловлено не оптимальными конструктивными схемами ротора, значительными потерями в магнитопроводе статора, а также теоретической базы, позволяющей их оптимизацию. Кроме того серийные высокооборотные ЭМПЭ с ВПМ не имеют функций защиты от витковых коротких замыканий, что значительно снижает их надежность. Поэтому в области создания ЭМПЭ с ВПМ для СГЭ КО необходимо разрешить научные задачи, связанные с минимизацией их массогабаритных показателей. обеспечением ИХ отказоустойчивости И надежности при одновременной минимизации трудозатрат и материальных ресурсов на их проектирование.

Безредукторные вспомогательные силовые установки. Другим объектом применения высокооборотных ЭМПЭ с ВПМ в ЛА является использование их в безредукторных вспомогательных силовых установках (ВСУ). Отказ от редуктора в ВСУ, а также от системы отбора воздуха позволяет минимизировать массу ВСУ на 20 %, минимизировать габариты на 15 % и уменьшить количество узлов в ВСУ на 30 %, что влечет за собой повышение надежности всей ВСУ, даже при условии снижения надежности используемых в ней ЭМПЭ.

В таблице 1.2 приведены характеристики ВСУ отечественных и зарубежных производителей при отказе в них от редуктора.

Из таблицы 1.2 видно, что в отечественной и зарубежной промышленности имеется научный задел для создания безредукторных ВСУ на частоты вращения 35 000–60 000 об/мин, а следовательно, создание ЭМПЭ для них является важной и актуальной задачей.

	Механические	Macca,	КПД
	нагрузки на	КГ	(полностью
	ротор, Мпа		СГЭКО), %
	[115, 116]		
Индукторный ЭМПЭ, изделие «36» (мощность	630	7	72
2,7 кВт, частота вращения 54 000 об/мин)			
Комбинированный ЭМПЭ, изделие «95»	610	5,1	75
(мощность 2,7 кВт, частота вращения			
45 000 об/мин)			
ЭМПЭ с ВПМ (мощность 2,7 кВт, частота	520	1,8	85
вращения 55 000 об/мин)			
ЭМПЭ с ВПМ (мощность 2,5 кВт, частота	430	2	86
вращения 48 500 об/мин)			
ЭМПЭ с ВПМ (мощность 750 Вт, частота	420	0.7	85
вращения 61 000 об/мин, ТЈ-100)			

Таблица 1.1 – Сравнение различных типов ЭМПЭ для СГЭ КО

Таблица 1.2 – Характеристики ВСУ отечественных производителей при отказе от редуктора

Тип ВСУ /	Частота вращения ротора	Мощность ЭМПЭ,	Статус проекта
разработчик /	ЭМПЭ при отказе от	кВт	
Объект примения	редуктора, об/мин		
ВСУ 120/	До 60000 об/мин	120	Эскизный проект
Технодинамика /			
TA-18-100/ AO	37 500 об/мин	90	_
НПП «Аэросила» /			
Ту-334, Бе-200			
ВСУ-117	57 000 об/мин	30	Эскизный проект
/ АО «Красный			
октябрь»			
ВСУ F-35 /	62 000 об/мин	140	Серийное ВСУ
Honeywell			
BCY Microturbo /	56 000 об/мин	50	Опытное ВСУ
Safran			

Из анализа работ отечественных и зарубежных авторов можно выделить основные направления исследований ЭГ с ВПМ, а также нерешенные задачи:

– управление магнитным потоком в ЭГ с ВПМ и управление ЭГ с ВПМ в составе СЭС ЛА, а также перспективы развития полупроводниковой авиационной техники [117–132]. Данные работы направлены на решение задач стабилизации выходного напряжения ЭГ с ВПМ, разработку новых способов управления ЭГ с ВПМ в стартерном режиме, а также минимизацию массогабаритных показателей сопутствующей силовой электроники;

– вопросы охлаждения ЭГ с ВПМ [129–131]. В данных работах решаются задачи повышения КПД ЭГ с ВПМ за счет оптимизации его системы охлаждения, в том числе благодаря использованию новых хладагентов (рассматриваются возможности применения криогенных хладагентов). В основном эти задачи решаются методами компьютерного моделирования в программных комплексах Ansys, Fluent и т.д.

– оптимизация геометрических размеров ЭГ с ВПМ и их конструктивного исполнения [132–140]. Задачи оптимизации в основном решаются методами компьютерного моделирования, кроме того, при решении задачи не учитывается влияние бесконтактных подшипников. Ряд работ ограничиваются предложением новых конструктивных исполнений высокооборотных магнитоэлектрических генераторов (ВМЭГ), a также ИХ отдельных обоснованием узлов, И перспективности их использования в промышленности [141–150]. При этом в [141– 150] не приведены модели, позволяющие вести учет многодисциплинарных процессов, протекающих в ЭГ с ВПМ;

– механические расчеты ЭГ с ВПМ и повышение механической прочности ротора ЭГ с ВПМ [151–161];

– применение систем Хальбаха и многофазных обмоток в ЭГ с ВПМ [162– 166]. Данные работы направлены на повышение мощности ЭГ с ВПМ благодаря применению особых конструкций ротора и обмоток статора. Несомненно, данные работы имеют перспективы внедрения в промышленность, но существуют ряд вопросов, которые при этом необходимо решить, в частности, это технологическая сложность изготовления систем типа Хальбах. Кроме работ, посвященных только исследованиям и созданию ЭГ с ВПМ, можно выделить ряд работ, определяющих тенденции по повышению эффективности ЭГ:

 – работы, посвященные оптимизации конструкции магнитопровода статора, повышению их технологичности, а также применению новых активных материалов с уникальными свойствами [157–160].

– работы, посвященные использованию новых изоляционных материалов, а также работы по повышению интенсивности и эффективности охлаждения ЭГ. Основным направлением данных работ является поиск путей снижения тепловыделений обмотки статора за счет применения новых изоляционных материалов, например, нанодиэлектриков или оптимизации систем охлаждения ЭГ;

– работы, посвященные решению проблем надежности подшипниковых узлов высокооборотных ЭГ [161–180]. Данные работы направлены в первую очередь на создание бесконтактных подшипниковых опор (БПО) газовых или магнитных. В особенности эти работы интересны, как было показано выше, для создания «сухих» силовых установок.

Из анализа литературных источников в предметной области очевидно, что эффективность высокооборотных интегрированных ЭГ определяется эффективностью их подшипникового узла, так как без обеспечения необходимой быстроходности и надежности последнего невозможно достичь высоких частот вращения ЭГ.

При подобном множестве работ нерешенными остаются вопросы создания обобщенной математической модели ЭГ с ВПМ и исследования ее при работе ЭГ в составе СГЭ, отсутствуют методы многодисциплинарного проектирования и оптимизации СГЭ и т.д.

В целом все эти нерешенные проблемы в области создания авиационных ЭГ с ВПМ являются значительным препятствием при создании и оптимизации высокоэффективных СГЭ ЛА. В данной диссертационной работе рассматриваются и решаются ряд указанных проблем.

1.3 Системы управления и стабилизации напряжения систем генерирования электроэнергии летательных аппаратов

Основными задачами системы управления (СУ) СГЭ ЛА являются обеспечение качества и необходимого уровня электроэнергии на выходе СГЭ, стабилизация напряжения, обеспечение защиты и диагностики СГЭ, реализация алгоритмов работы при различных этапах полетного задания и режимах работы СЭС. Наиболее важными функциями СУ для рассматриваемой научной проблемы в связи с использованием ЭГ с ВПМ является обеспечение уровня и необходимого качества электроэнергии, стабилизация напряжения и отказоустойчивости СГЭ. Детальные исследования систем стабилизации ЭМПЭ с ВПМ приведены в главе 4 настоящей диссертации.

Основные тенденции развития преобразовательной техники (выпрямителей и инверторов) и систем управления СГЭ ЛА отражены в работах [180–190].

Силовая часть любого преобразователя состоит из силовых ключей (СК) и усилителей управляющего сигнала – драйверов силовых ключей. Кроме того, силовая часть может содержать выходной силовой фильтр (СФ), источник питания силовой части (ИП СЧ) и фильтр помех (ФП). При этом источником питания силовой части может выступать как неуправляемый выпрямитель, так и сложный преобразователь напряжения со своей системой управления.

Система управления включает в себя схемы первичной обработки сигналов датчиков и аналого-цифрового преобразования; один или несколько контроллеров, отвечающих за выполнение задач, возложенных на электротехнический комплекс, источник питания или распределенную систему питания системы управления (ИП СУ) и входной фильтр помех, который также можно считать частью источника питания.

Важной задачей развития преобразователей СГЭ является реализация отказоустойчивых топологий СУ, в которых либо каждый инвертор отвечает за свою обмотку, либо реализуются многофазные преобразователи с дублированием каждого элемента. На рисунке 1.18 приведена топология преобразователя, разработанная в ФГБОУ ВО «УГАТУ» при участии автора для отказоустойчивого

обратимого СГЭ мощностью 30 кВт с ЭГ с частотой вращения ротора 58 000 об/мин.



Рисунок 1.10 – Отказоустойчивые преобразователи элементов СГЭ

Таким образом, стабилизация напряжения ЭГ с ВПМ является важной задачей, для решения которой необходимо развивать и математический, и теоретический аппарат, а также схемотехнические решения и элементную базу. В целом преобразовательная техника СУ СГЭ развивается за счет новых топологий, в том числе отказоустойчивых, и развития элементной базы. При этом в работах, посвященных исследованиям преобразователей для авиационных СГЭ, практически не уделяется внимания созданию отказоустойчивых топологий и исследованиям совместной работы ЭГ и преобразователя, ЭГ и регулятора напряжения, также не до конца исследованы способы стабилизации напряжения ЭГ с ВПМ. Кроме того, недостаточно разработаны алгоритмы интеллектуальных преобразователей, способных управлять авиационными ЭГ по встроенным математическим моделям и неизмеряемым параметрам [191–200].

1.4 Трансформаторы систем генерирования электроэнергии летательных аппаратов

Важным элементом СГЭ являются преобразующие трансформаторы и трансформаторно-выпрямительные устройства (ТВУ).

Ряд компаний занимаются производством ТВУ с различными параметрами [201]. Компания Thales Avionics Electrical Systems производит ТВУ для гражданского и военного применения, масса которого составляет 4,5–7,5 кг в зависимости от мощности, удельная мощность такого ТВУ составляет 1300 Вт/кг,

ток достигает 350 А. Компания L3 Communication предлагает ТВУ для военного применения, отличием их разработки является применение алюминиевых ленточных проводов в качестве обмотки трансформатора для снижения веса ТВУ. Второй особенностью их изделий является охлаждение через заземляющую пластину без применения специальных устройств охлаждения. Выходной ток с ТВУ составляет 125 А с пиковой нагрузкой до 500 А длительностью 1 с, эффективность ТВУ 86 %, масса 6,1 кг. Удельная мощность ТВУ составляет 574 Вт/кг. Недостатком такого ТВУ является необходимость применения монтажной конструкции с тепловым сопротивлением 0,04 °C / Вт или выше. Компания Crane Aerospace & Electronics предлагает ТВУ для военного и гражданского применения различных типов исполнения с диапазоном выходного тока 125–250 А, масса таких ТВУ варьируется в диапазоне 4,7–11,3 кг в зависимости от мощности, коэффициент нелинейных искажений составляет 5–13 % и требуется дополнительное воздушное охлаждение.

В таблице 1.3 приведены выпускаемые в настоящее время ТВУ, указаны их производители и основные выходные параметры. Как видно из таблицы 1.3, максимальный КПД существующих отечественных ТВУ составляет не более 85 %, а зарубежных – 87 %.

Наименование	Производитель	КПД,	Диапазон	Выходная	Macca,	Удельная
		%	частот,	мощность	КГ	мощность
			Гц	, кВт		, кВт/кг
ТВУ-9К	AO	85	360-480	9,0	11,3	0,8
	«Технодинамика»					
81-084-01	Crane Aerospace &	87	380-420	8,4	8,41	1,0
	Electronics					
8400-1Ф-1009	Avionic Instruments	85	380-420	8,4	11,01	0,76
Y237-2	ARTUS	87	360-440	8,4	10,25	0,82
3435-600	THALES	85	360-560	8,1	8,0	1,01
	AES/Acionics					
	Electrical Systems					
4-300-1	LLC "Innovative	87	360-800	8,4	10,43	0,81
	Power Solutions"					
ВУ-6Б	AO	85	380-420	6,0	9,7	0,62
	«Аэроэлектромаш»					

Таблица 1.3- Выпускаемые в настоящее время ТВУ

Особо важной задачей при создании трансформаторов и ТВУ СГЭ является повышение их эффективности [201–204], в особенности для снижения потерь

холостого хода. Это обусловлено тем, что большую часть эксплуатационного времени ТВУ работает в режиме холостого хода.

При участии автора для уменьшения потерь холостого хода ТВУ перспективных СГЭ были разработаны 12- и 18-пульсные трансформаторы с магнитопроводом из аморфного железа и с гибридными магнитопроводами для ТВУ-9 (АО «Технодинамика»), был выполнен полный цикл данных испытаний и доказано, что использование аморфного железа в ТВУ при условии увеличения частоты внутри СГЭ до 1000–2000 Гц позволяет снизить массу ТВУ при одновременном увеличении коэффициента полезного действия ТВУ. Результаты данных работ изложены в публикациях [205–208].

1.5 Электродвигатели для систем генерирования электроэнергии летательных аппаратов

Электродвигатели (ЭД) в системах СГЭ являются важным элементом, они обеспечивают функционирование маслонасосов для охлаждения элементов СГЭ и силовой установки, топливных насосов силовой установки и привода постоянных оборотов (в случае его использования).

В авиационных СГЭ и СЭС находят применение несколько типов ЭД: двигатели постоянного тока с щеточно-коллекторным узлом, асинхронные ЭД, индукторные и реактивные ЭД, синхронные ЭД с постоянными магнитами (СДПМ) с прямым пуском или с использованием инвертора.

ЭД с щеточно-коллекторным узлом является одним из основных вариантов ЭД, который применяется на различных типах топливных насосов (TH) ЛА. Здесь можно отметить ЭД серии МТ, например двигатель МП-100-С-3С, двигатель МГП-0,12 и т.д. Недостатками ЭД с щеточно-коллекторным узлом являются низкая надежность коллектора, малый ресурс работы и значительные массогабаритные показатели. Именно поэтому разработчики авиационных топливных насосов (TH) для обеспечения экономической эффективности и рентабельности их изделий отказываются от данного типа ЭД.

Асинхронные ЭД также широко используются в системах ЛА (например MT-3000-2C, ЭТМ-105, ЭТМ-106 и т.д.). Достоинством асинхронных ЭД являются

хорошие пусковые характеристики и возможность эксплуатации без системы управления. Недостатками асинхронных ЭД является низкий КПД при низком коэффициенте мощности, а также значительные массогабаритные показатели. Аналогичные проблемы (низкий КПД и высокие массогабаритные показатели) имеют место в индукторных ЭД, вентильно-индукторных ЭД и реактивных ЭД. При этом тенденции развития обмоток (такие, как совмещенные обмотки, интеллектуальная статорная клетка [209]), а также конструктивных схем роторов асинхронных, индукторных и реактивных двигателей (например, конструкция ротора индукторного ЭД со скошенными вырезами [210, 211]) обеспечивают развитие данного типа ЭД для некоторых ЛА.

Одним из решений проблем асинхронных ЭД может являться использование ЭД с ВПМ с асинхронным пуском. Конструктивно данный тип ЭД представляет ЭД, на роторе которого распложена короткозамкнутая клетка и ВПМ. Это позволяет запускать ЭД с ПМ без системы управления от сети и при этом достигать высокой эффективности и КПД. В данном направлении отечественными и зарубежными авиационными КБ ведутся работы по созданию и внедрению ЭД с асинхронным пуском в топливные насосы ЛА (в данном направлении работают АО «Аэроэлектромаш» (Москва), КБ «Электроприбор» (Саратов) и т.д.). В результате выполнения данной работы был создан опытный образец ЭД с ВПМ и асинхронным пуском, который по своим массогабаритным показателям был на 20 % меньше аналогичного асинхронного двигателя, при этом мощность на валу у аналога и созданного ЭД с ПМ была равнозначной, энергопотребление созданного образца 1300 Вт, тогда как у аналогично асинхронного ЭД (ЭТМ-105) энергопотребление составляло более 2 кВт. Полученные результаты подтверждают перспективность подобных технических решений. Особенности проектирования и оптимизации подобных ЭД приведены автором в работах [212–214].

При всех указанных выше достоинствах ЭД с ВПМ и асинхронным пуском имеет более низкий пусковой момент по сравнению с асинхронными ЭД и ЭД с ПМ и пуском с помощью инвертора. Это обусловлено тем, что в ЭД с ВПМ и асинхронным пуском в момент пуска имеют место два момента: пусковой асинхронный и тормозящий, генераторный момент, создаваемый постоянными магнитами. Для снижения данного тормозящего момента в ЭД с ВПМ и асинхронным пуском необходимо выбирать довольно большой воздушный зазор и

незначительную толщину постоянных магнитов. Также большой воздушный зазор необходимо выбирать для предотвращения размагничивания постоянных магнитов. Значительным недостатком ЭД с ВПМ и асинхронным пуском является невозможность регулирования частоты вращения ротора в процессе эксплуатации. Для современных топливных насосов и систем топливоснабжения глубокое регулирование частоты вращения является одним из основных требований, предъявляемых к ЭД.

Поэтому наиболее перспективным вариантом ЭД для создания перспективных СГЭ ЛА являются вентильные электродвигатели (ВЭД) – ЭД с ВПМ и запуском с помощью инвертора.

Перед рассмотренными выше типами ВЭД имеет следующие преимущества:

– бесконтактность и отсутствие узлов, требующих обслуживания. Отсутствие у вентильных электродвигателей скользящих электрических контактов существенно повышает их ресурс и надежность по сравнению с электрическими машинами постоянного тока или асинхронными двигателями с фазным ротором, расширяет диапазон достижимых частот вращения. Так, например, электрические машины постоянного тока с щеточно-коллекторным узлом по причине низкой надежности щеточного узла выполняются на частоту вращения не более 9000 об/мин (например стартер-генераторы ГСР-12, ГСР-18 и т.д.). Хотя уже для ряда перспективных насосов может потребоваться частота вращения 12 000 об/мин и более;

– большая перегрузочная способность по моменту (кратковременно допустимый момент и ток ВЭД могут превышать номинальные значения в 5 (и более раз). Именно это свойство ВЭД позволяет эффективно его использовать в ТН при температуре минус 65 °C;

- высокое быстродействие в переходных процессах по моменту;

 жесткая механическая характеристика и большой диапазон регулирования частоты вращения (1:10000 и более). Возможность регулирования частоты вращения как вниз от номинальной (с постоянством длительно допустимого и максимального моментов), так и вверх (с постоянством мощности);

 высокий КПД: КПД вентильных двигателей превышает 95 % и незначительно отклоняется от номинального при вариациях нагрузки;

– минимальный ток холостого хода;

– минимальные массогабаритные показатели при прочих равных условиях;

– бесшумная работа.

В рамках выполнения работ в интересах АО «ОКБ Кристалл», ФГУП «ЦИАМ» и АО «УАПО» при участии автора были разработаны ВЭД мощностью 80 и 100 Вт. Данные ВЭД рекомендованы к внедрению на ЛА. Акты внедрения приведены в приложении к диссертации. Важно отметить, что для создания отказоустойчивых СГЭ необходимо, чтобы ВЭД также являлись отказоустойчивыми. Данная задача решалась при участии автора в рамках научноисследовательской работы в интересах ФГУП «ЦИАМ» «Разработка и изготовление демонстратора отказоустойчивого электропривода с удельной массой 0,2...0,25 кг/кВт для насосов систем ГТД». ВЭД и его отказоустойчивый инвертор были созданы для топливного насоса перспективного авиационного двигателя.

В целом практический опыт создания ВЭД для СГЭ ЛА и анализ технических заданий в предметной области от предприятий РФ, а также публикационных наиболее источников позволяют сделать вывод, что перспективными ЛА конструкциями электродвигателей являются конструкции ЭД С высококоэрцитивными постоянными магнитами и зубцовой обмоткой. При этом для обеспечения максимальной отказоустойчивости необходимо, чтобы число фаз электродвигателей для авиакосмической промышленности было 6 и более. Основной тенденцией развития электродвигателей ЛА является повышение удельной мощности до 10–25 кВт/кг в ближайшие 15 лет.



Рисунок 1.11 – Зависимости удельной мощности от мощности для различных производителей ЭД с ПМ для летательных аппаратов

На рисунке 1.11 приведен анализ изготавливаемых в настоящее время наиболее перспективных электродвигателей зарубежных производителей и показана зависимость их удельной мощности от мощности. Очевидно, что наиболее эффективным на данном этапе развития является электродвигатель Siemens (на рисунке отмечен зеленым треугольником).

Таким образом, можно сделать вывод, что практически все агрегаты, входящие в СГЭ, развиваются по схожему пути. Основные тенденции их развития направлены на минимизацию их массогабаритных показателей, повышение интеллектуальности и отказоустойчивости, а также минимизацию их потерь. При ЭТОМ наиболее эффективным решением, которое позволяет обеспечить значительное повышение мощности СГЭ ЛА, является использование ЭГ с ВПМ в целом, и для ряда применений высокооборотных ЭГ с ВПМ. Интересной тенденций развития практически всех агрегатов, входящих в СГЭ (ЭГ, статических преобразователей, трансформаторов, ЭД и т.д.), является повышение частоты напряжения, вырабатываемой и потребляемой ими. Это говорит о том, что перспективным вариантом реализации СГЭ является создание СГЭ, напряжение между агрегатами которого может быть высокой частоты до 2000 Гц, а на выходе посредством статического преобразователя обеспечивается уже необходимое качество и уровень напряжения, определяемые ограничениями СЭС ЛА.

ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 1

1. Произведен анализ работ в области разработки и исследований СЭС и СГЭ перспективных ЛА, разработана классификация СГЭ ЛА и классификация ЭМПЭ с ВПМ. На основе данных классификаций и анализа научных публикаций установлено, что наиболее перспективным является использование на борту ЛА СГЭ на основе ЭМПЭ с ВПМ, так как они позволяют значительно повысить единичную мощность СГЭ ЛА, снизить ее полетную массу и повысить топливную эффективность ЛА. Особенно явно данные преимущества проявляются при интеграции ЭГ в силовую установку ЛА.

2. Анализ потерь в высокооборотных ЭГ с ВПМ мощностью 120 кВт и с частотой вращения ротора 60 000 об/мин показал, что при использовании зубцовой

обмотки и преобразователя частоты потери на вихревые токи в постоянных магнитах могут достигать 10 % от общей величины потерь. Поэтому необходимым является использование дополнительных методов минимизации этих потерь. При этом полные потери при использовании зубцовых обмоток в высокооборотных ЭГ с ВПМ указанного класса могут возрасти на 8–15 % по сравнению с ЭМПЭ с ВПМ с распределенной обмоткой, в зависимости от величины обмоточных коэффициентов.

3. Анализ работ в области авиационных СЭС позволяет сделать вывод о том, что не исследованы в должной мере вопросы создания эффективных ЭГ с ВПМ для авиационных СГЭ, отсутствуют рекомендации по обеспечению отказоустойчивости подобных ЭГ, не исследованы потери в их активных элементах.

4. 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 BΠM, отличаюшейся от известных возможностью исследования СГЭ. интегрированных в силовую установку при условии многовариантности построения СГЭ ЛА. Это позволит осуществлять одновременное исследование нескольких структур СГЭ ЛА и выбор оптимальной при минимальных временных затратах. Также в известных теоретических и практических работах не приведена методика, позволяющая выполнять процесс многодисциплинарного проектирования СГЭ ЛА на основе ЭМПЭ с ВПМ, отличающаяся от известных тем, что включает в себя одновременное многодисциплинарное проектирование всех компонентов, входящих в СГЭ, и позволяет их совместную оптимизацию. Хотя подобные методики позволили бы обеспечить решение задач робастного проектирования СГЭ ЛА.

Из анализа научных работ в части ЭМПЭ с ВПМ для СГЭ ЛА очевидно, 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 относятся создание обобщенной математической модели, описывающей процессы в ЭМПЭ с ВПМ в установившихся и переходных режимах в декартовых и цилиндрических координатах, 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.

Необходимо отметить, что достигнутые массогабаритные характеристики серийных высокооборотных ЭМПЭ с ВПМ для СГЭ КО не являются удовлетворительными для создания перспективных летательных аппаратов, что обусловлено не оптимальными конструктивными схемами ротора, значительными потерями в магнитопроводе статора, а также отсутствием теоретической базы, позволяющей их оптимизацию. Кроме того серийные высокооборотные ЭМПЭ с ВПМ не имеют функций защиты от витковых коротких замыканий, что значительно снижает ИХ надежность. Поэтому в области создания высокооборотных ЭМПЭ с ВПМ для СГЭ КО необходимо разрешить научные задачи, связанные с минимизацией их массогабаритных показателей, обеспечением их отказоустойчивости и надежности при одновременной минимизации трудозатрат и материальных ресурсов на их проектирование.

Также необходимо для расширения и эффективного использования ЭМПЭ с ВПМ в составе СГЭ ЛА выполнить исследования совместной работы ЭМПЭ с ВПМ с регулятором напряжения в составе СГЭ, разработать методики, позволяющие при минимальных затратах времени исследовать влияние реакции якоря на управляемость ЭМПЭ с ВПМ.

Таким образом, можно сделать вывод, что в области современных СГЭ ЛА сложилась 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.

Решение данной крупной научной проблемы обеспечит создание перспективных высокомощных СГЭ ЛА при минимальных затратах времени и средств.

Для достижения поставленной цели в работе ставятся 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 в декартовых и цилиндрических координатах, учитывающей 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 характеристик и геометрических размеров агрегатов, входящих в СГЭ ЛА, по заданным критериям и разработка методики, позволяющей выполнять процесс многодисциплинарного проектирования СГЭ ЛА на основе ЭМПЭ с ВПМ, а также одновременное многодисциплинарное проектирование всех компонентов, входящих в СГЭ ЛА.

4. Разработка нового метода обеспечения отказоустойчивости ЭМПЭ с ВПМ в части защиты ЭМПЭ с ВПМ от витковых коротких замыканий, позволяющего 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 с учетом механических процессов.

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, минимизирующей временные затраты при компьютерном моделировании ЭМПЭ с ВПМ.

6. Исследования потерь в агрегатах СГЭ, на основе которых необходимо разработать алгоритм расчета потерь в стали при частотах более 400 Гц и алгоритм выбора материалов и расчета геометрических размеров ЭМПЭ, трансформаторновыпрямительных устройств нового поколения, разработка нового метода изготовления магнитопровода статора ЭМПЭ из аморфного железа.

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

Процесс создания и проектирования СГЭ ЛА является нетривиальной задачей, требующей использования методов многодисциплинарного проектирования нескольких агрегатов, каждый из которых является сам по себе очень сложной технической системой. Качественное проектирование этих было без компонентов, как показано выше. выполнить невозможно одновременного учета тепловых, электромагнитных и механических процессов, протекающих непосредственно в них и в элементах СГЭ, с которыми они взаимосвязаны. Совместно с методами многодисциплинарного проектирования процесс разработки СГЭ ЛА требует одновременного решения задач оптимизации каждого агрегата и всей системы в целом и при этом все компоненты должны обеспечивать электромагнитную совместимость друг с другом, то есть необходимо учитывать их взаимовлияние друг на друга.

В данной главе решаются 1 и 2 задачи диссертационной работы.

2.1 Обобщенная структурная модель СГЭ ЛА на основе ЭМПЭ с ВПМ

В общем виде СГЭ ЛА на основе ЭМПЭ с ВПМ может быть описан 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 является структурной моделью, которая определяет всю совокупность возможных реализаций СГЭ. Использование подобного подхода к формированию структурной модели СГЭ на основе ЭМПЭ с электромагнитным возбуждением было предложено В. Т. Морозовским [6]. Качественное отличие преобразователей СГЭ на основе ЭМПЭ с ВПМ, а также топологий СГЭ на основе ЭМПЭ с ВПМ не позволяет использовать модели, предложенные в [6], для СГЭ на основе ЭМПЭ с ВПМ в полной мере. Кроме того, структурные модели, приведенные в [6], позволяют

только последовательный перебор различных структур СГЭ ЛА. При современной многовариантности использование последовательного подхода нецелесообразно, поэтому в разрабатываемой в диссертации структурной модели используется параллельный подход при анализе структур СГЭ ЛА. В связи с этим известные модели СГЭ ЛА требуют расширения.

Это обусловлено тем, что обобщенная структурная модель является важной составляющей при разработке новых СГЭ ЛА. Она позволяет обеспечивать теоретически обоснованный выбор топологии СГЭ, что особенно важно при многодисциплинарном проектировании СГЭ.

2.1.1 Обобщенная структурная модель магистрального СГЭ ЛА

На рисунке 2.1 приведена обобщенная структура магистральной СГЭ на основе ЭМПЭ с ВПМ (ЭМПЭ с электромагнитным возбуждением или щеточноколлекторным узлом в данной структуре не рассматриваются). При создании данной структуры было решено ограничиться основными применимыми СГЭ ЛА, а также перспективными на напряжение постоянного тока 540 В. Разработанная обобщенная структура является основой для создания структурной модели СГЭ с ЭМПЭ с ВПМ. В отличие от известных, предложенная обобщенная структура позволяет исследования СГЭ на основе ЭМПЭ с ВПМ, интегрированных СГЭ и СГЭ с повышенным напряжением постоянного тока 270 или 540 В. При анализе рассматривалось 6 основных типов ЭГ с ВПМ: 1 – ЭГ с ВПМ нестабильной частоты вращения (8000-24 000 об/мин) и стабилизацией напряжения с помощью последовательного инвертора, напряжение на выходе инвертора 115/200 В, 400 Гц или 230/400 В 400 Гц; 2 – ЭГ с ВПМ стабильной частоты вращения и с подмагничиванием участка магнитопровода для стабилизации напряжения; 3 – ЭГ с ВПМ и с параллельной стабилизацией напряжения; 4 – высокооборотный ЭГ с ВПМ (30 000-60 000 об/мин), работающий на инвертор (используется в резервных и вспомогательных СГЭ ЛА короткоресурсных объектов); 5 – ЭГ с ВПМ нестабильной частоты вращения (8000-24 000 об/мин) и стабилизацией напряжения с помощью последовательного выпрямителя, напряжение на выходе СГЭ 270 или 540 В постоянного тока; 6 – высокооборотный ЭГ с ВПМ (30 000– 60 000 об/мин), работающий на выпрямитель (270, 540 В, используется в резервных и вспомогательных СГЭ ЛА в короткоресурсных объектах).

Пунктирными линиями на рисунке 2.1 обозначены возможные места присоединения ЭГ с ВПМ, т.е. ЭГ нестабильной частоты может быть установлен как на коробке агрегатов, так и напрямую, на валу авиационного двигателя. Именно подобный подход позволяет исследовать несколько СГЭ в условиях мновариантности их построения.



Рисунок 2.1 – Обобщенная структура магистрального СГЭ ЛА на основе ЭМПЭ с ВПМ (*слева*) и структура вспомогательного (резервного) СГЭ ЛА на основе ЭМПЭ с ВПМ (*справа*)

Поэтому использование ЭГ с ВПМ в составе СГЭ ЛА исключает создание СЭС ЛА с нестабильной частотой сети, но при этом ЭГ с ВПМ может эксплуатироваться с переменной частотой вращения. Постоянная частота на выходе из СГЭ на основе ЭМПЭ с ВПМ позволяет обеспечить подъем стабильной частоты СГЭ, например, перейти к частоте 800 Гц вместо 400 Гц и снизить массу СЭС ЛА, но при этом частота напряжения СГЭ ЛА все равно останется стабильной.
Обозначения, принятые на рисунке 2.1: *КНД* – компрессор низкого давления; *КВД* – компрессор высокого давления; *АД* – авиационный двигатель, *КА* – коробка агрегатов; *ППЧ* – привод постоянной частоты.

Блок 6 представляет собой выпрямитель с выходным напряжением 270 В постоянного тока. Блок 7 – трансформаторно-выпрямительное устройство (ТВУ), преобразующее напряжение 115/200 В, 400 Гц в напряжение 27 В постоянного тока. Блок 8 – статический преобразователь, преобразующий постоянное напряжение 270 В в переменное напряжение 115/200 В, 400 Гц. Блок 9 – высоковольтный ТВУ, преобразующий напряжение 230/400 В в 270 В постоянного тока.

Такие ТВУ установлены на Boeing 787, отечественной промышленностью подобные ТВУ не производятся [205–207]. Использование данных ТВУ, по мнению автора, обусловлено отсутствием серийных авиационных аккумуляторов на напряжение более 270 В. При реализации на отечественных ЛА СЭС 230/400 В, 400 Гц, что планируется на ШФМДС или модернизированном Ил-96-300, потребуется создание подобных устройств отечественной промышленностью.

Блок 10 – трансформатор, преобразующий напряжение 230/400 В в 115/200 В. Его использование необходимо для систем, в которых уровень напряжения 115/200 В, 400 Гц. Повышение уровня напряжения сети до 230/400 В, 400 Гц для них является критичным.

Также на рисунке приняты следующие обозначения: *М* – мультипликатор; *СУЛА* – силовая установка летательного аппарата, которой может являться КТУ, ТХА, ТГИ или ВСУ.

Допуская, что все рассматриваемые каналы имеют равную мощность, данную структурную схему можно представить в виде структурной матрицы, элементы которой являются различными, способными обеспечить получение того или иного вида электрической энергии на борту ЛА:

$$X = \begin{bmatrix} X_{11}X_{12}X_{13}X_{14} & 0 \\ X_{21}X_{22}X_{23}X_{24} & 0 \\ X_{31}X_{32}X_{33}X_{34} & 0 \\ X_{41}X_{42}X_{43}X_{44} & 0 \end{bmatrix}$$
(2.1)

где X_{jj} – структура СГЭ, способная обеспечить мощность первичных энергетических узлов; X_{ij} – структура, способная обеспечить мощность P_{ij} вторичных энергетических узлов, в которых мощность первичного источника j преобразуется в мощность вторичного источника i.

При исследованиях данной матрицы необходимо учитывать, что установленная мощность СГЭ ЛА должна равняться мощности всех первичных энергетических узлов, присутствующих в СГЭ: $P_{yer} = \sum_{\alpha}^{j} P_{jj}$.

Элементы строки структурной матрицы представляют собой структуры, позволяющие обеспечить мощность энергетических узлов определенного уровня напряжения. Нулевые значения элементов показывают нецелесообразность того или иного преобразования энергии в СГЭ ЛА. Например, не имеет смысла выполнять преобразования 27 В постоянного тока в 230/400 В, 400 Гц переменного тока. Элементы X_{12}, X_{13} (структуры, обеспечивающие мощность канала с напряжением 115/230 В, 400 Гц, преобразованную в мощность напряжением 230/400 В, 400 Гц и преобразование 270 В постоянного тока в 230/400 В, 400 Гц) практически также не имеют смысла. Более рационально выполнить ЭГ на напряжение 230/400 Гц, но для ряда модернизируемых систем, а также для исследовательских летающих лабораторий данные каналы могут использоваться. Поэтому они введены в структурную матрицу. Аналогичная ситуация имеет место с элементами X_{42}, X_{43} .

Для удобства преобразований структурная матрица 2.1 приводится к виду структурной матрицы по роду тока: переменный стабильной частоты (первая строка), постоянный ток и переменный нестабильной частоты. Третья строка будет полностью нулевой, так как использование такого рода тока в СГЭ на основе ЭГ с ВПМ нецелесообразно.

Тогда данную матрицу возможно преобразовать в матрицу *Y*, которая будет содержать все возможные комбинации СГЭ. Итоговая матрица *Y* будет

представлять собой произведение квазидиагональной матрицы узлов переменного тока стабильной частоты на матрицу из СГЭ постоянного тока.

Для упрощения преобразования узлы постоянного тока 27 В возможно исключить, так как они не являются основными СГЭ ЛА. В этом случае матрица *X* представляется в виде:

$$X_{2} = \begin{bmatrix} X_{11}X_{12}X_{13}X_{14}X_{21}X_{22}X_{23}X_{24} \\ X_{31}X_{32}X_{33}X_{34}X_{41}X_{42}X_{43}X_{44} \end{bmatrix}.$$
 (2.3)

В этом случае матрица У представляется в виде (2.4).

$$Y = \begin{bmatrix} X_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & X_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & X_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & X_{21} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X_{23} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X_{24} & \\ \dots & & & & \\ X_{24} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & X_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & X_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & X_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_{21} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_{21} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X_{23} \end{bmatrix} ,$$

$$(2.4)$$

Таким образом, итоговая матрица *Y* является структурной моделью магистральной СГЭ ЛА с ВПМ, описывающей все возможные варианты построения СГЭ ЛА с ВПМ. Полученная матрица является входной моделью для СГЭ ЛА, в рамках которой каждая из возможных структур СГЭ посредством представленного далее многодисциплинарного алгоритма проектирования СГЭ рассчитывается и сравнивается по заданным критериям.

Необходимо отметить, что матрица Y не учитывает то, что одинаковые уровни напряжения и мощности могут быть получены разными типами СГЭ, и это в свою очередь будет влиять на массовые характеристики СГЭ. Например, как видно из рисунка 2.1, СГЭ с напряжением 115/200 В, 400 Гц возможно получить как с интегрированного ЭГ, так и с привода постоянной частоты, при этом масса данных СГЭ будет различна. В такой постановке задачи очевидно, что элементы матрицы Y также являются матрицами, которые описывают агрегатный характер СГЭ ЛА. В известных работах подобная постановка задачи не рассматривается, что затрудняет оптимизацию СГЭ ЛА на стадии проектирования. Хотя именно подобный подход позволяет обеспечить учет возможности параллельной реализации нескольких СГЭ ЛА при условиях многовариантности их построения. Тогда (2.4) целесообразно представить в виде (2.5).

Полученная матрица показывает все возможные структуры СГЭ ЛА на основе ЭМПЭ с ВПМ и позволяет их формализованное математическое описание, оптимизацию и проектирование при учете возможности параллельной реализации нескольких СГЭ ЛА.

При этом аналитическое решение данной структурной матрицы громоздко, поэтому далее ее решение осуществлялось в программном комплексе Matlab для конкретных параметров СГЭ ЛА в численном виде.

$$Y_{1} = \begin{bmatrix} \|P_{11}\| & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0\|X_{12}\| & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \|X_{13}\| & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \|X_{14}\| & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \|X_{21}\| & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \|X_{22}\| & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \|X_{23}\| & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \|X_{24}\| & \|X_{43}\| \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \|X_{23}\| & \|X_{44}\| \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \|X_{23}\| & \|X_{44}\| \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \|X_{23}\| & \|X_{44}\| \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \|X_{23}\| & \|X_{44}\| \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \|X_{23}\| & \|X_{44}\| \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \|X_{23}\| & \|X_{44}\| \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0$$

В выражении (2.5) $\|X_{jj}\|$ – матрицы, характеризующие агрегатные состояния первичных источников СГЭ ЛА, способные обеспечить электроэнергию одного

уровня напряжения и частоты; $\|X_{ij}\|$ – матрицы, характеризующие агрегатные состояния вторичных источников СГЭ ЛА, способные обеспечить электроэнергию одного уровня напряжения и частоты.

2.1.2 Критерии эффективности СГЭ ЛА

Каждая из структур СГЭ, входящих в структурную модель (2.4) и (2.5) должна оцениваться по ряду критериев для поиска оптимальных решений. Основными критериями, которые определяют эффективность СГЭ, являются ее полная полетная масса, надежность и качество электроэнергии на выходе из СГЭ. Также целесообразно при создании перспективных СГЭ ЛА оценивать их эффективность по критериям экономической эффективности, 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 многодисциплинарном 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.

При разработке критериев эффективности СГЭ рассматривается расчетная схема СГЭ, приведенная на рисунке 2.2.

В разработанной расчетной схеме связи имеют вариативный характер, то есть ЭГ СГЭ может охлаждаться либо топливом (для военных ЛА), либо маслом (для гражданских ЛА), либо забортным воздухом. Также и с остальными элементами рассматриваемой СГЭ. Аналогичная ситуация имеет место и со смазкой подшипниковых опор: они могут быть выполнены с консистентной смазкой, смазываться маслом или быть бесконтактными. Это влияет на ресурс СГЭ, его полетную массу и надежность.



Рисунок 2.2 – Расчетная схема СГЭ:

ЭД – электродвигатель; СУЛА – силовая установка ЛА (авиационный двигатель или ВСУ); ТН – топливный насос; МН – маслонасос; ЦРУ – центральное распределительное устройство;

 $\|X_{jj}\|, \|X_{jj}\|$ – матрицы, характеризующие агрегатные состояния СГЭ ЛА

В расчетной схеме предполагается, что силовая установка (авиационный двигатель и ВСУ) выполнены с электроприводными топливными агрегатами (топливный и масляный насос). Данные допущения являются характерными для перспективных ЛА и перспективных авиационных двигателей, например, двигатель Ultra Fan разработки Rolls Royce. Использование на данном авиационном двигателе титано-углеродного волокна, термостойкой композитной матрицы, электропривода топливных агрегатов и других инновационных технических решений, позволяет ему сократить на 75 % выбросы CO₂, на 90 % выбросы NO_x, снизить на 65 % шум авиационного двигателя.

Полную полетную массу СГЭ можно представить в следующем виде:

$$M_{\text{полк}} = \sum_{i=1}^{i=n} M_a + \sum_{i=1}^{i=n} M_o + \sum_{i=1}^{i=n} M_{2} + \sum_{i=1}^{i=n} M_n + \sum_{i=1}^{i=n} M_p, \qquad (2.6)$$

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_o – 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.

Очевидно, что конструктивная масса элемента СГЭ является функцией мощности, электромагнитных нагрузок или тока и напряжения агрегата СГЭ, частоты напряжения или частоты вращения элемента и некоторого коэффициента, который характеризует массу крепежных и конструкционных частей элемента СГЭ, а также некоторой добавочной массы, которая необходима для обеспечения отказоустойчивости СГЭ. Учет температуры при оценке массы является обязательным, так как многие элементы СГЭ (например, ЭГ с ВПМ, статический преобразователь) являются температурозависимыми элементами. Особенно очевидно это проявляется при выборе структур для интегрированных СГЭ, так как температурные условия в них отличаются от неинтегрированных СГЭ.

$$M_a = k_a f(P, B_{\delta}, I, U, f, \Theta) + f(P(A, t)), \qquad (2.7)$$

где k_a – конструктивный коэффициент; $f(P, B_{\delta}, I, U, f, \Theta)$ – масса элемента СГЭ как функция мощности, электромагнитных нагрузок, температуры и частоты вращения, P – мощность элемента СГЭ; f(P(A, t)) – масса элемента как функция надежности элемента СГЭ.

Масса хладагента характеризуется его расходом, который определяется известным выражением ($G = \frac{P_n}{c_p \rho \Delta \Theta}$). При этом потери в агрегатах СГЭ можно разделить на зависящие от частоты вращения агрегатов СГЭ (например, аэродинамические потери, потери на трение, потери на гистерезис и вихревые токи), так и независящие (например, омические потери). Подобное разложение позволяет оценивать влияние частоты вращения на полетную массу СГЭ. При этом для некоторых элементов будут иметь место только потери, зависящие от частоты вращения, например для мультипликатора, а для некоторых, например для проводов, только потери, зависящие от силы тока и напряжения элементов СГЭ. Необходимо отметить, что на величину потерь в элементах СГЭ температура оказывает также значительное влияние: она приводит к изменению электрической проводимости стали, меди, постоянных магнитов, изменяет вязкость смазки и теплофизические свойства хладагента:

$$G = \frac{P_n(f,\Theta)}{c_p \rho \Delta \Theta} + \frac{P_n(IU,\Theta)}{c_p \rho \Delta \Theta}, \qquad (2.8)$$

где $P_n(f,\Theta)$ – потери как функция частоты и температуры; $P_n(IU,\Theta)$ – потери как функция тока, напряжения и температуры элемента; c_p – удельная теплоемкость хладагента; P_n – потери, отводимые хладагентом; ρ – плотность хладагента; $\Delta\Theta$ – разность температур на входе и выходе.

80

Масса M_3 , входящая в выражение (2.8), во многом зависит от типа масла на борту ЛА, при этом необходимо помнить, что объем масла на борту ЛА является ограниченным и во время полета оно теряется на испарение легких фракций, утечек в лабиринтных уплотнениях и в выбросах, через дренажную систему. Для каждого типа ЛА устанавливается свой максимальный расход масла за время полета.

При оценке массы хладагента, потребного на функционирование определенного СГЭ, необходимо учитывать ограничения на возможность Обычно В ограничения тепловыделения хладагент. на тепловыделение закладываются в техническом задании на СГЭ и варьируются от 50 до 200 Ккал/мин, в зависимости от мощности СГЭ.

Масса элементов и смазки, необходимой для функционирования *i*-го элемента СГЭ, определяется как функция температуры данного элемента и его тепловыделений. Данная масса концентрируется в мультипликаторе, коробке агрегатов и подшипниковых узлах. Причем для подшипниковых узлов данная масса является функцией быстроходности подшипника:

$$Q_n = k_{mp} P_{{}_{\mathcal{S}\mathcal{K}\mathcal{B}}} V_{o\kappa p}, \qquad (2.9)$$

где k_{mp} – коэффициент трения подшипника; $P_{,_{3KB}}$ – эквивалентная нагрузка на подшипник; $V_{_{oKP}}$ – линейная скорость подшипника.

Масса проводов является по сути функцией температуры, протяженности СГЭ и напряжения с током. Масса $\sum_{i=1}^{i=n} M_p$, которая определяется надежностью, зависит от наличия каналов резервирования СГЭ и назначения СГЭ. В целом если используется «холодный» резерв, то есть резерв, вводимый только при отказах, полетная масса СГЭ будет равна M_a . В случае, если используется горячий резерв,

масса M_p будет определяться уровнем избыточной массы, необходимой для обеспечения перегрузки СГЭ.

В общем виде различаются два основных типа резервирования СГЭ ЛА [6]: с целой и дробной кратностью. При целой кратности считается, что отказ узла xвозможен только, когда отказали x+1 однотипных узлов. Даная кратность резервирования имеет в СЭС ЛА, которая резервируется несколькими однотипными СГЭ ЛА. В этом случае безотказность работы СГЭ ЛА определяется в виде, где x – либо количество резервируемых каналов, либо количество дублируемых элементов в агрегатах СГЭ:

$$p_{y}(t) = 1 - \prod_{i=0}^{i=x} (1 - p_{i}(t)), \qquad (2.10)$$

где $p_y(t)$ – вероятность безотказной работы энергоузла; $p_i(t)$ – вероятность безотказной работы СГЭ.

При дробном резервировании [6]:

$$P_{y}(t) = \sum_{j=1}^{n-h} c_{n}^{j} p^{n-j}(t) \left[1 - p(t)\right]^{j}.$$
(2.11)

Отказоустойчивость СГЭ ЛА достигается либо использованием дублируемых обмоток и элементов в системе управления, либо использованием многофазных систем.

Дублирование элементов внутри СГЭ является резервированием с целой кратностью, поэтому для СГЭ дублируемых элементов можно записать следующее:

$$p_{y}(t) = 1 - \prod_{i=0}^{i=x} \left(1 - \left[1 - \prod_{j=0}^{j=x} \left(1 - p_{j}(t) \right) \right] \right) = 1 - \prod_{i=0}^{i=x} \left(\prod_{j=0}^{j=x} \left(1 - p_{j}(t) \right) \right), \quad (2.12)$$

где $p_j(t)$ – вероятность безотказной работы дублируемого агрегата СГЭ ЛА.

Для резервирования внутри СГЭ ЛА с помощью многофазных ЭГ, которые обеспечивают резервирование с дробной кратностью, можно записать следующее:

$$p_{y}(t) = 1 - \prod_{i=0}^{i=x} \left(\sum_{j=1}^{n-h} c_{n}^{j} p^{n-j}(t) \left[1 - p(t) \right]^{j} \right),$$
(2.13)

где n = 3 – минимальное число фаз ЭГ с ВПМ и статического преобразователя, при котором возможно продолжение эксплуатации СГЭ ЛА; h – число фаз агрегатов

внутри СГЭ;
$$c_n^j = \frac{n!}{j!(n-j)!}; j$$
- количество агрегатов.

Таким образом, выражения (2.12), (2.13) являются выражениями для определения надежности отказоустойчивых каналов СГЭ ЛА. Благодаря использованию данных выражений появляется возможность учета многофазности и дублируемости элементов в отказоустойчивых ЭМПЭ с ВПМ СГЭ ЛА.

Тогда очевидно, что полетная масса СГЭ является функцией мощности СГЭ, его потерь, частоты вращения, времени полета и его топологической структуры. В более ранних работах полетная масса СГЭ рассматривалась только как функция частоты напряжения (не частоты вращения), мощности, напряжения и надежности. Расширение параметров, определяющих полетную массу СГЭ, позволяет в полной мере проводить эффективную оптимизацию полетной массы СГЭ, в том числе с возможностью учета СГЭ с ЭМПЭ, интегрированных в силовую установку ЛА. Например, полученный критерий позволяет учесть, что при условии интеграции ЭГ на вал высокого давления авиационного двигателя, ЭГ не имеет собственных подшипниковых опор, следовательно, и нет необходимости их смазывания. Но при этом возрастает эквивалентная нагрузка на подшипник самого авиационного двигателя за счет сил магнитного тяжения интегрированного ЭГ. Это приводит к увеличению смазки, требующейся для его функционирования.

Для введения ограничений на качество электроэнергии предлагается ввести множество *W*, которое является набором характеристик (ГОСТ 54073-2017). В частности, в данное множество вводятся уровень и пульсация напряжения, изменения частоты и другие параметры, определяющие качество электроэнергии СГЭ.

Тогда эффективность той или иной структуры структурной матрицы *Y_n*, *Y* может быть определена в виде:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{i=n} k_a f\left(P, B_{\delta}, I, U, f, \Theta\right) + f\left(P(A, t)\right) + \sum_{i=1}^{i=n} \left(\frac{P_n(f, \Theta)}{c_p \rho \Delta \Theta} + \frac{P_n(IU, \Theta)}{c_p \rho \Delta \Theta}\right) + \\ + \sum_{i=1}^{i=n} M_{\mathfrak{g}}(n_{\mathfrak{g}}) + \sum_{i=1}^{i=n} M_n + \sum_{i=1}^{i=n} M_p \to \min \\ P_{\text{yer}} = \sum_{i=1}^{i=j} P_{jj} \\ \frac{P_n(f, \Theta)}{c_p \rho \Delta \Theta} + \frac{P_n(IU, \Theta)}{c_p \rho \Delta \Theta} \leq P_{\text{orb}} \\ p_y(t) \leq p_{\text{yaal}}(t) \\ U_{\text{Bbax}jj} \in W; \Delta U_{\text{Bbax}jj} \in W; \Delta f_{\text{Bbax}jj} \in W \\ k_{ap} \to \min \end{cases}$$

$$(2.14)$$

где P_{ycr} – установленная необходимая мощность СГЭ; P_{orb} – максимальные допустимые потери, которые могут отводиться хладагентом; $U_{вых,jj};\Delta U_{выx,jj};\Delta f_{выx,jj}$ – выходная частота напряжения СГЭ, выходное напряжение и пульсации выходного напряжения СГЭ; Δk_{asp} – коэффициент аэродинамического сопротивления ЛА изза изменения габаритов СГЭ ЛА.

Выражение (2.14) позволяет оценивать эффективность того или иного СГЭ ЛА при условиях заданной надежности, качества электроэнергии, ограничений на тепловыделение. Топливная эффективность определяется влиянием СГЭ на аэродинамический коэффициент.

2.1.3 Численный анализ эффективности СГЭ ЛА

С помощью (2.14) произведем оценку эффективности нескольких типов первичных источников СГЭ ЛА, построенных на основе ЭГ с ВПМ. Рассмотрим магистральную СГЭ ЛА установленной единичной мощностью 250 кВт при частоте вращения ротора ЭГ с ВПМ 9000–12 000 об/мин, при этом рассматриваются следующие варианты: СГЭ ЛА с ЭГ, интегрированным на вал высокого давления авиационного двигателя с напряжением 230/400 В, 400 Гц, напряжением 270 В, 540 В; СГЭ ЛА с ЭГ, установленным на коробке агрегатов с напряжением 230/400 В, 400 Гц, напряжением 270 В, 540 В и СГЭ ЛА с ЭГ ВПМ, установленным с использованием привода постоянной скорости (ППС) и

регулированием напряжения с подмагничиванием спинки статора на напряжение 230/400 B, 400 Гц.

В таблице 2.1 приведена масса проводов для СГЭ с различным напряжением для установленной единичной мощности 250 кВт. Данные расчеты были выполнены при участии автора специалистами ПАО «ОДК-Авиадвигатель» при исследованиях выбора напряжения для перспективного широкофюзеляжного самолета.

Как видно из таблицы 2.1, масса провода для СГЭ мощностью 250 кВт с напряжением 115/200 В, 400 Гц практически в 2 раза больше всех конкурирующих вариантов. Это говорит о том, что использование данного напряжения для высокомощных СГЭ нецелесообразно, и поэтому далее не рассматривается.

При анализе учитываются температурные условия эксплуатации интегрированных ЭГ (200–250 °C) и неинтегрированных (55 °C), а также необходимость обеспечения отказоустойчивости интегрированных ЭГ. При этом учитывается, что у интегрированного ЭГ отсутствует необходимость смазки подшипниковых узлов, но при этом объем смазки силовой установки (ВСУ или авиационного двигателя) должен быть увеличен. Кроме того, также учитывается масса мультипликатора и масла, необходимого для его смазки.

Результаты расчета полетной массы для всех исследуемых вариантов СГЭ приведены в таблице 2.2. Необходимо отметить, что при расчетах сохранялись ограничения на надежность (надежность рассчитывалась по [215–218], при этом учитывалось, что надежность СГЭ зависит от его агрегатного состояния, частоты вращения ротора ЭГ, механической прочности и т.д. при многодисциплинарной оптимизации допускалось изменение всех параметров, которые влияют на надежность, но при этом сама надежность изделия должна была оставаться фиксированной), качество электроэнергии, указанные в выражении (2.16). Время полета при расчетах принималось равным 8 ч.

Таблица 2.1– Масса провода СГЭ едини	ичной мощностью	250 кВт
--------------------------------------	-----------------	---------

Уровень напряжения, В	115/200, 400 Гц	230/400, 400 Гц	270 B	540 B
Масса провода, кг	873	410	505	378

Из полученных результатов видно, что минимальной полетной массой, с учетом всех ограничений, обладает СГЭ ЛА на основе ЭГ с ВПМ, интегрированные в силовую установку и выполненные либо на напряжение постоянного тока 540 В, либо на 230/400 В, 400 Гц. В этом случае масса СГЭ ЛА является ниже на 40 кг по сравнению с другими вариантами. Кроме того, снижение аэродинамического коэффициента при этом позволяет снизить расход топлива ЛА на 3,2% [7]. Таким образом, очевидно, что наиболее эффективной СГЭ ЛА по критерию полетной массы является СГЭ с интегрированным ЭГ с ВПМ, выполненным на напряжение постоянного тока 540 В.

Реализация подобных СГЭ значительно ограничена коммутационной аппаратурой и требует более тщательного подхода к выбору элементной базы, коммутационной аппаратуры и т.д. Но в целом использование подобных СГЭ позволит значительно повысить эффективность ЛА в перспективе.

	$\sum_{i=1}^{i=n} M_a$	$\sum_{i=1}^{i=n} M_o$	$\sum_{i=1}^{i=n} M_{\mathfrak{s}}$	$\sum_{i=1}^{i=n} M_n$	Полетная масса	$k_{a > p}$
ЭГ интегрирован на	220	50	7	410	687	1,012
вал высокого						
давления, 230/400 В,						
400 Гц						
ЭГ интегрирован на	190	59	7	505	761	1,012
вал высокого						
давления, 270 В						
ЭГ интегрирован на	170	45	7	378	600	1,012
вал высокого						
давления, 540 В						
ЭГ на КА, 230/400 В,	230	65	16	410	721	1,045
400 Гц						
ЭГ на КА, 270 В	207	67	16	505	795	1,045
ЭГ на КА, 540 В	187	58	16	378	639	1,045
ЭГ на ППС,	239	72	18	410	739	1,049
230/400 В, 400 Гц						

Таблица 2.2 – К определению эффективности структур СГЭ ЛА

2.2 Обобщенная математическая модель электромеханических преобразователей энергии с высококоэрцитивными постоянными магнитами на упругих подшипниковых опорах

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 реализовать многодисциплинарное проектирование СГЭ ЛА, а также основой для исследования структурной модели СГЭ ЛА, полученной выше.

Исследованиям ЭМПЭ с ВПМ для ЛА посвящено множество работ, в которых заложены основы проектирования ЭМПЭ с ВПМ, исследованы и предложены различные математические модели ЭМПЭ с ВПМ [219–250]. Так, в работе [219] представлена математическая модель, описывающая электромагнитные процессы в ЭМПЭ с ВПМ с использованием метода магнитных цепей. Аналогичные математические модели представлены в работах [220-222]. Метод магнитных цепей хорошо зарекомендовал себя при предварительных инженерных расчетах, но его результаты могут расходиться с реальными характеристиками ЭМПЭ на 12–20 % [223]. Подобное расхождение является весьма существенным и не удовлетворяет современным требованиям к точности математических моделей. Также математические модели, созданные с помощью магнитных цепей, сложны в использовании для исследования динамических процессов, что ограничивает их применение. Как было показано автором в работе [224], развитие метода магнитных цепей может быть направлено на создание комбинированных магнитотепловых схем, которые позволяют учитывать и электромагнитные, и тепловые процессы в ЭМПЭ с ВПМ.

В работах [225–227] представлены различные модификации математических моделей ЭМПЭ с ВПМ на основе решения уравнений Максвелла и определения векторного потенциала. Данные математические модели обладают достаточно высокой точностью расчета магнитных полей и позволяют рассматривать в том числе и динамические режимы работы ЭМПЭ. Вместе с тем данные модели учитывают только электромагнитные процессы в ЭМПЭ с ВПМ, то есть являются узконаправленными, однодисциплинарными моделями. Как доказано в работах

[228–230], точный расчет ЭМПЭ с ВПМ невозможен без учета влияния температуры на свойства материалов на стадии расчета электромагнитных, механических процессов и учета влияния внешних магнитных полей. То есть математические модели, удовлетворяющие современным требованиям, должны быть многодисциплинарными и отражать взаимозависимость электромагнитных, механических, электрических и тепловых процессов. Однодисциплинарные модели не дают полного представления о процессах, протекающих в ЭМПЭ с ВПМ, и позволяют с достаточной точностью при верном задании начальных условий и входных параметров рассчитывать только какой-либо один режим работы ЭМПЭ в определенный момент времени или очень короткий промежуток времени при постоянных условиях окружающей среды.

В работах [231–236] описаны математические и компьютерные модели ЭМПЭ с ВПМ, получаемые методом конечных элементов с помощью специализированных программных комплексов. Данные модели в ряде случаев позволяют производить взаимосвязанные температурные и электромагнитные расчеты, в том числе в нестационарных режимах работы. При этом многодисциплинарность расчетов в данных моделях реализуется двумя способами (на примере программного комплекса Ansys):

– определение распределения магнитного поля в некотором малом временном интервале (Ansys Maxwell); расчет на основе данного распределения потерь (Ansys Maxwell); расчет на основе потерь теплового распределения (Ansys CFX); перерасчет свойств материалов в зависимости от температуры и определение распределения поля для данной температуры. Данный метод описан в работе [230] и является приближенным. Кроме того, он обладает значительной трудоемкостью и требованиями к вычислительным ресурсам.

– одновременный расчет магнитных полей (Ansys Maxwell) и температурных полей (Ansys CFX). Метод является достаточно точным, но алгоритмы для его реализации только начинают разрабатываться [233], поскольку необходимы значительные вычислительные мощности. И это ограничивает возможности его широкого применения. Теоретические основы метода представлены в докторской диссертации Ю. Б. Казакова [234].

Известные математические модели в полной мере не удовлетворяют современным задачам создания ЭМПЭ с ВПМ и СГЭ ЛА, что требует их

87

расширения и дополнения. Для этого была разработана математическая модель ЭМПЭ с ВПМ. Разработанная математическая модель позволяет реализовать предложенную идеологию комплексного многодисциплинарного проектирования ЭМПЭ с ВПМ и СГЭ ЛА на их основе в интересах минимизации времени и материальных затрат на создание СГЭ ЛА.

Обобщенная структура многодисциплинарной математической модели представлена на рисунке 2.3.

На структурной схеме обобщенной математической модели показаны параметры ЭМПЭ с ВПМ, взаимосвязь которых необходимо учитывать для обеспечения анализа процессов, протекающих в ЭМПЭ с ВПМ. На рисунке 2.3 UI – внешняя характеристика ЭМПЭ с ВПМ; T – температура активных элементов ЭМПЭ с ВПМ; $K\Gamma U$ – коэффициент гармонических искажений; X – индуктивные сопротивления ЭМПЭ с ВПМ; R – активные сопротивления: ЭM силы – электромагнитные силы.



Рисунок 2.3 – Структурная схема многодисциплинарной математической модели ЭМПЭ с ВПМ

2.2.1 Взаимовлияние электромагнитных и тепловых процессов

Для упрощения математических преобразований при анализе взаимовлияния электромагнитных и тепловых процессов используются следующие допущения:

 магнитная проницаемость окружающей среды и воздушного зазора равна магнитной проницаемости вакуума, магнитная проницаемость магнитопровода и вала учитывается введением коэффициента насыщения;

 обмотка статора представляется в виде тонкого электропроводящего слоя, распределенного по диаметру расточки магнитопровода статора; плотность индуцированных токов по толщине тонкого медного слоя постоянна;

– потери каждого элемента распределяются равномерно по этому элементу;

– аксиальная составляющая напряженности магнитного поля в торцевых поверхностях ротора равна 0, то есть рассматривается ЭМПЭ бесконечной длины;

 – влияние других агрегатов СГЭ на потери и электромагнитные процессы в ЭМПЭ с ВПМ учитывается углом нагрузки и внешней характеристикой ЭМПЭ с ВПМ.

Так как конечной целью является создание обобщенной математической модели, то уравнения Максвелла и Фурье, с учетом закона Ньютона – Рихмана рассматриваются в декартовых координатах. Также в данном случае можно учитывать влияние подшипниковых опор (механических процессов) на параметры ЭМПЭ. Механические процессы в основном рассматриваются как перемещение ротора по осям *x* и *y*. В отношении оси *z* ротор считается жестко закрепленным.

При решении поставленной задачи рассматриваются взаимозависимые электромагнитные и тепловые процессы. Поэтому при математическом моделировании необходимо учитывать и влияние системы охлаждения, эффективность которой в данном случае учитывается величиной коэффициента теплоотдачи (закон Ньютона – Рихмана). В модели предполагается, что охлаждение ЭМПЭ осуществляется по внешней поверхности статора и по воздушному зазору.

Расчетная схема ЭМПЭ с ВПМ разбита на активные зоны, при этом для каждой активной зоны решается совместно система уравнений Максвелла (описывающие электромагнитные процессы) и уравнения Фурье (описывающие тепловые процессы).

Уравнения Максвелла представляются в виде [234]:

$$\operatorname{rot}\vec{H} = \vec{j} + \vec{j}_{cr}, \quad \operatorname{rot}\vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \quad \vec{j} = \sigma \left[\vec{E} + \left(\vec{V} \times \vec{B}\right)\right], \quad \operatorname{div}\vec{B} = 0, \quad \operatorname{div}\vec{j} = 0, \quad \vec{H} = \mu_0 \vec{B}, \quad (2.15)$$

где \vec{B} – вектор магнитной индукции результирующего магнитного поля; \vec{E} , \vec{H} – вектор напряженности электрического и магнитного полей; \vec{V} – вектор скорости движения ротора; σ – электрическая проводимость обмотки статора; \vec{j} – вектор плотности индуцированных токов; $\vec{j}_{\rm er}$ – вектор плотности сторонних токов.

При исследованиях электромагнитного поля удобно использовать векторный потенциал:

$$\vec{B} = rot\vec{A}.$$
 (2.16)

При анализе уравнений Максвелла рассматриваются либо уравнения Лапласа (для зон, где отсутствуют токи, например воздушный зазор), либо уравнения Пуассона (для зоны постоянных магнитов, зоны обмотки). В общем виде для векторного потенциала можно записать следующее [234]:

$$\frac{1}{\mu_0}\nabla^2 \mathbf{A} = \mathbf{J} + \operatorname{rot}\mathbf{M} \tag{2.17}$$

Для трехмерной постановки задачи использования $div\vec{B}=0$ приводит к громоздким аналитическим решениям для векторного потенциала, поэтому в диссертации рассматривается уравнение для векторного потенциала в двухмерной постановке:

$$\frac{1}{\mu_0} \frac{\partial^2 A_z}{\partial x^2} + \frac{1}{\mu_0} \frac{\partial^2 A_z}{\partial y^2} = -J_z + \frac{\partial M_x}{\partial y} - \frac{\partial M_y}{\partial x}, \qquad (2.18)$$

Математическое описание постоянных магнитов представляется в виде зависимости коэрцитивной силы ВПМ, остаточной индукции и намагниченности [234]:

$$\vec{\mathbf{B}} = \mu \mu_0 \left(\vec{\mathbf{M}} + \vec{\mathbf{H}} \right), \tag{2.19}$$

где *м*- вектор намагниченности ВПМ; *µ*- магнитная проницаемость ВПМ.

Известно, что свойства ВПМ в значительной степени зависят от температуры:

$$B_{r}(\Theta) = B_{r0} \left(1 - \frac{k_{Br}(\Theta_{\rm PM} - 20)}{100} \right), \tag{2.20}$$

$$H_{c}(\Theta) = H_{c0} \left(1 - \frac{k_{Hc}(\Theta_{\rm PM} - 20)}{100} \right), \tag{2.21}$$

$$\mu = \frac{\mu_0 H_{c0} \left(1 - \frac{k_{Hc} (\Theta_{\rm PM} - 20)}{100} \right)}{B_{r0} \left(1 - \frac{k_{Br} (\Theta_{\rm PM} - 20)}{100} \right)}.$$
(2.22)

где $B_r(\Theta), H_C(\Theta)$ – значения остаточной индукции и коэрцитивной силы ВПМ при действующей температуре соответственно; B_{r0}, H_{C0} – значение остаточной индукции и коэрцитивной силы ВПМ, указанные в технических характеристиках соответственно; Θ_{PM} – температура ВПМ; k_{Br} – температурный коэффициент по индукции; k_{Hc} – температурный коэффициент по напряженности.

Исследования численных параметров температурных коэффициентов будут выполнены в главе 3.

Тогда намагниченность ВПМ, в зависимости от температуры, представляется в виде:

$$\vec{\mathbf{M}}(x, y, \Theta_{\rm PM}) = \frac{B_{r_0}^2(x, y) \left(1 - \frac{k_{Br}(\Theta_{\rm PM} - 20)}{100}\right)^2}{\mu_0^2 H_{c_0}(x, y) \left(1 - \frac{k_{Hc}(\Theta_{\rm PM} - 20)}{100}\right)} - H_{c_0}(x, y) \left(1 - \frac{k_{Hc}(\Theta_{\rm PM} - 20)}{100}\right). \quad (2.23)$$

Уравнения Фурье для каждой рассматриваемой зоны имеют свою интерпретацию: для изотропных и анизотропных тел. Для изотропных тел с внутренним источником теплоты (обмотка статора, бандаж ротора, нешихтованный вал) [235]:

$$\frac{d\Theta}{dt} = \frac{\lambda}{c\rho} \left(\frac{\partial^2 \Theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial z^2} \right) + \frac{q_{\nu}}{c\rho}, \qquad (2.24)$$

где Θ – температура тела; q_v – удельная мощность теплоты внутреннего источника; c – удельная теплоемкость; λ – теплопроводность тела.

Для анизотропных тел [235, 236]:

$$\frac{d\Theta}{dt} = \frac{1}{c\rho} \left(\lambda_x \frac{\partial^2 \Theta}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 \Theta}{\partial y^2} + \lambda_z \frac{\partial^2 \Theta}{\partial z^2} + q_v \right).$$
(2.25)

При анализе взаимовлияния тепловых и магнитных полей рассматриваются стационарное магнитное и тепловое поля. Важно отметить, что все представленные решения возможны и для динамических режимов. При этом рассматривается расчетная схема, рисунок 2.4.



Рисунок 2.4 – Расчетная схема ЭМПЭ с ВПМ

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

$$-\frac{q_{\nu Cu}}{\lambda_{Cu}} = \frac{\partial^2 \Theta_{Cu}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Theta_{Cu}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Theta_{Cu}}{\partial z^2}, \qquad (2.26)$$

где $_{\Theta_{Cu}}$ – температура обмотки; $q_{_{v_{cu}}}$ – удельная мощность теплоты обмотки; λ_{cu} – теплопроводность тела.

Очевидно, что удельная мощность тепловыделения обмотки определяется квадратом тока и проводимостью:

$$q_{wu} = \frac{\dot{J}_z^2}{\sigma}.$$
(2.27)

Тогда, подставив в выражение (2.26) выражение (2.27), имеем:

$$-\frac{j_z^2}{\lambda_{cu}\sigma} = \frac{\partial^2 \Theta_{cu}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Theta_{cu}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Theta_{cu}}{\partial z^2}.$$
 (2.28)

Или в более общем виде:

$$-j_z \frac{j_z}{\lambda_{cu}\sigma} = \nabla^2 \Theta_{cu} \,. \tag{2.29}$$

Так как рассматривается область I, заданная токовым слоем, уравнения векторного потенциала для зоны I:

$$\frac{1}{\mu_0} \frac{\partial^2 A_z}{\partial x^2} + \frac{1}{\mu_0} \frac{\partial^2 A_z}{\partial y^2} = -j_z.$$
(2.30)

Совместив (2.29) и (2.30), получим:

$$\frac{j_z}{\lambda_{cu}\sigma} \left(\frac{1}{\mu_0} \frac{\partial^2 A_z}{\partial x^2} + \frac{1}{\mu_0} \frac{\partial^2 A_z}{\partial y^2} \right) = \frac{\partial^2 \Theta_{cu}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Theta_{cu}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Theta_{cu}}{\partial z^2}.$$
 (2.31)

Так как рассматривается ЭМПЭ бесконечной длины, $\frac{\partial^2 \Theta_{cu}}{\partial z^2} = 0$ и

$$\frac{\partial^2 \Theta_{cu}}{\partial x^2} - \frac{j_z}{\lambda_{cu} \sigma \mu_0} \frac{\partial^2 A_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Theta_{cu}}{\partial y^2} - \frac{j_z}{\lambda_{cu} \sigma \mu_0} \frac{\partial^2 A_z}{\partial y^2} = 0.$$
(2.32)

Таким образом, выражение (2.32) показывает взаимосвязь магнитных и тепловых полей. При этом, вводя в выражение (2.32) вектор скорости (выражая его через перемещения по координатам *x*, *y*) и раскладывая его по координатам, можно выразить зависимость параметров ЭМПЭ от механических процессов ротора (колебаний, вибраций и т.д.). Также выражение (2.33) демонстрирует связь законов электромагнетизма, описанных уравнениями Максвелла, и уравнений теплопроводности (уравнениями Фурье). Из выражения (2.32) можно сделать вывод, что тепловое и магнитное поля ЭМПЭ с ВПМ необходимо рассматривать только совместно.

Решение уравнения (2.32), которое будет приведено в главе 3, с учетом нелинейности температурных зависимостей возможно только численными методами.

Для решения уравнения (2.32) целесообразно использовать граничные условия 3 рода для температурных полей и метод разделения переменных. В этом случае для уравнения Фурье можно записать следующее:

$$\frac{\partial \Theta_{cu}}{\partial x} + \frac{\alpha}{\lambda_{cu}}\Big|_{x=x_1} = 0$$

$$\frac{\partial \Theta_{cu}}{\partial y} + \frac{\alpha}{\lambda_{cu}}\Big|_{y=y_4} = 0$$
(2.33)

Благодаря симметричности теплового поля

$$\frac{\partial \Theta_{cu}}{\partial x}\Big|_{x=0} = 0$$

$$\frac{\partial \Theta_{cu}}{\partial y}\Big|_{y=0} = 0$$
(2.34)

где α – коэффициент теплоотдачи для поверхности охлаждения.

Далее рассмотрим 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 уравнение для векторного потенциала с учетом температурной зависимости намагниченности может быть представлено в виде:

$$\frac{1}{\mu_0}\frac{\partial^2 A_z}{\partial x^2} + \frac{1}{\mu_0}\frac{\partial^2 A_z}{\partial y^2} = -j_{zpm} + \frac{\partial M\left(\Theta_{\rm PM}\right)_x}{\partial y} - \frac{\partial M\left(\Theta_{\rm PM}\right)_y}{\partial x}.$$
(2.35)

Уравнение Фурье для зоны III:

$$-q_{vpm} = \lambda_{pmx} \frac{\partial^2 \Theta_{PM}}{\partial x^2} + \lambda_{pmy} \frac{\partial^2 \Theta_{PM}}{\partial y^2} + \lambda_{pmz} \frac{\partial^2 \Theta_{PM}}{\partial z^2}, \qquad (2.36)$$

где Θ_{PM} – температура ВПМ; q_{vcu} – удельная мощность теплоты ВПМ; γ_{prx} – теплопроводность ВПМ по различным осям.

При формировании уравнения (2.37), а также при его решении необходимо учитывать, что ВПМ обладают температурной анизотропией. Для ВПМ на основе сплава *SmCo* теплопроводность по осям может отличаться в 2–4 раза, для *NdFeB* – более чем в 5 раз.

Очевидно, что удельная мощность теплоты, выделяемой в BПМ, определяется квадратом плотности вихревых токов, наводимых в них:

$$q_{\alpha u} = \frac{\dot{J}_{\rm qm}^2}{\sigma_{\rm PM}}.$$
 (2.37)

Детально анализ потерь в ВПМ ротора на вихревые токи будет приведен в следующих главах. Запишем совместно выражения (2.35) и (2.36):

$$\left(\frac{1}{\mu_0}\frac{\partial^2 A_z}{\partial x^2} + \frac{1}{\mu_0}\frac{\partial^2 A_z}{\partial y^2} - \frac{\partial M\left(\Theta_{\rm PM}\right)_x}{\partial y} + \frac{\partial M\left(\Theta_{\rm PM}\right)_y}{\partial x}\right)\frac{j_{zpm}}{\sigma_{\rm PM}} = \lambda_{\rm pmx}\frac{\partial^2 \Theta_{\rm PM}}{\partial x^2} + \lambda_{\rm pmy}\frac{\partial^2 \Theta_{\rm PM}}{\partial y^2}$$
(2.38)

ИЛИ

$$\lambda_{pmx} \frac{\partial^{2} \Theta_{PM}}{\partial x^{2}} + \lambda_{pmy} \frac{\partial^{2} \Theta_{PM}}{\partial y^{2}} - \frac{j_{zpm}}{\sigma_{PM} \mu_{0}} \frac{\partial^{2} A_{z}}{\partial x^{2}} - \frac{j_{zpm}}{\sigma_{PM} \mu_{0}} \frac{\partial^{2} A_{z}}{\partial y^{2}} + \frac{j_{zpm}}{\sigma_{PM} \mu_{0}} \frac{\partial M \left(\Theta_{PM}\right)_{x}}{\partial x} + \frac{j_{zpm}}{\sigma_{PM} \mu_{0}} \frac{\partial M \left(\Theta_{PM}\right)_{y}}{\partial x} = 0$$

$$(2.39)$$

Из выражения (2.39) видно, что зона III, в отличие от зоны I, имеет крайне сложную взаимозависимость температурных и магнитных полей. Данная сложность, как видно из (2.39), 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 являются переходными и могут продолжаться до достижения установившегося температурного режима.

Граничные условия, которые применяются к выражениям (2.40), (2.41), аналогичны выражениям (2.32) и (2.33), за исключением того, что на границе ВПМ задаются условия постоянства температуры (граничные условия 1 рода).

Таким образом, очевидно, что выражения (2.32) и (2.39) описывают теплообмен между активными элементами ЭМПЭ, нагрев ЭМПЭ за счет выделяемых потерь, электромагнитные характеристики ЭМПЭ и взаимозависимость тепловых и магнитных полей ЭМПЭ.

Наиболее сложным при решении поставленной задачи является оценка взаимозависимости полей для области II (воздушный зазор). В этом случае уравнение для векторного потенциала принимает вид:

$$\frac{1}{\mu_0} \frac{\partial^2 A_z}{\partial x^2} + \frac{1}{\mu_0} \frac{\partial^2 A_z}{\partial y^2} = 0.$$
(2.40)

Уравнение Фурье для зоны II:

$$\frac{-q_{\text{vair}}}{\lambda_{\text{air}}} = \frac{\partial^2 \Theta_{\text{air}}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Theta_{\text{air}}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Theta_{\text{air}}}{\partial z^2}, \qquad (2.41)$$

где θ_{air} – температура ВПМ; q_{vair} – удельная мощность теплоты в воздушном зазоре; λ_{air} – теплопроводность воздуха.

Удельная мощность теплоты в данном случае определяется не электромагнитными полями, а механическими характеристиками ЭМПЭ: частотой вращения, коэффициентом трения, диаметром ротора и величиной воздушного зазора.

Поэтому взаимозависимость теплового и электромагнитного полей в воздушном зазоре характеризуется граничными условиями, определяемыми из решения уравнений (2.32) и (2.39). При решении данных уравнений определяются температуры на границах $y = y_3$ и $y = y_2$, которые определяются взаимозависимостью магнитного и теплового полей. При этом важно отметить, что область воздушного зазора является основной областью для учета механических процессов (динамики ротора, механической прочности и аэродинамических потерь). Для полного решения полученных уравнений необходимо получить решения для электромагнитных процессов в ЭМПЭ с ВПМ и учесть механические процессы.

Важно отметить, что полученные математические выкладки показывают, что ЭМПЭ с ВПМ может генерировать электрическую энергию при неподвижном роторе и изменяющейся во времени температуре. Очевидно, что скорость изменения температуры ВПМ много меньше скорости вращения ЭМПЭ. Но в то же время доказанное свойство ЭМПЭ с ВПМ может быть использовано при создании различных типов датчиков и микротермоэлектрических генераторов [237].

2.2.2 Обобщенная математическая модель ЭМПЭ с ВПМ с учетом механической модели ЭМПЭ

При разработке обобщенной математической модели, описывающей ЭМПЭ с ВПМ как элемент СГЭ ЛА с учетом механических процессов, рассматривается жесткий недеформируемый ротор на упругих подшипниковых опорах. В качестве упругих подшипниковых опор (ПО) могут выступать активные магнитные подшипники, газовые подшипники или гибридные магнитные подшипники (ГМП).

Эффективность использования ГМП доказана автором в рамках кандидатской диссертации [238] и в работах [239–250]. Ротор массой *m_p* установлен на двух опорах (рисунок 2.5); статическая неуравновешенность массы ротора характеризуется эксцентриситетом *e*, динамическая – угловым параметром β.



Рисунок 2.5 – Расчетная схема ротора ЭМПЭ с ВПМ на упругих подшипниковых опорах

В качестве ЭМПЭ при разработке математической модели рассматривается неявнополюсная ЭМПЭ с ВПМ.

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 $k_{\rm kp}$, полученным выше;

 – для обеспечения минимальных аэродинамических потерь ЭМПЭ воздушный зазор ЭМПЭ равен воздушному зазору подшипниковых опор;

— обмотка статора представляется в виде тонкого электропроводящего слоя, распределенного по диаметру расточки магнитопровода статора, влияние лобовых частей учитывается введением коэффициента k_{n} ;

плотность индуцированных токов по толщине тонкого медного слоя постоянна;

– аксиальная составляющая напряженности магнитного поля в торцевых поверхностях ротора равна 0, то есть рассматривается ЭМПЭ бесконечной длины;

– перемещение ротора измеряется датчиками смещения;

 – влияние других агрегатов СГЭ на потери и электромагнитные процессы в ЭМПЭ с ВПМ учитывается углом нагрузки и внешней характеристикой ЭМПЭ с ВПМ.

Входными параметрами разрабатываемой математической модели являются свойства материалов (свойства постоянных магнитов, свойства электротехнической стали, предел прочности бандажной оболочки ротора), частота вращения и номинальная мощность ЭМПЭ, тип подшипниковых опор, предельная геометрия ЭМПЭ, тип системы охлаждения и условия охлаждения.

Ограничениями математической модели являются предельные рабочие температуры материалов активных элементов ЭМПЭ с ВПМ (температура магнитов, температура изоляции обмоточного провода), параметры, оговоренные в ГОСТ Р 54073-2017 в части требований к качеству электроэнергии, номинальному напряжению на выходе СГЭ и частоте на выходе СГЭ, температура хладагента на выходе из СГЭ и объем тепла, отдаваемого в хладагент (в ккал/мин), ограничения на удельную мощность и предельные габаритные размеры ЭМПЭ, указанные в техническом задании.

При решении поставленной задачи находится совместное решение нескольких систем уравнений:

 – системы уравнений, описывающих электромагнитные процессы в ЭМПЭ (системой уравнений Максвелла для медленно движущихся сред):

математической модели, описывающей механическое движение ротора
 [251, 252]:

$$m_1 \ddot{x}_1 - m_{12} \ddot{x}_2 + h_0 (\dot{y}_1 - \dot{y}_2) = Q_{1m} + Q_1 + Q_{1\nu}(t), \qquad (2.42)$$

$$m_1 \ddot{y}_1 - m_{12} \ddot{y}_2 - h_0 (\dot{x}_1 - \dot{x}_2) = Q_{2m} + Q_2 + Q_{2\nu}(t), \qquad (2.43)$$

$$-m_{12}\ddot{x}_1 + m_2\ddot{x}_2 - h_0(\dot{y}_1 - \dot{y}_2) = Q_{3m} + Q_3 + Q_{3\nu}(t), \qquad (2.44)$$

$$-m_{12}\ddot{y}_{1} - m_{2}\ddot{y}_{2} + h_{0}(\dot{x}_{1} - \dot{x}_{2}) = Q_{4m} + Q_{4} + Q_{4\nu}(t), \qquad (2.45)$$

где $Q_{1m} - Q_{4m}$ - силы реакции опор; $Q_1 - Q_4$ - внешние силы, определяющие характер движения ротора, в том числе должны учитываться и силы одностороннего магнитного тяжения ЭМПЭ с ВПМ;

$$Q_{1v}(t) = \frac{m_{p}e\omega^{2}}{l_{e}}(z_{2}\cos\omega t) - \frac{(J_{1} - J_{3})e\omega^{2}}{l_{e}}(\sin\omega t);$$

$$Q_{2v}(t) = \frac{m_{p}e\omega^{2}}{l_{e}}(z_{2}\sin\omega t) - \frac{(J_{1} - J_{3})e\omega^{2}}{l_{e}}(-\cos\omega t);$$

$$Q_{3v}(t) = \frac{m_{p}e\omega^{2}}{l_{e}}(-z_{1}\cos\omega t) - \frac{(J_{1} - J_{3})e\omega^{2}}{l_{e}}(-\sin\omega t);$$

$$Q_{4v}(t) = \frac{m_{p}e\omega^{2}}{l_{e}}(-z_{1}\sin\omega t) - \frac{(J_{1} - J_{3})e\omega^{2}}{l_{e}}(\cos\omega t);$$
(2.46)

где e – эксцентриситет ротора; $m_{\rm B}$ – масса вала с ротором; $l_{\rm B}$ – длина вала ротора; ω – частота вращения ротора; J_1 – экваториальный момент инерции вала; J_3 – осевой

момент инерции вала; $m_1 = \frac{J_1 + m_e z_2^2}{l_e^2}$, $m_{12} = \frac{J_1 + m_e z_1 z_2}{l_e^2}$, $m_2 = \frac{J_1 + m_e z_1^2}{l_e^2} - изменение$

массы ротора; $h_0 = \frac{J_3 \omega}{{l_B}^2}$ – гироскопический коэффициент; x_1, x_2, y_1, y_2 – радиальные смещения вала в упругой подшипниковой опоре; z_1, z_2 – осевая координата первого и второго подшипника; $\ddot{x}_1, \ddot{x}_2, \ddot{y}_1, \ddot{y}_2$ – вторые производные от перемещений по времени.

Для общего анализа физических процессов в ЭМПЭ с ВПМ разрабатываемая математическая модель должна учитывать зависимость параметров магнитного поля в рабочем зазоре ЭМПЭ от температуры, полученную в параграфе 2.2.1.

При анализе электромагнитных процессов предполагается, что результирующее магнитное поле определяется суммой двух магнитных полей (поля ротора и поля статора):

$$\vec{H} = \vec{H}_1 + \vec{H}_2, \tag{2.47}$$

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2. \tag{2.48}$$

Решая систему уравнений Максвелла относительно напряженности поля реакции якоря, имеем следующее:

$$\Delta \vec{H}_2 - \mu_0 \sigma \left(\frac{\mathrm{d}\vec{H}_2}{\mathrm{d}t} - \operatorname{rot}\left(\vec{V} \times \vec{H}_2\right) \right) = -\mu_0 \sigma \left(\frac{\mathrm{d}\vec{H}_1}{\mathrm{d}t} - \operatorname{rot}\left(\vec{V} \times \vec{H}_1\right) \right).$$
(2.49)

При решении уравнения (2.49) обычно принимается, что ротор ЭМПЭ обладает одной степенью свободы, и его скорость не зависит от системы координат.

Принятие данного допущения, согласно представленной в главе 1 классификации ЭМПЭ с ВПМ, значительно ограничит использование разрабатываемой математической модели. Это обусловлено тем, что в ЭМПЭ с ВПМ СГЭ ЛА, в особенности в их частном случае – высокооборотных ЭМПЭ с ВПМ для короткоресурсных СГЭ ЛА, эффективным является применение бесконтактных упругих подшипниковых опор (газовых или магнитных). Высокооборотные ЭМПЭ в основном предназначены для объектов, обладающих коротким жизненным циклом.

При рассмотрении ЭМПЭ на упругих подшипниковых опорах ротор обладает пятью степенями свободы, в связи с чем допущение об одной степени свободы при решении для ЭМПЭ на упругих подшипниковых опорах будет ошибочным.

Поэтому представим $\operatorname{rot}(\vec{V} \times \vec{H}_2)$ в виде:

$$\operatorname{rot}\left(\vec{V}\times\vec{H}_{2}\right) = \left(\vec{H}_{2}\cdot\nabla\right)\vec{V} - \left(\vec{V}\cdot\nabla\right)\vec{H}_{2} + \vec{V}\operatorname{div}\vec{H}_{2} - \vec{H}_{2}\operatorname{div}\vec{V}, \qquad (2.50)$$

$$\operatorname{rot}\left(\vec{V}\times\vec{H}_{1}\right) = \left(\vec{H}_{1}\cdot\nabla\right)\vec{V} - \left(\vec{V}\cdot\nabla\right)\vec{H}_{1} + \vec{V}\operatorname{div}\vec{H}_{1} - \vec{H}_{1}\operatorname{div}\vec{V}, \qquad (2.51)$$

где ∇-оператор Гамильтона.

Так как div $\vec{H}_2 = 0$, div $\vec{H}_1 = 0$:

$$\operatorname{rot}\left(\vec{V}\times\vec{H}_{2}\right) = \left(\vec{H}_{2}\cdot\nabla\right)\vec{V} - \left(\vec{V}\cdot\nabla\right)\vec{H}_{2} - \vec{H}_{2}\operatorname{div}\vec{V}, \qquad (2.52)$$

$$\operatorname{rot}\left(\vec{V}\times\vec{H}_{1}\right) = \left(\vec{H}_{2}\cdot\nabla\right)\vec{V} - \left(\vec{V}\cdot\nabla\right)\vec{H}_{2} - \vec{H}_{2}\operatorname{div}\vec{V}. \qquad (2.53)$$

$$\Delta \vec{H}_{2} - \mu_{0} \sigma \left(\frac{\mathrm{d}\vec{H}_{2}}{\mathrm{d}t} - \left(\left(\vec{H}_{2} \cdot \nabla \right) \vec{V} - \left(\vec{V} \cdot \nabla \right) \vec{H}_{2} - \vec{H}_{2} \mathrm{div} \vec{V} \right) \right) =$$

$$= -\mu_{0} \sigma \left(\frac{\mathrm{d}\vec{H}_{1}}{\mathrm{d}t} - \left(\left(\vec{H}_{1} \cdot \nabla \right) \vec{V} - \left(\vec{V} \cdot \nabla \right) \vec{H}_{1} - \vec{H}_{1} \mathrm{div} \vec{V} \right) \right)$$

$$(2.54)$$

Из векторного анализа известно, что:

$$\left(\vec{H}_{1}\cdot\nabla\right)\vec{V} = H_{x1}\frac{\partial\vec{V}}{\partial x} + H_{y1}\frac{\partial\vec{V}}{\partial y} + H_{z1}\frac{\partial\vec{V}}{\partial z},\qquad(2.55)$$

$$\left(\vec{V}\cdot\nabla\right)\vec{H} = V_x\frac{\partial\vec{H}}{\partial x} + V_y\frac{\partial\vec{H}}{\partial y} + V_z\frac{\partial\vec{H}}{\partial z}.$$
(2.56)

При проектировании ЭМПЭ с упругими опорами удобно оперировать переменными в декартовой системе координат. При этом при вычислении магнитных полей необходимо учитывать результаты для криволинейного воздушного зазора, полученные выше.

Тогда можно записать следующее:

$$\begin{split} \Delta \vec{H}_{2} &- \mu_{0} \sigma \left(\frac{\mathrm{d}\vec{H}_{2}}{\mathrm{d}t} - \left(-\vec{H}_{2} \mathrm{div}V + \left(H_{x2} \frac{\partial \vec{V}}{\partial x} + H_{y2} \frac{\partial \vec{V}}{\partial y} + H_{z2} \frac{\partial \vec{V}}{\partial z} \right) - \\ &- \left(V_{x} \frac{\partial \vec{H}_{2}}{\partial x} + V_{y} \frac{\partial \vec{H}_{2}}{\partial y} + V_{z} \frac{\partial \vec{H}_{2}}{\partial z} \right) \right) \right) = \\ &= - \mu_{0} \sigma \left(\frac{\mathrm{d}\vec{H}_{1}}{\mathrm{d}t} - \left(-\vec{H}_{1} \mathrm{div}\vec{V} + \left(H_{x1} \frac{\partial \vec{V}}{\partial x} + H_{y1} \frac{\partial \vec{V}}{\partial y} + H_{z1} \frac{\partial \vec{V}}{\partial z} \right) - \\ &- \left(V_{x} \frac{\partial \vec{H}_{2}}{\partial x} + V_{y} \frac{\partial \vec{H}_{2}}{\partial y} + V_{z} \frac{\partial \vec{H}_{2}}{\partial z} \right) \right) \right) \end{split}$$

$$(2.57)$$

Допускается, что в направлении оси *z* ротор жестко закреплен:

$$\Delta \vec{H}_{2} - \mu_{0} \sigma \left(\frac{d\vec{H}_{2}}{dt} - \left(-\vec{H}_{2} \operatorname{div} V + \left(H_{x2} \frac{\partial \vec{V}}{\partial x} + H_{y2} \frac{\partial \vec{V}}{\partial y} \right) - \left(V_{x} \frac{\partial \vec{H}_{2}}{\partial x} + V_{y} \frac{\partial \vec{H}_{2}}{\partial y} \right) \right) \right)$$

$$= -\mu_{0} \sigma \left(\frac{d\vec{H}_{1}}{dt} - \left(-\vec{H}_{1} \operatorname{div} \vec{V} + \left(H_{x1} \frac{\partial \vec{V}}{\partial x} + H_{y1} \frac{\partial \vec{V}}{\partial y} + H_{z1} \frac{\partial \vec{V}}{\partial z} \right) - \left(V_{x} \frac{\partial \vec{H}_{2}}{\partial x} + V_{y} \frac{\partial \vec{H}_{2}}{\partial y} + V_{z} \frac{\partial \vec{H}_{2}}{\partial z} \right) \right) \right)$$

$$(2.58)$$

100

Таким образом, совокупность представленных выражений является обобщенным математическим описанием ЭМПЭ с ВПМ на упругих подшипниковых опорах.

Для решения данного уравнения также необходимо решение уравнений Максвелла для первичного магнитного поля в воздушном зазоре, которые приведены в главе 3.

Необходимо отметить, что полученные математические модели были подвергнуты различным уровням верификации для обеспечения необходимой точности. Верификация была выполнена в виде решения формализованной символьной задачи с использованием программного комплекса Matlab и Wolfram Alpha, в рамках которой была проверена правильность полученных результатов. Результаты данной проверки представлены в работе [239]. Следующим уровнем верификации была проверка физической сущности моделей с помощью метода конечных элементов, после чего проводилась экспериментальная верификация.

2.3 Алгоритм многодисциплинарного проектирования СГЭ

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 проектирования СГЭ ЛА.

Разработанный алгоритм СГЭ приведен на рисунке 2.6. Он состоит из 14 шагов, каждый из которых подразумевает проведение в том числе и итерационных расчетов по различным методикам и математическим моделям – как известным, так и разработанным 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 предлагаемом алгоритме 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,

101

которые удовлетворяют поставленным ограничениям. В том числе определяется тип ЭГ, тип преобразователей и ТВУ для СГЭ.



Рисунок 2.6 – Многодисциплинарный алгоритм проектирования СГЭ ЛА

Известные алгоритмы проектирования авиационных каналов генерирования ограничены в подобных подходах. В предложенном алгоритме 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 алгоритма функции (2.15) позволяет выбрать оптимальную структуру СГЭ. Оптимизация агрегатов в предлагаемом алгоритме проводится с помощью генетических алгоритмов по критерию минимальных массогабаритных показателей, тепловыделений и гармонических искажений в системе. Так как поставленная оптимизационная задача является многокритериальной, многопараметрической, то ее решение осуществляется при помощи метода Парето. В результате данной структурной оптимизации определяется величина оптимального напряжения внутри СГЭ, и исходя из этого уже проектируются ЭГ, статический преобразователь и ТВУ.

В результате 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 ЭГ ТВУ. После проектирования И трансформатора каждого этапа многодисциплинарного проектирования отдельного объекта СГЭ проверяется оптимальность СГЭ в целом, и если СГЭ не оптимальна, то производятся Количество расчеты. итерационных циклов итерационные определяется сходимостью получаемых результатов. Именно такой подход обеспечивает оптимальность всей СГЭ по завершению процедуры проектирования.

Необходимо отметить, что основным элементом предлагаемого алгоритма является многодисциплинарная модель ЭГ с ВПМ, которая должна учитывать взаимозависимость тепловых, электромагнитных и механических процессов (данная модель приведена в разделе 2.2), а также структурная модель СГЭ ЛА, которая позволяет осуществить математическую формализацию возможных структур СГЭ ЛА (приведена выше), а также оптимизационная функция, позволяющая оценивать эффективность той или иной структуры СГЭ ЛА (выражение (2.16)). Именно многодисциплинарность обеспечивает минимизацию времени проектирования, так как расчеты ведутся совместно.

103

Многодисциплинарное проектирование ЭГ является основополагающим звеном в предлагаемом алгоритме, так как именно параметры ЭГ являются функциями ограничения при проектировании остальных агрегатов СГЭ.

Следующим шагом алгоритма 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, оценивается качество электроэнергии, ее 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 испытаниях.

Далее представлены исследования предложенного алгоритма и методологии, приведенной в главе 6, на примере реализации маломощной СГЭ ЛА с напряжением 27 В постоянного тока. На рисунке 2.1 СГЭ имеет индекс P₅₅. При этом создаваемая СГЭ состоит из ЭГ с ВПМ с частотой вращения ротора 12 000 об/мин, мощность системы составляет не более 20 кВт. Данная СГЭ была разработана при участии автора, результаты экспериментальных исследований данной СГЭ приведены в главе 7, акт об испытаниях представлен в приложениях к диссертации. (Приложение 6)

2.3.1 Многодисциплинарное создание маломощной СГЭ ЛА

Так как рассматриваемый ЭГ с ВПМ является частью СГЭ постоянного тока, то он может иметь любую частоту и уровень напряжения, так как эти величины преобразуются в ТВУ в постоянный ток с уровнем напряжения 27 В. Ограничения на эти параметры установлены только на выходе из канала генерирования. Поэтому первым этапом перед многодисциплинарным проектированием СГЭ было определение частоты и напряжения внутри СГЭ. Для этого решалась задача выбора числа полюсов ЭГ с ВПМ и выбора уровня выходного напряжения ЭГ с ВПМ и

104

входного напряжения трансформатора ТВУ. В известных работах данная задача решается только для ЭГ с ВПМ.

Но так как в рассматриваемом случае частота и уровень напряжения ЭГ с ВПМ будут влиять на массу и КПД трансформатора ТВУ, то при выборе числа полюсов и выходного напряжения ЭГ с ВПМ рассматривались также изменения массы ТВУ, массы СГ и их КПД.

Очевидно, что для решения данной задачи необходимо определить тип трансформатора ТВУ. Трансформатор ТВУ должен обладать следующими основными характеристиками: минимальной массой, максимальным КПД и минимальным коэффициентом гармонических искажений. Исходя из этих требований, был выбран 12-пульсный трансформатор с магнитопроводом из аморфного железа. Аморфное железо применяется для минимизации потерь в магнитопроводе трансформатора. Соединение обмоток высокого напряжения «звезда», соединение обмоток низкого напряжения «звезда» и «треугольник».

Задача выбора выходного напряжения ЭГ с ВПМ и трансформатора ТВУ решалась с помощью оптимизации методами генетических алгоритмов. Так как уровень выходного напряжения сам по себе не влияет на коэффициент гармонических искажений ЭГ с ВПМ и трансформатора ТВУ, то в качестве критерия оптимизации была выбрана минимальная масса и минимальные тепловыделения СГЭ. Для обобщения результатов оптимизации данные критерии были сведены в один обобщенный критерий (К), который представлял собой произведение теплового фактора ЭГ с ВПМ и массы ЭГ с ВПМ с трансформатором ТВУ. На рисунке 2.7 приведены полученные результаты оптимизации СГЭ.



Рисунок 2.7 – Результаты оптимизации напряжения СГЭ

2.3.2 Комплексная оптимизация ЭГ с ВПМ и трансформатора ТВУ

Решение оптимизационной задачи выполняется с использованием генетических алгоритмов по следующей методике оптимизации (рассматривается на примере ЭМПЭ с ВПМ, для ТВУ и СГЭ ЛА методика имеет аналогичный вид):

1. Задаются первоначальные, желаемые характеристики ЭМПЭ. В частности, необходимо задать мощность ЭМПЭ, его тип, напряжение питания или выходное напряжение, частоту вращения ротора, а также желаемые массогабаритные показатели ЭМПЭ и геометрические размеры. Все эти исходные параметры формируют три исходных множества начальных параметров ЭМПЭ. Общих (число пар полюсов, мощность, частоту вращения, конструктивную схему, напряжение питания, температуру окружающей среды) – $(x_1...x_i) \in X_0$; свойств материалов, в том числе их температурные зависимости и механические свойства – $(m_1...m_i) \in M_0$; начальных геометрических размеров– $(r_1...r_i) \in R_0$. Множество R_0 дополняется размерами ЭМПЭ на последующем этапе.

2. Исходя из начальных параметров производится расчет заданной конструктивной схемы ЭМПЭ с помощью стандартных методик и методов компьютерного моделирования. Рассчитанные параметры формируют множества размеров, параметров и характеристик ЭМПЭ, а также свойств материалов $(x_1...x_i) \in X_0$, $(m_{1r}...m_{ir}) \in M_r$, $(r_{1r}...r_{ir}) \in R_r$. Множество размеров и свойств материалов считается фиксированным для следующего шага алгоритма, при этом множество $(x_1...x_i) \in X_0$ варьируется.

3. Опираясь на фиксированные геометрические размеры и свойства материалов, производится оптимизация конструктивной схемы ЭМПЭ с помощью генетического алгоритма. Генетический алгоритм выбран ввиду того, что решение данной задачи методами перебора практически невозможно из-за огромного множества конкурентных вариантов. Решение традиционными методами оптимизации, которые основаны на математических операциях с производной целевой функции, для данной задачи также невозможно, так как математическая формулировка функции цели требует достаточного множества допущений, что влияет на точность решения.

Для реализации генетического алгоритма каждый конструктивный элемент ЭМПЭ (форма полюсов ротора, тип паза статора или тип обмотки, пазовый или беспазовый статор, а также система охлаждения и подшипники) шифруется в виде генетического кода. Использование генетического алгоритма при фиксированных размерах ЭМПЭ и свойствах материала в данном случае позволяет достаточно быстро определить наиболее оптимальную конструктивную схему ЭМПЭ из огромного множества вариантов и модификаций.

Выбор оптимальной конструктивной схемы ЭМПЭ осуществляется исходя из значения функции приспособленности. Для данного этапа предлагаемого алгоритма, очевидно, что функции приспособленности не должны быть ориентированы на геометрические размеры, так как они являются фиксированными, также считается фиксированной частота вращения ротора ЭМПЭ.

Для специальных областей применения ЭМПЭ могут быть использованы различные функции приспособленности ЭМПЭ. В настоящей работе применяются функции приспособленности, характерные для аэрокосмических агрегатов СГЭ ЛА: активная мощность или момент, величина потерь, технологичность производства ЭМПЭ, коэффициент мощности, а также его тепловая нагрузка. Под тепловой нагрузкой понимается отношение суммарных потерь в ЭМПЭ к температуре его поверхности. Данный параметр показывает, насколько эффективно потери ЭМПЭ отводятся его системой охлаждения. Тогда общая функция приспособленности на данном этапе формулируется в следующем виде:

$$\begin{cases} P_{a} \rightarrow \max, P_{loss} \rightarrow \min \\ \frac{P_{loss}}{T_{h}} \rightarrow \max, pf(power \ factor) \rightarrow \max \\ E_{t} \rightarrow \max, R_{r} = \text{const} \\ M_{r} = \text{const} \end{cases}$$

где $_{P_a}$ – активная мощность ЭМПЭ; $_{P_{loss}}$ – полные потери в ЭМПЭ; $\frac{P_{loss}}{T_h}$ – тепловая нагрузка ЭМПЭ; T_h – температура корпуса ЭМПЭ; pf – коэффициент мощности ЭМПЭ; E_t – технологичность ЭМПЭ.

Ввиду того, что каждый критерий, входящий в конечную функцию приспособленности имеет различный численный порядок, необходимо привести

все члены выражения от размерных величин к относительным единицам. Для этого полученные значения функции приспособленности относятся к заданным в шаге 1 значениям:

$$\begin{cases} \frac{P_{a}(R_{r}, M_{r}) \in X_{r}}{P_{a}(R_{r}, M_{r}) \in X_{0}} \rightarrow \max \\ \frac{P_{loss}(R_{r}, M_{r}) \in X_{r}}{P_{loss}(R_{r}, M_{r}) \in X_{0}} \rightarrow \min \\ \frac{(P_{loss}(R_{r}, M_{r})/T_{h}(R_{r}, M_{r})) \in X_{r}}{P_{loss}(R_{r}, M_{r})/T_{h}(R_{r}, M_{r}) \in X_{0}} \rightarrow \max \\ \frac{pf(R_{r}, M_{r}) \in X_{r}}{pf(R_{r}, M_{r}) \in X_{0}} \rightarrow \max \\ \frac{E_{t}(R_{r}, M_{r}) \in X_{r}}{E_{t}(R_{r}, M_{r}) \in X_{0}} \rightarrow \max \\ R_{r} = \operatorname{const} \\ M_{r} = \operatorname{const} \end{cases}$$

где $_{X_r}$ – множество энергетических параметров рассматриваемой конструктивной схемы; X_0 – множество энергетических параметров изначально заданной (на шаге 1) конструктивной схемы.

Так как полученная задача является многокритериальной, было найдено решение, оптимальное в смысле Парето.

В результате выполнения данного шага с помощью генетического алгоритма определяется множество $(z_1...z_i) \in Z_0$, которое описывает оптимальную конструктивную схему ЭМПЭ. Важно отметить, что на различных этапах предлагаемого алгоритма устанавливаются свои функции приспособленности.

4. После выбора оптимальной конструктивной схемы ЭМПЭ необходимо произвести оптимизацию основных геометрических размеров ЭМПЭ для данной конструктивной схемы. На данном этапе фиксируется множество $(z_1...z_i) \in Z_0$. Множество $(r_{1r}...r_{ir}) \in R_r = \text{var}$. В большинстве случаев на данном шаге рассматривается оптимизация активной длины ротора и статора, воздушного
зазора, диаметра ротора, размеров паза и т.д. Для решения данной задачи также используется генетический алгоритм, который реализован в различных программных пакетах, например в Ansys Maxwell. Для данного шага используются свои функции приспособленности, в которых уже учитывается и цена материалов, их масса, удельная мощность ЭМПЭ, удельная мощность потерь, удельная цена ЭМПЭ.

5. После выбора оптимальной конструктивной схемы ЭМПЭ, а также оптимальных геометрических размеров необходимо произвести оптимизацию используемых материалов ЭМПЭ. Данный шаг выполняется аналогично шагу 4, с использованием таких же функций приспособленности. При этом множества $(z_1...z_i) \in Z_0 = \text{const}, (r_{1r}...r_{ir}) \in R_r = \text{const}, (m_{1r}...m_{ir}) \in M_r = \text{var}.$

6. В результате выполнения шагов 4 и 5 образуются новые множества оптимальных геометрических размеров, свойств материалов и энергетических характеристик ЭМПЭ: $(x_{1o}...x_{io}) \in X_{ro}$, $(m_{1o}...m_{io}) \in M_o$, $(r_{1ro}...r_{iro}) \in R_{ro}$. Данные множества позволяют итерацию шагов 2 и 3. В результате выполнения шага 3 с новым множеством фиксированных размеров определяется новое множество $(z_{1o}...z_{io}) \in Z_r$, которое описывает оптимальную конструктивную схему ЭМПЭ для новых входных геометрических размеров и свойств материалов.

7. Производится сравнение множества Z_r и Z_0 . Если данные множества равны, то разработанный ЭМПЭ может считаться оптимальным. Если нет, то шаги 4–7 повторяются с заменой множества Z_0 на Z_r до момента соблюдения равенства множеств Z_r и Z_0 .

В результате выполнения предлагаемого алгоритма на выходе разработчик получает 4 множества, которые описывают конструктивную схему, геометрические размеры, энергетические характеристики и свойства материалов оптимального ЭМПЭ. При этом появляется возможность определения таких множеств для различных типов ЭМПЭ и их конкурентного сравнения.

С использованием описанной выше последовательности была произведена оптимизация ЭМПЭ с ВПМ для маломощной СГЭ ЛА, а также ТВУ. Результаты оптимизации приведены в таблице 2.3 и на рисунке 2.8.

Из анализа рисунка 2.8 видно, что минимальная масса при минимальных тепловыделениях имеет место при двух уровнях линейных напряжений СГЭ: 140 и 260 В. В данном случае 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 сечение соединительных проводов. Поэтому в проектируемой СГЭ был выбран именно этот уровень напряжения. Далее при фиксированном уровне напряжения определялась частота напряжения внутри СГЭ. Данный результат однозначно доказывает, что внутри СГЭ уровни напряжения и частоты могут быть любыми, ограничением являются только параметры, заданные в ТЗ на СГ ЛА.

При фиксированном напряжении и частоте вращения ротора ЭГ с ВПМ частота напряжения СГЭ будет определяться числом полюсов ротора ЭГ с ВПМ. Поэтому для определения частоты напряжения СГЭ решалась оптимизационная задача выбора числа пар полюсов ЭГ С ВПМ, числа пазов на полюс и фазу ЭГ с ВПМ (Qq).

В таблице 2.3 приведены результаты решения данной задачи. Важно отметить, что исходя из ограничений на тепловыделения в ВПМ, рассматривались только целые *Q*, максимальное допустимое число пазов равнялось 72. Максимальное число полюсов ограничивалось диаметром ротора ЭГ с ВПМ и составляло не более 12.

Анализируя массу компонентов СГЭ, видно, что минимальная масса имеет место при числе полюсов, равным или более 6, при увеличении числа полюсов более 6 масса ЭГ с ВПМ и трансформатора ТВУ изменяется незначительно. Минимальными потерями обладает вариант 13. Суммарные потери в обмотке и магнитопроводе составляют 227 Вт. Суммарная масса данного варианта по активной части 10 кг. Недостатком данного варианта является высокий коэффициент гармонических искажений, который составляет более 2 %. Очевидно, что при коэффициенте гармонических искажений (КГИ) более 2 % только на ЭГ с ВПМ в СГЭ КГИ может значительно превысить параметры, указанные в стандартах, а для авиационных систем это недопустимо. Поэтому из всех вариантов реализации нами был выбран вариант с минимальным КГИ. Данным вариантом является вариант 10. Масса СГЭ в этом случае по активной части составляет 10,36 кг, потери в ЭГ с ВПМ составляют 298 Вт, а КГИ 1,6 %. Массовые и

энергетические параметры этого варианта незначительно отличаются от варианта 13.

N⁰		<i>f</i> , Hz	P_{s}, W	P_{cu} ,	$P_{cu}+$	M _{em} ,	<i>J</i> ,	КГИ,	P _{str} ,	M_{tr} , КГ
				W	$P_{s,,} W$	КГ	A/mm ²	%	W	
1	Z=12, p=2	400	45	774	819	6,79	14	20,06	11	6
2	Z=24, p=2	400	45,1	792	837,1	6,4	15,8	8	11	6
3	Z=36, p=2	400	45,1	824	869,1	6,5	15,9	5,15	11	6
4	Z=48, p=2	400	43,29	775	818,29	6,43	15,9	4,2	11	6
5	Z=60, p=2	400	43,29	634	677,29	6,49	14	3,9	11	6
6	Z=72, p=2	400	43,29	628	671,29	6,48	14	3,81	11	6
7	Z=18, p=3	600	93	173	266	6,69	6,26	8,9	9,43	4
8	Z=36, p=3	600	93	168	261	6,56	6,39	7,8	9,43	4
9	Z=54, p=3	600	90,1	512	602,1	6,39	11,79	2,24	9,43	4
10	Z=72, p=3	600	90	208	298	6,36	8	1,6	9,43	4
11	Z=24, p=4	800	138,54	223	361,54	6,54	7,2	9,4	8,1	3,7
12	Z=48, p=4	800	135	192	327	6,32	7,13	2,58	8,1	3,7
13	Z=72, p=4	800	134	93,68	227,68	6,3	4,9	2,15	8,1	3,7
14	Z=30, p=5	1000	168	174	342	6,58	5,9	8,4	7,3	3,5
15	Z=60, p=5	1000	168	150	318	6,35	5,8	2,27	7	3,5
16	Z=36, p=6	1200	191	291	482	6,19	8,16	1,9	7	3,3
17	Z=72, p=6	1200	191	138	329	6,6	5,11	7	7	3,3

Таблица 2.3 – Результаты совместной оптимизации элементовСГЭ

Таким образом, реализация этого шага позволила нам сформировать облик СГЭ, выбрать оптимальное напряжение внутри СГЭ, определиться с частотой внутри СГЭ, а также с конструктивными особенностями ЭГ с ВПМ и трансформатора ТВУ.

2.3.3 Многодисциплинарное проектирование агрегатов СГЭ ЛА

Следующим шагом являлось многодисциплинарное проектирование ЭГ с ВПМ и трансформатора ТВУ.

Проектируемый ЭГ с ВПМ рассчитывался на мощность 16 кВА при частоте 12 000 об/мин. Постоянные магниты были выполнены из сплава Sm₂Co₁₇

остаточной индукцией не менее 1,1 Тл и коэрцитивной силой постоянного магнита по намагниченности 812 кА/м.

Для обеспечения максимальной плотности энергии магнитопровод статора ЭГ с ВПМ был выполнен шихтованным из кобальтового магнитомягкого сплава, легированного 49 % кобальта (49К2ФА). Толщина листа 0,35 мм. Индукция насыщения 2,5 Тл, удельные потери 35 Вт/кг при частоте 400 Гц.

Для достижения минимальных гармонических искажений напряжения при проектировании ЭГ с ВПМ использовалась двухслойная обмотка с q, равным 4. Частота и напряжение ЭГ с ВПМ были определены на предыдущем шаге. Для обеспечения технологичности укладки обмотки использовался прямоугольный провод с полиамидной изоляцией, температурный индекс 220 °C. При расчетах ЭГ с ВПМ использовалась многодисциплинарная математическая модель, описанная в главе 3. ЭГ проектировался совместно с внешней нагрузкой, что позволило провести анализ в том числе нестационарных электромагнитных процессов, таких как однофазное и трехфазное короткие замыкания. В результате расчетов были получены основные выходные параметры ЭГ с ВПМ (таблица 2.3) и распределение магнитных полей. Механический расчет напряжений ротора был выполнен параллельно с электромагнитными расчетами. Это было сделано из-за того, что эти расчеты являются полностью взаимосвязанными, толщина бандажа ротора, рассчитывается на стадии механических расчетов, определяет которая немагнитный зазор электрической машины, без величины которого нельзя определить параметры ЭГ с ВПМ. Объем постоянных магнитов, который рассчитывается на стадии электромагнитных расчетов, определяет механические нагрузки на бандаж ротора и его толщину. Поэтому использовалась следующая последовательность расчетов: определялся необходимый объем постоянных магнитов при зазоре 3 мм, после этого определялась необходимая толщина бандажа ротора. Если толщина бандажа составляла не более 60 % от выбранного воздушного зазора, то геометрические размеры ЭГ с ВПМ считались приемлемыми. В исследуемом случае толщина бандажной оболочки ротора с коэффициентом запаса по механической прочности, равным 2, составляла 1,5 мм. Бандаж был выполнен из титана BT-8.

По результатам электромагнитного расчета были определены потери в магнитопроводе статора, потери в обмотке, а также потери в постоянных магнитах

112

и бандаже ротора на вихревые токи. Потери в постоянных магнитах и бандаже ротора на вихревые токи оценивались с учетом того, что ЭГ с ВПМ работает совместно с выпрямителем, то есть учитывались временные гармоники.

Следующим шагом после электромагнитных расчетов и оценки потерь был анализ процессов в ЭГ с ВПМ при перегрузочной мощности а также при однофазном и трехфазном коротких замыканиях (КЗ). Данные шаги являются важными, так как позволяют уже на этапе электромагнитных расчетов определиться с системой защиты ЭГ с ВПМ от коротких замыканий и вести дальнейшее проектирование с учетом этих особенностей.

На рисунке 2.8 приведено распределение магнитного поля b потерь в постоянных магнитах при K3 в ЭГ с ВПМ при однофазном, трехфазном K3 и при номинальной нагрузке.



Рисунок 2.8 – Распределение магнитных полей и потерь в постоянных магнитах ЭГ с ВПМ:

А – магнитное поле при номинальном режиме работы; В – магнитное поле при трехфазном КЗ;
 С – магнитное поле при однофазном КЗ; D – потери в постоянных магнитах на вихревые токи
 при трехфазном КЗ; е – потери в постоянных магнитах на вихревые токи при однофазном КЗ; f–

d – потери в постоянных магнитах на вихревые токи при номинальном режиме работы

Из анализа рисунка 2.8 видно, что максимальная индукция в воздушном зазоре при номинальной нагрузке составляет 0,63 Тл, в спинке статора ЭГ с ВПМ не более 1,7 Тл, а в зубцах – не более 1,16 Тл. Данные значения при использовании кобальтовых сплавов являются относительно низкими. Но они выбраны такими для того, чтобы обеспечить перегрузочную способность ЭГ с ВПМ, а также возможность регулирования напряжения ЭГ с ВПМ с помощью подмагничивания спинки статора.

Для авиационных ЭГ с ВПМ, согласно требованиям по резервированию, ЭГ с ВПМ должен обеспечивать перегрузочную способность (150 % от номинальной мощности в течение 5 мин и 200 % от номинальной в течение 5 с).

Поэтому при геометрических размерах ЭГ с ВПМ по таблице 2.4 были произведены его расчеты на мощность 24 кВА (150 % от номинальной мощности).

Мощность генератора, кВА	16
Частота вращения ротора, об/мин	12000
Фазное напряжение холостого хода, В	155
Частота тока фазы холостого хода, Гц	600
Внешний диаметр статора, мм	180
Диаметр расточки статора, мм	133,3
Толщина бандажной оболочки ротора, мм	1,5
Диаметр ротора с учетом толщины бандажной оболочки, мм	131
Высота постоянных магнитов, мм	7
Активная длина постоянных магнитов ротора, мм	42
Постоянные магниты ротора (тип / В _г , Тл / Н _с , кА/м)	Sm ₂ Co ₁₇ / 1,1 / 812
Ток фазы, А (действующее значение)	35,11
Плотность тока в обмотке, А/мм ²	8
Линейная нагрузка, А/м	20709
Тип обмотки / шаг обмотки по пазам	двухслойная / 1–9
Число витков в фазе	48
Число проводников в пазу	4
Активное сопротивление и сопротивление рассеяния	0,0083/0,14
Индуктивное сопротивление фазы по осям <i>d-q</i>	0,74/1,1

Таблица 2.4 – Результаты расчетов ЭГ с ВПМ

В результате данных расчетов было установлено, что для ЭГ с ВПМ с данными по таблице 2.4 можно обеспечить максимальную мощность не более 20 кВА. То есть при проверке перегрузочной способности ЭГ с ВПМ была выявлена необходимость увеличения его перегрузочной мощности. При этом изменение габаритных размеров не допускается.

В этом случае увеличение перегрузочной мощности возможно за счет увеличения объема постоянных магнитов. Так как бандажная оболочка имеет коэффициент запаса прочности 2, то реальный объем магнитов может быть увеличен на 50–70 %. При постоянной длине магнитов объем магнитов возможно увеличивать за счет увеличения их высоты.

При оценке увеличения перегрузочной мощности за счет изменения высоты постоянного магнита необходимо учитывать, что высота постоянного магнита ограничивается толщиной бандажной оболочки, которая на данном этапе считается фиксированной.

Увеличение толщины постоянных магнитов до 10 мм позволяет обеспечивать перегрузочную мощность ЭГ с ВПМ 25 кВт. При мощности 25 кВт плотность тока в обмотках ЭГ с ВПМ возрастет до 18 А/мм², а потери в меди увеличатся в 4 раза, стали на 25 %. После оценки процессов при КЗ возможность достижения перегрузочной мощности будет оцениваться еще с помощью тепловых расчетов.

Следующим шагом предложенного алгоритма была оценка процессов в ЭГ с ВПМ при однофазном и трехфазном КЗ на выводах ЭГ с ВПМ. Эти режимы исследовались с помощью методов компьютерного моделирования. Картина магнитного поля при данных режимах работы приведена на рисунке 2.9. Из рисунка 2.9 видно, что при трехфазном коротком замыкании магнитная индукция в спинке статора возрастает на 20–25 %, при этом потери в постоянных магнитах на вихревые токи возрастают в 100 раз по сравнению с номинальным режимом работы. Сами постоянные магниты при коротком замыкании не размагничиваются под действием тока КЗ, но резкое увеличение потерь в них может привести к их перегреву и тепловому размагничиванию. Это результат стоит выделить особенно, так как ранее в публикациях он не рассматривался.

Также были рассчитаны потери в ЭГ с ВПМ при трехфазном коротком замыкании. Результаты расчета потерь приведены в таблице 2.5, из которой видно,

что при трехфазном коротком замыкании потери в ЭГ с ВПМ возрастают более чем в 20 раз.

Потери в номинальном режиме работы				
Потери в обмотке статора, Вт	208			
Потери в магнитопроводе статора, Вт	90			
Аэродинамические и механические потери, Вт	50			
Потери в постоянных магнитах и бандаже ротора, Вт	7			
Суммарные потери в номинальном режиме работы, Вт	363			
Максимальные потери при трехфазном КЗ				
Потери в постоянных магнитах и бандаже ротора при трехфазном КЗ, Вт	700			
Потери в магнитопроводе статора, Вт	125			
Аэродинамические и механические потери, Вт	60			
Потери в меди, Вт	6791,8			

Таблица 2.5 – Потери в элементах ЭГ с ВПМ

Таким образом, из результатов компьютерного моделирования видно, что короткое замыкание в разработанном ЭГ с ВПМ приведет к выходу его из строя. Также в результате компьютерного моделирования было установлено, что при трехфазном коротком замыкании на выводах ЭГ с ВПМ пиковая мощность ЭГ с ВПМ увеличивается в 3–3,5 раза, а ток возрастает более чем в 7 раз. Привод ЭГ с ВПМ обеспечивает максимальную мощность 32 кВт и поэтому при КЗ в ЭГ с ВПМ может произойти разрушение турбины привода генератора. То есть очевидно, что ток КЗ необходимо ограничивать. Для ограничения тока КЗ и защиты ЭГ с ВПМ от данных режимов используются методы, разработанные при участии автора и описанные в главе 4.

При однофазных КЗ процессы имеют не столь критичный характер, это отчетливо видно из результатов моделирования. Поэтому однофазные КЗ не настолько опасны для проектируемого ЭГ с ВПМ, как трехфазные. При однофазном КЗ потери на вихревые токи в постоянных магнитах возрастают в 7 раз по сравнению с номинальным режимом, а индукции в спинке статора – на 11–12 %. Механическая мощность увеличивается в 2 раза.

По распределению потерь были выполнены тепловые расчеты аналитическими методами с учетом взаимосвязи электромагнитных и тепловых расчетов, а также с помощью методов компьютерного моделирования. Охлаждение

проектируемого ЭГ с ВПМ воздушное, тепловые расчеты выполнялись в программном комплексе Ansys IcePack. Воздух подается внутрь ЭГ с ВПМ через специальный воздушный тракт, установленный в заднем щите ЭГ с ВПМ. В теле статора для обеспечения воздушного охлаждения выполнены воздушные каналы. Расход воздуха на охлаждение составлял 0,0348 кг/с. В результате расчетов было установлено, что максимальная температура ЭГ с ВПМ имеет место в лобовых частях ЭГ с ВПМ, она составляет 177 °С. Время достижения установившегося теплового режима составило не более 15 мин. Из рисунка видно, что температура постоянных магнитов не превышает 82 °С. Для магнитов из *SmCo* подобный нагрев приведет к изменению энергетических характеристик не более чем на 5 %. Поэтому дополнительной итерации для электромагнитных расчетов не производилось.

Также была произведена оценка теплового состояния ЭГ с ВПМ при перегрузке. В результате было установлено, что при перегрузочном режиме температура наиболее нагретого места поднимается до 237 °C. Используемый провод ПНЭТ-имид выдерживает тепловой удар 260 °C в течение 1 ч. То есть проектируемый ЭГ с ВПМ без изменений условий охлаждения при перегрузке 150 % от номинальной мощности способен эксплуатироваться не более 1 ч.

Следующим этапом многодисциплинарного проектирования была оценка критических частот вращения ротора, выбор подшипника и разработка проекта самого ротора. Для обеспечения минимальных массогабаритных показателей в теле ротора были выполнены отверстия. По результатам расчета критических частот была построена диаграмма Кэмпбелла, из анализа которой было установлено, что первая критическая частота имеет место при 27 000 об/мин.

По результатам проектирования ЭГ с ВПМ была рассчитана его надежность. Расчеты надежности выполнялись с использованием известных методик [215, 216] с использованием выражений (2.15), (2.16). Вероятность безотказной работы ЭГ с ВПМ составила 0,998. Оценка вероятности безотказной работы выполнялась для полетного времени 8 ч, при этом интенсивность отказов выбиралась из интенсивности отказов изделия аналога (генератор ГСА-15), без учета интенсивности отказов электромагнитной муфты.

С использованием методов многодисциплинарного проектирования была разработана конструкторская документация и макетный образец ЭГ с ВПМ. Испытания макета ЭГ с ВПМ показали расхождение не более 10–12 % от

результатов расчета. Фазное напряжение ЭГ с ВПМ под нагрузкой составляло 152 В, а при испытаниях 153 В. Тепловые режимы, полученные в ходе экспериментов, соответствовали результатам теоретических расчетов и компьютерного моделирования. Более подробные результаты испытания созданного макета в составе СГЭ приведены в главе 7.

Следующим этапом проектирования и создания СГЭ была разработка трансформатора ТВУ. В задачи многодисциплинарного проектирования трансформатора ТВУ входили его электромагнитный расчет, имитационное моделирование процессов в нем при номинальных и перегрузочных режимах, расчет его теплового состояния, а также оценка надежности. При проектировании ТВУ СГЭ ЛА разработчики пытаются добиться компромисса между такими критериями, как массогабаритный показатель и минимум тепловых потерь (максимальный КПД). Одним из способов снижения тепловых потерь является использование аморфной стали, обладающей в 10–15 раз меньшими потерями холостого хода взамен холоднокатаной электротехнической или прецизионной магнитомягкой стали. На этапе выбора типов компонентов СГЭ был выбран трансформатор ТВУ, состоящий из витого трехстержневого сердечника из аморфного железа с первичной цепью, соединенной по схеме «звезда» и двумя вторичными обмотками со схемами соединения «звезда» и «треугольник». Данный трансформатор соединен с 12-пульсным мостовым выпрямителем с уравнительным реактором. Схема соединения обмоток трансформатора приведена на рисунке 2.9.



Рисунок 2.9 – Схема соединения обмоток трансформатора ТВУ

Первоначальным этапом многодисциплинарного проектирования трансформатора ТВУ были его электромагнитные расчеты, которые выполнялись аналитически и верифицировались методом конечных элементов. В таблице 2.6 приведены результаты электромагнитных расчетов трансформатора ТВУ.

118

Таблица 2.6 – Результаты расчетов трансформатора ТВУ с номинальной мощностью 10 кВт и пиковой мощностью до 18 кВт

Коэффициент трансформации	9,53
Ток в первичной обмотке, А	28
Ток во вторичной обмотке («треугольник»), А	78
Ток во вторичной обмотке («звезда»), А	138
Плотность тока во всех обмотках, А/мм ²	8
Потери в меди суммарные, Вт	505
Потери в стали, Вт	13

Следующим этапом было создание имитационной модели трансформатора, которую создавали в программном комплексе Matlab.

Результаты моделирования гармонического состава первичного тока фазы А показывают, что амплитудное значение тока первой гармоники равно 41,11 А, коэффициент искажения кривой составляет КГИ = 18,44 %.

При этом 5-я гармоника составляет 8,6% от основной гармоники, 7-я – 6,1%, 11-я – 9,04%, 13-я – 7,5%, 17-я – 2,58%, 19-я – 2,35% от основной, величины остальных гармоник не превышают 4 % от основной. Как видно, коэффициент гармонических искажений трансформатора много больше, чем у СГ, именно поэтому для обеспечения эффективной работы всего СГЭ необходимо обеспечить минимальный коэффициент гармонических искажений у СГ.

Также были проведены электромагнитные расчеты трансформатора ТВУ при перегрузке, из которых было установлено, что трансформатор ТВУ способен обеспечить полуторакратную перегрузку по мощности.

Для оценки теплового состояния трансформатора ТВУ при эксплуатации было проведено его компьютерное моделирование в программной среде Ansys IcePack. При компьютерном моделировании рассматривался магнитопровод трансформатора из аморфного сплава. Обмотка трансформатора выполнена из термостойкого провода ПНЭТ-имид с температурным индексом 220 °C. Трансформатор имел принудительное воздушное охлаждение от вентилятора.

Результаты моделирования трансформатора ТВУ показывают, что максимальная температура обмоток в номинальном режиме при температуре окружающей среды 20 °C с обдувом вентилятора составляет 118,6 °C, магнитопровода – 51,6 °C. При перегрузочных режимах (150 % от номинальной

мощности) температура обмотки может достигать 185–187°С за 10 мин эксплуатации. Результаты моделирования подтверждены экспериментальными данными.

Также была выполнена оценка вероятности безотказной работы ТВУ, которая составила 0,999%.

Для оценки эффективности созданного по предложенной методике СГЭ было произведено ее сравнение с серийными ЭГ с ВПМ ГСА с блоком ПЧА, а также с разработками ООО «Эрга+» (ВЭЛМА). Результаты сравнения приведены в таблице 2.7. При этом для адекватности сравнения в проектируемой СГЭ блок ТВУ был заменен на статический преобразователь типа ПЧА, вероятность безотказной работы которого составляет 0,9993.

Параметры Мощность	кВА	СГЭ на основе ЭМПЭ с ВПМ (ФГБОУ ВО УГАТУ) 150	СГЭ на основе ЭМПЭ с ВПМ (ФГБОУ ВО УГАТУ) 16,17	СГЭ на основе ЭМПЭ с ВПМ (генератор ГСА) 15	СГЭ на основе ЭМПЭ с ВПМ (генератор ВЭЛМА 10) [36] 10
Частота вращения	об/мин	24000	12000	9000-10800	19900-24000
ротора Тип упадагента		Масло		Bozuw	
Масса генератора	КГ	32	8	32 5	18
Улельная генератора	κι/κΒτ	0.213	0.479	2.16	1.8
Масса статического преобразователя	КГ	55 (масса блока РН 20 кг)	30 (масса блока РН 14 кг)	30 (масса блока РН 14 кг)	_
Полная масса	КГ	87	38	62,5	_
Удельная масса СГЭ	кг/кВт	0,58	2,27	4,1	_
Интенсивность отказов СГЭ (ЭМПЭ с ВПМ и статический преобразователь с регулятором напряжения) [215, 216]	1/ч	0,95×10 ⁻⁴ расчетная	0,85×10 ⁻⁴ расчетная	1×10 ⁻⁴ эксперимента льная	_
Вероятность безотказной работы СГЭ при 8 часах работы (методика расчета надежности приведена в приложении 19)		0,99924	0,99932	0,9992	

Таблица 2.7 – Сравнение созданной СГЭ ЛА с серийными СГЭ ЛА

Из таблицы 2.7 видно, что созданные СГЭ ЛА по сравнению с серийно выпускаемыми СГЭ ЛА обладают более высокой вероятностью безотказной работы при более низких массовых характеристиках. Повышение вероятности безотказной работы обусловлено отказом, по сравнению с аналогами, от электромагнитной муфты и использованием способов обеспечения отказоустойчивости, описанным в главе 5.

Результаты испытаний разработанного ЭГ приведены в приложениях. При этом очевидно, что созданный ЭГ значительно эффективнее по массогабаритным показателям по сравнению с серийными аналогами.

Также с использованием предложенного алгоритма и методологии, описанной в главе 6, был спроектирован СГЭ мощностью 150 кВт.

Ротор ЭМПЭ для СГЭ мощностью 150 кВт выполняется из цельных цилиндрических постоянных магнитов, сегментированных в осевом направлении и намагниченных диаметрально. Ротор выполнен двухполюсным для минимизации потерь в железе статора, а также для обеспечения во всем диапазоне частот вращения выходной частоты напряжения в диапазоне 380-420 Гц (частоты напряжения согласно авиационным стандартам). Регулирование напряжения в данном ЭМПЭ осуществляется путем подмагничивания спинки статора. Поверх магнитов ротора устанавливается бандаж из Инконеля 718, толщина бандажа составляет 4 мм на одну строну. В данном случае бандаж из углеволокна использовать нецелесообразно, так как он не обеспечивает механическую прочность ротора, механические расчеты бандажной оболочки приведены в следующем разделе. В таблице 2.8 представлены основные геометрические размеры создаваемого с применением предлагаемой методологии ЭМПЭ для СГЭ ЛА мощностью 150 кВт. Магниты ротора выполнялись из Sm₂Co₁₇ с остаточной индукцией 1,07 Тл и коэрцитивной силой 756 кА/м. Внешний диаметр магнитов составлял 100 мм, активная длина ротора составляла 105 мм.

Для обеспечения высокой перегрузочной способности ЭМПЭ необходимо обеспечить интенсивный теплоотвод от его активных частей. Для обеспечения эффективного теплоотвода статор ЭМПЭ был выполнен полностью погруженным в хладагент, который протекает в пазах статора и по внешней поверхности статора в аксиальных каналах. В качестве хладагента мы используем масло с рабочей температурой 100 °C. Тепловыделения ЭМПЭ в масло ограничиваются на уровне

121

80–100 Ккал/мин, поскольку масло после прохождения по ЭМПЭ используется для смазки элементов авиационного двигателя, а дополнительный теплообменник для его охлаждения устанавливать нецелесообразно из-за его высоких массогабаритных показателей. Соответственно, требования по теплоотоводу в масло накладывают жесткие ограничения на эффективность ЭМПЭ, которая должна быть не менее 95%. В противном случае масло, используемое для охлаждения ЭМПЭ, будет перегреваться и не сможет использоваться для смазки других систем.

Мощность, кВА	150		
Частота вращения, об/мин	24 000		
Напряжение фазное/линейное, В	115/200		
Число полюсов	2		
Частота перемагничивания, Гц	400		
Ток (основная обмотка), А	432		
КПД (электрический)	0,97		
Плотность тока основной обмотки, А/мм ²	13,43		
Число пазов статора	18		
Тип основной обмотки	распределенная		
Вылет лобовой части, мм	35		
Активное сопротивление фазы при 20 °С, Ом	0,0039		
Индуктивность Х _d /Х _q , мГн	0,048/0,048		
Марка материала бандажной оболочки	Inconel 718		
Толщина бандажной оболочки, мм	4		
Масса статора, кг	17,6		
Масса ротора, кг	8		
Масса обмотки статора, кг	3,5		

Таблица 2.8– Геометрические размеры и параметры ЭМПЭ

Ротор от статора, с целью минимизации гидравлических потерь и защиты от проникновения масла, отделен трубой, выполненной из стекловолокна с толщиной стенки 1 мм. Используемое стекловолокно рассчитано на эксплуатации в масле при 120 °С и имеет предел прочности 0,26 Гпа, модуль Юнга 22,9 Гпа. Предварительное расчетное давление на трубу не превышает 3 атмосферы. Недостатком данной системы охлаждения является то, что стекловолокно обладает низкой

теплопроводностью, коэффициент его теплопроводности составляет 0,26 Вт/К*м. Теплоотдача от ротора при подобной системе охлаждения очень затруднена. Следовательно, потери в роторе ЭМПЭ, чтобы избежать теплового размагничивания постоянных магнитов, должны быть минимальны. Поэтому в разрабатываем ЭМПЭ используется не зубцовая, а распределенная обмотка с 3 пазами на полюс и фазу. В этом случае у ЭМПЭ несколько увеличивается осевая длина, но при этом магниты его ротора не перегреваются из-за пространственных гармоник. А так как мы не используем совместно с ЭМПЭ преобразователь частоты, то временные гармоники также минимальны. В целом даже при использовании распределенной обмотки объем ЭМПЭ не превысил 0,011775 м³. При этом в результате моделирования было установлено, что потери в постоянных магнитах на вихревые токи не превышали 50–60 Вт во всем диапазоне нагрузок ЭМПЭ.

Статор ЭМПЭ имеет 18 пазов, он выполнен из электротехнической стали 2421 с толщиной листа 0,35 мм с индукцией насыщения 1,7 Тл. Основными требованиями, предъявляемыми к авиационным ЭМПЭ, являются максимальная эффективность, максимальная надежность и высокая плотность энергии. Очевидно, что все эти требования взаимосвязаны друг с другом. Помимо этого, в исследуемом случае ЭМПЭ должен обладать мощностью не менее 150 кВт и иметь КПД не менее 90%. Жесткие требования на коэффициент полезного действия обусловлены ограничениями на уровень тепловыделений, указанными выше.

Надежность рассчитывалась с использованием известных методик [215, 216]. Для обеспечения максимальной плотности энергии немагнитный зазор

ЭМПЭ должен быть минимальным, при этом для обеспечения высокой жесткости внешней характеристики генератора, и, соответственно, для обеспечения его перегрузочной способности, величина немагнитного зазора должна быть довольно большой, чтобы уменьшить размагничивающее действие реакции якоря. Также величина немагнитного зазора влияет на аэродинамические потери: с увеличением немагнитного зазора аэродинамические потери уменьшаются.

На величину немагнитного зазора в значительной степени влияют толщина бандажной оболочки ротора и толщина трубы из стекловолокна, а также механические и тепловые расширения бандажной оболочки ротора в процессе эксплуатации. Кроме того, покрытие внешней поверхности бандажной оболочки ротора и покрытие внутренней поверхности трубы из стекловолокна, а также

воздушный зазор между ними значительно влияют на аэродинамические потери в ЭМПЭ. Поэтому для определения оптимального немагнитного зазора, а также для определения воздушного зазора был произведен взаимосвязанный комплекс механических тепловых и электромагнитных расчетов с помощью методов FEM. Входными параметрами для данных расчетов являлись минимальная толщина бандажной оболочки ротора, которая определяется исходя ИЗ условий механической прочности ротора, а также минимальная толщина трубы из стекловолокна, которая определялась из условий гидравлического расчета. Выходной величиной итерационных расчетов является оптимальная величина немагнитного зазора. На рисунке 2.10 приведена зависимость аэродинамических потерь и жесткости внешней характеристики ЭМПЭ с ВПМ в зависимости от величины воздушного зазора. Для удобства расчетов жесткость внешней характеристики описывалась коэффициентом ke, который показывает, во сколько разнапряжение при номинальной нагрузке отличается от напряжения при холостом ходе. Аэродинамические потери между статором и ротором, в зависимости от величины воздушного зазора, определялись выражениями [115, 116]. Также на рисунке 2.11 приведена зависимость мощности ЭМПЭ от величины воздушного зазора.



Рисунок 2.10 – К выбору величины воздушного зазора ЭМПЭ

Из рисунка 2.10 видно, что при воздушном зазоре 0,5 мм аэродинамические потери превышают 300 Вт, что при общем уровне предварительных потерь в ЭМПЭ порядка 4 кВт, является существенной величиной. Уточнение расчет потерь в ЭМПЭ выполняется после выбора оптимального воздушного зазора. При воздушном зазоре 1 мм аэродинамические потери превышают 100 Вт. Ввиду того, что ротор теплоизолирован от статора трубой из стекловолокна, данные потери негативно скажутся на характеристиках ЭМПЭ. При воздушном зазоре 1,5 мм аэродинамические потери не превышают 60 Вт, что практически в два раза меньше чем при воздушном зазоре 1 мм. Мощность при воздушном зазоре 0,5 мм составляет порядка 152 кВт, а при воздушном зазоре 1,5 мм достигает 150,7 кВт, при воздушном зазоре 1,6 мм – 149,4 кВт, при воздушном зазоре 2 мм – 148 кВт. То есть зазор 1,5 мм является рубежной величиной, после которой мощность становится меньше значений, установленных в технических требованиях. Поэтому в результате анализа был выбран воздушный зазор 1,5 мм, т.к. мощность при воздушном зазоре соответствует техническим требованиям, данном a аэродинамические потери минимальны ИЗ рассмотренных вариантов. Немагнитный зазор составил 6,5 мм. Жесткость внешней характеристики в исследуемом случае не зависит от величины воздушного зазора. Это обусловлено тем, что минимальный исследуемый немагнитный зазор составлял 5,3 мм. При такой величине реакция якоря уже минимальна, и дальнейшее увеличение зазора не приводит к ее уменьшению.

Результаты механического, гидравлического, теплового и электромагнитного расчетов методами конечных элементов приведены на рисунке 2.11. Из них было установлено, что минимальная толщина бандажной оболочки ротора составляет 4 мм, а трубы из стекловолокна 1 мм. По результатам гидравлического расчета видно, что максимальное давление, приходящееся на трубу из стекловолокна, составляет 400 000 Па. На стадии гидравлических расчетов были определены потери давления в системе охлаждения, которые составили не более 10 000 Па.

Из рисунка 2.11, видно, что максимальные механические напряжения составляют 832 Мпа. Это значительно меньше, чем механические напряжения, которые способен обеспечить Инконель 718. Коэффициент запаса прочности ротора, используемого в проекте, составляет 1,3. Максимальная скорость данного

ротора составляет 33 000 об/мин. Механические расширения бандажной оболочки ротора составляют 0,09 мм. Натяг между бандажом ротора и постоянными магнитами составляет 0,2 мм. Величина натяга была определена исходя из условий остаточного давления на постоянные магниты.

С учетом механических и тепловых расширений минимальный воздушный зазор между ними должен быть не менее 0,3 мм. Таким образом, были определены минимальные размеры при выборе оптимального немагнитного зазора, которые составили 5,3 мм, в том числе воздушный зазор 0,3 мм.

Далее, согласно предложенной методологии, были проведены итерационные электромагнитные расчеты для выбора воздушного зазора исходя из минимальных пределов.

Используя полученные геометрические размеры, была построена имитационная компьютерная модель В Ansys Maxwell И проведены электромагнитные расчеты. Электромагнитные расчеты выполнялись при нагрузке 150 кВт. По данным электромагнитных расчетов были определены потери в железе статора, которые составили 1370 Вт, потери в обмотке статора, которые составили 2183 Вт и добавочные потери 550 Вт (потери на скин-эффект в проводниках, потери в постоянных магнитах на вихревые токи и гистерезис и т.д.). Суммарные потери при нагрузке 150 кВт составляют 4623 Вт.

Были проведены электромагнитные и тепловые расчеты ЭМПЭ при перегрузке (150 % от номинальной мощности). Потери в этом случае увеличились на 35–40 % и составили 7006 Вт.

Также в результате электромагнитного расчета было установлено, что магнитная индукция в магнитопроводе статора под нагрузкой не превышает 1,58 Тл, что меньше на 20–25 % до величины насыщения используемой электротехнической стали.

На основе электромагнитных расчетов были выполнены тепловые расчеты в программном комплексе Ansys Ice Pack. В результате данных расчетов было установлено, что температура ЭМПЭ не превышает 177 °C, для обмоток и 107 °C для постоянных магнитов. Расчеты температуры были выполнены для двух режимов номинального и перегрузки 225 кВт. Учитывалось, что перегрузочный режим длится не более 5 мин. Температура обмотки повышается до 215 °C. Используемый обмоточный провод способен час эксплуатироваться при

температуре 260 °С. То есть ЭМПЭ способен выдержать перегрузочные режимы без ущерба для изоляции.

Необходимо отметить, что при компьютерном моделировании было доказано, что в дополнительной обмотке наводится ЭДС, величина которой составляет 600 В. Именно эту ЭДС мы используем как дополнительный канал энергии для запуска СГ основного авиационного двигателя. По своей сути дополнительная обмотка является простейшим генератором Грамма. Результаты FEM сравниваются нами с результатами экспериментов в следующем разделе.



Рисунок 2.11 – Гидравлический расчет ЭМПЭ, механический расчет напряжений в бандаже ротора, электромагнитные и тепловые расчеты СГ

Важной задачей при проектировании данного ЭМПЭ является обеспечение герметизации статора. Это важно, поскольку протечка масла из полости статора в полость ротора может привести к нарушению работы подшипниковых узлов, нарушению норм безопасности в месте установки ЭМПЭ и нарушению экологичности всей системы, поэтому области ЭМПЭ, погруженные в масло, должны быть герметичны. Разрабатываемый ЭМПЭ имеет 3 основных узла герметизации: между статором и ротором, между подшипниковыми щитами и корпусом, между выводными концами обмотки статора ЭМПЭ и клеммной коробкой. Узлы герметизации приведены на рисунке 2.12. Далее математически описан процесс выбор геометрических размеров из условия герметичности для каждого из этих узлов.

Элементы герметичности этих узлов ЭМПЭ устанавливаются с предварительной механической нагрузкой (натягом), именно за счет данной предварительной механической нагрузки обеспечивается герметичность при заданном уровне протечки жидкости. Условия герметичности каждого из рассматриваемых узлов можно в зависимости от предварительной нагрузки описать выражением [217]:

$$Q \leq nS_k \sigma - (1 - \alpha)Q_g$$

где Q – предварительная нагрузка (натяг) соединительных элементов узла герметизации; $(1-\alpha)$ – коэффициент основной нагрузки; Q_g – сила давления рабочей среды; n – число соединений; σ – допустимое напряжение материала прокладки или герметизирующего узла; S_k – площадь соединения в узле герметизации.



Рисунок 2.12 – Основные узлы герметизации жидкостнозаполненного СГ: 1 – подшипниковый щит; 2 – труба из стекловолокна; 3 – резиновое кольцо; 4 – подшипниковая крышка; 5 – корпус СГ; 6 – подшипниковый щит; 7₁, 7₂ – крепежный болт и гайка; 8 – резиновая прокладка; 9 – клеммный болт; 10 – гайка; 11 – прокладка; 12 – прокладка; Q_g – сила давления рабочей среды

Так как узел герметизации должен обеспечивать не только герметичность при заданной величине протечки, но и обладать достаточной механической прочностью, необходимо записать также условия механической прочности данного узла в зависимости от предварительной механической нагрузки при сборке [217]:

$$Q \ge \pi Db[q] - \alpha Q_g,$$

где *Q* – предварительная нагрузка (натяг) соединительных элементов узла герметизации; α–коэффициент жесткости соединения; [*q*]–минимальная удельная нагрузка; *b*–толщина герметизирующей трубы.

100

Тогда математическая задача выбора геометрических размеров, исходя из условий герметичности и прочности, сводится к определению коэффициента основной нагрузки и коэффициента жесткости соединения. Данные коэффициенты определяются в виде:

$$\alpha = \frac{\Sigma \lambda_b}{\Sigma \lambda_b + \Sigma \lambda_p},$$

где $\Sigma \lambda_b$ – сумма податливостей деталей, на которые нагрузка увеличивается с увеличением давления рабочей среды; $\Sigma \lambda_p$ – сумма податливостей деталей, на которые нагрузка уменьшается с увеличением давления рабочей среды.

Аналогичным образом с помощью предложенного алгоритма был создан СГЭ ЭГ с ВПМ мощностью 120 кВт с напряжением 270 В постоянного тока. Результаты экспериментальных исследований данных СГЭ приведены в главе 7. Акты испытаний данных СГЭ приведены в приложениях к диссертационной работе.

ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 2

1. Разработана обобщенная структурная модель СГЭ ЛА на основе ЭМПЭ с ВПМ с учетом тенденций развития современных ЛА, отличающаяся от известных учетом возможности параллельной реализации нескольких СГЭ ЛА и прямой интеграции ЭМПЭ с ВПМ в силовую установку ЛА, а также многофазности и дублируемости элементов в отказоустойчивых ЭМПЭ с ВПМ СГЭ ЛА. Модель 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. 2. Показано, что для оптимизации СГЭ и агрегатов внутри СГЭ необходимо использовать разные оптимизационные критерии. Предложен обобщенный критерий, способный обеспечивать комплексную оптимизацию агрегатов в составе СГЭ ЛА, который представляет собой произведение теплового фактора и массы ЭГ с ВПМ, ТВУ и статического преобразователя.

3. Разработана обобщенная многодисциплинарная математическая модель, отличающаяся от известных учетом взаимовлияния тепловых, механических и электромагнитных процессов, а также процессов в подшипниковых узлах и влияния эксцентриситета ротора на параметры ЭМПЭ с ВПМ.

3. 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 массу соединительных проводов.

4. 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). Показано, что оптимальным 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 их совместную оптимизацию. Для верификации предложенной методологии было произведено многодисциплинарное проектирование, создана и испытана СГЭ ЛА мощностью 16 кВт. При этом предлагаемая методология показала высокую точность (расхождение с экспериментом не составляло более

130

10–12%). Доказано на примере маломощной СГЭ ЛА, что с использованием предлагаемой методологии можно создавать СГЭ ЛА, обладающие по сравнению с серийными СГЭ (генератор ГСА-15 и блока ПЧА) сравнимой расчетной вероятностью безотказной работы при более низких массогабаритных показателях.

Также приведено описание процесса проектирования с используемой методологией СГЭ с ЭГ с ВПМ мощностью 150 кВт.

ГЛАВА З ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ ЭНЕРГИИ С ВЫСОКОКОЭРЦИТИВНЫМИ ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

Для развития общей теории электромеханических преобразователей энергии с ВПМ и обобщения теории СГЭ ЛА на их основе важной задачей является разработка аналитической многодисциплинарной математической модели ЭМПЭ с ВПМ. Данная модель должна позволять одновременно учитывать тепловые (с помощью уравнений Фурье) и электромагнитные процессы (с помощью уравнений Максвелла) в ЭМПЭ, электрические и механические процессы в ЭМПЭ с ВПМ. Поэтому в диссертации был предложен метод учета данных процессов в единой математической модели, приведенный в главе 2.

В данной главе представлены решения разработанной обобщенной математической модели и приведены исследования с помощью нее различных процессов. Также приведены решения уравнений Максвелла в двухмерной и трехмерной постановке для ЭМПЭ с ВПМ.

3.1 Математическое описание основного магнитного поля в воздушном зазоре ЭМПЭ с ВПМ

При разработке математического описания первичного магнитного поля в воздушном зазоре ЭМПЭ с ВПМ рассматривается расчетная схема ЭМПЭ, представленная на рисунке 3.1.

Изначально рассматривается картина первичного трехмерного магнитного поля в зазоре ЭМПЭ при холостом ходе (нагрузка в СГЭ отсутствует, задача регулятора напряжения сводится к обеспечению уровня напряжения на выходе СГЭ ЛА согласно ГОСТ 54073-2017). Ввиду того, что источники тока в немагнитном зазоре области зазора отсутствуют, магнитное поле описывается уравнением Лапласа в цилиндрических координатах в частных производных [253–255]:

$$H_{r}(r,\varphi,z) = \frac{\partial^{2}H_{r}}{\partial r^{2}} + \frac{1}{r}\frac{\partial H_{r}}{\partial r} + \frac{1}{r^{2}}\frac{\partial^{2}H_{r}}{\partial \varphi^{2}} + \frac{\partial^{2}H_{r}}{\partial z^{2}}, \qquad (3.1)$$

$$H_{\varphi}(r,\varphi,z) = \frac{\partial^2 H_{\varphi}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial H_{\varphi}}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 H_{\varphi}}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 H_{\varphi}}{\partial z^2}, \qquad (3.2)$$

$$H_{z}(r,\varphi,z) = \frac{\partial^{2}H_{z}}{\partial r^{2}} + \frac{1}{r}\frac{\partial H_{z}}{\partial r} + \frac{1}{r^{2}}\frac{\partial^{2}H_{z}}{\partial \varphi^{2}} + \frac{\partial^{2}H_{z}}{\partial z^{2}}, \qquad (3.3)$$

где *H_r*, *H_{\phi}*, *H_z*, – радиальная, тангенциальная и аксиальная составляющие напряженности магнитного поля в немагнитном зазоре ЭМПЭ с ВПМ.



Рисунок 3.1 – Расчетная схема ЭМПЭ с ВПМ

Система уравнений (3.1)–(3.3) решается с учетом того, что:

$$\operatorname{div}\vec{H} = \frac{1}{r}\frac{\partial H_r r}{\partial r} + \frac{1}{r}\frac{\partial H_{\varphi}}{\partial \varphi} + \frac{\partial H_z}{\partial z} = 0.$$
(3.4)

Решение уравнений (3.4)–(3.5) в общем виде:

 $H_{z}(r,\varphi,z) = \mathcal{U}(r)\mathcal{F}(\varphi)\Gamma(z),$

где Ц(r)Б (ϕ) Г(z) – произведение Лапласа.

При решении поставленной задачи используются общепринятые допущения, не вносящие в результаты значительной погрешности:

I. Магнитная проницаемость стали сердечника, а также стали вала равна бесконечности, магнитная проницаемость воздушного зазора равна магнитной проницаемости вакуума.

II. Аксиальная составляющая напряженности магнитного поля в торцевых поверхностях ротора равна 0, т. е. рассматривается ЭМПЭ бесконечной длины.

III. Токи в бандажной оболочке ротора отсутствуют, и зубчатость магнитопровода статора не учитывается.

IV. Масса бандажной оболочки незначительна по сравнению с массой ВПМ.

V. Температура вала ЭМПЭ незначительно отличается от температуры окружающей среды.

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

VII. Плотность индуцированных токов по толщине тонкого медного слоя постоянна.

Немагнитный зазор в ЭМПЭ с ВПМ с учетом толщины бандажа представляется в виде:

$$\delta = \delta_{B} + \delta_{\delta}$$

где $\delta_{\rm B}$ – воздушный зазор в ЭМПЭ; $\delta_{\rm 5}$ – бандажная оболочка ротора ЭМПЭ.

При значительных скоростях вращения ротора ЭМПЭ (более 60 000 об/мин) толщина бандажной оболочки ротора может значительно превышать толщину воздушного зазора, поэтому в ряде случаев при исследованиях ЭМПЭ толщиной воздушного зазора можно пренебречь.

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

$$H_{\varphi}|_{r=\frac{D_{\text{BIM}}+\delta}{2}}=0, \qquad (3.5)$$

$$H_{\varphi}|_{r=\underline{D_{\text{BIIM1}}}} = k_{\varphi} \frac{J}{4\pi\mu_0} \sin\varphi, \qquad (3.6)$$

$$H_r |_{r=\frac{D_{\text{BIIM1}}}{2}} = k_r \frac{J}{4\pi\mu_0} \cos\varphi, \qquad (3.7)$$

$$H_{z}|_{z=0} = 0, \frac{\partial H_{z}}{\partial z}|_{z=0} = 0,$$
 (3.8)

$$H_{z}|_{z=l}, \frac{\partial H_{z}}{\partial z}|_{z=l} = 0.$$
(3.9)

Граничное условие (3.5) вытекает из допущения I, граничные условия (3.6), (3.7) – из допущения II. При этом, согласно граничным условиям (3.8), (3.9), поставленная задача вырождается в двухмерную краевую задачу для уравнения

Лапласа внутри кольца с радиусами $\frac{D_{\text{впм1}}}{2}$ и $\frac{D_{\text{впм1}}}{2} + \delta$.

Так как магнитное поле на поверхности ВПМ зависит от энергетических параметров ВПМ, то тангенциальная и радиальная составляющие магнитного поля на поверхности ВПМ могут быть описаны в виде:

$$H_{\varphi}(r,\varphi,z) = k_{\varphi} \frac{J}{4\pi\mu_0} \sin\varphi, \qquad (3.10)$$
$$H_r(r,\varphi,z) = k_r \frac{J}{4\pi\mu_0} \cos\varphi,$$

где k_{ϕ} – коэффициент пропорциональности между коэрцитивной силой ВПМ и остаточной индукцией ВПМ и тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля на поверхности ВПМ; J – намагниченность ВПМ; k_r – коэффициент пропорциональности между коэрцитивной силой ВПМ, и остаточной индукцией ВПМ и радиальной составляющей напряженности магнитного поля на поверхности ВПМ.

Методология определения коэффициентов пропорциональности k_{φ} и k_r представлена автором в работе [243] и здесь не рассматривается.

Величина немагнитного зазора зависит от нагрузки на бандажную оболочку и определяется в виде [4]:

$$\delta_{6} = \frac{\Omega^{2} \left[\rho_{B\Pi M} R_{B\Pi M} \left(D_{B\Pi M1}^{2} - D_{B\Pi M2}^{2} \right) \right]}{8\sigma}, \qquad (3.11)$$

где Ω – угловая скорость ротора ЭМПЭ с ВПМ; $\rho_{BM\Pi}$ – плотность материала ВПМ; σ – предел прочности на текучесть материала бандажной оболочки; $R_{BM\Pi}$, $D_{BM\Pi 2}$ – геометрические параметры ЭМПЭ с ВПМ.

Геометрические параметры определяются согласно рисунку 3.1:

$$D_{\rm BFIM2} = D_{\rm BFIM1} - 2h_M$$
, $R_{\rm BFIM} = \frac{D_{\rm max} - 2\delta - 2h_{\rm M}}{2}$.

Рассматривается режим холостого ЭМПЭ с ВПМ, при этом предполагается, что токи в области зазора отсутствуют, а влияние регулятора напряжения СГЭ ЛА на процессы в ЭМПЭ с ВПМ пренебрежимо мало. Тогда с учетом граничных условий решение для тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля в воздушном зазоре ЭМПЭ с ВПМ ищется в виде:

$$H_{\varphi} = \frac{A_{0}}{2} \frac{R_{0}^{\left(\frac{D_{\text{ВПМI}}}{2}\right)}(r)}{R_{0}^{\left(\frac{D_{\text{ВПМI}}}{2}\right)}\left(\frac{D_{\text{ВПМI}}+2\delta}{2}\right)} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{R_{n}^{\left(\frac{D_{\text{ВПМI}}}{2}+\delta\right)}(r)}{R_{n}^{\left(\frac{D_{\text{ВПМI}}}{2}+\delta\right)}\left(\frac{D_{\text{ВПМI}}}{2}\right)} \left\{A_{n}\cos n\varphi + B_{n}\sin n\varphi\right\}, (3.12)$$

где $R_{0}^{\left(\frac{D_{\text{ВПМI}}}{2}\right)}(r) = \ln \frac{2r}{D_{\text{ВПMI}}}; R_{n}^{\left(\frac{D_{\text{ВПMI}}}{2}\right)}(r) = \frac{-r^{2n} + \left(\frac{D_{\text{ВПMI}}}{2} + \delta\right)}{r^{n}};$

*А*₀, *А*_{*n*}, *B*_{*n*}, – постоянные составляющие, определяемые из граничных условий. Обозначим:

$$\frac{D_{\rm BIIM1} + 2\delta}{2} = R_{\rm CT}, \qquad (3.13)$$

$$\frac{D_{\text{BIIM1}}}{2} = R_{\text{BIIM1}},\tag{3.14}$$

С учетом (3.14), (3.13) выражение (3.12) переписывается в менее громоздком виде:

$$H_{\varphi} = \frac{A_0}{2} \frac{R_0^{(R_{\rm BIIM})}(r)}{R_0^{(R_{\rm BIIM})}(R_{\rm cr})} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{R_n^{(R_{\rm CT})}(r)}{R_n^{(R_{\rm CT})}(R_{\rm BIIM})} \{A_n \cos n\varphi + B_n \sin n\varphi\}.$$
 (3.15)

Из граничных условий следует:

при
$$r = R_{\rm cT}$$
; $R_0^{(R_{\rm BHM})}(r) = \ln\left(1 + \frac{\delta}{D_{\rm BHM}}\right)$; $R_0^{(R_{\rm BHM})}(R_{\rm cT}) = \ln\left(1 + \frac{\delta}{D_{\rm BHM}}\right)$;
 $R_n^{(R_{\rm BHM})}(r) = \frac{R^{2n}_{\rm CT} - R^{2n}_{\rm BHM}}{R_{\rm CT}^n}$; $R_n^{(R_{\rm BHM})}(R_{\rm cT}) = \frac{R^{2n}_{\rm CT} - R^{2n}_{\rm BHM}}{R_{\rm CT}^n}$.
 $\frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \{A_n \cos n\varphi + B_n \sin n\varphi\} = k_{\varphi} \frac{J}{4\pi\mu_0} \sin \varphi$. (3.16)

Следовательно:

$$A_0 = 0; A_n = 0, n = 1, 2 ...; B_1 = k_{\varphi} \frac{J}{4\pi\mu_0}, B_n = 0, n \neq 1.$$
 (3.17)

Тогда:

$$H_{\varphi}(r, \varphi) = \frac{R_{1}^{(R_{\rm CT})}(r)}{R_{1}^{(R_{\rm CT})}(R_{\rm BIIM1})} k_{\varphi} \frac{J}{4\pi\mu_{0}} \sin\varphi = k_{\varphi} \frac{J}{4\pi\mu_{0}} \frac{(R_{\rm CT}^{2} - r^{2})R_{\rm BIIM1}}{r(R_{\rm CT}^{2} - R_{\rm BIIM1}^{2})} \sin\varphi.$$
(3.18)

Возвращаясь к обратной замене:

$$H_{\varphi}(r,\varphi) = k_{\varphi} \frac{J}{4\pi\mu_0} \frac{\left(\left(\frac{D_{\text{BIIM1}}}{2} + \delta\right)^2 - r^2\right)\left(\frac{D_{\text{BIIM1}}}{2}\right)}{r\left(\left(\frac{D_{\text{BIIM1}}}{2} + \delta\right)^2 - \left(\frac{D_{\text{BIIM1}}}{2}\right)^2\right)} \sin\varphi.$$
(3.19)

Производится проверка выражения (3.19) на соответствие граничным условиям:

$$\begin{split} H_{\varphi}\left(\frac{D_{\mathrm{BIIM1}}}{2},\varphi\right) &= k_{\varphi} \frac{J}{4\pi\mu_{0}} \frac{\left(\left(\frac{D_{\mathrm{BIIM1}}}{2} + \delta\right)^{2} - \left(\frac{D_{\mathrm{BIIM1}}}{2}\right)^{2}\right) \left(\frac{D_{\mathrm{BIIM1}}}{2}\right)}{\left(\frac{D_{\mathrm{BIIM1}}}{2}\right) \left(\left(\frac{D_{\mathrm{BIIM1}}}{2} + \delta\right)^{2} - \left(\frac{D_{\mathrm{BIIM1}}}{2}\right)^{2}\right)} \sin\varphi = k_{\varphi} \frac{J}{4\pi\mu_{0}} \sin\varphi + \delta \left(\frac{D_{\mathrm{BIIM1}}}{2} + \delta\right)^{2} - \left(\frac{D_{\mathrm{BIIM1}}}{2} + \delta\right)^{2}\right) \left(\frac{D_{\mathrm{BIIM1}}}{2}}{2}\right)}{\left(\frac{D_{\mathrm{BIIM1}}}{2} + \delta\right)^{2} - \left(\frac{D_{\mathrm{BIIM1}}}{2} + \delta\right)^{2}\right) \left(\frac{D_{\mathrm{BIIM1}}}{2}}{2}\right)} \sin\varphi = 0. \end{split}$$

Таким образом, полученное решение соответствует заданным граничным условиям.

Вводится зависимость напряженности магнитного поля в воздушном зазоре ЭМПЭ с ВПМ от механической прочности бандажной оболочки и температуры ВПМ, при этом зависимость магнитного поля в воздушном зазоре ВПМ от температуры определяется исходя из того, что:

$$\boldsymbol{B}_r = \boldsymbol{H}_c \boldsymbol{\mu}_0 + \boldsymbol{J} \,. \tag{3.20}$$

$$J = B_r \left(1 - \frac{k_{Br}(\Theta_{\rm BIIM} - 23)}{100} \right) - H_c \mu_0 \left(1 - \frac{k_{Hc}(\Theta_{\rm BIIM} - 23)}{100} \right).$$
(3.21)

$$\begin{split} H_{\varphi}(r, \ \varphi) &= k_{\varphi} \frac{1}{4\pi\mu_{0}} \left[B_{r} \left(1 - \frac{k_{Br}(\Theta_{\text{BIIM}} - 23)}{100} \right) - H_{c}\mu_{0} \left(1 - \frac{k_{Hc}(\Theta_{\text{BIIM}} - 23)}{100} \right) \right] \times \\ &\times \frac{\left(\left(\frac{D_{\text{BIIM1}}}{2} + \frac{\Omega^{2} \left[\rho_{\text{BIIM}} R_{\text{BIIM}} \left(D_{\text{BIIM1}}^{2} - D_{\text{BIIM2}}^{2} \right) \right]}{8\sigma} \right)^{2} - r^{2} \left(\left(\frac{D_{\text{BIIM1}}}{2} \right) \right) \right] \times \\ &\times \frac{r \left(\left(\frac{D_{\text{BIIM1}}}{2} + \frac{\Omega^{2} \left[\rho_{\text{BIIM}} R_{\text{BIIM}} \left(D_{\text{BIIM1}}^{2} - D_{\text{BIIM2}}^{2} \right) \right]}{8\sigma} \right)^{2} - \left(\frac{D_{\text{BIIM1}}}{2} \right)^{2} \right) \right) \right)} \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \right) \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \right) \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \right) \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \right)^{2} \right) \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \right) \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2}$$

Для исследования полученного выражения представим его в виде функции полюсного деления. Тогда с учетом того, что $\tau = \frac{\pi D_{\text{BПМ1}}}{2\text{p}}$, опуская промежуточные

математические выкладки, получим:

$$H_{\varphi}(r,\varphi) = k_{\varphi} \frac{1}{4\pi\mu_0} \left[B_r \left(1 - \frac{k_{Br}(\Theta_{\text{BIIM}} - 23)}{100} \right) - H_c \mu_0 \left(1 - \frac{k_{Hc}(\Theta_{\text{BIIM}} - 23)}{100} \right) \right] \times \\ \times \frac{2\text{pr}\left(\frac{D_{\text{BIIM1}}^2}{8} + \frac{D_{\text{BIIM1}}\delta}{2} + \frac{\delta^2}{2} - \frac{r^2}{2} \right)}{\pi\delta \left(D_{\text{BIIM1}} + \delta \right) r} \sin\varphi$$
(3.22)

Вводится замена $k_{\tau} = \frac{\tau}{\delta}$, тогда путем математических преобразований (3.22) представляется как функция k_{τ} и τ . На рисунке 3.2 представлены зависимости тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля в воздушном зазоре ЭМПЭ от k_{τ} при неизменном диаметре ротора для различного числа пар полюсов.

Из рисунка видно, что с увеличением k_{τ} при неизменном диаметре, т. е. при уменьшении воздушного зазора, происходит уменьшение тангенциальной составляющей магнитного поля (при уменьшении k_{τ} в 2 раза тангенциальная составляющая снижается на 4% при 2p = 6 и на 0,5% при 2p = 2).

С учетом непрерывности линий магнитного поля радиальная составляющая напряженности магнитного поля в немагнитном зазоре ВПМ может быть определена аналогичным путем. Математические выкладки здесь не приводятся и могут быть получены простыми алгебраическими вычислениями.

На рисунках 3.2, 3.3 построены зависимости радиальной составляющей магнитного потока в воздушном зазоре ЭМПЭ с ВПМ от температуры, величины воздушного зазора и характеристик, применяемых ВПМ

Из зависимости (рисунок 3.2) видно, что при увеличении воздушного зазора в 2 раза амплитуда радиальной составляющей магнитного потока снижается в 1,85 раза, а при увеличении воздушного зазора на 28,5 % амплитуда радиальной составляющей магнитного потока в воздушном зазоре ЭМПЭ с ВПМ снижается на 66 %.



Рисунок 3.2 – Зависимость тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля ЭМПЭ с ВПМ от безразмерного соотношения *k*_τ (*слева*) и зависимость радиальной составляющей магнитного потока в воздушном зазоре ЭМПЭ с ВПМ от величины воздушного зазора

При построении зависимостей, рисунок 3.2, использовались постоянные температурные коэффициенты для ВПМ различных марок. При этом ИЗ представленной зависимости, рисунок 3.2, видно, что температура ВПМ оказывает значительное влияние на радиальную составляющую магнитного потока в воздушном зазоре. Так, для ВПМ марки NdFeB при увеличении температуры с 70 до 140 градусов радиальная составляющая магнитного потока снижается на 25-35 %. И несмотря на то, что начальные характеристики (при температуре 23°С) *NdFeB* 38UH больше, чем у Sm_2Co_{17} (по остаточной индукции больше на 10%, а по коэрцитивной силе на 7-8%, при этом ВПМ NdFeB 38UH создает при температуре 23°С радиальный магнитный поток на 9 % больше, нежели Sm₂Co₁₇), то при температуре 70-80°С характеристики ВПМ Sm₂Co₁₇ и NdFeB 38UH становятся равными и создают одинаковый магнитный поток, а при температуре 140-150°C ВПМ Sm₂Co₁₇ создают магнитный поток в воздушном зазоре ЭМПЭ с ВПМ на 20% NdFeB 38UH. Таким образом, в ЭМПЭ с ВПМ целесообразно больше, чем применять ВПМ NdFeB в тех случаях, когда их температура не превышает 80 °C, в других случаях, с точки зрения обеспечения энергетических характеристик, для изделий аэрокосмической отрасли предпочтительно применение ВПМ Sm₂Co₁₇.



Рисунок 3.3 – Зависимость радиальной составляющей магнитного потока в воздушном зазоре ЭМПЭ с ВПМ от типа ВПМ (*a*) и зависимость радиальной составляющей магнитного потока в воздушном зазоре высокооборотного ЭМПЭ

с ВПМ от температуры ВПМ для различных типов ВПМ (б)

3.2 Математическое описание трехмерного магнитного поля в воздушном зазоре ЭМПЭ с ВПМ в декартовой системе координат

В приведенных выше параграфах представлено решение, описывающее магнитное поле в немагнитном зазоре ЭМПЭ с ВПМ СГЭ ЛА с учетом его кривизны. В то же время более общим решением для использования в обобщенной математической модели с учетом механических характеристик и взаимовлияния тепловых и электромагнитных процессов будет являться описание магнитного поля при допущении, что величина немагнитного зазора намного меньше радиуса его кривизны. Данное решение может быть использовано не только в обобщенной математической модели, представленной выше, но и при исследованиях линейных и колебательных ЭМПЭ с ВПМ. Для цилиндрических ЭМПЭ с ВПМ данное решение может быть использовано при введении коэффициента кривизны воздушного зазора. Поэтому необходимо разработать математический аппарат, описывающий магнитное поле в рабочем зазоре ЭМПЭ с ВПМ в декартовой координат определить расхождение системе между решениями И В цилиндрической и декартовой системах координат, а также определить величину коэффициента кривизны.

140

На рисунке 3.4 представлена расчетная схема ЭМПЭ с ВПМ в декартовой системе координат.



Рисунок 3.4 – Расчетная схема ЭМПЭ с ВПМ в декартовых координатах

По аналогии с цилиндрическими координатами магнитное поле в зазоре описывается уравнением Лапласа в частных производных [253–255]:

$$\Delta \bar{H} = 0, \qquad (3.23)$$

$$\frac{\partial^2 H_z}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 H_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H_z}{\partial y^2} = 0, \qquad (3.24)$$

$$\frac{\partial^2 H_x}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 H_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H_x}{\partial y^2} = 0, \qquad (3.25)$$

$$\frac{\partial^2 H_y}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 H_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H_y}{\partial y^2} = 0.$$
(3.26)

Составляющие H_x , H_y , H_z обеспечивают условия непрерывности магнитных силовых линий, при этом H_z обеспечивает преобразование энергии.

Поле на поверхности ВПМ задается в виде нормальной составляющей напряженности:

$$H_{z0} = H_{z0} \cos q_1 x \cos q_2 y \,. \tag{3.27}$$

Исходя из чего решение ищется в виде:

$$H_{z} = (C_{1} \operatorname{sh} q_{3} z + C_{2} \operatorname{ch} q_{3} z) \cos q_{1} x \cos q_{2} y, \qquad (3.28)$$

$$H_{x} = (C_{3}shq_{3}z + C_{4}chq_{3}z)sinq_{1}xcosq_{2}y, \qquad (3.29)$$

$$H_{y} = (C_{3}shq_{3}z + C_{4}chq_{3}z)\cos q_{1}x\sin q_{2}y , \qquad (3.30)$$

где $q_1 = \frac{\pi}{\tau}, q_2 = \frac{\pi}{l}, q_3 = \sqrt{q_{12}^2 + q_{32}^2}, \ \tau = \frac{\pi D}{2p}$ – полюсное деление ЭМПЭ; *l* – активная

длина ротора; *D* – диаметр ротора.

Из начальных условий определяются постоянные интегрирования

при 1) z = 0; при 2) $z = \delta$, $yC_1 chq_3\delta + yC_2 shq_3\delta = 0$, $C_1 = -C_2 thq_3\delta$.

С учетом условия непрерывности магнитного поля:

$$q_{3}(C_{1} \text{sh}q_{3}z + C_{2} \text{ch}q_{3}z) \cos q_{1}x \cos q_{2}y + +q_{1}(C_{3} \text{sh}q_{3}z + C_{4} \text{ch}q_{3}z) \cos q_{1}x \cos q_{2}y + +q_{2}(C_{3} \text{sh}q_{3}z + C_{4} \text{ch}q_{3}z) \cos q_{1}x \cos q_{2}y = 0$$
(3.31)

Можно получить приравненные слагаемые при одинаковых функциях sh и ch:

$$q_3C_1 + q_1C_4 + q_2C_4 = 0, (3.32)$$

$$q_3C_2 + q_1C_3 + q_2C_3 = 0. (3.33)$$

Отсюда:

$$C_4 = -C_1 \frac{q_3}{q_1 + q_2},\tag{3.34}$$

$$C_{3} = -C_{2} \frac{q_{3}}{q_{1} + q_{2}} = -C_{2} \frac{\sqrt{q_{1^{2}} + q_{2^{2}}}}{q_{1} + q_{2}}.$$
(3.35)

С учетом соотношений для C_{1} , C_{2} , C_{3} , C_{4} составляющие трех векторов напряженности поля имеют вид:

$$H_{z} = H_{z0m} \left(\operatorname{ch} q_{3} z - \operatorname{th} q_{3} \delta \operatorname{sh} q_{3} z \right) \cos q_{1} x \cos q_{2} y , \qquad (3.36)$$

$$H_{x} = -H_{z0m} \frac{q_{3}}{q_{1} + q_{2}} \operatorname{ch} q_{3} z (\operatorname{th} q_{3} \delta - \operatorname{th} q_{3} z) \operatorname{sin} q_{1} x \cos q_{2} y , \qquad (3.37)$$

$$H_{y} = -H_{z0m} \frac{q_{3}}{q_{1} + q_{2}} \operatorname{ch} q_{3} z (\operatorname{th} q_{3} \delta - \operatorname{th} q_{3} z) \cos q_{1} x \cos q_{2} y.$$
(3.38)

В относительно коротких машинах ослабление поля, создаваемого ВПМ ротора за счет полей рассеяния H_x , H_y , может быть значительным при больших немагнитных зазорах, которые определяются как толщиной слоя бандажа, так и увеличением воздушного зазора для создания лучших условий охлаждения ротора.

Поскольку составляющие магнитного поля H_x , H_y ослабляют основную составляющую магнитного поля H_z , представляется целесообразным оценить их влияние на H_z . При малых зазорах $q_3\delta <<1$, th $q_3\delta$ – th $q_3z \approx 0$, $h_x \approx 0$, $h_y = 0$, $h_z = 1$, с ростом $q_3\delta$ убывает h_z , т.е. происходит ослабление нормальной составляющей магнитного поля.

При $q_3 \delta \rightarrow \infty, h_z = e^{-q_3 z} \cos q_1 x \cos q_2 y = 0.$ При $\beta << \alpha$:

$$h_z = (\operatorname{ch} q_1 z - \operatorname{th} \delta \operatorname{sh} q_1 z) \cos q_1 x, \qquad (3.39)$$

$$h_x = \operatorname{ch} q_1 z \left(\operatorname{th} q_1 \delta - \operatorname{th} q_1 z \right) \sin q_1 x, \qquad (3.40)$$

$$h_{\rm v} = 0.$$
 (3.43)

Из представленных выражений видно, что с уменьшением τ увеличивается h_x , а h_z уменьшается.

При q₂>>q₁,

$$h_{z} = (ch\beta z - th\beta\delta sh\beta z)cos\beta x, \qquad (3.44)$$

$$h_{y} = \mathrm{ch}\beta z (\mathrm{th}\beta\delta - \mathrm{th}\beta z) \mathrm{sin}\beta x, \qquad (3.45)$$

$$h_x = 0.$$
 (3.46)

При анализе представленных выражений видно, что с увеличением l уменьшается h_y , а h_z увеличивается. Таким образом, целесообразно найти условия, при которых h_z наибольшее.

Так как электромагнитные мощность, сила и момент на валу ЭМПЭ определяются нормальной составляющей магнитной индукции, пронизывающей обмотку, и аксиальной составляющей тока в обмотках, необходимо оценить влияние отношения *l* к *D*₁ на энергетические характеристики ЭМПЭ с ВПМ.

Это отношение входит в q_3 в виде:

$$q_{3} = \sqrt{\left(\frac{\pi}{\tau}\right)^{2} + \left(\frac{\pi}{l}\right)^{2}}.$$
(3.47)
Поскольку $\tau = \frac{\pi D}{2p}$, то $q_{3} = \frac{\pi}{\tau} \sqrt{1 + \left(\frac{\pi D}{2pl}\right)^{2}}.$

Из выражения для h_z, h_y видно, что с ростом l увеличивается H_z , а H_y

уменьшается. При
$$\frac{l}{D} > 3$$
, $q_3 = \frac{\pi}{\tau} \sqrt{1 + \left(\frac{\pi}{2p}\right)^2} = 1,12\frac{\pi}{\tau}$, для $p=1$. Для $p=2$, $q_3 = 1,03\frac{\pi}{\tau}$,

т.е. с увеличением аксиальных размеров влияние составляющей H_y на нормальную составляющую магнитного поля в зазоре уменьшается. Это позволяет рекомендовать выбор для ЭМПЭ с ВПМ геометрического соотношения $l / D \ge 3$.

Для проверки данного вывода было проведено трехмерное компьютерное моделирование магнитного поля в ЭМПЭ с ВПМ в программном комплексе Ansys. Результаты моделирования приведены на рисунке 3.5. При моделировании рассматривалась задача магнитостатики по аналогии с математическими выкладками, влияние внешней цепи СГЭ не рассматривалось.



Рисунок 3.5 – Трехмерное магнитное поле в зазоре ЭМПЭ с ВПМ λ =3 (*a*) и λ =4 (δ)

Результаты компьютерного моделирования подтвердили полученные аналитические выводы.

Визуально видно, что представленные аналитические решения в декартовой системе координат менее громоздки, чем полученные выражения в цилиндрических координатах. Поэтому необходимо определить значения зазора в ЭМПЭ с ВПМ, где возможно использование решения в декартовых координатах и где – в цилиндрических.
Для этого были рассчитаны зависимости тангенциального и радиального магнитного потока (*z* и *x* составляющие в выражениях) от величины воздушного зазора для ЭМПЭ с диаметром ротора 60 мм и активной длиной 180 мм. Сравнительный анализ результатов расчета для тангенциального магнитного потока представлен на рисунке 3.6.



Рисунок 3.6 – Зависимость тангенциального магнитного потока, рассчитанного в прямоугольной и цилиндрической системах координат, от изменения зазора

Из анализа рисунка 3.6 видно, что в области малых зазоров (до 4 мм) расхождение между решениями для цилиндрической системы координат и декартовой системы координат не превышают 3%. В области величины воздушного зазора более 4 мм расхождение между решениями для цилиндрической и декартовой системами координат достигает 20%, для радиального магнитного потока результаты имеют аналогичный характер. Таким образом, очевидно, что для зазора не более 4 мм допускается использование выражений в декартовых координатах, а при зазоре более 4 мм необходимо учитывать кривизну воздушного зазора и рассчитывать магнитное поле в нем по выражениям в цилиндрических координатах.

3.3 Исследования процессов в ЭМПЭ с ВПМ на основе разработанной обобщенной математической модели

Ввиду трудоемкости исследований влияния механических процессов в упругих подшипниковых опорах на характеристики ЭМПЭ с ВПМ аналитическими методами, исследования разработанной математической модели производились в программном комплексе Matlab численными методами. При этом рассматривался высокооборотный ЭМПЭ с ВПМ в генераторном режиме (мощность 120 кВт, частота вращения ротора 35 000 об/мин, выходное линейное напряжение 200 В, внешний диаметр ротора 65 мм, активная длина 135 мм, диаметр расточки статора 74 мм, внешний диаметр статора 150 мм). Для решения поставленной задачи разработанная математическая модель была реализована в виде имитационной компьютерной модели.

Необходимо отметить, что созданная математическая модель позволяет исследования ЭМПЭ с ВПМ в составе СГЭ, в том числе она позволяет реализовать различные режимы работы и разгонные характеристики силовой установки СГЭ ЛА (авиационного двигателя или ВСУ).

При моделировании влияния механических процессов в упругих подшипниковых опорах на электромагнитные процессы в ЭМПЭ рассматривалось резкое изменение баланса сил, воздействующих на ротор ЭМПЭ и перемещение ротора, обусловленное этим изменением, с последующим возвратом ротора в исходное положение. Изменение баланса механических усилий в опорах может быть вызвано, например, стартерным запуском силовой установки ЛА. Исследование подобных режимов для СГЭ ЛА представлено автором в работе [256].

В результате моделирования для ЭМПЭ были получены следующие результаты: при перемещении ротора на БПО на 10% от воздушного зазора на стороне увеличения воздушного зазора индуктивное сопротивление обмотки увеличивается на 0,5–1%. При этом возникают характерные незначительные провалы напряжения, рисунок 3.7.

Величина и длительность данных провалов определяются жесткостью упругих подшипниковых опор и постоянной времени его системы управления. То есть при достаточно низкой жесткости ГМП, для обеспечения постоянства напряжения необходимо при применении упругих подшипниковых опор (например, систем магнитного подвеса) в ЭМПЭ с ВПМ рассчитывать регулятор напряжения ЭМПЭ с учетом параметров упругих подшипниковых опор. Причем

параметры по быстродействию и возможностям регулирования данной системы должны согласовываться с параметрами системы управления упругими подшипниковыми опорами, при ее наличии.



Рисунок 3.7 – Результаты имитационного моделирования процесса изменения индуктивных сопротивлений ЭМПЭ с ВПМ

Предложенная обобщенная математическая модель позволила оценить влияние упругих подшипников на динамику ротора (в основном исследовались гибридные магнитные подшипники), выявить новые диагностические и технические критерии перемещения ротора, эффективность использования воздействия упругих подшипниковых опор на управление дисбалансом и критическими частотами вращения ротора ЭМПЭ с ВПМ.

На основе анализа предложенной математической модели при непосредственном участии автора были разработаны новые способы управления ротором на магнитных подшипниках, диагностики состояния ЭМПЭ с ВПМ, а также реализованы методы диагностики технического состояния ЭМПЭ с ВПМ и управление положением ротора у упругих подшипниковых опорах на их основе:

• Способ и устройство управления положением ротора в магнитных подшипниках (патент РФ № 2518053). Данный способ заключается в получении сигнала с датчика, электрически соединенного с пропорционально-интегрально-дифференциальным регулятором и силовым преобразователем, отличающийся тем, что управление положением ротора осуществляют по напряженности внешнего магнитного поля магнитных подшипников на постоянных магнитах, использующихся в качестве основных опорных подшипников, информация об

изменении которой поступает в пропорционально-интегральнодифференциальный регулятор и силовой преобразователь, которые регулируют напряжение на двух электромагнитах, посредством которых управляют устойчивостью ротора.

Способ бессенсорного управления положением ротора В бесконтактных подшипниках (патент РФ № 2539690). Данный способ заключается в том, что измеряют электродвижущую силу каждой фазы электрической машины и раскладывают ее на гармонические составляющие, измеряют выходное напряжение электрической машины и представляют его в двухфазной системе координат, в которой рассчитывают эквивалентные токи, измеряют скорость вращения ротора, и по изменению первой, третьей, девятой и сорок третьей гармоники электродвижущей силы судят о пространственном положении ротора, а по изменению напряжений, частоты вращения и эквивалентных токов в двухфазной системе координат судят об угловой координате ротора, при этом информация об изменении пространственного положения ротора и угловой координате поступает в регулятор и силовой преобразователь, которые регулируют величину воздействия управляющих элементов.

РΦ • Способ диагностирования электрической машины (патент № 2542596), по которому измеряют электродвижущую силу, отличающийся тем, что электродвижущую силу измеряют в момент холостого хода электрической машины на номинальной частоте вращения ротора, сравнивают ее с эталонной величиной, характеризующей исправное состояние электрической машины, и при расхождении измеренной электродвижущей силы и эталонной по величине измеренной электродвижущей силы рассчитывают величины статических и динамических эксцентриситетов, а по разложению осциллограммы измеренной электродвижущей силы в ряд Фурье рассчитывают уровень колебаний, и по величинам статических и динамических эксцентриситетов, а также по уровню колебаний судят о техническом состоянии электрической машины в режиме реального времени.

Способ прохождения критических частот вращения В PΦ № электромеханическом преобразователе энергии (патент 2605692) отличающийся тем, что режиме измерения скорости ротора В

148

электромеханического преобразователя энергии на гибридных магнитных подшипниках, состоящих из магнитных подшипников на постоянных магнитах и электромагнитных подшипников, посредством блока управления электромагнитными подшипниками измеряют значение напряжения на обмотках статора, сравнивают со значениями, заложенными в программу блока управления, при которых появляются критические частоты вращения ротора, и при приближении к значению напряжения, соответствующему диапазону критической частоты вращения ротора, что составляет ±10% от критической частоты, блоком управления электромагнитными подшипниками импульсно повышают ток на обмотках электромагнитных подшипников, тем самым мгновенно изменяют жесткость гибридных магнитных подшипников, смещая диапазон критических частот для данного ротора, причем при прохождении зоны критических частот, заложенных в программе блока управления электромагнитными подшипниками, ток на обмотках электромагнитных подшипников возвращают к номинальному возвращая жесткость гибридных магнитных значению, подшипников к номинальным значениям.

Способ управления положением ротора электрической машины на бесконтактных подшипниках (варианты) и электрическая машина для его реализации (патент РФ № 2656871), заключающийся в измерении сигнала с обмоток электрической машины, ПО изменению которого судят 0 пространственном положении ротора, при этом информация об изменении пространственного положения ротора поступает в регулятор и силовой преобразователь, которые регулируют величину воздействия управляющих элементов, отличающийся тем, что в правой и левой формирующих измерительный сигнал обмотках, которые уложены в каждом пазу электрической машины, создают высокочастотное магнитное поле, частота которого больше частоты пятой гармоники электрической машины, при этом в электропроводящих элементах ротора наводят вихревые токи, которые создают вторичное магнитное поле, воздействие которого воспринимается измерительной обмоткой, и по результату измерения сигнала с измерительной правой и левой обмоток судят о пространственном положении ротора, причем сигналы правой и левой обмоток обеспечивают симметричность, при несимметричности данных сигналов судят об

149

угловых перекосах ротора, при этом информация об изменении пространственного положения ротора и угловой координаты поступает в регулятор и силовой преобразователь, которые регулируют величину воздействия управляющих элементов.

3.4 Влияние эксцентриситета ротора на параметры ЭМПЭ с ВПМ

Как отмечалось выше, эксцентриситет ротора в ЭМПЭ с ВПМ, в особенности в высокооборотных ЭМПЭ с ВПМ и интегрированных в силовую установку ЭМПЭ с ВПМ, является проблемой, которая оказывает значительное влияние на эксплуатацию всего СГЭ ЛА в целом, на силовую установку и эффективность подшипниковых опор в частности.

Поэтому представляется целесообразным на основе полученной математической модели произвести исследования эксцентриситета ротора и оценить его влияние на ЭМПЭ с ВПМ в частности и на СГЭ в целом.

Используя тензор натяжений Максвелла для эксцентричного ротора ЭМПЭ с ВПМ, рисунок 3.8, сила на единицу длины может быть определена в следующем виде [257]:

$$F_{x} = -\frac{1}{2\mu_{0}} \iint \left[\left(B_{\varepsilon\varphi}^{2} - B_{\varepsilon r}^{2} \right) \cos\alpha + 2B_{\varepsilon\varphi} B_{\varepsilon r} \sin\alpha \right] r(\alpha) d\alpha$$
(3.48)

$$F_{y} = -\frac{1}{2\mu_{0}} \iint \left[\left(B_{\varepsilon r}^{2} - B_{\varepsilon \phi}^{2} \right) \sin \alpha + 2B_{\varepsilon \phi} B_{\varepsilon r} \cos \alpha \right] r(\alpha) d\alpha, \qquad (3.49)$$

где F_x , F_y – силы, действующие на эксцентричный ротор; B_{φ} , B_r – радиальная и тангенциальная составляющие магнитной индукции в немагнитном зазоре ЭМПЭ с ВПМ; μ_0 – магнитная проницаемость вакуума; α – угловая координата ротора.



Рисунок 3.8 – Эксцентричный ротор ЭМПЭ с ВПМ СГЭ ЛА

С учетом эксцентриситета ротора величина зазора:

$$\delta_{_{\theta}} = \delta_{_{\mathrm{B}0}} - \varepsilon \cos \alpha \,, \tag{3.50}$$

где δ_{в0} – воздушный зазор при концентричном положении ротора; ε – эксцентриситет

Введем в выражение (3.50) изменение зазора для эксцентричного ротора и подставим результаты расчетов в (3.48) и (3.49).

Ввиду ограниченности объема данные выкладки не приводятся, но они определяются путем простых алгебраических вычислений.

Используя программный комплекс Matlab, был произведен анализ выражений (3.48) и (3.49) с учетом полученных решений для уравнений Лапласа.

При этом рассматривались три случая: концентричное положение ротора, эксцентриситет ротора 5% от величины воздушного зазора и эксцентриситет ротора 10% от величины воздушного зазора. В результате было установлено, что при эксцентриситете 5% от величины воздушного зазора магнитная индукция на стороне уменьшения зазора увеличивается на 10%, а на стороне увеличения зазора уменьшается на 8%. При эксцентриситете 10% от воздушного зазора магнитная индукция на стороне уменьшения зазора увеличивается на 24%, а на стороне 22%. увеличения зазора уменьшается на Для верификации созданной математической модели был выполнен анализ влияния эксцентриситета на характеристики ЭМПЭ с ВПМ СГЭ ЛА с помощью методов компьютерного моделирования в программном комплексе Ansys Maxwell.

Оценка влияния эксцентриситета на параметры ЭМПЭ с ВПМ выполнялась в программном комплексе Ansys Maxwell. При этом также, как и при аналитическом решении, рассматривались три случая: концентричное положение ротора, эксцентриситет ротора 5% от величины воздушного зазора и эксцентриситет ротора 10% от величины воздушного зазора. Результаты компьютерного моделирования для всех рассматриваемых случаев приведены на рисунке 3.9.

При анализе результатов компьютерного моделирования оценивалось изменение магнитной индукции, а также токов в ЭМПЭ с ВПМ. В результате компьютерного моделирования было установлено, что при эксцентриситете 5% от

величины воздушного зазора магнитная индукция на стороне уменьшения зазора увеличивается на 7%, а на стороне увеличения зазора уменьшается на 6,8%. При эксцентриситете 10% от воздушного зазора магнитная индукция на стороне уменьшения зазора увеличивается на 19%, а на стороне увеличения зазора уменьшается на 18–19%.



Рисунок 3.9 – Результаты компьютерного моделирования эксцентричного положения ротора в ЭМПЭ с ВПМ

В целом сила одностороннего магнитного тяжения определяется квадратом радиальной составляющей плотности магнитного потока в воздушном зазоре. Поэтому изменение силы одностороннего магнитного тяжения, а также изменение жесткости ЭМПЭ с ВПМ при эксцентриситете ротора можно оценить именно по асимметрии плотности магнитного потока в воздушном зазоре. Так как сила одностороннего магнитного тяжения зависит от квадрата магнитной индукции, то очевидно, что сила одностороннего магнитного тяжения при эксцентриситете 10% увеличится на 41%, а отрицательная жесткость ЭМПЭ с ВПМ изменится в 1,22 раза. То есть жесткость подшипниковых опор с учетом влияния возможного эксцентриситета должна быть больше на 1,22 раза своего начального номинального значения. Также очевидно, что тяговые усилия подшипниковых опор, в случае применения магнитных или газовых подшипников, должны иметь запас по своим силовым характеристикам в 1,44 раза.

3.5 Зависимость магнитного поля реакции якоря в ЭМПЭ с ВПМ от температуры ВПМ

Очевидно, что тепловые эффекты влияют не только на первичное магнитное поле ЭМПЭ с ВПМ, они оказывают значительное влияние и на вторичное

магнитное поле (поле реакции якоря). При исследованиях эксплуатации ЭМПЭ в составе СГЭ ЛА взаимовлияние тепловых и электромагнитных процессов вторичного поля является наиболее важным, так как отражает не только характеристики самого ЭМПЭ с ВПМ, а позволяет оценить влияние данных характеристик на другие агрегаты СГЭ ЛА, также учет подобных взаимовлияний позволяет рассчитывать более точно внешние характеристики ЭМПЭ с ВПМ при эксплуатации в составе СГЭ.

При исследованиях взаимовлияния магнитного поля реакции якоря и тепловых процессов воспользуемся понятием безразмерной частоты или магнитного числа Рейнольдса (безразмерная частота), введенного по отношению к ЭМПЭ А. И. Вольдеком. Магнитное число Рейнольдса наиболее полно отражает зависимость и индуктивного, и активного сопротивлений и их влияние на различные характеристики ЭМПЭ.

Для оценки влияния температуры на безразмерную частоту и на размагничивающее действие поля реакции якоря авторами были произведены численные расчеты зависимости безразмерной частоты ЭМПЭ с ВПМ при различных режимах нагрузки (короткое замыкание ($r_{\mu} = 0$), номинальная нагрузка, полуторакратная нагрузка, двукратная нагрузка). Результаты расчетов представлены на рисунке 3.10.



Рисунок 3.10 – Зависимость безразмерной частоты от температуры: *а* – идеальное короткое замыкание; *б* – полуторакратная перегрузка; *в* – номинальная нагрузка; *г* – двукратная нагрузка

Из рисунка 3.10 видно, что максимальное влияние температуры на поле реакции якоря в ЭМПЭ с ВПМ имеет место при КЗ. При увеличении температуры в 2 раза безразмерная частота снижается на 25%, при этом ВПМ близки к размагничиванию (коэрцитивная сила, создаваемая ВПМ при КЗ, составляет всего 4 кА/м). В других режимах работы ЭМПЭ повышение температуры оказывает незначительное влияние на размагничивающее действие поля реакции якоря (безразмерная частота изменяется не более чем на 0,5% / 100 °C).

3.6 Исследование влияния температуры ВПМ на внешнюю характеристику ЭМПЭ с ВПМ

В предыдущем параграфе были приведены исследования влияния температуры на величину размагничивающего поля реакции якоря. При этом очевидно, что если температура сказывается на величине реакции якоря, то она должна сказываться и на внешней характеристике высокооборотных ЭМПЭ с ВПМ при их работе в генераторном режиме.

В качестве примера для исследования внешних характеристик ЭМПЭ с ВПМ рассматривается внешняя характеристика неявнополюсного ЭМПЭ с ВПМ с частотой вращения ротора 24 000 об/мин, мощностью 100 кВт и линейным напряжением 200 В. Данный ЭМПЭ (МЭГ-100Ч) был разработан при участии автора на АО «УАПО», акт внедрения представлен в приложении к диссертации. (Приложение 15)

Внешняя характеристика, ввиду равенства индуктивных сопротивлений по осям *d* и *q*, строилась на основе уравнения эллипса [75]:

$$\left(\frac{U}{E_0}\right)^2 + \left(\frac{I}{I_k}\right)^2 + 2\left(\frac{U}{E_0}\frac{I}{I_k}\right)\cos\left(\varphi - \arctan\frac{x_d}{r}\right) = 1, \qquad (3.53)$$

где E_0 – ЭДС холостого хода ЭМПЭ с ВПМ; I_k – ток, при котором происходит размагничивание ВПМ, определяется из рабочей диаграммы ВПМ; x_d – синхронное индуктивное сопротивление по продольной оси.

При построении внешней характеристики по предложенному методу для определения тока I_k были построены рабочие диаграммы магнитов для нескольких значений температуры (23, 175, 230 °C), также учитывалось изменение ЭДС

холостого хода при увеличении температуры, изменение активного сопротивления фазы и реактивного сопротивления ВПМ. В результате была получена внешняя характеристика с учетом температуры и без учета температуры, рисунок 3.11.



Рисунок 3.11 – Внешняя характеристика ЭМПЭ с ВПМ с учетом влияния температуры и без учета влияния температуры

Из рисунка 3.11 видно, что расхождение между кривыми (с учетом температурного влияния и без учета температурного влияния) при трехкратной перегрузке может достигать 20%.

Предложенный метод учета взаимовлияния магнитных и тепловых полей был апробирован экспериментально на ЭМПЭ с ВПМ МЭГ-100Ч и показал свою высокую точность и эффективность.

3.7 Исследования зависимости температурных коэффициентов ВПМ от температуры

Так как температурные коэффициенты ВПМ в разрабатываемой теории играют значительную роль, то представляется целесообразным выполнить их исследования в зависимости от температуры. В диссертации данная задача решается путем экспериментальных исследований различных типов ВПМ.

Разработанная экспериментальная установка для исследования температурных коэффициентов ВПМ содержит (рисунок 3.12): магнитную

систему, выполненную из стали, в зазоре магнитной системы установлен исследуемый BΠM, на поверхности магнитной системы располагаются немагнитные накладки, позволяющие контролировать величину воздушного зазора. Нагрев ВПМ осуществляется двумя электронагревателями (ЭН). Причем ЭН нагревает непосредственно сам ВПМ и магнитную систему. Показания магнитной индукции в воздушном зазоре измеряются посредством датчика Холла, ТПУ-05, соединенного с милитесламетром измерение температуры осуществляется с помощью термопары 8, соединенной с мультиметром.



Рисунок 3.12 – Установка для исследования температурных коэффициентов ВПМ

При экспериментальных исследованиях в качестве образца исследовались ВПМ *NdFeB* $(30 \times 20 \times 10)$ прямоугольной формы марки с начальными характеристиками Br=1,1 Тл, коэрцитивной силе по намагниченности Hj=760 кА/м, максимальным энергетическим произведением 256 кДж/м³, максимальной рабочей температурой 150 °С, выполненным по ТУ 6391-002-55177547-2005 и SmCo (YX30) прямоугольной формы (30×20×10) с начальными характеристиками Br=1,1Tл, *Hj*=597 кА/м. коэрцитивной силе намагниченности ПО максимальным энергетическим произведением 239 кДж/м3, максимальной рабочей температурой 300 °C.

Методика проведения экспериментальных исследований заключается в следующем:

1. Контролируемый нагрев исследуемого образца посредством нагревателей 4, 5 (рисунок 3.12) Начальной точкой нагрева при этом считается комнатная температура, а конечной 150 °C;

2. Измерение температуры ВПМ посредством термопары в режиме реального времени;

3. Измерение магнитной индукции в зазоре экспериментальной установки посредством милитесламетра ТПУ-05 в режиме реального времени;

4. При достижении образцом максимальной исследуемой температуры происходит охлаждение образца до комнатной температуры и повторение пунктов 1–4.

В результате экспериментальных исследований были определены значения магнитной индукции в воздушном зазоре экспериментальной установки (B_{δ}) для различных значений температуры ВПМ (T_{BIM}) на основе сплава *NdFeB*, которые посредством интерполяции были преобразованы в зависимость (рисунок 3.13).

В результате конвективного нагрева ВПМ на основе сплава *NdFeB* было выявлено, что при увеличении температуры с 20 до 100 °C индукция в воздушном зазоре магнитопровода линейно убывает от 0,965 до 0,7 Тл (на 27,4 или 3,4% B_{δ} на 10 °C), а при увеличении температуры с 130 до 155 °C индукция резко убывает от 0,7 до 0,4 Тл (на 42,85 или 5,8% B_{δ} на 10 °C) по кривой, близкой к экспоненциальной.

В результате конвективного нагрева ВПМ на основе сплава *SmCo* было выявлено, что при увеличении температуры с 80 до 120 °C индукция в воздушном зазоре экспериментальной установки линейно убывает от 0,471 до 0,455 Тл (на 3,3 или 0,85 % Вδ на 10 °C), а при увеличении температуры с 120 до 150 °C индукция резко убывает от 0,455 до 0,438 Тл (на 3,8 или 1,3 % B_{δ} на 10 °C) по кривой, близкой к экспоненциальной.

Важно отметить, что для определения зависимости энергетических характеристик ВПМ от температуры существуют выражения (3.5), (3.6), в которых используются линейные температурные коэффициенты. В результате

экспериментальных исследований установлено, что поскольку при температуре от 130 до 155 °C, индукция убывает по кривой, близкой к экспоненциальной, можно сделать вывод, что зависимость температурных коэффициентов от температуры носит нелинейный характер.



Рисунок 3.13 – Зависимость индукции в воздушном зазоре экспериментальной установки от температуры ВПМ на основе сплава *NdFeB* (*a*) и на основе сплава *SmCo* (б)

Это подтверждает вывод, что зависимость температурных коэффициентов ВПМ от температуры ВПМ имеет нелинейный характер. Полученные экспериментальные зависимости учитываются в обобщенной математической модели.

3.8 Оценка эффективности разработанной методологии комплексного анализа при проектировании агрегатов СГЭ ЛА

Для оценки эффективности предложенной методологии комплексного анализа ЭМПЭ с ВПМ с целью обеспечения минимальных затрат времени на проектирование и разработку агрегатов СГЭ ЛА проводилось сравнение двух проектов, выполненных при участии автора. В первом проекте был разработан электродвигатель ЭТН-91 В (ЭМПЭ с ВПМ мощностью 100 Вт, создан для топливного насоса ЭЦН-91), во втором проекте был разработан электродвигатель МП-40 (ЭМПЭ с ВПМ мощностью 80 Вт, создан для топливного насоса типа ЭЦН).

Конструктивное исполнение обоих ЭМПЭ одинаковое. При этом при реализации первого проекта была использована комплексная методология анализа магнитных полей, а при анализе второго была использована устоявшаяся методология последовательного анализа. Акты внедрения по обоим проектам приведены в приложениях к диссертации. (Приложение 9,16)

В обоих проектах были разработаны демонстрационные образцы и опытные партии.

При этом затраты времени на выполнение первого проекта, согласно договору АП-ЭМ-09-17-ХК, составили 4 месяца (с разработкой КД и изготовлением опытного образца), а при традиционной технологии проектирования (согласно договору АП-ЭМ-01-18-ХК время создания опытного образца составило не менее 5 месяцев). Срок изготовления опытного образца по обоим проектам составил 3 месяца. Оба проекта выполнялись в практически одинаковых условиях, при одинаковом количестве специалистов и одинаковом объеме работ. При этом максимальное время на проектирование было затрачено при выполнении тепловых расчетов, при последовательном анализе.

Сравнение временных затрат двух методов приведено в таблице 3.1. Как видно из таблицы 3.1, предлагаемая методология позволяет практически на 20 % сократить временные затраты при создании ЭМПЭ с ВПМ и СГЭ ЛА.

Таким образом, очевидно, что применение предлагаемой в диссертационной работе комплексной методологии позволяет практически в два раза сократить временные затраты на проектирование, что подтверждается актами выполненных работ по рассмотренным проектам.

Таблица 3.1 – Сравнение временных затрат предложенного и устоявшегося метода на примере ЭД ВЭП-40 и ЭТН-91В

	Комплексная методология	Последовательная	
	(ЭТН-91B)	методология (ВЭП-40)	
Электромагнитные расчеты, ч	70	30	
Тепловые и гидравлические		80	
расчеты, ч			
Механические расчеты, ч		20	

160 ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 3

1. Разработано описание основного магнитного поля в воздушном зазоре ЭМПЭ с ВПМ в цилиндрических (двухмерная задача) и декартовых координатах (трехмерная задача), на основе исследований которого установлены:

– рациональные безразмерные соотношения длины и диаметра ротора ЭМПЭ с ВПМ, при отношении $\frac{l}{D}$ > 3 тангенциальная составляющая напряженности магнитного поля в воздушном зазоре минимальна, а нормальная составляющая максимальна, то есть рассеивание магнитного потока при данном соотношении 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 *Sm*₂*Co*₁₇ – 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;

-при радиальном смещении ротора на упругих подшипниковых опорах на 10% от воздушного зазора, на стороне увеличения воздушного зазора индуктивное сопротивление увеличивается на 0,5–1%. При этом МДС в воздушном зазоре на стороне увеличения воздушного зазора изменяется на 3%. В результате перемещения ротора и отработки системы управления ГМП для возврата ротора в исходное положение на клеммах ЭМПЭ с ВПМ возникают характерные незначительные провалы напряжения. Величина и длительность данных провалов определяется жесткостью ГМП и постоянной времени его системы управления. То есть при достаточно низкой жесткости ГМП и при условии постоянства нагрузки ЭМПЭ с ВПМ, а также постоянства его частоты, из-за применения ГМП необходимо вводить дополнительно систему стабилизации выходного напряжения ЭМПЭ с ВПМ;

-зависимость свойств ВПМ от температуры имеет нелинейный характер, что было установлено в ходе экспериментальных исследований и учтено в обобщенной математической модели.

2. Разработан математический аппарат, позволяющий проводить исследование эксцентриситета ротора. Исследования с помощью полученного математического аппарата показали, что сила одностороннего магнитного тяжения при эксцентриситете ротора 10% увеличится на 41%, а отрицательная жесткость ЭМПЭ с ВПМ изменится в 1,22 раза. То есть жесткость подшипниковых опор с учетом влияния возможного эксцентриситета должна быть больше на 1,22 раза своего начального номинального значения. Также очевидно, что тяговые усилия подшипниковых опор в случае применения магнитных или газовых подшипников должны иметь запас по своим силовым характеристикам в 1,44 раза. Также было доказано, что при расчетах ЭМПЭ с ВПМ на БПО необходимо обязательно учитывать силы одностороннего магнитного тяжения ЭМПЭ с ВПМ как элемент, вносящий отрицательную позиционную жесткость систему В упругих подшипниковых опор.

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

4. Показано, что предложенная методология комплексного анализа магнитных и тепловых полей с учетом требований механической прочности позволяет практически в два раза снизить время, необходимое для проектирования ЭМПЭ с ВПМ как агрегата СГЭ ЛА.

ГЛАВА 4 ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ЭМПЭ С ВПМ СОВМЕСТНО С РЕГУЛЯТОРОМ НАПРЯЖЕНИЯ В СОСТАВЕ СГЭ ЛА

В данной главе приводится исследование методов стабилизации напряжения ЭМПЭ с ВПМ при работе в составе СГЭ ЛА. Результаты исследований подтверждаются экспериментальными данными.

Стабилизация напряжения СГЭ с ЭГ с ВПМ возможна несколькими способами, описанными в литературе [250, 258, 260]. Классификация данных способов представлена на рисунке 4.1.



Рисунок 4.1 – Классификация систем регулирования и стабилизации напряжения ЭГ с ВПМ

Ряд из данных методов, например механические, имеет довольно низкую эффективность при частотах вращения ротора ЭГ более 6000 об/мин и поэтому здесь не рассматриваются.

Методы самостабилизации напряжения ЭГ с ВПМ были разработаны в последние 5 лет при непосредственном участии автора (патент РФ №2637767). Данные методы имеют перспективу использования, но требуют высокой точности и технологичности изготовления. Далее методы изложены более подробно.

Метод прямой тепловой стабилизации предложен автором (патент №2597888). Суть данного метода заключается в тепловом воздействии на постоянный магнит и изменении тем самым его свойств. Данный метод имеет широкий диапазон регулирования, но из-за низких значений тепловых постоянных времени он может быть использован только в системах, в которых время

переходного процесса не нормируется. Другим вариантом использования данного метода является форсирование теплопередачи к ВПМ.

Способы комбинированной стабилизации напряжения ЭГ, например, выполнение в одном корпусе ЭГ с ВПМ и индукторного ЭГ (стартер-генератор СТГ-9В, АО «Технодинамика»), или размещение на одном роторе обмоток возбуждения и ВПМ (генератор СГК-30, АО «СЭГЗ»). Данные способы отличаются значительными перегревами ротора, тепло от которого отводить затруднительно, поэтому данные ЭГ выполняются «раздутыми» и обладают значительными массогабаритными показателями. Исходя из практики, их массогабаритные показатели на 30–50% больше, чем ЭГ с другими способами регулирования напряжения.

Наиболее эффективными, нашедшими широкое применение на практике, являются способы, основанные на подмагничивании участка магнитопровода статора (зубцов, спинки, клиньев), (при участии автора был разработан ЭГ с ВПМ мощностью 120–150 кВт и частотой вращения ротора 24 000 об/мин с подмагничиванием магнитопровода статора), способы со статическим преобразователем энергии и способы, основанные на параллельной стабилизации напряжения (подключение стабилизатора параллельно ЭГ).4

4.1 Работа ЭМПЭ с ВПМ совместно с управляемым выпрямителем в составе СГЭ ЛА

На основе анализа обобщенной структурной модели в главе 2 было доказано, что наиболее перспективными вариантами построения СГЭ ЛА единичной мощностью более 250 кВт является создание систем с повышенным напряжением постоянного тока 270 или 540 В.

При создании подобных СГЭ, ЭМПЭ с ВПМ работает совместно с выпрямителем на нелинейную нагрузку. Регулирование напряжения в этом случае осуществляется повышающим преобразователем напряжения. Повышающий преобразователь напряжения построен по схеме двухуровневого активного корректора коэффициента мощности. Каждый уровень состоит из транзистора, дросселя и диода. Управление ключами повышающего преобразователя напряжения осуществляется микроконтроллером посредством генерации ШИМсигнала. Алгоритм управления основан на сравнении сигнала рассогласования тока с опорным пилообразным сигналом. Ширина импульсов управления ключами определяется величиной ошибки относительно напряжения, а частота следования импульсов – частотой пилообразного сигнала.

В работах В. А. Балагурова, А. Н. Ледовского, В. В. Лохнина, С. А. Харитонова, Л. Э. Рогинской [4, 10, 75, 250, 258–263] и др. приведены основные расчетные уравнения для оценки эффективности работы ЭМПЭ с ВПМ совместно с выпрямителем, также в данных работах изложены основы стабилизации напряжения ЭМПЭ с ВПМ при помощи выпрямителя. При этом в данных работах рассматривается только система «ЭМПЭ с ВПМ–выпрямитель», а внешняя нагрузка, которая для современных СГЭ ЛА является явно нелинейной, в данных работах не рассматривается. Поэтому представляется целесообразным для обобщения теории СГЭ ЛА произвести исследования системы «ЭМПЭ с ВПМ– выпрямитель–нелинейная нагрузка».

Для исследования влияния различных типов нагрузки на параметры ЭМПЭ с ВПМ была разработана имитационная модель СГЭ ЛА в среде LTSpiceIV, содержащая трехфазный ЭМПЭ с ВПМ, выпрямитель и нагрузку постоянного тока (рисунок 4.2).

Ввиду того, что в среде LTSpice IV не имеется готовых блоков, имитирующих работу электрических машин, для решения поставленной задачи ЭМПЭ с ВПМ был представлен тремя однофазными источниками и тремя парами магнитно-связанных индуктивностей, образующих трехфазный источник напряжения.



Рисунок 4.2 – Имитационная модель СГЭ ЛА

Имитационное моделирование проводилось для системы, содержащей трехфазный источник переменного напряжения 115/200 В (ЭМПЭ с ВПМ) с частотой 400 Гц с заземленной нейтралью, и нагрузку, подключаемую через однофазный или трехфазный выпрямитель. Таким образом, разработанная схема имитационной модели имитирует СГЭ ЛА, включающую в себя ЭМПЭ с ВПМ, фильтры и нагрузку, имеющую нелинейный характер. На рисунках 4.3 и 4.4 представлены моделируемые схемы включения трехфазной и однофазной нелинейной нагрузок в составе СГЭ ЛА.



Рисунок 4.3 – Схемы подключения трехфазной нагрузки: *а* – активная; б – активно-емкостная; *в* – активно-индуктивная; *г* – активно-индуктивно-емкостная



Рисунок 4.4 – Схемы подключения однофазной нагрузки: *a* – активная; *б* – активно-емкостная; *в* – активно-индуктивная; *г* – активно-индуктивно-емкостная

По полученным данным имитационного моделирования с использованием программного комплекса Matlab определялись: полная мощность ЭМПЭ с ВПМ,

активная мощность ЭМПЭ с ВПМ, коэффициент мощности, суммарный коэффициент гармонических искажений потерь в ЭМПЭ с ВПМ.

В результате моделирования были получены кривые тока и напряжения ЭМПЭ с ВПМ и нагрузки при работе в составе СГЭ ЛА.

Из таблицы 4.1 видно, что при подключении трехфазного выпрямителя фазный ток ЭМПЭ с ВПМ содержит кроме основной гармоники также гармоники с номерами 5, 7, 11, 13, 17, 19. Гармоники, кратные трем, отсутствуют. При этом наиболее худший вариант для исследуемых численных параметров имеет место при трехфазной активно-емкостной нагрузке и однофазной активно-емкостной нагрузке. В этом случае коэффициент гармоник достигает 95,2%. При активной нелинейной трехфазной нагрузке коэффициент гармонических искажений – 29%. При этом при активно-индуктивной нелинейной нагрузке коэффициент гармонических искажений составляет 31,1%.

Схема, рисунок	S, кВт	Р, кВт	cos φ	Коэффициент гармоник,%
трехфазная активная нагрузка, рисунок 4.3, <i>а</i>	18,0	17,3	0,96	29,0
трехфазная активно- емкостная нагрузка, рисунок 4.3, б	24,7	17,5	0,71	95,2
трехфазная активно- индуктивная нагрузка, рисунок 4.3, в	17,9	17,1	0,95	31,3
трехфазная активно- индуктивно-емкостная нагрузка, рисунок 4.3, г	18,0	17,1	0,95	31,7
однофазная активная нагрузка, рисунок 4.4, <i>а</i>	3,1	3,1	1,00	2,4
однофазная активно- емкостная нагрузка, рисунок 4.4, б	6,9	4,5	0,65	93,3
однофазная активно- индуктивная нагрузка, рисунок 4.4, <i>в</i>	3,1	3,1	1,00	3,6
однофазная активно- индуктивно-емкостная нагрузка, рисунок 4.4, г	6,2	4,7	0,76	76,9

Таблица 4.1 – Результаты имитационного моделирования при работе ЭМПЭ с ВПМ с выпрямителем в составе СГЭ ЛА

Таким образом, используя полученные результаты, можно оценивать влияние нелинейной токовой нагрузки на СГЭ ЛА и ЭМПЭ с ВПМ и учитывать это влияние при проектировании СГЭ ЛА и ЭМПЭ с ВПМ, а также, исходя из полученных данных, выбирать фильтрокомпенсирующую аппаратуру СГЭ ЛА.

На основе выводов, полученных в данном параграфе, при непосредственном участии автора был разработан ЭМПЭ с ВПМ мощностью 120 кВт с частотой вращения ротора 60 000 об/мин, который работает совместно с выпрямителем. Созданный ЭМПЭ с ВПМ и его выпрямитель с функцией стабилизации напряжения приведен на рисунке 4.5.



Рисунок 4.5 – СГЭ ЛА на основе статического преобразователя и ЭМПЭ с ВПМ мощностью 120 кВт, созданные при участии автора

Результаты испытаний созданного ЭМПЭ с ВПМ и выпрямителя показали высокую сходимость разработанной имитационной модели.

4.2 Работа ЭМПЭ с ВПМ в составе СГЭ ЛА совместно с регулятором напряжения, включенным параллельно

Основные исследования данного метода приведены в [256, 259, 260]. Суть данного метода управления и стабилизации выходного напряжения ЭМПЭ с ВПМ заключается в том, что управление напряжением осуществляется изменением магнитного поля реакции якоря ЭМПЭ посредством индуктивного или емкостного тока, формируемого регулятором напряжения (PH). РН подключается параллельно нагрузке до фидера ЭМПЭ с ВПМ и потребляет ток, сдвинутый относительно напряжения ЭМПЭ с ВПМ строго на ±90°, тем самым PH либо усиливает магнитное поле реакция якоря ЭМПЭ с ВПМ и снижает его напряжение (индуктивный ток), либо ослабляет магнитное поле реакции якоря и повышает

напряжение ЭМПЭ с ВПМ (емкостной ток). При этом ток РН является для ЭМПЭ с ВПМ реактивным и не создает дополнительных тепловых потерь в обмотке ЭМПЭ с ВПМ и механической нагрузки на валу.

Структурная схема метода управления и стабилизации напряжения, реализуемая РН, показана на рисунке 4.6.



Рисунок 4.6 – Структурная схема метода управления и стабилизации выходного напряжения системы генерирования переменного тока стабильной частоты на

базе магнитоэлектрического генератора:

U_{ref} – заданное напряжение стабилизации (действующее значение);
U_{rms} – действующее значение фазного напряжения; e_u – рассогласование действующего значения напряжения; W[°]_p – передаточная функция регулятора опорного тока; *i_{dref}* – заданное значение опорного тока; e_{id} – рассогласование тока регулятора;
W[°]_p – передаточная функция инвертора напряжения; *i_{reg}* – ток регулятора напряжения;
G – модель генератора; *i_{abc}* – фазные токи регулятора; U_{abc} – фазные напряжения генератора. Блок *dq/abc* преобразует значения фазных токов в *dq*-координаты. Блок *RMS* измеряет действующее значение фазного напряжения

Для подтверждения работоспособности предложенного метода управления и стабилизации выходного напряжения ЭМПЭ с ВПМ в СГЭ ЛА и доказательства возможности его практической реализации была разработана имитационная модель канала генерирования в программном комплексе Matlab, рисунок 4.7, которая позволяет оценить работоспособность предложенного метода управления и стабилизации выходного напряжения генератора ЭМПЭ с ВПМ, а также длительность переходных процессов, точность стабилизации напряжения и получить регулировочную характеристику PH.





Рисунок 4.7 – Имитационная модель СГЭ ЛА (*сверху*) и блок привод-генератора (*снизу*)

Разработанная имитационная модель состоит из нескольких блоков: блок нагрузок (Load), блок PH, реализованный блоками (Current Regulator и Solver), а также блока привод-генератора (Generator).

На рисунке 4.7 представлен блок привод-генератора, входящий в состав имитационной модели СГЭ ЛА, приведенной на рисунке 4.7 (*сверху*). Представленная модель реализована в *dq*-координатах и позволяет моделировать работу ЭМПЭ с ВПМ в генераторном режиме в составе привода постоянной частоты в диапазоне нагрузок от холостого хода до трехкратной перегрузки.

При моделировании рассматривался ЭМПЭ с ВПМ со следующими численными параметрами: частота вращения 24 000 об/мин, номинальная мощность 100 кВА, частота генерируемого напряжения 400 Гц, магнитная индукция в воздушном зазоре 0,66 Тл.

В результате моделирования были получены значения тока PH, напряжения и тока генератора при резком изменении нагрузки.

Из анализа результатов моделирования (рисунок 4.8) видно, что предложенный метод управления и стабилизации напряжения ЭМПЭ с ВПМ работоспособен и позволяет управлять напряжением ЭМПЭ с ВПМ в широком диапазоне изменения нагрузок. Кроме того, очевидно, что наибольшая длительность переходного процесса наблюдается при изменении нагрузки от двукратной перегрузки до холостого хода и составляет 70 мс. При этом напряжение генератора достигает 140 В, т.е. увеличивается на 21,7%, после чего восстанавливается до номинального значения.



Рисунок 4.8 – Действующие значения тока PH, напряжения PH и тока генератора при резком изменении нагрузки

Как видно из рисунка 4.8, ток РН при моделировании работы СГЭ ЛА меняется в диапазоне от 0 А при 80% нагрузке до 200 А при холостом ходе или нагрузке 160%. При этом в режиме холостого хода генератора ток РН отстает от напряжения, а в режиме перегрузки – опережает на 90°, что также подтверждает правильность предложенного метода управления напряжением.

Для подтверждения данных имитационного моделирования был разработан и подвергнут испытаниям макет РН с ЭМПЭ с ВПМ, рисунок 4.9. Данный ЭМПЭ с ВПМ и РН предназначен для использования в системах перспективных летательных аппаратов.



Рисунок 4.9 – ЭМПЭ с ВПМ и РН с параллельной стабилизацией напряжения

Акт внедрения, подтверждающий результаты испытаний данного ЭМПЭ с ВПМ и PH, приведен в приложениях к диссертации.

4.2.1 Исследования магнитного поля реакции якоря для эффективной реализации работы РН с параллельной стабилизацией

Важным этапом для реализации на практике метода параллельной стабилизации напряжения ЭМПЭ с ВПМ является исследование влияния магнитного поля реакции якоря ЭМПЭ с ВПМ на характеристики СГЭ ЛА при совместной работе с РН.

Данная задача решается с помощью методов компьютерного моделирования в программном комплексе Ansys Maxwell. В рамках диссертационной работы разработана новая методика моделирования магнитного поля реакции якоря, которая описана далее. Решение поставленной задачи осуществляется для конкретного ЭМПЭ с ВПМ, геометрические размеры которого приведены в таблице 4.2. При исследованиях рассматриваются следующие задачи:

– влияние изменения воздушного зазора ЭМПЭ с ВПМ на магнитное поле реакции якоря при прочих неизменных геометрических размерах системы;

– влияние установившейся температуры ЭМПЭ с ВПМ на магнитное поле реакции якоря;

– влияние формы ВПМ ротора ЭМПЭ с ВПМ на величину магнитного поля реакции якоря ЭМПЭ с ВПМ.

Мощность, кВт	40
Внешний диаметр статора, мм	110
Внешний диаметр ротора, мм	45
Диаметр расточки статора, мм	51
Активная длина, мм	70
Частота вращения ротора, об/мин	50 000
Частота тока в обмотках ЭМПЭ с ВПМ, Гц	1666
Тип постоянных магнитов	<i>Sm</i> ₂ <i>Co</i> ₁₇
Плотность тока в обмотках, А/мм ²	6,5

Таблица 4.2 – Характеристики исследуемого ЭМПЭ с ВПМ

Для компьютерного моделирования магнитного поля реакции якоря в общем виде была разработана новая методика моделирования магнитного поля реакции якоря, которая позволяет учитывать не только воздействие магнитного поля реакция якоря, но и локальные размагничивания ВПМ. В общем виде разработанная методика может быть описана следующей последовательностью:

– по данным таблицы 4.2 в программном комплексе Ansoft Maxwell формируется 2D-конечно-элементная модель ЭМПЭ с ВПМ и производится моделирование электромеханических процессов, протекающих в ЭМПЭ с ВПМ, в динамике. В результате определяются мгновенные значения токов и напряжения в обмотках ЭМПЭ с ВПМ при определенном значении угла нагрузки (тип анализа в Ansoft Maxwell – Transient);

– определяется магнитное поле в зазоре ЭМПЭ с ВПМ при холостом ходе. По полученным результатам моделирования строится конечно-элементная модель ЭМПЭ с ВПМ с такой угловой координатой ротора относительно статора, при которой мгновенные значения токов в фазе A, определенные по результатам динамического анализа, максимальны и производится компьютерное моделирование ЭМПЭ с ВПМ при неподвижном роторе, при этом в обмотках статора задаются нулевые значения мгновенных токов (тип анализа в Ansoft Maxwell – Magnetostatic);

– определяется магнитное поле в зазоре ЭМПЭ с ВПМ при нагрузке и перегрузках. На построенной для предыдущего анализа конечно-элементной модели ЭМПЭ с ВПМ в обмотках статора задаются мгновенные значения токов, соответствующие угловой координате ротора, и производится компьютерное моделирование ЭМПЭ с ВПМ при неподвижном роторе (тип анализа в Ansoft Maxwell – Magnetostatic);

– в результате моделирования ЭМПЭ с ВПМ при неподвижном роторе и нулевых токах в обмотках статора, а также при неподвижном роторе и ненулевых токах в обмотках статора определяются картины магнитного поля в воздушном зазоре ЭМПЭ с ВПМ и кривая распределения магнитного поля под зубцами, которые наглядно демонстрируют влияние магнитного поля реакция якоря.

На рисунке 4.10, 4.11 в качестве примера представлены картины магнитного поля в воздушном зазоре ЭМПЭ с ВПМ при холостом ходе и номинальной нагрузке.

172



Рисунок 4.10 – Распределение магнитного поля на протяжении фазной зоны А-Х при номинальной нагрузке и перегрузочных режимах работы ЭМПЭ с ВПМ



Рисунок 4.11 – Картина магнитного поля в воздушном зазоре ЭМПЭ с ВПМ при холостом ходе и нагрузке

Из рисунков 4.10, 4.11 видно, что при холостом ходе магнитное поле в воздушном зазоре и ВПМ имело равномерное распределение, а при нагрузке распределение магнитного поля носит ступенчатый характер, причем под фазой А при нагрузке магнитное поле значительно меньше, чем при холостом ходе, что подтверждает соответствие используемого метода и разработанной модели реальным физическим процессам, протекающим в ЭМПЭ с ВПМ.

Также одной из задач, решаемых в работе, является исследование влияния формы ВПМ ротора ЭМПЭ с ВПМ на величину магнитного поля реакции якоря ЭМПЭ с ВПМ. При решении данной задачи рассматривались три магнитные системы ВПМ ротора ЭМПЭ с ВПМ, которые нашли наибольшее распространение в современной промышленности: с цилиндрическими ВПМ, намагниченными радиально, с полукруглыми ВПМ, намагниченными радиально, и полукруглыми ВПМ, намагниченными диаметрально (рисунок 4.12).

В результате решения поставленных задач по вышеописанной методике были получены кривые распределения магнитного поля ЭМПЭ с ВПМ при различных режимах его работы.



Рисунок 4.12 – Магнитная система ротора ЭМПЭ с ВПМ с цилиндрическими ВПМ, намагниченными радиально; магнитная система ротора ЭМПЭ с ВПМ с полукруглыми ВПМ, намагниченными радиально; магнитная система ротора ЭМПЭ с ВПМ с полукруглыми ВПМ, намагниченными диаметрально

На рисунке 4.13, 4.14 представлены результаты исследований влияния формы ВПМ ротора ЭМПЭ с ВПМ на величину магнитного поля реакции якоря ЭМПЭ с ВПМ.



Рисунок 4.13 – Распределение магнитного поля под фазой А для магнитных систем ротора с полукруглыми и цилиндрическими ВПМ с радиальным направлением намагниченности

На рисунке 4.13 кривая *1* – это распределение магнитного поля под фазой А для магнитной системы ротора с полукруглыми ВПМ с радиальным направлением

намагниченности при холостом ходе, кривая 2 – это распределение магнитного поля под фазой A для магнитной системы ротора с цилиндрическим BПM с радиальным направлением намагниченности при холостом ходе, кривая 3 – распределение магнитного поля под фазой A для магнитной системы ротора с полукруглыми BПM с радиальным направлением намагниченности при номинальной нагрузке, кривая 4 – это распределение магнитного поля под фазой A для магнитного поля под фазой A для магнитного поля под фазой A для магнитной системы ротора с полукруглыми BПM с радиальным направлением намагниченности при номинальной нагрузке, кривая 4 – это распределение магнитного поля под фазой A для магнитной системы ротора с цилиндрическим BПM с радиальным направлением намагниченности при номинальной нагрузке.

Из рисунка 4.13 видно, что применение магнитной системы ротора с полукруглыми ВПМ с радиальной намагниченностью позволяет проводить более глубокое регулирование напряжения ЭМПЭ с ВПМ. Так, при номинальной нагрузке при магнитной системе ротора с полукруглыми ВПМ с радиальной намагниченностью магнитная индукция в воздушном зазоре под действием реакции якоря снижается на 12,6%, а при магнитной системе с цилиндрическими ВПМ – только на 10,2%. То есть благодаря правильному выбору магнитной системы ротора и формы ВПМ можно повысить или понизить чувствительность СУ ЭМПЭ с ВПМ.



Рисунок 4.14 – Распределение магнитного поля под фазой А для магнитных систем ротора с полукруглыми ВПМ с диаметральной намагниченностью и цилиндрическими ВПМ с радиальной намагниченностью

На рисунке 4.14 кривая *1* – это распределение магнитного поля под фазой А для магнитной системы ротора с цилиндрическими ВПМ с радиальным направлением намагниченности при холостом ходе, кривая 2 – это распределение магнитного поля под фазой А для магнитной системы ротора с цилиндрическим

ВПМ с радиальным направлением намагниченности при номинальной нагрузке, кривая *3* – распределение магнитного поля под фазой А для магнитной системы ротора с полукруглыми ВПМ с диаметральным направлением намагниченности при номинальной нагрузке, кривая *4* – распределение магнитного поля под фазой А для магнитной системы ротора с полукруглыми ВПМ с диаметральным направлением намагниченности при холостом ходе.

Из рисунка 4.14 видно, что применение магнитной системы ротора с полукруглыми ВПМ с диаметральным намагничиванием позволяет достигнуть более высоких энергетических характеристик ЭМПЭ с ВПМ, при этом она обладает более низкими регулировочными характеристиками по сравнению с магнитной системой с цилиндрическими ВПМ. Так, при номинальной нагрузке при магнитной системе ротора с полукруглыми ВПМ с диаметральной намагниченностью магнитная индукция в воздушном зазоре снижается на 7,2%, а при магнитной системе с цилиндрическими ВПМ только на 10,2%.

На рисунке 4.14 представлены исследования по влиянию установившейся температуры ЭМПЭ с ВПМ с цилиндрическими ВПМ, намагниченными в радиальном направлении, на магнитное поле реакции якоря, а также был рассмотрен режим холостого хода (магнитное поле реакции якоря отсутствовало). При исследованиях учитывалось изменение характеристик ВПМ под действием температуры и параметров обмотки статора.



Рисунок 4.15 – Распределение магнитного поля под фазой А при различных температурах ВПМ ротора

На рисунке 4.15 кривая *1* – режим работы ЭМПЭ с ВПМ при температуре 75°С и номинальной нагрузке, а кривая *2* – это холостой ход ЭМПЭ с ВПМ при температуре 23°С.

Из анализа рисунка 4.15 видно, что при увеличении установившейся температуры ЭМПЭ с ВПМ на 52°С происходят существенные изменения магнитного поля в воздушном зазоре ЭМПЭ с ВПМ. Причем сравнивая индукцию при номинальной нагрузке, видно, что при увеличении температуры магнитное поле в воздушном зазоре снижается на 40 мТл (с 0,53 до 0,49 Тл). 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.

На рисунке 4.16 представлены исследования влияния величины воздушного зазора на магнитное поле в воздушном зазоре при холостом ходе и номинальной нагрузке ЭМПЭ с ВПМ.



Рисунок 4.16 – Зависимость магнитного поля под фазой А от величины воздушного зазора при холостом ходе (кривая 1) и номинальной нагрузке (кривая 2) ЭМПЭ с ВПМ

Из рисунка 4.16 видно, что при увеличении воздушного зазора магнитное поле в нем снижается практически по линейной зависимости. Под нагрузкой (при наличии реакция якоря) магнитное поле при изменении величины зазора

изменяется по экспоненциальному закону. Из анализа кривой 2 видно, что оптимальная величина воздушного зазора, при существует которой регулируемость и управляемость ЭМПЭ с ВПМ, т.е. изменение магнитного поля в воздушном зазоре под действием реакции якоря, будет максимальной. Для исследуемых ЭМПЭ с ВПМ данная величина находится в промежутке между 3,7 и 4,1 мм. При такой величине зазора при номинальной нагрузке магнитное поле снижается на 20%. При этом, например, при зазоре 3 мм при том же воздействии магнитное поле в воздушном зазоре снижается на 13%, а при зазоре 4,5 мм – на 16%. Данные результаты необходимо учитывать при проектировании ЭМПЭ с ВПМ совместно с СУ и проектировать ЭМПЭ с ВПМ таким образом, чтобы величина воздушного зазора была близка к оптимальной с точки зрения и его управляемости и его механических и энергетических характеристик.

4.3 ЭМПЭ с ВПМ с подмагничиванием спинки статора в составе СГЭ ЛА

Одним из способов в эффективной стабилизации напряжения ЭМПЭ с ВПМ СГЭ ЛА, работающих в системах с постоянной частотой вращения, например в ВСУ и приводах типа ПГЛ или ДПГЛ, является использование дополнительных обмоток (ДО). ДО питаются постоянным током либо от стороннего источника постоянного тока, либо от ключей, которые замыкают данные обмотки и используют энергию, генерируемую в них. Основная теория PH для ЭМПЭ с ВПМ и ДО приведена в работах А. И. Бертинова, В. В. Лохнина, В. А. Балагурова и др. Реализация подобных PH на современной элементной базе разработана при участи автора и представлена в работе [263]. В параграфе даются общие рекомендации по исследованиям ЭМПЭ с подобными PH в составе СГЭ ЛА.

4.3.1 Исследования регулятора напряжения ЭМПЭ с ВПМ для подмагничивания спинки статора

Сущность управления ДО ЭМПЭ с ВПМ сводится к увеличению либо уменьшению тока подмагничивания в соответствии с напряжением на выходе ЭМПЭ. Алгоритм управления основан на сравнении выходного напряжения генератора с требуемым значением. При изменении этого напряжения в большую либо меньшую сторону программа управления с помощью ПИД-регулятора увеличивает либо уменьшает скважность напряжения, формируемого ШИМ.

При варьировании скважности импульсов напряжения на затворе силового транзистора уменьшается либо увеличивается длительность протекания постоянного тока через обмотку подмагничивания и, соответственно, изменяется МДС подмагничивания спинки якоря, которая ослабляет либо усиливает поток в соответствующей части спинки якоря ЭМПЭ с ВПМ. Величина тока подмагничивания измеряется РН одним из каналов АЦП и контролируется на уровне, необходимом для создания намагничивающей силы требуемого значения, а также контроля и предотвращения аварийных ситуаций. При превышении тока подмагничивания либо при его «исчезновении» срабатывает защита и отключает силовые транзисторы.

Все измерения токов и напряжений системой управления сводятся к измерению из действующих значений.

Программный ПИД-регулятор отвечает за точное и плавное регулирование тока подмагничивания.

Если измеренное значение выходного напряжения не соответствует PH вырабатывает установленному требуемому значению, ошибку то регулирования е, относительно которой помощью ПИД-регулятора С устанавливается соответствующее значение ШИМ-сигнала.

На основе регулировочных характеристик и данного алгоритма была разработана электрическая принципиальная схема и составлена программа управления на языке ANSIC. Регулировочные характеристики ЭМПЭ с ВПМ с РН приведены на рисунке 4.17.

Из характеристик (рисунок 4.17) видно, что они носят нелинейный характер. С увеличением тока нагрузки величина тока подмагничивания уменьшается, причем нелинейно к концу характеристики, что обусловливается насыщением участков спинки якоря. Так, при холостом ходе для установления номинального напряжения 200 В необходим ток подмагничивания 40 А, а коэффициент заполнения ШИМ – 48%. При токе нагрузки 20 А ток подмагничивания составляет 24 А, коэффициент заполнения ШИМ – 34%.



Рисунок 4.17 – Регулировочные характеристики

Аналогичным образом может быть реализована система с использованием замыкающих вентилей, предложенная В. В. Лохниным [250].

4.3.2 Выбор эффективного места расположения ДО в ЭМПЭ с ВПМ

Для обеспечения эффективной стабилизации напряжения ЭМПЭ с ВПМ важным является выбор места расположения ДО. При анализе вариантов размещения ДО были выявлены три возможных варианта ее укладки. По первому варианту ДО укладывается в спинке статора и насыщает магнитопровод статора. Подобный способ укладки ДО был предложен профессором А. И. Бертиновым и др. [1, 3, 250] и далее был развит при участии автора в ФГБОУ ВО «УГАТУ» [259, 260]. Другим способом является укладка ДО на ферромагнитном клине, который устанавливается в пазу ЭМПЭ с ВПМ, рисунок 4.18, кроме того, в [264] был предложен способ укладки обмотки на зубцах магнитопровода статора ЭМПЭ с ВПМ. Укладка в пазах требует использования дополнительного места в пазу и поэтому здесь не рассматривается.



Рисунок 4.18 – Расположение ДО в ЭМПЭ с ВПМ
Важной задачей при формировании конструктивной схемы ЭМПЭ с ВПМ является выбор места расположения ДО. Далее рассматриваются преимущества и недостатки каждого из вариантов размещения ДО.

При расположении ДО на спинке магнитопровода статора ЭМПЭ с ВПМ проектируется таким образом, что без нагрузки его напряжение на 15% выше, чем параметры, указанные в стандартах. В режиме без нагрузки ток в ДО максимальный, то есть ДО работает на понижение напряжения и насыщает участок магнитопровода статора. При этом так как ЭМПЭ с ВПМ работает без нагрузки, то тока в основных обмотках нет, ток есть только в ДО. Когда же ЭМПЭ с ВПМ в генераторном режиме работает при максимальной нагрузке, то ток в ДО равен 0, так как под действием размагничивающей реакции якоря напряжение само снижается до пределов, оговоренных в стандартах.

Подобный подход обеспечивает эффективность ЭМПЭ с ВПМ на одном уровне во всех режимах работы: и под нагрузкой и без нагрузки, и в режиме перегрузок.

В том случае, если ДО размещать на ферромагнитном клине в пазу, регулирование выходного напряжения также возможно по аналогичному принципу, но при этом ДО будет постоянно находиться под током, а это приведет к снижению КПД для исследуемого ЭМПЭ с ВПМ на 1–1,5%, что в условиях жестких ограничений на эффективность ЭМПЭ с ВПМ, обусловленных ограниченным теплоотводом в масло, ограничивает эффективность данного места расположения ДО. Но при этом, как будет показано в главе 5, этот способ обладает более высокой возможностью защиты ЭМПЭ с ВПМ от витковых коротких замыканий.

В данном режиме ДО не участвует в преобразовании энергии и необходима только как дополнительная индуктивность при коротких замыканиях в ЭМПЭ с ВПМ или как элемент насыщения участка магнитопровода статора для обеспечения закрытия пути магнитному потоку при витковых коротких замыканиях. В этом случае оба места расположения обмотки могут использоваться достаточно эффективно, но при расположении ДО на пазовом клине эффективность защиты от витковых коротких замыканий выше в 2–2,5 раза.

181

Важно отметить, что обмотка, уложенная по спинке статора, является также дополнительным теплоотводом потерь в основной обмотке. В таблице 4.3 приведено сравнение рассматриваемых мест укладки ДО.

	ПО на спинке статора	ЛО на ферромагнитном
		клине
Масса ЭМПЭ с ДО и корпусными	37	38,2
элементами, кг		
Установившаяся температура обмотки	169	231
ЭМПЭ, °С		
Коэффициент заполнения паза основной	55	40
обмотки,%		
Коэффициент полезного действия, %	94	92,5
Предел стабилизации напряжения, %	20	20
от номинального для ЭМПЭ с ВПМ		
с двухполюсным ротором		
Защита от фазного короткого замыкания	да	да
Защита от виткового короткого замыкания	малоэффективна	да
Возможность создания повышенного	да	нет
напряжения для стартерного запуска ЭМПЭ		
основных авиационных двигателей		

Таблица 4.3 – Сравнение различных мест расположения ДО

В целом из анализа таблицы 4.3 видно, что наиболее эффективным является укладка ДО на спинке статора, но при этом она не позволяет эффективную защиту ЭМПЭ с ВПМ от витковых коротких замыканий. На рисунке 4.19 приведены данные компьютерного моделирования распределения температуры для обоих вариантов расположения ДО. Результаты получены для режима работы ЭМПЭ с ВПМ с нагрузкой и без нагрузки. Из данных результатов видно, что при укладке ДО на ферромагнитном клине температура обмотки ЭМПЭ с ВПМ под нагрузкой больше 70°С. Тепловые расчеты выполнялись в программном комплексе Ansys Ice Раск для режима полной нагрузки.



Рисунок 4.19 – Результаты теплового расчета ЭМПЭ с ВПМ с различными местами укладки ДО: ДО на спинке статора (*слева*) и ДО на ферромагнитном клине (*справа*)

Таким образом, в случае отсутствия необходимости введения в ЭМПЭ с ВПМ защиты от витковых КЗ, более эффективной является укладка ДО на спинке статора. В случае необходимости обеспечения эффективной защиты ДО от витковых КЗ, ДО должна быть уложена на ферромагнитном клине.

4.3.3 Влияние числа пар полюсов на глубину регулирования ЭМПЭ с ВПМ с подмагничиванием спинки статора

Помимо тока в обмотке подмагничивания, свойств материала магнитопровода статора, схемы ДО и расположения ДО, на глубину регулирования напряжения ЭМПЭ с ВПМ в значительной степени влияет количество полюсов ЭМПЭ с ВПМ. В литературе указано, что обычно ЭМПЭ с подмагничиванием магнитопровода статора не обеспечивает более 20–25% регулирования напряжения [3, 8]. Вместе с тем на ряде экспериментальных машин при участии автора была доказана возможность регулирования напряжения более чем на 45%. Значительное повышение глубины регулирования было достигнуто за счет увеличения числа пар полюсов.

Обобщая экспериментальные данные, полученные с ЭМПЭ с ВПМ с подмагничиванием спинки статора, разработанных при участии автора, можно построить кривую, характеризующую влияние числа пар полюсов на глубину регулирования напряжения ЭМПЭ с ВПМ.

Из рисунка 4.20 видно, что ЭМПЭ с ВПМ могут достигать глубины регулирования 45% и более при условии использования большего числа полюсов.



Рисунок 4.20 – Зависимость глубины регулирования напряжения ЭМПЭ с ВПМ и подмагничиванием спинки статора от числа полюсов

4.4 Новый параметрический метод стабилизации напряжения ЭМПЭ с ВПМ

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.

При увеличении нагрузки напряжение генератора уменьшается вследствие снижения магнитной индукции в воздушном зазоре и снижения МДС ВПМ вследствие их нагрева. Вместе с тем снижение МДС спинки статора как следствие выхода магнитопровода из насыщения несколько компенсирует это уменьшение напряжения. Таким образом, параметрическое согласование этих встречно направленных процессов на этапе проектирования ЭМПЭ с ВПМ позволяет получить достаточно жесткую внешнюю характеристику генератора.

Точность параметрической стабилизации составляет приблизительно 5 В (4,3 %), поэтому для повышения точности регулирования совместно с предложенным методом может использоваться метод управления полем реакции якоря. В этом случае, поскольку диапазон регулирования напряжения составляет не более 10 В, ток регулятора напряжения не превышает 50 А, что в 4 раза меньше, в отличие от случая, рассмотренного в параграфе 4.2. Поэтому масса PH, используемого для реализации этого метода, составляет не более 40–50% от массы PH, предназначенного для регулирования напряжения ЭМПЭ с ВПМ методом управления полем реакции якоря без параметрической стабилизации.

Для теоретической оценки эффективности предлагаемого метода необходимо разработать компьютерную имитационную модель и провести ее исследования с целью оценки эффективности гибридной стабилизации напряжения.

Сумма магнитных напряжений на отдельных участках магнитной цепи ЭМПЭ с ВПМ при холостом ходе равняется МДС, создаваемым ВПМ:

$$F_M = F_\delta + 2F_z + F_j, \tag{4.1}$$

где F_M – МДС ПМ; F_{δ} – МДС воздушного зазора; F_j – МДС спинки магнитопровода статора; F_j – МДС зубцов статора.

Представляя (4.1) в виде зависимостей МДС от магнитных индукций и напряженностей соответствующих участков, получим:

$$F_{M} = 1,6B_{\delta}k_{\delta}\delta + 2H_{z}h_{z} + H_{j}h_{j}, \qquad (4.2)$$

где B_{δ} – магнитная индукция в воздушном зазоре ЭМПЭ с ВПМ; δ – воздушный зазор; H_z – напряженность магнитного поля в зубцах статора; H_j – напряженность магнитного поля в спинке статора; h_z , h_j – высота зубца и спинки соответственно; k_{δ} – коэффициент воздушного зазора.

Из выражения (4.2) видно, что при постоянной МДС ПМ значительное увеличение напряженности магнитного поля в зубцах или спинке приведет к

снижению магнитной индукции в воздушном зазоре, что в свою очередь обеспечит снижение напряжения ЭМПЭ с ВПМ до необходимого уровня.

При увеличении нагрузки возникает МДС магнитного поля реакции якоря, которая снижает магнитное поле в воздушном зазоре, но при этом не размагничивает ВПМ, то есть МДС ВПМ остается постоянной. Помимо МДС реакции якоря на выходное напряжение ЭМПЭ с ВПМ также оказывает влияние нагрев ВПМ, что приводит к снижению энергетических характеристик и МДС магнитов. При этом изменение напряжения под действием нагрева ВПМ происходит значительно медленнее, чем под влиянием магнитного поля реакции якоря, что учитывается при проектировании ЭМПЭ с ВПМ по предложенному методу стабилизации.

Для обоснования работоспособности предложенного метода стабилизации напряжения в программном комплексе Ansoft Maxwell была разработана компьютерная модель ЭМПЭ с ВПМ, реализующая описанный алгоритм. Геометрические размеры разработанной модели представлены в таблице 4.4. Магнитопровод статора ЭМПЭ с ВПМ выполнен из стали 2421.

Внешний диаметр статора, мм	185
Диаметр расточки статора, мм	106
Внешний диаметр ротора, мм	100
Активная длина ротора, мм	115
Число пазов	18
Число полюсов	2
Тип ПМ	Sm ₂ Co ₁₇
Толщина ПМ, мм	10

Таблица 4.4 – Геометрические размеры и параметры исследуемого ЭМПЭ с ВПМ

По результатам моделирования ЭМПЭ с ВПМ при холостом ходе было установлено, что магнитная индукция в воздушном зазоре составляет 0,63 Тл; индукция в спинке статора составляет 2,22 Тл, что соответствует насыщению магнитопровода из стали 2421; индукция в зубцах статора 1,46 Тл; индукция в спинке ротора 1,64 Тл. Распределение магнитной индукции в магнитопроводе ЭМПЭ с ВПМ представлено на рисунке 4.21.



Рисунок 4.21 – Распределение магнитной индукции по сечению магнитопровода статора

При подключении номинальной нагрузки в компьютерной модели проявляется магнитное поле реакции якоря, что приводит к тому, что магнитные потоки в участках ЭМПЭ с ВПМ перераспределяются следующим образом: индукция в спинке статора составляет 1,97 Тл, в зубцах 1,56 Тл, в спинке ротора 1,75 Тл, в воздушном зазоре 0,62 Тл. Так как выходное напряжение ЭМПЭ с ВПМ линейно зависит от магнитной индукции в воздушном зазоре, то напряжение ЭМПЭ с ВПМ под нагрузкой снизилось только на 1,5% (около 2 В). В том же случае, если магнитопровод статора не насыщен, магнитная индукция в воздушном зазоре при холостом ходе составляет 0,68 Тл и снижение напряжения достигает 10–12% (13–16 В).

Таким образом, методами компьютерного моделирования доказывается работоспособность предлагаемого метода.

К недостаткам предложенного метода относится то, что достаточно сложно обеспечить необходимое качество электроэнергии ЭМПЭ с ВПМ, что значительно усложняет использование данного метода в СГЭ ЛА, но при этом он может найти широкое применение в других автономных объектах, где требования к качеству электроэнергии более низкие.

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. Результаты экспериментов и данных компьютерного моделирования приведены на рисунке 4.22.



Рисунок 4.22 – Результаты экспериментальных исследований (*слева*) и данных компьютерного моделирования (*справа*) для насыщенного МЭГ-100Ч при нагрузке 50 А

Рисунок 4.22 показывает высокую сходимость экспериментальных данных и данных компьютерного моделирования. Также видно, что при увеличении нагрузки до 50 A (амплитудное значение) кривая напряжения практически не изменилась по сравнению с холостым ходом. Полученные результаты обусловлены тем, что, как видно из данных компьютерного моделирования, у МЭГ-100Ч помимо магнитопровода статора искусственно значительно насыщена спинка ротора. При увеличении нагрузки в МЭГ-100Ч появляется реакция якоря, которая снижает индукцию в зазоре и разнасыщает спинку ротора, что приводит к параметрической стабилизации напряжения.

Для полной верификации компьютерной модели были также произведены исследования МЭГ-100Ч под нагрузкой 120 А. Результаты экспериментальных исследований представлены на рисунке 4.23.

Таким образом, возможность реализации предложенного метода доказана экспериментальным путем, при этом очевидно, что данный способ действительно снижает качество электроэнергии ЭМПЭ с ВПМ и может применяться как способ стабилизации напряжения в объектах, у которых требования к качеству электроэнергии невысокие.



Рисунок 4.23 – Результаты экспериментальных исследований (*слева*) и данных компьютерного моделирования (*справа*) для насыщенного МЭГ-100Ч при нагрузке 120 А

Ha представленных исследований таблице 4.5 основе В даны массогабаритные оценки и оценки функциональных возможностей наиболее применимых способов стабилизации напряжения на примере ЭГ с ВПМ мощностью 120 кВт с частотой вращения ротора 24 000-60 000 об/мин. Данные результаты получены на основе практических исследований, выполненных при участии автора. Важно отметить, что подмагничивание участка магнитопровода и параллельная стабилизация напряжения не позволяют стабилизировать частоту напряжения, в отличие, например, от последовательной стабилизации, поэтому в случае использования СЭС стабильной частоты для подобных СГЭ необходим привод постоянных оборотов. При расчетах РН, приведенных в таблице 4.5, использовалась зарубежная элементная база.

Очевидно, что наиболее минимальной массой обладают СГЭ со статическим преобразователем и ЭМПЭ с ВПМ. Данный способ может быть эффективным как для резервных ЭМПЭ с ВПМ, так и для магистральных ЭГ. Но при этом другие способы стабилизации могут также эффективно использоваться, например, при модернизации существующих ЛА с приводом постоянных оборотов или при установке ЭМПЭ с ВПМ без редуктора в низкооборотный ВСУ, частота вращения ротора которого не превышает 25 000–30 000 об/мин (например, ВСУ-10, производимой ОМКБ, г. Омск).

Таким образом, очевидно, что наименьшей массой при максимальных функциональных возможностях (стартерный пуск, отказоустойчивость, стабилизация напряжения ЭМПЭ с ВПМ, обеспечение качества электроэнергии на выходе СГЭ) обладают СГЭ с последовательным инвертором и высокооборотным ЭМПЭ с ВПМ. Данный способ может быть эффективным как для резервных ЭМПЭ, так и для магистральных ЭМПЭ.

Таблица 4.5 –	Основные методы	стабилизации н	апряжения З	ЭМПЭ с ВП	М с ВПМ в
составе СГЭ м	ющностью 120 кВт	Γ			

	Подмагничивание статора постоянным током 2- ,4-полюсного ЭМПЭ	Параллельная стабилизация	Подмагничивание статора постоянным током 8–14-полюсного ЭМПЭ	Статический преобразователь и высокооборотный ЭМПЭ	Статический преобразователь и магистральный ЭМПЭ с ВПМ
Масса ЭГ с ВПМ, кг	35	30	35	22	30
Масса СУ, кг	8	12	8	18	18
Масса СУ и ЭГ	43	42	43	40	48
Частота вращения ЭГ,	24 000	24 000	6000-8000	60 000	24 000
об/мин					
Реализация	да	да	да	да	да
стартерного пуска					
Предел регулирования	25	25	50	100	100
напряжения,% от					
номинального					
Предел регулирования	-			100	100
частоты,% от					
номинального					
Возможность	да	да	да	да	да
обеспечения защиты от					
витковых КЗ					

Но при этом другие способы стабилизации напряжения ЭМПЭ с ВПМ (подмагничивание спинки статора, параллельная стабилизация) также могут эффективно использоваться. Показано, что для ЭМПЭ с ВПМ мощностью 100–150 кВт при использовании различных способов стабилизации напряжения разница по массе комплекса «ЭМПЭ и система стабилизации напряжения»

составляет не более 5–8 кг. Такая разница по массе СГЭ в зависимости от типа стабилизации может быть достигнута только при условии совместного проектирования ЭМПЭ и РН.

ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 4

1. 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 под действием температуры постоянных магнитов и магнитного поля 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.

2. Наименьшей массой при функциональных максимальных возможностях (стартерный пуск, отказоустойчивость, стабилизация напряжения ЭМПЭ с ВПМ, обеспечение качества электроэнергии на выходе СГЭ) обладают СГЭ с последовательным инвертором и высокооборотным ЭМПЭ с ВПМ. Данный способ может быть эффективным как для резервных ЭМПЭ, так и для магистральных ЭМПЭ. Но при этом другие способы стабилизации напряжения ЭМПЭ с ВПМ (подмагничивание спинки статора, параллельная стабилизация) также могут эффективно использоваться. Было показано, что для ЭМПЭ с ВПМ мощностью 100-150 кВт при использовании различных способов стабилизации напряжения разница по массе комплекса «ЭМПЭ и система стабилизации напряжения» составляет не более 5-8 кг, такая разница по массе СГЭ в зависимости от типа стабилизации может быть достигнута только при условии совместного проектирования ЭМПЭ и РН.

3. Показано, что при подключении трехфазного управляемого выпрямителя и нелинейной нагрузке худшим вариантом для исследуемых численных параметров является трехфазная активно-емкостная нагрузка и однофазная активно-емкостная нагрузка. В этом случае коэффициент гармоник достигает 95,2 %. При активной нелинейной трехфазной нагрузке коэффициент гармонических искажений составляет 29 %. При этом при активно-индуктивной нелинейной нагрузке коэффициент гармонических искажений – 31,1 %.

4. Предложена методика исследования магнитного поля реакции якоря в программном комплексе Ansys и исследовано влияние на магнитное поле реакции якоря как на регулировочный параметр ЭМПЭ с ВПМ. Установлено, что:

– при увеличении установившейся температуры ЭМПЭ с ВПМ на 50–60°С 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, т.е. изменение магнитного поля в воздушном зазоре под действием реакции якоря будет наиболее максимальной. Для исследуемых численных параметров данная величина находится в промежутке между 3,7 и 4,1 мм. При данной величине воздушного зазора при номинальной нагрузке магнитное поле снижается на 20 %. При зазоре 3 мм при том же воздействии магнитное поле в воздушном зазоре снижается на 13 %, а при зазоре 4,5 мм – на 16 %.

5. Исследованы особенности создания РН напряжения ЭМПЭ с ВПМ с подмагничиванием магнитопровода статора с использованием современных и перспективных подходов и установлено, что:

 – наиболее эффективным является укладка ДО на спинке статора, но при этом она не обеспечивает эффективную защиту ЭМПЭ с ВПМ от витковых коротких замыканий;

– ЭМПЭ с ВПМ могут достигать глубины регулирования 45 % и более при условии использования большего числа полюсов.

192

ГЛАВА 5 КОРОТКИЕ ЗАМЫКАНИЯ В ЭМПЭ С ВПМ И МЕТОДЫ ЗАЩИТЫ ОТ НИХ. ЗАДАЧИ ДИАГНОСТИКИ ЭМПЭ С ВПМ

Одной из основных сложностей использования ЭМПЭ с ВПМ в составе СГЭ ЛА являются проблемы коротких замыканий (КЗ) в них (как витковых, так междуфазных). Это обусловлено тем, что в отличие от электрических машин с электромагнитным возбуждением, в которых при КЗ применяются гашение магнитного поля и отключение возбуждения ротора, в ЭМПЭ с ВПМ «отключить» поле возбуждения, которое создается постоянными магнитами, невозможно. Поэтому для предотвращения негативных последствий от КЗ в ЭМПЭ с ВПМ используются либо механические разъединители (способны разрешить проблемы как витковых, так и междуфазных КЗ), либо полупроводниковые элементы, которые производят отключение поврежденного участка цепи от основной обмотки (способны разрешить проблему междуфазных КЗ). По своей сути данные методы являются необратимыми способами защиты, что ограничивает практическое применение ЭМПЭ с ВПМ, в особенности в интегрированных СГЭ ЛА.

Также для некоторых приложений используются высокоиндуктивные ЭМПЭ (ЭМПЭ, в которых индуктивность обмотки столь велика, что при КЗ ток короткого замыкания незначительно превышает ток номинального режима (обычно на 20–25%) и, соответственно, не создает каких-либо значительных нарушений в эксплуатации ЭМПЭ [265]). Данный метод является весьма перспективным, поэтому он используется в ЭМПЭ с ВПМ, устанавливаемых на самолете Lockheed Martin F-35 Lightning II. Недостатком данного метода является то, что внешние характеристики ЭМПЭ с ВПМ имеют малую жесткость. В настоящей главе предложен и апробирован на практике один из методов решения данной проблемы.

В работе [266] при участии автора были исследованы трехфазные симметричные КЗ и получены для них характерные зависимости. Аналитические решения, описывающие другие типы КЗ в ЭМПЭ с ВПМ, получить сложно, в особенности это касается витковых КЗ и различных комбинаций витковых и фазных КЗ.

В данной главе предложена методика компьютерного моделирования, позволяющая исследовать все типы КЗ и комбинации КЗ в ЭМПЭ с ВПМ, численно исследованы различные типы КЗ и разработаны новые способы защит ЭМПЭ с

ВПМ от КЗ, в том числе предложен метод защиты ЭМПЭ с ВПМ от витковых коротких замыканий. В главе исследованы отказоустойчивые ЭМПЭ с ВПМ. Полученные теоретические результаты подтверждаются данными экспериментальных исследований.

5.1 Компьютерное моделирования витковых и междуфазных коротких замыканий в ЭМПЭ с ВПМ

Известные методики исследования КЗ в ЭМПЭ с ВПМ построены либо на аналитических уравнениях, например, решения, предложенные в работах В. А. Балагурова [3, 75], либо на использовании программного комплекса Matlab [265–268], который по своей сути решает также аналитические уравнения, описывающие электромагнитные процессы в ЭМПЭ с ВПМ при КЗ. При этом данные методики не учитывают влияние ударных моментов на механические характеристики силовой установки, обеспечивающей механической энергией СГЭ ЛА. Это значительно ограничивает использование данных методик и моделей при создании перспективных СГЭ ЛА, в том числе и интегрированных в силовую установку СГЭ ЛА.

В работах зарубежных авторов используются либо аналитические решения, либо компьютерное моделирование методом конечных элементов [269–275]. Отдельные зарубежные работы посвящены глубоким исследованиям тепловых и электромагнитных процессов в ЭМПЭ с ВПМ при витковых КЗ. Но при этом методик, описывающих способы исследования витковых КЗ, в [274–275] не представлено.

Для создания и внедрения перспективных СГЭ ЛА на основе ЭМПЭ с ВПМ важным является не только исследование электромагнитных и тепловых процессов в ЭМПЭ с ВПМ при витковых и фазных КЗ, но и влияние этих процессов на механические характеристики силовой установки.

Для решения данной проблемы предложена методика компьютерного моделирования коротких замыканий ЭМПЭ с ВПМ с учетом механических процессов ротора, позволяющая исследовать не только отдельные виды КЗ, но и их различные комбинации.

5.1.1 Методика компьютерного моделирования КЗ в ЭМПЭ с ВПМ с учетом механических процессов движения ротора

Для решения поставленной задачи предлагается использовать метод конечных элементов, реализуемый в программном комплексе Ansys Maxwell. Далее приведена предлагаемая последовательность действий на примере конкретного ЭМПЭ с ВПМ СГЭ ЛА.

Предлагаемая методика:

– в программном комплексе Ansys Maxwell создается двухмерная или трехмерная компьютерная модель ЭМПЭ с ВПМ. В таблице 5.1 приведены параметры исследуемого ЭМПЭ с ВПМ и свойства материалов, применяемых в нем. В отличие от моделей, приведенных в известных работах [263–275], в предлагаемой методике и компьютерной модели для ее реализации каждый виток моделировался отдельной геометрической фигурой. Это значительно усложняет модель, однако позволяет моделировать не только короткие замыкания на выводах генератора, но и замыкания внутри генератора, причем замыкания одного витка или комбинации различных замыканий.

Для обеспечения взаимосвязи между электрической частью модели (характеризующей параметры обмоток и схему их соединения) и магнитной используется программный пакет Maxwel Circuit. Расчетная схема и электрическая часть модели ЭМПЭ с ВПМ приведены на рисунке 5.1, где сопротивления R1-R3 являются сопротивлениями нагрузки; сопротивления Rg1-Rg3 – внутренние сопротивления ЭМПЭ с ВПМ (сопротивления обмоток); Hg1-Hg3 – индуктивности обмоток ЭМПЭ с ВПМ; сопротивление Rg4 предназначено для моделирования замыкания одного витка внутри ЭМПЭ с ВПМ; обмотки A1, A2, A3, B1, B2, B3, C1, C2, C3 на электрической модели (рисунок 5.1, *снизу*) соответствуют фазам на расчетной схеме (рисунок 5.1, *сверху*). Каждая обмотка состоит из трех витков. Для удобства на электрической части модели раскрыта только обмотка A1, B1 и C1.

Все результаты исследований, приведенные далее, были получены для конкретных численных параметров, приведенных в таблице 5.1. Общность физических процессов, протекающих в ЭМПЭ с ВПМ, позволяет использовать полученные результаты в широком диапазоне конструктивных параметров и особенностей ЭМПЭ с ВПМ.

Мощность, кВт	100
Частота вращения ротора, об/мин	24000
Число фаз	3
Число полюсов	2
Внешний диаметр статора (D1), мм	190
Число витков в фазе	9
Сопротивление фазы, Ом	0,0063
Индуктивность фазы, Гн	7,93.10-6
Активная длина (<i>l</i>), мм	120
Воздушный зазор (δ), мм	3
Напряжение фазное (амплитуда), В	175
Полная длина ротора, мм	120
Диаметр ротора(D2), мм	100
Тип постоянных магнитов / остаточная магнитная	<i>Sm</i> ₂ <i>Co</i> ₁₇ / 1.08 Тл / 850 кА/м
индукция / коэрцитивная сила	
Плотность тока, А/мм ²	15

Таблица 5.1 – Параметры ЭМПЭ с ВПМ

При моделировании различных режимов работы изменялись параметры сопротивлений *R*1–*R*3, *Rg*4, тем самым имитировались различные типы коротких замыканий, в том числе различные комбинации витковых и междуфазных замыканий.

Движение ротора задавалось уравнениями движения силовой установки в механической части конечно-элементной модели ЭМПЭ с ВПМ. Данные уравнения могут учитывать не только механическое движение силовой установки СГЭ ЛА, но и законы управления ею. Важно отметить, что при исследованиях рассматривался такой вариант, когда привод движется с номинальной скоростью и КЗ происходит мгновенно. При этом предполагается, что система управления силовой установкой не успевает отработать. Это необходимо для того, чтобы на основе исследований обеспечить возможность создания законов управления силовой установкой СГЭ ЛА при различных видах КЗ.



Рисунок 5.1 – Расчетная схема ЭМПЭ с ВМП (*сверху*) и электрическая часть модели (*снизу*)

5.1.2 Компьютерное моделирование ЭМПЭ с ВПМ в составе СГЭ ЛА при различных видах КЗ

В результате компьютерного моделирования по разработанной методике на предложенной модели были определены электромагнитные моменты, токи и распределение магнитного поля в различных элементах статора ЭМПЭ при холостом ходе, номинальной нагрузке и различных типах коротких замыканий. При этом рассматривался ЭМПЭ с характеристиками по таблице 5.1. Для верификации обеспечения экспериментальной предложенной методики характеристики ЭМПЭ с ВПМ при компьютерном моделировании полностью генератору МЭГ-100Ч ГМЭТСЧ, соответствует И созданных при непосредственном участии автора.

Номинальный режим работы ЭМПЭ. Исследования номинальных режимов не являлись основной задачей параграфа. В то же время анализ данного режима необходим для верификации модели, так как экспериментальные исследования данного режима не имеют каких-либо негативных последствий, в отличие от режимов с КЗ. Моделирования данного режима выполнялись при чисто активной нагрузке (коэффициент мощности нагрузки 1), сопротивления *R*1–*R*3 составляли 0,25 и 0,35 Ом, сопротивление *Rg*4 равнялось 1 000 000 Ом.

Компьютерное моделирование в данном режиме позволило определить номинальный электромагнитный момент ЭМПЭ, напряжение при номинальной нагрузке, а также напряжение при различного рода перегрузках и холостом ходе. На рисунке 5.2 представлен электромагнитный момент, полученный при нагрузке 0,25 Ом.

Из рисунка 5.2 видно, что полученный электромагнитный момент имеет минимальные пульсаций и составляет 55–60 Нм, что соответствует номинальной мощности.

Трехфазное симметричное КЗ ЭМПЭ с ВПМ. Следующим этапом исследований было компьютерное моделирование ЭМПЭ с ВПМ в режиме трехфазного короткого замыкания. Для исследований данного режима работы сопротивления R1-R3 приняты равными $1\cdot 10^{-6}$ Ом, сопротивление Rg4 1 000 000 Ом. Сопротивления Rg1-Rg3 составляли 0,0063 Ом, индуктивности фаз также выставлялись согласно таблице 5.1. В результате были получены токи в обмотках ЭМПЭ трехфазном КЗ, с ВПМ при внезапном a также изменения электромагнитного момента во времени. Результаты приведены на рисунке 5.2.



Рисунок 5.2 – Электромагнитный момент: *а* – при номинальном режиме; *б* – электромагнитный момент при трехфазном КЗ

Из рисунка 5.2 видно, что при симметричном трехфазном КЗ в ЭМПЭ с ВПМ с исследуемыми численными параметрами происходит практически двукратный бросок электромагнитного момента и поэтому привод ЭМПЭ с ВПМ (в случае

работы в генераторном режиме) должен выдерживать двукратные перегрузки. Электромагнитный момент имеет затухающий характер и по истечении 20 мс снижается более чем в 3 раза. Электромагнитный момент имеет знакопеременный характер. Полученный результат в данном случае хорошо согласуется с результатами работ [266], а также других научных работ по исследованию трехфазных КЗ, что подтверждает адекватность полученных результатов.

Из рисунка очевидно, что длительность импульса максимального тока и, соответственно, максимального момента не превышает 3–6 мс. На 7 мс электромагнитный момент уже практически равен номинальному. То есть из-за воздействия таких токов за такой короткий промежуток времени температура обмоток ЭМПЭ изменится незначительно. Поэтому основным негативным действием токов трехфазного КЗ для ЭМПЭ с ВПМ является значительное возрастание электродинамических усилий в обмотке и перегрузки по моменту.

Двухфазное несимметричное КЗ ЭМПЭ с ВПМ и двухфазное КЗ одновременно с витковым КЗ. Аналогичные исследования были выполнены для двухфазного КЗ и двухфазного КЗ одновременно с витковым КЗ. Для исследования этих режимов работы сопротивления R1, R2 выставлялись равными $1\cdot10^{-6}$ Ом, сопротивление Rg4 равнялось 1 000 000 Ом, сопротивление R3 составляло 0,25 Ом. Сопротивления Rg1-Rg3 составляли 0,0063 Ом, индуктивности фаз также выставлялись согласно таблице 5.1. В результате были получены токи (на рисунке не представлены) в обмотках ЭМПЭ с ВПМ при двухфазном КЗ, а также изменения электромагнитного момента во времени. Результаты представлены на рисунке 5.3.



Рисунок 5.3 – Электромагнитный момент:

а – при двухфазном КЗ; *б* – скоростная характеристика привода при двухфазном КЗ

Из рисунка 5.3 видно, что при двухфазном КЗ в ЭМПЭ с ВПМ с исследуемыми численными параметрами происходит бросок электромагнитного момента, превышающего номинальный почти в 2,5 раза (по сравнению с рисунком 5.2). 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). Для сопоставления данного режима с теоретическими результатами, приведенными в других работах, также были исследованы разгонные характеристики привода при двухфазном КЗ.

На рисунке 5.4 показана характеристика изменения частоты вращения привода ЭМПЭ с ВПМ при работе его в генераторном режиме. На рисунке 5.4 приведен электромагнитный момент при двухфазном КЗ одновременно с витковым КЗ.



Рисунок 5.4 – Электромагнитный момент: *а* – при двухфазном КЗ одновременно с витковым КЗ; *б* – при однофазном КЗ

Из рисунка 5.4 (по сравнению с рисунком 5.2) видно, что при двухфазном КЗ и одновременным витковым КЗ в ЭМПЭ с ВПМ с исследуемыми численными параметрами происходит бросок электромагнитного момента в 2,5 раза. Электромагнитный момент имеет слабый затухающий характер и по истечении 20 мс снижается не более чем на 10%. При этом он имеет знакопеременный характер и превышает электромагнитный момент, имеющий место при трехфазном КЗ, одновременно с витковым. Поэтому данный режим носит более негативный характер для ЭМПЭ с ВПМ.

Однофазное несимметричное КЗ ЭМПЭ с ВПМ и однофазное КЗ одновременно с витковым КЗ. Для исследования этих режимов работы сопротивления R1 выставлялось равными $1 \cdot 10^{-6}$ Ом, сопротивление Rg4 равнялось 1 000 000 Ом, сопротивление R2, R3 составляло 0,25 Ом. Сопротивления Rg1–Rg3 составляли 0,0063 Ом, индуктивности фаз также выставлялись согласно таблице 5.1. В результате были получены токи в обмотках ЭМПЭ с ВПМ при однофазном КЗ, а также изменения электромагнитного момента во времени. Результаты приведены на рисунке 5.4, *б*.

Из рисунка 5.4, б видно, что при однофазном КЗ 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.

На рисунке 5.5 приведен электромагнитный момент при однофазном КЗ одновременно с витковым КЗ. При моделировании предполагалось, что все фазы соединены в звезду с общей точкой, разъединение фаз не предусмотрено.



Рисунок 5.5 – Электромагнитный момент: *а* – при однофазном КЗ одновременно с витковым КЗ; *б*– витковое КЗ в фазе ЭМПЭ с ВПМ

При однофазном КЗ и одновременным витковым КЗ в ЭМПЭ с ВПМ с исследуемыми численными параметрами происходит также бросок

электромагнитного момента в 2,3 раза. Электромагнитный момент имеет незатухающий, знакопеременный характер. Причем изменения момента в положительной области и отрицательной области асимметричны. В этом случае имеют место аналогичные кривые, как и для рассмотренных выше двухфазных КЗ одновременно с витковыми. То есть диагностические критерии витковых замыканий преобладают над другими типами, в комбинации с которыми они могут возникнуть. Вместе с тем при однофазном КЗ одновременно с витковым КЗ имеет место асимметрия электромагнитного момента относительно оси абсцисс.

Также проведены исследования чистого виткового замыкания. Результаты представлены на рисунке 5.5, который показывает, что при витковом КЗ характеристика электромагнитного момента имеет аналогичный рассмотренным выше характер: она слабозатухающая, знакопеременная и превышает номинальный момент более чем в 2 раза.

Из изложенного можно сделать вывод, что в ЭМПЭ с ВПМ витковые замыкания могут привести к наиболее негативным последствиям, так как они имеют незатухающий характер. Для минимизации последствий витковых замыканий эффективным будет разбиение проводника на множество жил или использование специальных методов, предложенных и исследованных далее.

5.2 Методы защиты от фазных КЗ. Исследования и разработка

Как видно из представленных выше результатов, КЗ могут являться причиной нарушения работоспособности СГЭ ЛА, в особенности если ЭМПЭ интегрирован в силовую установку. Поэтому задачам разработок методов защиты ЭМПЭ с ВПМ от витковых КЗ посвящено большое количество научных работ [269–275].

На рисунке 5.6 приведена классификация способов защиты ЭМПЭ с ВПМ от фазных КЗ, полученная автором на основе анализа литературы и разработок кафедры электромеханики ФГБОУ ВО «УГАТУ», выполненных при участи автора.

Из рисунка 5.6 видно, что защиты ЭМПЭ с ВПМ могут быть как обратимыми, так и необратимыми. Необратимые защиты эффективно использовать тогда, когда СГЭ ЛА имеет возможность резервирования СГЭ такой же мощности. Как было

показано выше, для перспективных ЛА подобный подход является нецелесообразным, так как приводит к увеличению массы. Использование обратимых защит позволяет создавать отказоустойчивые СГЭ ЛА и «купировать» поврежденные участки обмотки без вывода из эксплуатации всей СГЭ ЛА. Далее будут рассмотрены основы создания подобных защит СГЭ ЛА.



Рисунок 5.6 – Классификация способов защиты ЭМПЭ с ВПМ от фазных КЗ

Наиболее сложным и малоэффективным из обратимых способов защиты является использование электромагнитных муфт. В частности, подобные решения ЭМПЭ ВПМ ГСА 15 используются с (производства OAO на «Маяк»). «Машиностроительный завод Электромагнитные муфты имеют ограничения по частоте вращения и значительные массогабаритные показатели. Новые способы необратимых защит на основе механического разъединения разработаны при непосредственном участии автора (патент РФ № 2634836 «Способ управления системой защиты магнитоэлектрического генератора от короткого замыкания»).

Высокой эффективностью обладают ЭМПЭ с ВПМ с повышенной индуктивностью. Именно данные ЭМПЭ с ВПМ используются на F-35. Суть данного метода заключается в том, что обмотка ЭМПЭ с ВПМ выполняется с такой индуктивностью, при которой токи КЗ не превышают номинальные токи. В этом случае ЭМПЭ с ВПМ при фазном коротком замыкании работает так же, как и в номинальном режиме. Основы данного метода были разработаны в исследованиях Е. Ganeva. Суть данной схемы заключается в том, что повышенная индуктивность компенсируется емкостным током инвертора, а при коротком защиты реализуется с превышает 150 % от номинального. Такой алгоритм защиты реализуется с

помощью статического преобразователя. Статический преобразователь в этом случае содержит трехфазный мост, конденсаторный блок постоянного тока, фильтр электромагнитных помех для шины постоянного тока и контактор.

Особенностью данного статического преобразователя является то, что он способен обеспечивать защиту ЭМПЭ с ВПМ от короткого замыкания. Если шина постоянного тока перегружена, статический преобразователь линейно уменьшает выходное напряжение, чтобы предотвратить перегрузку элементов.

Когда короткое замыкание происходит в статическом преобразователе, алгоритмически происходит отключение управления ЭМПЭ. Ток КЗ будет ограничен индуктивностью ЭМПЭ с ВПМ и сопоставим с рабочим током.

Недостатком данного метода является то, что его можно эффективно применять только при стабилизации ЭМПЭ с ВПМ совместно с последовательным статическим преобразователем. Для решения данной проблемы при участии автора был предложен новый метод защиты ЭМПЭ с ВПМ от фазных КЗ с помощью повышенной индуктивности. Предлагаемый метод, в отличие от известных, может использоваться в ЭМПЭ с ВПМ с подмагничиванием спинки статора или другими методами стабилизации напряжения. Для реализации данного метода в ЭМПЭ с ВПМ укладывается дополнительная тороидальная обмотка, в том случае, если данная обмотка в ЭМПЭ отсутствует.

Суть предложенного метода заключается в том, что в нормальном режиме эксплуатации ЭМПЭ работает как генератор с жесткой внешней характеристикой. Жесткость внешней характеристики может быть обеспечена конструкцией магнитной системы ротора или конфигурацией пазовой зоны. В момент короткого замыкания дополнительная тороидальная обмотка через полупроводниковый ключ подключается к основной, тем самым значительно увеличивая индуктивность ЭМПЭ основной обмотки. B ЭТОМ случае уже эксплуатируется как высокоиндуктивная электрическая машина, ток короткого замыкания которой равен или несколько больше номинального тока. Таким образом, ЭМПЭ, выполненные по данному способу защиты, обеспечивают высокую перегрузочную способность, имеют высокий стартовый момент при работе в номинальном режиме и при этом – достаточно эффективную защиту от коротких замыканий. Поскольку дополнительная обмотка не участвует в преобразовании энергии, она может быть выполнена многовитковой, но с незначительным сечением, следовательно, она будет занимать мало места в пазу ЭМПЭ и незначительно увеличивать его массу. На предложенный метод получен патент на способ (патент РФ № 2644586 «Способ управления системой защиты магнитоэлектрического генератора от короткого замыкания»).

Для исследования эффективности предложенного метода было произведено моделирование ЭМПЭ с ВПМ, реализующее данный метод, результаты которого приведены на рисунке 5.7.



Рисунок 5.7 – *a* – 3D-модель ЭМПЭ; *б* – результаты электромагнитного расчета; *в* – результаты теплового расчета

Основной задачей при компьютерном моделировании была апробация предложенного метода защиты от КЗ. Для этого было произведено моделирование процессов в ЭМПЭ при коротком замыкании без подключения дополнительной обмотки и с подключением. Моделирование было произведено для трехфазного и однофазного КЗ. Результаты компьютерного моделирования представлены в таблице 5.2.

Номинальный ток, А	3-фазное КЗ без подключения обмотки подмагничивания	3-фазное КЗ с подключением обмотки подмагничивания	1-фазное КЗ без подключения обмотки подмагничивания	1-фазное КЗ с подключением обмотки подмагничивания
432	1613.18	177.3	1773.04	212.76

Таблица 5.2 – Значения токов в номинальном режиме и в режиме КЗ

Из таблицы 5.2 следует, что ток трехфазного КЗ, 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 подключении к обмоткам ЭМПЭ дополнительной обмотки и увеличении индуктивности основных обмоток, ток КЗ снижается в 5–7 раз. Полученные результаты компьютерного моделирования доказывают эффективность предложенного метода.

Для подтверждения эффективности предлагаемого метода были выполнены экспериментальные исследования на разработанном маломощном макете, рисунок 5.8. Характеристики макета приведены в таблице 5.3.



Рисунок 5.8 – Статор и ротор прототипа

Мощность при частоте вращения ротора 9000 об/мин, Вт	300
Мощность при частоте вращения	66
1000 об/мин	
Число витков в фазе	32
Число полюсов / пазов	10/12
Тип постоянных магнитов / рабочая температура	SmCo (T 550) / 550 °C,
Остаточная индукция / коэрцитивная сила постоянных магнитов	0,92 Тл; 720 кА/м
(B_r/H_{cB})	

Активное сопротивление фазы, Oh	0,38
Индуктивность фазы, Н	0,000024

Прототип вводился в режим трехфазного КЗ и при этом ток КЗ составлял 34 А. После чего к основной обмотке подключалась дополнительная обмотка ЭМПЭ. В этом случае ток КЗ снижался до 22 А. Эта величина превышает номинальный ток экспериментального прототипа всего на 25% и не причинит значительных проблем ЭМПЭ. То есть в нормальных режимах ЭМПЭ, в котором реализован предложенный метод защиты, может обеспечить перегрузку по мощности до 150%, а в режиме КЗ ток ЭМПЭ не превышает 1,25 от номинального.

Таким образом, испытания на маломощном макете подтвердили эффективность предложенного способа защиты от короткого замыкания и возможность его практического использования.

Помимо апробации предложенного метода на макете также были исследованы характеристики ЭМПЭ с ВПМ при различных видах КЗ. Для этого экспериментальный макет ЭМПЭ с ВПМ вводился в режим несимметричных (одно- и двухфазных КЗ) и симметричного трехфазного короткого замыкания с различных режимов работы (холостой ход и номинальная нагрузка). При этом исследования коротких замыканий осуществлялось при температурах 25 и 120°С, охлаждение ЭМПЭ с ВПМ как в холодном, так и в горячем состоянии. Исследовались не только электромагнитные процессы в ЭМПЭ, но и его тепловое состояние с помощью тепловизора.

На рисунке 5.9 представлены осциллограммы тока и напряжения в фазе исследуемого ЭМПЭ с ВПМ при трехфазном симметричном КЗ. КЗ обмоток осуществлялось через замыкание контактов реле. Из рисунка 5.9 видно, что время переходного процесса составляет не более 0,05–0,1 мс. За это время при внезапном трехфазном коротком замыкании происходит резкий скачок тока с 0 до 13,46 A, а фазное напряжение (амплитудное) снижается с 5,8 до 0,4 В (амплитудное). Важно отметить, что индуктивное сопротивление обмотки ЭМПЭ меньше активного сопротивления обмотки.

207



Рисунок 5.9 – Осциллограммы токов и напряжений при внезапном трехфазного КЗ в ЭМПЭ с ВПМ

После проведения данных экспериментальных исследований ЭМПЭ был помещен в печь при температуре 120°С на 1 ч. При извлечении из печи ЭМПЭ снова вводился в режим симметричного трехфазного КЗ. На рисунке 5.10 показаны осциллограммы токов при трехфазном КЗ ЭМПЭ с ВПМ при различных температурах обмотки ЭМПЭ с ВПМ (25 и 120°С). Из рисунка 5.10 видно, что при увеличении температуры обмотки в 5 раз ток внезапного трехфазного КЗ ЭМПЭ снизился на 25%. Полученный результат показывает адекватность разработанных в главе 3 аналитических моделей и необходимость учета взаимовлияния магнитных и тепловых процессов как при нормальных, так и при аварийных режимах работы ЭМПЭ с ВПМ. При обычных методах расчета токов КЗ данное снижение тока КЗ под действием температуры не учитывается, что может привести к неверному проектировании системы защиты ЭМПЭ от КЗ.



Рисунок 5.10 – Осциллограммы токов внезапного трехфазного КЗ в ЭМПЭ с ВПМ при различных температурах

Аналогичные результаты были получены для несимметричных одно-, рисунок 5.11, и двухфазных КЗ. Ток внезапного КЗ при увеличении температуры обмотки в 5 раз снизился на 18–20%. При несимметричном двухфазном КЗ при увеличении температуры в 5 раз ток КЗ снизился на 19%.



Рисунок 5.11 – Осциллограммы токов внезапного однофазного КЗ в ЭМПЭ при различных температурах

Важно отметить, что после всех проведенных исследований ЭМПЭ с ВПМ запускался в режиме холостого хода и осциллограммы напряжения холостого хода оставались на одинаковом уровне, выполненном до испытаний, что свидетельствует о том, что постоянные магниты ЭМПЭ при различных типах КЗ не размагнитились, в том числе при значительном температурном воздействии (до 1 часа при температуре 120°C).

Далее для оценки теплового состояния ЭМПЭ с ВПМ при различных температурах окружающей среды были сняты теплограммы ЭМПЭ с ВПМ (рисунок 5.12) при различных режимах: после статического нагрева в печи, а также после эксплуатации ЭМПЭ с ВПМ в течение 40 с в режиме трехфазного КЗ. Из полученных теплограмм видно, что после нагрева в течение 1 ч ЭМПЭ с ВПМ в печи температура обмотки составила 130°С, а температура постоянных магнитов – 113°С. То есть экспериментально возможно определить постоянные времени нагрева активных элементов ЭМПЭ с ВПМ при отсутствии в них потерь: для обмотки 0,029 °C/с, а для магнитов – 0,0244 °C/с.



Рисунок 5.12–Теплограммы СГ при различных режимах работы: *а* – после нагрева в печи при температуре 120 °С; *б* – после нагрева в печи при температуре 120 °С и 40 с в режиме КЗ

После нагрева ЭМПЭ с ВПМ был введен в режим трехфазного КЗ на 40 с. За это время температура обмотки изменилась на 20 °C, а температура постоянных магнитов всего на 3 °C. Это показывает, что при переходных процессах (при одно-, двух- и трехфазных КЗ) температура обмотки незначительно влияет на температуру магнитов, значительно больше на температуру магнитов оказывает влияние температура внешней среды и потери на вихревые токи в постоянных магнитах. При этом повышение температуры обмотки на 20 °C практически не оказало никакого влияния на величину тока внезапного короткого замыкания.

Поэтому при исследованиях переходных режимов работы ЭМПЭ с ВПМ необходимо учитывать только температуру активных элементов ЭМПЭ в момент начала переходного процесса, а изменение данной температуры во время переходного процесса будет незначительно влиять на параметры ЭМПЭ ввиду того, что постоянные времени нагрева ЭМПЭ с ВПМ несоизмеримы с постоянными времени электромагнитных процессов. То есть для упрощения расчетов ЭМПЭ с ВПМ при переходных процессах достаточно только определить температуру и свойства материалов при данной температуре в определенный момент времени. Для ЛА данная задача решается исходя из времени полета. При этом система защиты от КЗ ЭМПЭ с ВПМ должна соответствовать времени полета ЛА.

Таким образом, в результате экспериментальных исследований определены зависимости тока от температуры ЭМПЭ с ВПМ при различных режимах (номинальном и анормальном режимах). Все исследования проведены с учетом взаимовлияния температурных и электромагнитных процессов.

Кроме описанных методов, при участии автора были разработаны способы защиты от фазных КЗ 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.

Также высокой эффективностью обладают методы электромагнитного шунтирования. Они позволяют обеспечить не только защиту ЭМЭ с ВПМ от фазных КЗ, но и от витковых. Поэтому более детально они исследованы в следующем параграфе.

5.3 Метод защиты от витковых КЗ

Создание защиты от витковых КЗ ЭМПЭ с ВПМ является более сложной задачей по сравнению с защитой от фазных КЗ. Традиционно для решения данной проблемы используется механический разъединитель. Подобный подход не позволяет после виткового КЗ продолжить эксплуатацию ЭМПЭ с ВПМ.

Процессы при витковых КЗ в ЭМПЭ с ВПМ описываются выражением

$$I = -\frac{e_2(\omega)}{R_s + j\omega L_s} - \frac{j\omega L_m}{R_s + j\omega L_s} I_1(\omega), \qquad (5.1)$$

где I – ток в короткозамкнутом витке; $e_2 - ЭДС$, наводимая в короткозамкнутом витке; L_s – индуктивность короткозамкнутого витка; R_s – сопротивление короткозамкнутого витка; L_m – взаимная индуктивность между короткозамкнутыми витками и остальной обмоткой; I_1 – ток, протекающий по основной обмотке.

Данное уравнение необходимо решать совместно с уравнением механического движения вала силовой установки:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{pJ} \left[M_{\Pi} - \frac{3}{2} p \left(\Psi_M i_q + \left(L_d - L_q \right) i_d i_q \right) \right].$$
(5.2)

Как видно из представленных выражений, токи виткового КЗ возможно минимизировать несколькими способами: либо максимально снизить взаимную индуктивность между закороченным витком и оставшейся частью обмотки, либо сделать ЭДС закороченного витка равной 0. В условиях вращающегося ротора это реализуется при условии равенства магнитного потока 0. Для этого используется электромагнитное шунтирование обмотки.

Подобная конструкция была описана в главе 4 при исследованиях выбора места расположения обмотки подмагничивания для стабилизации напряжения ЭМПЭ с ВПМ. Для пояснения работы конструкции детальная схема приведена на рисунке 5.13.



Рисунок 5.13 – Использование магнитного шунтирования для защиты от витковых КЗ: номинальный режим (*слева*); режим виткового КЗ (*справа*): *1* – основная обмотка; 2 – ферромагнитный клин; 3 – ДО, питаемая постоянным током

Описание данного метода проводится по рисунку 5.13. Суть его заключается в том, что в пазу ЭМПЭ с ВПМ устанавливается ферромагнитный клин (2), на котором расположена ДО (3), питаемая постоянным током. В режиме нормальной эксплуатации клин максимально насыщен и магнитный поток Φ по нему не замыкается. При возникновении виткового КЗ постоянный ток в ДО (3) перестает подаваться, это позволяет практически всему магнитному потоку Φ замыкаться по ферромагнитному клину, не пересекая при этом обмотку 3. Это приводит к минимизации токов виткового КЗ, а также фазного КЗ. То есть ферромагнитный клин обеспечивает купирование фазы ЭМПЭ с ВПМ.

При участии автора также был разработан метод, лишенный данных недостатков и заключающийся в насыщении спинки статора при витковом КЗ. Описание данного метода приводится на рисунке 5.14.



Рисунок 5.14 – Использование магнитного шунтирования для защиты от витковых КЗ: *1* – основная обмотка; *2* – ферромагнитный клин; *3* – ДО, питаемая постоянным током

Суть предложенного метода с намагничиванием спинки статора заключается в том, что в пазу ЭМПЭ с ВПМ устанавливается ферромагнитный клин (2), а на спинке магнитопровода статора расположена тороидальная ДО (3), питаемая постоянным током. При этом ДО каждого паза выполнена с возможностью автономного управления. Размеры клина выбираются таким образом, чтобы в номинальном режиме по нему замыкалось не более 20–30% магнитного потока Φ_1 , а большая часть потока замыкалась через спинку статора (поток Φ_2). При нормальном режиме эксплуатации ДО либо питается постоянным током, необходимым для стабилизации напряжения, либо питание отсутствует. При возникновении виткового КЗ в ДО (3) подается максимальный постоянный ток, который насыщает спинку статора до такого состояния, когда она пропускает не более 30% магнитного потока. Это приводит к минимизации (не полному устранению) токов виткового КЗ, а также фазного КЗ. Достоинством данного метода является то, что ДО питается постоянным током не постоянно, а в основном в режиме виткового КЗ.

Важно отметить, что КЗ в ДО в случае ферромагнитного клина приведет к купированию фазы, а в случае ДО на спинке статора – к отказу защиты от витковых КЗ. Данный факт является важным при создании отказоустойчивых ЭМПЭ с ВПМ.

5.3.1 Отказоустойчивые ЭМПЭ с ВПМ для СГЭ ЛА

Описанные методы защиты от витковых КЗ позволяют не только значительно повысить надежность и безотказность ЭМПЭ с ВПМ, но создавать на практике отказоустойчивые ЭМПЭ с ВПМ. Под понятием отказоустойчивость подразумевается возможность сохранения ЭМПЭ с ВПМ, а следовательно, и СГЭ ЛА своих функций при любом единичном отказе.

Для реализации отказоустойчивого ЭМПЭ с ВПМ он должен быть выполнен либо многофазным, либо иметь дублируемую обмотку 2×3. Требования по дублированию также должны относиться и к РН ЭМПЭ с ВПМ.

Необходимо отметить, что при реализации отказоустойчивой схемы ЭМПЭ с ВПМ с защитой от витковых КЗ (многофазной схемы или дублируемой схемы) основным требованием является термическая, гальваническая и электромагнитная развязка обмоток ЭМПЭ, именно данная особенность учитывается в предложенном методе защиты от витковых КЗ. Данное требование можно реализовать, только применяя зубцовую обмотку по схеме, приведенной на рисунке 5.15. В данном случае лобовые части обмоток ЭМПЭ с ВПМ не пересекаются, и витковое КЗ в одной из лобовых частей не приведет к нарушению эксплуатации всего ЭМПЭ с ВПМ.

Для выбора эффективного способа обеспечения отказоустойчивости ЭМПЭ с ВПМ целесообразно рассмотреть особенности реализации каждой конструктивной схемы, провести детальный анализ многофазных и дублируемых ЭМПЭ с ВПМ и выбрать наиболее эффективный вариант.



Рисунок 5.15 – Схема обмотки ЭМПЭ с ВПМ с гальванически-, термически- и электромагнитно-развязанной обмоткой на примере ЭМПЭ с 10 полюсами и 12 пазами

При использовании дублируемой обмотки в ЭМПЭ с ВПМ выход из строя одной фазы (например короткое замыкание) влечет за собой выход трех фаз, это приводит к увеличению тепловой нагрузки на оставшуюся звезду в 2 раза. При этом второй отказ в дублируемой обмотке, в том случае, если ЭМПЭ с ВПМ имеет две звезды, приводит к полному отказу ЭМПЭ с ВПМ. При большем количестве дублируемых элементов (обмоток и систем управления) массогабаритные показатели ЭМПЭ с ВПМ значительно возрастают.

При использовании дублируемых обмоток можно использовать также реконфигурацию дублируемых звезд, но это повышает требования к системе управления ЭМПЭ с ВПМ и усложняет ее алгоритмы.

Поэтому исходя из выражений надежности, полученных в главе 2 для многофазных ЭМПЭ с ВПМ СГЭ ЛА, видно, что более эффективным является использованием дробного резервирования с помощью многофазных ЭМПЭ с ВПМ. Это приводит к меньшей тепловой нагрузке, позволяет продолжить эксплуатацию ЭД при одном и двух отказах.

При возникновении КЗ в обмотках ЭМПЭ с ВПМ и купировании одной из фаз (в случае многофазных ЭМПЭ с ВПМ) или одной из звезд в случае дублируемых ЭМПЭ с ВПМ, происходит увеличение тока в других фазах, а следовательно, и увеличение омических потерь в обмотке, увеличение пульсаций момента (для отказоустойчивых ЭМПЭ с ВПМ, работающих в режиме ЭД), увеличение потерь в постоянных магнитах на вихревые токи.

В таблице 5.4 приведены данные, полученные на основе расчетов для отказоустойчивого ЭМПЭ с ВПМ, работающего в режиме двигателя. В таблице приведено сравнение различных схем обеспечения отказоустойчивости ЭМПЭ с ВПМ по уровню увеличения тепловых потерь, увеличению тока, увеличению пульсаций момента. Рассматривались схемы 2×3 с реконфигурируемой обмоткой (R) и нереконфигурируемой, а также 5- и 6-фазные ЭМПЭ с ВПМ.

Как видно из таблицы 5.4, наиболее эффективным вариантом является, исходя из увеличения токов и пульсаций момента при различных отказах, ЭД с ПМ, имеющий 6 фаз.

Таблица 5.4 – Сравнение параметров ЭД с ПМ с различными способами обеспечения отказоустойчивости

	2×3	2×3 (R)	5 фаза	6 фаза
Увеличение тока/плотности	200	27	40	23
тока при отключении одной				
фазы,%				
Увеличение тока/плотности	Неработоспособна	50	270	40
тока при отключении двух				
фаз,%				
Увеличение пульсаций	40	40	40	30
момента при отключении				
одной фазы,%				
Увеличение пульсаций	Неработоспособна	50	70	50
момента при отключении				
двух фаз,%				

5.3.2 Исследования способа защиты от витковых КЗ

Для оценки эффективности и выбора рассмотренных выше способов защиты от витковых КЗ были проведены экспериментальные исследования и компьютерное моделирование шестифазного отказоустойчивого ЭГ с ВПМ с защитой от витковых КЗ (далее ЗВКЗ). Конструкции исследуемых ЭМПЭ с ВПМ приведены на рисунке 5.16.

Исследуемый ЭМПЭ имеет 10 (на рисунке 5.15) полюсов и 12 пазов. В пазах уложена зубцовая 6-фазная обмотка, каждая фаза которой располагается в своем пазу для обеспечения максимальной отказоустойчивости, согласно приведенным положениям. Количество витков в катушке 50. При размещении на ферромагнитном клине ДО 3ВКЗ имеет 12 катушек по 7 витков в каждой, соединение катушек последовательное. При расположении ДО на спинке статора, ДО имеет 12 катушек по 16 витков в каждой, соединение катушек – последовательное.

На рисунке 5.16 приведены результаты компьютерного моделирования ЭМПЭ с ВПМ с ДО на ферромагнитном клине при наличии и отсутствии тока в
ДО. На рисунке 5.17 приведены результаты компьютерного моделирования ЭМПЭ с ВПМ с ДО на спинке магнитопровода при наличии и отсутствии тока в ДО.



Рисунок 5.16 – ЭМПЭ с ВПМ с ЗВКЗ с помощью подмагничивания ферромагнитного клина (*слева*) и заманивания спинки статора (*справа*)



Рисунок 5.17 – Картина распределения магнитной индукции в ЭМПЭ с ВПМ с ЗВКЗ и ДО на ферромагнитном клине в номинальном режиме работы (*справа*) и режиме виткового КЗ (*слева*), при срабатывании защиты

Из результатов компьютерного моделирования видно, что оба предложенных метода защиты позволяют эффективно защищать от виткового КЗ, но при этом в методе ЗВКЗ с насыщением спинки статора необходимы значительные токи для минимизации магнитного потока.

Для обоих методов были разработаны макетные образцы и проведены их экспериментальные исследования.



Рисунок 5.18 – Картина распределения магнитной индукции в ЭМПЭ с ВПМ с ЗВКЗ и ДО на спинке статора в номинальном режиме работы (*слева*) и режиме виткового КЗ (*справа*), при срабатывании защиты

В таблице 5.5 представлены результаты экспериментальных исследований для ЗВКЗ с ДО на феррормагнитном клине.

Из таблицы 5.5 и рисунка 5.19 следует, что ток короткого замыкания магнитоэлектрического генератора можно снизить в 3,6–4 раза. При этом витковое КЗ возможно погасить практически полностью. Важно отметить, что характеристики ЭМПЭ с ВПМ при использовании данного метода защиты от витковых КЗ снижаются на 20–25% (по КПД, массогабаритным показателям).

Таблица 5.5 – Результаты экспериментальных исследований для ЭМПЭ ЗВКЗ с ДО на ферромагнитном клине

	Параметр	Значение
1	Ток в обмотке подмагничивания, А	0
	Ток КЗ в основной обмотке, А (режим КЗ с защитой)	2,24
	Частота вращения ротора, об/мин	2100±20
2	Ток в обмотке подмагничивания, А	12
	Ток КЗ в основной обмотке, А	3,2
	Частота вращения ротора, об/мин	2100±20
3	Ток в обмотке подмагничивания, А	60
	Ток КЗ в основной обмотке, А	8,08
	Частота вращения ротора, об/мин	2100±20

На рисунке 5.19 показана функция зависимости тока фазы от тока в обмотке ДО на ферромагнитном клине.



Рисунок 5.19 – Функция зависимости тока фазы от тока в обмотке подмагничивания

На рисунке 5.20 показаны осциллограммы напряжений трех фаз ЭМПЭ с ВПМ и ДО на ферромагнитном клине при срабатывании защиты.



Рисунок 5.20 – Осциллограммы напряжений трех фаз ЭМПЭ с ВПМ при действии защиты от ВКЗ (*слева*) и функция зависимости напряжения холостого хода от тока в обмотке подмагничивания (*справа*)

Из рисунка 5.20 следует, что в пазах, где размещены обмотки фаз A и B, ток в обмотке подмагничивания отсутствует, т.е. магнитный поток практически не пересекает обмотки данных фаз, а в пазу, где размещены обмотки фазы C, ток поступает в ДО и сильно насыщает ферромагнитный клин, поэтому ЭДС фазы C больше, чем ЭДС двух других фаз. При увеличении тока в ДО разница ЭДС может быть увеличена до 4–5 раз.

Далее были произведены исследования ЭМПЭ с ВПМ с ЗВКЗ с помощью насыщения спинки статора, результаты приведены в таблице 5.6 и на рисунке 5.20.

Важно отметить, что при встречном включении у экспериментального ЭМПЭ с ВПМ появились дополнительные вибрации.

На рисунке 5.20 (*справа*) показана функция зависимости напряжения холостого хода от тока в ДО для исследуемого образца.

Таблица 5.6 – Результаты экспериментальных исследований для ЭМПЭ ЗВКЗ с ДО на спинке статора

Режим	Значение			
	Напряжение	Ток в обмотке	Частота вращения,	
	холостого хода, В	подмагничивания, А	об/мин	
Последовательное	13,3	0	1030±20	
включение обмотки	7.2	62	1030±20	
подмагничивания	,,2		1000-20	
Встречное включение	10,3	0	800±20	
обмотки	11.5	62	800+20	
подмагничивания	11,5	02	000±20	

Важно отметить, что при встречном включении у экспериментального ЭМПЭ с ВПМ появились дополнительные вибрации.

Таблица 5.7 – Результаты экспериментальных исследований

1	Ток в обмотке подмагничивания, А Последовательное включение обмотки подмагничивания	0
	Ток КЗ в основной обмотке, А	12,9
	Частота вращения ротора, об/мин	945±20
2	Ток в обмотке подмагничивания, А Последовательное включение обмотки подмагничивания	62
	Ток КЗ в основной обмотке, А	7,8
	Частота вращения ротора, об/мин	945±20
3	Ток в обмотке подмагничивания, А Встречное включение обмотки подмагничивания	0
	Ток КЗ в основной обмотке, А	12,95
	Частота вращения ротора, об/мин	945±20
Λ	Ток в обмотке подмагничивания, А Встречное включение обмотки подмагничивания	62
+	Ток КЗ в основной обмотке, А	14,4
	Частота вращения ротора, об/мин	945±20

Из полученных результатов следует, что при последовательном включении ДО напряжение холостого хода уменьшается в 1,84 раза для насыщаемой области магнитопровода статора. При встречном включении магнитные потоки, исходящие от обмоток подмагничивания, складываются с магнитным потоком возбуждения, в результате напряжение холостого хода увеличивается в 1,11 раз.

В таблице 5.7 приведены результаты измерений в режиме короткого замыкания.

Из таблицы 5.7 видно, что ток КЗ при данном способе защиты снижается всего лишь в 2 раза. Поэтому для эффективной защиты от витковых КЗ необходимо использовать ДО, расположенное на ферромагнитном клине.

ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 5

1. Предложен новый способ обеспечения защиты ЭМПЭ с ВПМ от витковых коротких замыканий, отличающийся тем, что учитывается гальваническая, термическая и электромагнитная связь катушек ЭМПЭ с ВПМ. Данный способ позволяет сохранять работоспособность ЭМПЭ с ВПМ при витковых коротких замыканиях путем шунтирования 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 (без дополнительных обмоток на роторе) от витковых коротких замыканий во всех режимах работы Произведена оценка увеличения массогабаритных показателей ЭМПЭ с ВПМ при использовании предлагаемой защиты от витковых коротких замыканий.

2. Предложена и разработана методика компьютерного моделирования коротких замыканий ЭМПЭ с ВПМ с учетом механических процессов ротора, позволяющая проводить исследование не только отдельных типов КЗ, но и их различных комбинаций. С помощью разработанной методики были проведены исследования коротких замыканий в ЭМПЭ с ВПМ на примере электрогенератора СГЭ ЛА МЭГ-100Ч

3. Предложен способ защиты ЭМПЭ с ВПМ в составе СГЭ ЛА от трехфазных КЗ (патент РФ № 2644586 «Способ управления системой защиты

магнитоэлектрического генератора от короткого замыкания»), отличающийся от известных тем, что при фазных коротких замыканиях на фазу коммутируется дополнительная индуктивность, роль которой выполняет обмотка подмагничивания. Проведены экспериментальные и компьютерные исследования данного метода, которые позволили установить, что при использовании предложенного метода ток КЗ снижается в 5–7 раз.

4. Разработаны способы защиты от фазных КЗ 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.

5. Проведены экспериментальные исследования КЗ в ЭМПЭ с ВПМ в «холодном» и «горячем» состоянии ЭМПЭ и установлено:

– при увеличении температуры обмотки ЭМПЭ с ВПМ в 5 раз ток внезапного трехфазного КЗ ЭМПЭ снизился на 25%.Это доказывает, что величина токов внезапного КЗ в «холодном» ЭМПЭ и ЭМПЭ при рабочей температуре значительно отличаются;

– при переходных процессах (при одно-, двух- и трехфазных КЗ) температура обмотки незначительно влияет на температуру магнитов.

6. Проведены исследования отказоустойчивых ЭМПЭ с ВПМ и доказано, что эффективным вариантом с точки зрения обеспечения надежности, увеличения КПД и снижения пульсаций момента является использование ЭМПЭ с ВПМ, имеющих 6 и более фаз.

ГЛАВА 6 ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ И МИНИМИЗАЦИЯ ПОТЕРЬ В АГРЕГАТАХ СИСТЕМ ГЕНЕРИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ. МЕТОДОЛОГИЯ СОЗДАНИЯ СИСТЕМ ГЕНЕРИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ С МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ ЭНЕРГИИ

Полетная масса современных СГЭ ЛА, как видно из математического описания, полученного в главе 2, определяется не только мощностью агрегатов СГЭ (АСГЭ), но и их рабочей температурой, хладагентом, используемым для охлаждения, его теплофизическими свойствами и требуемым расходом, а также коэффициентом полезного действия. Поэтому важной задачей при создании перспективных СГЭ ЛА на основе ЭМПЭ с ВПМ является минимизация потерь в основных АСГЭ ЛА.

В данной главе приводятся исследования потерь в АСГЭ ЛА в целом, и в ЭМПЭ с ВПМ в частности, даются рекомендации по внедрению новых технологий при создании АСГЭ и ЭМПЭ с ВПМ с целью минимизации потерь. Так как максимальной тепловой нагрузкой и максимальными потерями обладают основной энерговырабатывающий узел СГЭ ЛА (ЭМПЭ с ВПМ) и его PH, так как через них «прокачивается» максимальная мощность СГЭ ЛА, то основной акцент в главе делается на минимизацию потерь именно в ЭМПЭ с ВПМ.

Основные исследования потерь в ЭМПЭ с ВПМ проведены в работах [276– 312]. В данных работах также даны общие рекомендации по расчету аэродинамических, механических и других видов потерь. Поэтому в данной главе в основном уделяется внимание потерям в магнитопроводе АСГЭ ЛА и способам их минимизации, потерям в подшипниковых опорах ЭМПЭ с ВПМ на вихревые токи, а также потерям в ВПМ на вихревые токи.

6.1 Потери на вихревые токи и гистерезис в магнитопроводах АСГЭ ЛА

В составе СГЭ ЛА, как было показано в главе 1, имеется значительное множество агрегатов, которые содержат магнитопроводы из магнитомягких

материалов. В частности, к таким АСГЭ ЛА относятся ЭМПЭ, трансформаторы, ТВУ, дроссели и т.д. Количество подобных АСГЭ с магнитопроводами из магнитомягких материалов в составе СГЭ ЛА может достигать 50–70%. Поэтому масса магнитопроводов АСГЭ, а также потери в них оказывают значительное влияние на эффективность и полетную массу всей СГЭ.

В связи с этим особо важной задачей при создании перспективных СГЭ ЛА является оптимальный выбор материалов магнитопроводов с целью обеспечения минимизации массогабаритных показателей АСГЭ при максимизации их КПД. Свойства и оценка эффективности использования различных магнитомягких материалов для АСГЭ ЛА приведены автором в работе [290] и здесь не рассматриваются. Для агрегатов общепромышленного применения (с частотой 50 Гц) задача точного расчета потерь в магнитопроводах решена теоретически и подтверждена экспериментально в работах отечественных и зарубежных авторов [285–290]. Частичный анализ потерь для магнитопроводов АСГЭ с частотами 400 Гц представлен в работах [287, 288]. При этом в известных работах практически не уделяется внимания экспериментальным исследованиям потерь в магнитопроводах с частотами более 400 Гц, хотя именно подобные частоты характерны для перспективных СГЭ ЛА. Подобное отсутствие экспериментальных обусловлено исследований В работах тем, что ПО проектированию электротехнических устройств представлено множество аналитических выражений для определения удельных потерь в магнитопроводе статора в широком диапазоне частот, что, на первый взгляд, позволяет считать задачу расчета потерь в магнитопроводе статора в широком диапазоне частот решенной.

Для магнитопроводов, эксплуатирующихся при более высоких частотах перемагничивания, необходимо получить выражения, аппроксимирующие экспериментальные зависимости удельных потерь, при этом для каждого типа материалов коэффициенты в данных выражениях должны быть индивидуальны (анизотропных, изотропных, магнитомягких и т.д.). Поэтому в рамках диссертации были проведены экспериментальные исследования удельных потерь при высоких частотах перемагничивания и получены их аппроксимирующие функции. Аппроксимация выполнялась полиноминальной функцией 6 степени.

Некоторые из экспериментальных исследований представлены на рисунке 6.1.



Рисунок 6.1 – Результаты экспериментальных исследований для изотропной электротехнической стали 2421, толщина 0,26 мм (*слева*) и результаты экспериментальных исследований для стали 49К2ФА, толщина 0,08 мм (*справа*)

Экспериментальные исследования потерь в магнитопроводе производились при синусоидальной форме магнитного потока, и изменение формы магнитного потока может привести к увеличению удельных потерь еще на 10–15%.

С помощью программного комплекса Matlab была проведена аппроксимация эмпирических зависимостей удельных потерь от частоты перемагничивания $(p_{yd}=f(B))$ и индукции. Практически все экспериментальные кривые аппроксимируются полиномом вида

$$p(f,B) = A_1(f) \cdot 1,495B^6 + A_2(f) \cdot B^5 + A_3(f) \cdot B^4 + A_4(f) \cdot B^3 + A_5(f) \cdot B^2 + A_6(f) \cdot B + A_7(f).$$

В качестве примера приведены результаты аппроксимации для аморфного железа 5БДСР, тип В:

$$p_{5E\mathcal{A}CP(B)} = (2 \cdot 10^{-5} f^2 - 0,019 f + 4,372) \cdot B^2 + (-5 \cdot 10^{-6} f^2 + 0,027 f - 4,479) \cdot B + (9 \cdot 10^{-7} f^2 - 0,003 f + 0,943).$$

Для других типов магнитомягких материалов может быть выполнена аналогичная аппроксимация, с использованием приведенного полинома. Полученные аппроксимирующие выражения позволяют учесть нелинейность зависимости потерь в магнитопроводах из аморфного железа от частоты перемагничивания.

6.1.1 Влияние температуры на потери в магнитопроводе элементов СГЭ ЛА

В процессе эксплуатации магнитопровод АСГЭ ЛА под действием температуры окружающей среды, а также из-за потерь будет нагреваться. Как

известно, увеличение температуры магнитопровода приводит к изменению его магнитных свойств. Поэтому необходимо оценить влияние температуры магнитопроводов АСГЭ ЛА на удельные потери в них.

Для выполнения поставленной цели были произведены экспериментальные исследования удельных потерь в беспазовых магнитопроводах из аморфного железа 5БДСР трех типов: тип Т, тип Е, тип В (производство Ашинского металлургического комбината, сертификат качества №11, индукция насыщения сплавов составляет 1,3 Тл, удельное сопротивление 1,6 мкОм/м (62 500 См/м), масса магнитопроводов составляла 0,5 кг, активная длина 50 мм, толщина ленты 32 мкм, температура Кюри 350 °C). Экспериментальные исследования выполнялись на установке МК-4Э при синусоидальном перемагничивании образцов. Все эксперименты проводились при индукциях на 30% ниже индукции насыщения, при частотах 400, 1000, 2000 Гц. Исследования осуществлялись при комнатной температуре и температуре 80 °C (после нагрева образца с измерительной обмоткой в муфельной печи). Погрешность от увеличения сопротивления измерительной обмотки учитывалась. Данные экспериментальных исследований были аппроксимированы с помощью программного пакета Ansoft Maxwell (модуль для расчета потерь в стали по зависимостям от частоты), что позволило получить эмпирические выражения для расчета потерь в аморфных сплавах и произвести их численные исследования.

В результате экспериментальных исследований были получены зависимости удельных потерь в исследуемых образцах аморфного железа от частоты перемагничивания, магнитной индукции и температуры. На рисунке 6.2 представлена зависимость удельных потерь для магнитопровода из 5БДСР, тип Е при частоте перемагничивания 400 Гц.

Из полученных экспериментальных данных видно, что с увеличением температуры образцов удельные потери в магнитопроводе снижаются. Так, при частоте перемагничивания 400 Гц и магнитной индукции 0,5 Тл удельные потери при повышении температуры с 20 до 80 °C снижаются на 15–17%. При этом в области более низких значений индукций (например, 0,25 Тл) данное снижение составляет всего 3–5%.



Рисунок 6.2 – Зависимость удельных потерь в магнитопроводе статора из 5БДСР, тип Е при частоте перемагничивания 400 Гц и температурах 20 и 80 °С (*слева*); зависимость удельных потерь в магнитопроводе статора из 5БДСР, тип Е при частоте перемагничивания 1000 Гц и температурах 20 и 80 °С (*справа*)

На рисунке 6.3 в качестве примера приведены экспериментальные петли гистерезиса для типа Е при температуре 80 °С и частоте 400 Гц (индукция 0,3595) и 2000 Гц (индукция 0,4561 Тл).



Рисунок 6.3 – Динамические петли гистерезиса для аморфного железа типа Е: при температуре 80°С и частоте 400 Гц (индукция 0,3595 Тл) (*слева*); при температуре 80°С и частоте 2000 Гц (индукция 0,4561 Тл) (*справа*)

Для обобщения полученных результатов представляется целесообразным разработать эмпирическую модель, описывающую зависимость удельных потерь в аморфном железе марки 5БДСР от температуры, частоты и магнитной индукции. В общем виде модель, описывающая потери в магнитопроводе, может быть представлена в виде:

$$P = P_{\text{гист}} + P_{\text{вих}}, \qquad (6.1)$$

$$P_{\text{rucr}} = k_{\text{rucr}} B^2 f , \qquad (6.2)$$

$$P_{\rm BHX} = k_{\rm BHX} \left(Bf\right)^2 + k_{\rm BHX,H36} \left(Bf\right)^{1.5}, \tag{6.3}$$

где $P_{_{\rm ГИСТ}}$ – потери в магнитопроводе на гистерезис; $k_{_{\rm ГИСТ}}$ – коэффициент, характеризующий потери в магнитопроводе на гистерезис; B – магнитная индукция в магнитопроводе; f – частота перемагничивания; $P_{_{\rm BUX}}$ – потери на вихревые токи в магнитопроводе; $k_{_{\rm BUX}}$ – коэффициент, характеризующий потери на вихревые токи; $k_{_{\rm BUX,H36}}$ – коэффициент, характеризующий избыточные потери на вихревые токи.

Потери на вихревые токи в общем виде могут быть представлены:

$$P_{\rm BHX} = \frac{E_{\rm BHX}^2}{r(1 + \alpha(T - 20))},$$
(6.4)

где *r* – удельное сопротивление аморфного железа; *E*_{вих} – ЭДС вихревых токов, индуцируемых в аморфном железе; α – температурный коэффициент сопротивления материала магнитопровода; *T* – температура магнитопровода.

Тогда можно записать:

$$P_{\text{BMX}} = \frac{1}{(1 + \alpha(T - 20))} \left(k_{\text{BMX0}} \left(Bf \right)^2 + k_{\text{BMX.M360}} \left(Bf \right)^{1,5} \right) = P_{\text{BMX0}} \frac{1}{(1 + \alpha(T - 20))}, (6.5)$$

где $k_{\text{вих0}}$ – коэффициент, характеризующий потери на вихревые токи при температуре 20°С; $k_{\text{вих.из60}}$ – коэффициент, характеризующий избыточные потери на вихревые токи при температуре 20°С; $P_{\text{вих0}}$ – удельные потери на вихревые токи при температуре 20°С; $P_{\text{вих0}}$ – удельные потери на вихревые токи при температуре 20°С; $P_{\text{вих0}}$ – удельные потери на вихревые токи

Потери на гистерезис характеризуются площадью петли гистерезиса, которая, как было показано выше, с увеличением температуры уменьшается. В связи с этим введем коэффициент, характеризующий уменьшение площади петли гистерезиса под действием температуры (по аналогии с температурным коэффициентом сопротивления).

$$P_{\rm rucr} = k_{\rm rucr0} (1 - \beta (T - 20)) B^2 f = P_{\rm 0rucr} (1 - \beta (T - 20)), \tag{6.6}$$

где $k_{\text{гист0}}$ – коэффициент, характеризующий потери на гистерезис при температуре 20°С; β – температурный коэффициент петли гистерезиса, характеризующий уменьшение ее площади с увеличением температуры; $P_{0\text{гнст}}$ – удельные потери на гистерезис при температуре 20°С.

С учетом этого эмпирическая модель, характеризующая потери в магнитопроводе от температуры, частоты и магнитной индукции, может быть записана как сумма (6.5) и (6.6).

Необходимо отметить, что аналогичные аппроксимирующие выражения, характеризующие зависимость потерь в магнитопроводах, могут быть получены для любых магнитомягких материалов. Также важно отметить, что полученные выражения позволяют учитывать зависимость потерь в магнитопроводах аморфного железа от температуры, что является важным при проектировании агрегатов СГЭ ЛА с их использованием.

6.1.2 Влияние технологии изготовления магнитопроводов АСГЭ на удельные потери в магнитопроводе

Одной из основных задач, которую требуется решить разработчикам АСГЭ ЛА, содержащих магнитопроводы, является минимизация себестоимости изделия при сохранении его энергетических параметров. Минимизация себестоимости производится с учетом программы выпуска изделий и их прогнозируемой потребности, данные показатели определяют технологии, применяемые для изготовления АСГЭ, и используемые материалы.

минимизации стоимости мелкосерийных Для И опытных изделий целесообразно применять новые технологии, которые при малых объемах производимой продукции требуют незначительных вложений на технологическую оснастку и перенастройку оборудования. В особенности это проявляется при изготовлении магнитопроводов АСГЭ. При серийном освоении для изготовления магнитопровода используется штамповка, для которой требуется изготовление дорогостоящего штампа, стоимость которого может достигать нескольких миллионов рублей. Штамповка эффективна для серийных АСГЭ и абсолютно нерентабельна для опытных АСГЭ, которые могут требовать изменения геометрии листа магнитопровода по результатам испытаний и, соответственно, изменения геометрии штампа. Для опытных АСГЭ и мелкосерийных АСГЭ целесообразно применять электроэрозионную или лазерную резку листов магнитопроводов.

Особенности применения данных технологий рассмотрены в работах [292– 298]. В [292–298] доказана экономическая эффективность лазерной резки и электроэрозионной резки при создании опытных образцов, но при этом

практически не приведены технические рекомендации по использованию этих технологий, рекомендации по расчету потерь в листах магнитопровода при электроэрозионной резке и лазерной резке, не представлено сравнение данных технологий. Хотя очевидно, что изменение технологии изготовления листов магнитопровода приведет к изменению характеристик магнитомягкого материала. Это показано в работах [298], которые посвящены изменению удельных потерь в магнитопроводе при лазерной резке и электроэрозии, при этом в своем большинстве эти результаты получены только для 50 Гц [298] и приведены для электротехнических сталей зарубежного производства. Так, в работе [296] представлены результаты исследований удельных потерь при изготовлении листов лазерной резкой при 50 Гц. В работе [297] произведен анализ изменения кривой намагничивания магнитомягкого материала при 50 и 400 Гц. В [298] представлено сравнение магнитопроводов, полученных лазерной резкой и штамповкой, и доказано, что при термообработке магнитопровод, полученный с помощью лазерной резки, имеет более низкие удельные потери, чем при штамповке. Важно отметить, что в [296–298] в основном рассматривается лазерная резка и отмечается, что полученные характеристики материалов зависят от типа станка для лазерной резки и режима резки.

Задачей данного параграфа является исследование технологий электроэрозионной и лазерной резки для производства магнитопроводов из электротехнических сталей отечественного производства, сравнение данных технологий и оценка характеристик магнитопроводов АСГЭ, выполненных по данным технологиям не только при частотах до 50 Гц, но и при частотах до 2000 Гц. Исследования проводятся на образцах без термообработки (ТО) и с ТО.

Объектом исследований в работе являются кольцевые образцы из электротехнической стали 2421 с толщиной листа 0,18, 0,27 и 0,35 мм Для измерений на образцах уложено 56 витков измерительной обмотки и 5 витков обмотки намагничивания. Резка образцов выполнялась на лазерном станке Laser Cut FO Professional на основе волоконного лазера IPG Photonics. Эрозионная резка выполнялась на станке DK 7725. При исследованиях рассматривались образцы с TO после резки и без него. ТО проводилась по методике, изложенной в TУ 14-1-4657-89, до температуры 800 °C.

В результате экспериментов было получено семейство кривых, характеризующих удельные потери и кривые намагничивания стали 2421 при различных частотах и технологиях обработки листов. На рисунке 6.4, *а* приведены кривые намагничивания стали 2421 при лазерной резке (ЛР) с термообработкой (TO) и без нее, а также кривая намагничивания для стали 2421, приведенная в технических условиях. На рисунке 6.4, *б* представлена кривая намагничивания для эрозионной резки (ЭО) с TO и без нее.



Рисунок 6.4 – Кривые намагничивания электротехнической стали 2421 при различных технологиях изготовления листов с последующей ТО или без нее: *a* – ЛР; *б* – ЭО

Из анализа полученных экспериментальных данных видно, что при лазерной резке без ТО кривая намагничивания в области рабочих индукций (0,5–1,4 Тл) имеет более высокие значения напряженности магнитного поля по сравнению с кривой намагничивания, представленной в технических условиях, петля гистерезиса образца после ЛР значительно изменяется без ТО. На рисунке 6.5 приведена петля гистерезиса для исследуемого образца. При этом термообработка электротехнической стали после лазерной резки согласно ТУ, позволяет на том же кольцевом образце получить кривую, которая полностью соответствует данным ТУ. Петля гистерезиса образца после ТО также приведена на рисунке 6.5.

Полученный результат говорит о том, что после лазерной резки листы магнитопровода необходимо подвергать термообработке согласно ТУ. В противном случае характеристики магнитомягких материалов будут значительно хуже. Аналогичные результаты были получены для электротехнической стали 2421 с толщиной 0,27 и 0,35 мм (кривые не приведены). При анализе кривых намагничивания образцов, полученных с помощью ЭО, видно, что они практически не изменяются относительно кривой, приведенной в технических условиях,

расхождение достигает не более 5%. При этом образцы с ТО и без ТО имеют аналогичные характеристики. В первом приближении это позволяет сделать вывод о том, что образцы после ЭО не нужно подвергать термообработке. Для подтверждения данного тезиса были проведены детальные исследования удельных потерь в образцах после ЛР и ЭО.



Рисунок 6.5 – Петля гистерезиса образцов после ЛР без TO (a) и с TO (δ)

На рисунке 6.6 представлены результаты исследования удельных потерь в кольцевом магнитопроводе при 50 Гц. Магнитопроводы выполнялись с помощью ЛР и ЭО с ТО и без нее, толщина листа исследуемых образцов составляла 0,18 мм.



Рисунок 6.6 – Удельные потери электротехнической стали 2421 (толщина листа 0,18 мм) при частоте 50 Гц и при различных технологиях изготовления листов с последующим ТО или без нее

Из анализа рисунка 6.6 видно, что при ЛР без ТО при индукции 1,2 Тл удельные потери составляют 2,4 Вт/кг, при этом термообработка согласно ТУ позволяет снизить данные потери в 2 раза. При ЭО удельные потери при частоте 50 Гц и индукции 1,2 Тл составляют 1,9 Вт/кг, при этом ТО позволяет их также снизить до 1,4 Вт/кг (на 36,8%). То есть в образцах, полученных с помощью ЛР без

ТО, удельные потери на 20 % выше по сравнению с образцами, полученными с помощью ЭО без ТО. При этом ТО позволяет обеспечить удельные потери как в образцах, полученных с помощью ЭО, так и в образцах, полученных с помощью ЛР на уровне ТУ, разница составляет не более 5 %. Полученные результаты показывают, что и при ЛР и при ЭО необходимо производить ТО образцов, при этом ТО обеспечивает свойства образцов на уровне данных, заложенных в ТУ. Полученные результаты доказывают перспективность использования лазерной резки электротехнической стали.

На рисунке 6.7 представлены результаты исследования удельных потерь в кольцевом магнитопроводе при 400 Гц. Магнитопроводы выполнялись с помощью ЛР и ЭО с ТО и без нее, толщина листа исследуемых образцов составляла 0,18 мм.



Рисунок 6.7 – Удельные потери электротехнической стали 2421 (толщина листа 0,18 мм) при частоте 400 Гц и при различных технологиях изготовления листов с последующим ТО или без нее

Из анализа рисунка 6.7 видно, что при ЛР без ТО при индукции 1,2 Тл и частоте 400 Гц удельные потери составляют 33 Вт/кг, увеличение потерь, по сравнению с 50 Гц, происходит в 13,75 раза. При этом термообработка 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. Здесь можно отметить увеличение разницы

потерь между образцами ЛР и ЭО без ТО, по сравнению с 50 Гц. При этом ТО позволяет обеспечить удельные потери как в образцах, полученных с помощью ЭО, так и в образцах, полученных с помощью ЛР на уровне ТУ, разница составляет не более 5%. Кроме того, при увеличении частоты перемагничивания разница между удельными потерями в образцах, полученных с помощью ЭО без ТО и с ТО, снижается. Для 50 Гц она составляла 36,8 %, а при 400 Гц она составляет 14 %.

На рисунке 6.8 приведены удельные потери для 2000 Гц.



Рисунок 6.8 – Удельные потери электротехнической стали 2421 (толщина листа 0,18 мм) при частоте 2000 Гц и при различных технологиях изготовления листов с последующим ТО или без нее

Из анализа рисунка 6.8 видно, что при ЛР без ТО при индукции 1,2 Тл и частоте 2000 Гц удельные потери составляют 280 Вт/кг, увеличение потерь, по сравнению с 50 Гц, происходит в 116,6 раз. При этом термообработка согласно ТУ позволяет снизить данные потери до 210 Вт/кг (на 25%). При ЭО удельные потери при частоте 2000 Гц и индукции 1,2 Тл составляют 210 Вт/кг, важно отметить, что у образца, полученного с помощью ЭО с ТО и без него, потери одинаковые.

То есть в образцах, полученных с помощью ЛР без ТО, удельные потери на 25 % больше по сравнению с образцами, полученными с помощью ЭО без ТО, с ТО, а также в образцах, полученных с помощью ЛР и ТО. При этом ТО позволяет обеспечить удельные потери как в образцах, полученных с помощью ЭО, так и в образцах, полученных с помощью ЛР на уровне ТУ, разница составляет не более 5 %. Кроме того, при увеличении частоты перемагничивания до 2000 Гц разница между удельными потерями в образцах, полученных с помощью ЭО без ТО и с ТО,

отсутствует. То есть в области высоких частот для исследуемого случая 2000 Гц и более образцы после ЭО можно не подвергать ТО. В подтверждении данного вывода приведена кривая намагничивания, полученная для образца ЭО при 2000 Гц, рисунок 6.9. Из данной кривой видно, что образец с ТО и без ТО имеют одинаковую кривую намагничивания.



Рисунок 6.9 – Кривые намагничивания электротехнической стали 2421 при ЭО и частоте 2000 Гц с последующим ТО или без нее

Таким образом, проведенные результаты исследований показали, что использование ТО позволяет обеспечить характеристики магнитомягких материалов (кривые намагничивания, удельные потери) после ЛР и ЭО на уровне, который соответствует ТУ на исследуемую электротехническую сталь.

На основе полученных результатов выполнено сравнение технологии ЛР и ЭО. Использование ТО позволяет обеспечить для магнитопроводов, полученных с помощью ЛР и ЭО, одинаковые значения потерь. Поэтому представляется целесообразным выполнить сравнение этих технологий по другим критериям. Результаты сравнения приведены в таблице 6.1.

Сравнение выполнялось для вентильного электродвигателя с постоянными магнитами с частотой 400 Гц и мощностью 80 Вт (разработан при непосредственном участии автора), используемый материал магнитопровода – сталь 2421 с толщиной листа 0,18 мм.

Значительным недостатком ЭО является то, что при изготовлении магнитопровода образец охлаждается водой. Это, в свою очередь, приводит к коррозии материала. Важно отметить, что погружение после ЭО в керосин или масло не предотвращает коррозионный процесс. Также ЭО имеет более высокую трудоемкость, связанную с подготовкой образца в единый монолитный блок. При

ЛР данная операция не требуется, так как ЛР обеспечивает перемещение по всей ленте и вырезку листов.

	ЛР	ЭО	Механическая штамповка
Удельные потери без	30	22	22
ТО, Вт/кг			
Удельные потери с ТО,	18	18	18,5
$BT/k\Gamma$			
Стоимость	3000 (по данным	3000 (по данным	Оценка может быть
магнитопровода, руб.	группы компании	группы компании	произведена только при
	«Фодес»)	«Фодес»)	наличии программы
			выпуска
Подверженность	Нет	Дa	Нет
коррозии			
Необходимость	В зависимости от	Нет	Дa
дополнительной	режима резки		
механической			
обработки			
Трудоемкость, %	30	60	30

Таблица 6.1 – Сравнение различных технологий изготовления магнитопроводов

Трудоемкость рассчитывалась согласно методикам АО «УАПО».

Недостатком ЛР является размерный припуск на ЛР и наличие нагаров, которые требуют дополнительной механической обработки, например, на гратосъемных станках. Кроме того, при неверных режимах резки магнитомягкий материал может подвергаться дополнительным нагарам, что ухудшает его свойства. Стоимость изготовления магнитопроводов при обеих технологиях одинаковая.

В целом ЛР с ТО при условии соблюдения режимов резки является более перспективной технологией изготовления магнитопроводов для АСГЭ.

6.1.4 Разработка и экспериментальные исследования магнитопроводов статора ЭМПЭ с ВПМ из аморфного железа

Одним из наиболее эффективных способов минимизации потерь в магнитопроводах АСГЭ, как видно из разработанной методики

многокритериального выбора материалов магнитопровода, а также из представленных экспериментальных исследований, является использование аморфных магнитомягких материалов (AMM).

АММ нашли широкое применение и доказали свою эффективность в трансформаторных устройствах и дросселях СГЭ ЛА. В частности, при непосредственном участии автора были разработаны трансформаторы с магнитопроводами из АММ для ТВУ 9-800. Но помимо трансформаторов и дросселей АММ могут найти широкое применение и обеспечить высокую эффективность ЭМПЭ с ВПМ. При этом данная задача в полной мере не решена.

Основной проблемой, препятствующей широкому использованию АММ в ЭМПЭ с ВПМ, является отсутствие экономически и технологически эффективной технологии изготовления магнитопровода статора из него. Традиционные технологии изготовления статоров, такие как штамповка, лазерная или электроэрозионная резка при создании магнитопроводов из АММ малоэффективны.

Это связано с рядом технических особенностей, которые определяют весь процесс технологии создания ЭМПЭ с АММ. В частности:

– толщина ленты аморфного железа не превышает 25–30 мкм и слои аморфного железа в магнитопроводе не изолируются друг от друга. При этом коэффициент заполнения железом магнитопровода статора из AMM не превышает 0,8. Это вызвано тем, что при производстве аморфного железа на ленте формируются различные технологические раковины и вкрапления;

– аморфное железо, производимое промышленностью, имеет невысокую индукцию насыщения, которая обычно варьируется от 1,3 до 1,55 Тл. Это на 60 % ниже, чем у различных кобальтовых сплавов. При легировании аморфного железа Со магнитная индукция увеличивается до 1,8 Тл. Но при этом также увеличиваются и удельные потери из-за увеличения электрической проводимости. Поэтому в ЭМПЭ с АММ при проектировании необходимо жестко ограничивать индукцию в воздушном зазоре;

 – высокая твердость ленты AMM, которая может превышать 1000 гН/м² при прочности 4 гН/м², что не позволяет эффективное использование штамповки при создании магнитопроводов из AMM;

237

– магнитопроводы из аморфного железа обладают высокой магнитострикцией, коэффициент магнитострикции аморфной ленты составляет 26×10⁻⁶. Из-за высокой магнитострикции магнитопроводы из аморфного железа при эксплуатации создают больше шума, по сравнению с магнитопроводами из электротехнической стали;

 механические и температурные воздействия могут значительно изменить магнитные свойства AMM.

Из-за данных особенностей при лазерной резке происходит локальный перегрев ленты AMM, замыкание между листами AMM в магнитопроводе статора и как следствие увеличение потерь на вихревые токи.

Dr. Wenming Tong и др. [302] реализовал несколько ЭМПЭ с магнитопроводом из АММ с помощью электроэрозионной обработки. Но при этом также был обнаружен ряд сложностей, связанных со временем изготовления одного магнитопровода, его стоимостью И было установлено, что требованиям электроэрозионная резка не удовлетворяет промышленного производства ЭМПЭ с АММ.

В работах [303. 304] приведена технология изготовления витых магнитопроводов из АММ для ЭМПЭ с аксиальным магнитным потоком. В работе [305] исследуются ЭМПЭ с аксиальным магнитным потоком и выпуклым витым магнитопроводом из АММ. В [306] рассматриваются ЭМПЭ с радиальным магнитным потоком и витым магнитопроводом из АММ. В [307] представлена технология формирования зубцов статора ЭМПЭ из отдельных листов АММ прямоугольной формы. В работе [308] рассматриваются различные технологии использования АММ в радиальных ЭМПЭ мощностью до 15 кВт. В [310] приведены исследования беспазовых ЭМПЭ с магнитопроводом из АММ мощностью до 100 Вт с частотой вращения ротора до 1 000 000 об/мин. В [311] представлен асинхронный двигатель с магнитопроводом из АММ. Важно отметить, что использование АММ в роторе асинхронного двигателя позволяет создавать высокоэффективные асинхронные двигатели с зубцовой обмоткой. На данном этапе развития электромашиностроения подобные ЭМПЭ являются очень перспективными для ряда отраслей, но практически не создаются, из-за высоких потерь на вихревые токи в магнитопроводе ротора, обусловленных пространственными гармониками МДС обмотки статора.

Во всех указанных выше работах в основном исследуется какая-либо одна технология изготовления магнитопровода статора из АММ, при этом анализа всех технологических особенностей применения АММ не приведено, также как не представлено и сравнение различных технологий изготовления магнитопроводов из АММ.

Одним из перспективных направлений использования AMM является создание сборных магнитопроводов статора из отдельных элементов из AMM. Важно отметить, что данные технологии являются общими как для беспазовых, так и для пазовых ЭМПЭ.

Сборные конструкции магнитопроводов ЭМПЭ из АММ характеризуются тем, что элементы магнитопровода из АММ выполняются отдельно из простых геометрических форм, после чего происходит их совмещение. Наибольшее распространение данная технология получила для аксиальных ЭМ.

На рисунке 6.10 приведены возможные способы реализации магнитопроводов статора из АММ для аксиальных ЭМПЭ, предложенные в работах [302, 303].



Рисунок 6.10 – Способы реализации магнитопроводов статора аксиальных ЭМПЭ из АММ [314, 315]

Для радиальных ЭМПЭ также применяются технологии сборных магнитопроводов. Например, на рисунке 6.11 приведены технические решения, предложенные в работах [314, 3158] для создания радиальных ЭМ с магнитопроводом из аморфного железа.



Рисунок 6.11 – Способы реализации магнитопроводов статора радиальных ЭМПЭ из АММ [313, 314]

Для сборных магнитопроводов из аморфного железа характерно выполнение элементов магнитопровода статора витыми из ленты аморфного железа с последующей склейкой элементов в единый магнитопровод. Подобная технология позволяет достичь коэффициент заполнения магнитопровода статора AMM на уровне 0,8. Данная технология имеет ряд недостатков, обусловленных наличием дополнительных воздушных зазоров и сложностью обеспечения надежных креплений элементов магнитопровода статора. При исследованиях данной технологии был выявлен один из ее значительных недостатков: при выполнении радиального ЭМПЭ по данной технологии с аксиальной длиной магнитопровода статора более 10 мм контуры вихревых токов в магнитопроводе статора становятся достаточно значительными, что приводит к обратному эффекту: потери в магнитопроводе статора не уменьшаются, а увеличиваются.

При участии автора был разработан и запатентован новый метод изготовления магнитопроводов статора из АММ (патент РФ № 2570834 «Магнитопровод статора электромеханических преобразователей энергии с интенсивным охлаждением (варианты) и способ его изготовления»), по которому было предложено выполнение магнитопроводов из АММ сборными и в аксиальном и в радиальном направлении с максимальной аксиальной длиной сектора 5 мм. Данный подход аналогичен шихтовке листов магнитопровода статора в традиционных ЭМПЭ. В ЭМПЭ с АММ подобный подход приводит к уменьшению коэффициента заполнения магнитопровода статора АММ до 70–75%, но при этом потери на вихревые токи и гистерезис в этом случае уменьшаются в 3 раза. Важно отметить, что данный подход эффективен как при создании беспазовых ЭМПЭ с магнитопроводом из АММ, так и ЭМПЭ с зубцами статора.

На рисунке 6.12 приведены магнитопроводы, полученные из ленты аморфного железа (ПАО «Ашинский металлургический комбинат») по технологии, разработанной при участии автора. По данной технологии формируются несколько магнитопроводов треугольной формы. Количество треугольных магнитопроводов соответствует количеству пазов статора ЭМПЭ. Важно отметить, что с целью сокращения экономических издержек при производстве желательно, чтобы число пазов было минимальным. Одно из важных преимуществ магнитопроводов по предложенной технологии – это то, что при изготовлении сразу формируются технологические каналы для охлаждения ЭМПЭ, по которым может проходить воздух. Эти каналы располагаются в теле статора, что значительно улучшает теплоотвод от активной зоны ЭМПЭ. Воздух движется по трем путям: в теле статора, по воздушному зазору и по поверхности статора. При отказе от этого кольца, как в магнитопроводе на рисунке 6.12, *справа*, ЭМПЭ будет иметь всего 2 канала охлаждения.



Рисунок 6.12 – Магнитопроводы из аморфного железа, созданные по предложенной нами технологии (без спинки статора (*справа*) и со спинкой статора (*слева*)), по технологии, предложенной при участии автора

Для снижения экономических издержек при производстве ЭМПЭ с магнитопроводом из аморфного железа необходимо выбирать минимальное число пазов. Максимально эффективно выполнять ЭМПЭ с числом пазов, равным 6. Статор был выполнен из аморфного железа марки 5БДСР с индукцией насыщения 1,35 Тл и удельными потерями при частоте 1000 Гц и индукции 1,25 Тл, не более 5 Вт/кг.

Также при участии автора с целью повышения эффективности использования АММ в ЭМПЭ была предложена технология изготовления магнитопровода статора не из ленты AMM а из проволоки. Особенности данной технологии раскрыты в патенте РФ 2659091. В этом случае потери в магнитопроводе статора будут значительно ниже, чем в ЭМПЭ, реализованных по другим технологиям. В то же время коэффициент заполнения магнитопровода статора, выполненного из проволоки из AMM, будет значительно ниже по сравнению с другими технологиями. По нашим оценкам он составит не более 0,5–0,65. Технологически проволочные магнитопроводы из аморфного железа могут быть выполнены двумя методами:

– из аморфной проволоки совместно с клеевым связующим формируется цилиндр, по технологии, аналогичной формированию цилиндров из карбоновой нити. Далее с помощью электроэррозионной обработки в нем формируются пазы для укладки обмотки. При данной технологии коэффициент заполнения магнитопровода статора из АММ может достигать 0,65;

– из аморфной проволоки формируются элементы сборного магнитопровода. После этого аналогично технологии формирования сборного магнитопровода создается магнитопровод статора ЭМПЭ. В данном случае коэффициент заполнения магнитопровода статора не превысит 0,5.

На данный момент обе эти технологии находятся в стадии разработки и их реализация требует проведения дополнительных исследований.

Другой перспективной технологией создания магнитопроводов из AMM может являться порошковая металлургия. На рисунке 6.13 приведен внешний вид порошка, полученного из ленты AMM, а также формы частиц, получаемые из AMM.



Рисунок 6.13 – Порошок из АММ и формы частиц

В результате исследований было установлено, что магнитная проницаемость порошка из АММ может доходить до 40 единиц. Но при этом, как видно из рисунка 6.13, частица порошка имеет форму чешуи, что приводит к невысокому

коэффициенту заполнения магнитопровода. В результате экспериментов по изготовлению магнитопроводов из АММ коэффициент заполнения магнитопровода статора железом не превысил 0,4. В будущем, при условии увеличения коэффициента заполнения магнитопровода статора, данная технология может найти широкое применение в промышленности и может обеспечить серийный выпуск ЭМПЭ с АММ, по примеру ЭМПЭ, магнитопроводы статора которых выполнены из Somalloy 500 P. На данном этапе развития порошковая технология создания магнитопроводов может считаться перспективной, но не конкурентоспособной из-за низкого коэффициента заполнения магнитопровода статора железом.

В таблице 6.2 приведены все рассмотренные технологии изготовления магнитопроводов статора из AMM.

Таблица 6.2 – Сравнение различных технологий создания магнитопроводов из АММ для радиальных ЭМПЭ

Технология создания	Коэффициент	Удельные потери	Сложность	Возможность
магнитопроводов из АММ	заполнения	в % от потерь для	реализации и	использования
для радиальных ЭМПЭ	сердечника	электротехниче-	уровень	при серийном
	статора	ской стали	экономичес-	производстве
	1	2421 с толщиной	ких издержек	1
		0,18 мм		
Лазерная резка	0,8	90	Высокий	Нет
Электроэрозионная резка	0,8	50	Высокий	Нет
Выполнение сборного	0,75	40	Низкий	Да
магнитопровода				
Выполнение	0,75	30	Средний	Да
магнитопровода по				
технологии Radam				
Выполнение сборного	0,75	35	Низкий	Дa
магнитопровода по				
технологии УГАТУ				
Выполнение	0,4	35	Низкий	Да
магнитопровода из				
порошка АММ				
Выполнение	0,5	25	Средний	Да
магнитопровода из				
проволоки АММ				

Из анализа таблицы 6.2 видно, что наиболее применимой на данный момент является технология создания сборных магнитопроводов из АММ. Хотя

перспективными направлениями являются технологии создания магнитопроводов из AMM с помощью порошка или проволоки.

С учетом особенностей предложенной технологии формирования магнитопроводов из АММ для ЭМПЭ, а также с учетом нелинейности зависимости потерь в магнитопроводе статора из АММ от частоты и температуры, необходимо разработать алгоритм проектирования подобных ЭМПЭ.

Предлагается, с учетом технологических особенностей использования AMM, алгоритм, состоящий из 5 основных итерационных шагов:

– шаг 1. Из технологических возможностей изготовления магнитопровода из АММ определяется число пазов статора. То есть на самых начальных этапах проектирования число пазов статора является фиксированной величиной. Эффективным является число пазов статора, равное 6, так как его изготовление требует минимальных затрат. Для выбранного числа пазов выбираются материалы ротора, выполняются предварительные электромагнитные расчеты для всех возможных вариантов числа полюсов ротора. При этом необходимо учитывать низкую индукцию насыщения магнитопроводов из АММ. При проектировании ЭМПЭ с ВПМ, работающих совместно со статическим преобразователем ИЛИ выпрямителем), является вариативной (инвертором частота может переменной.

Необходимо отметить, что в ЭМПЭ с ВПМ с магнитопроводом статора из кобальтовых или кремниевых сплавов пытаются варьировать между частотой перемагничивания и потерями. В ЭМПЭ с АММ данная проблема отсутствует ввиду более низких потерь, частота выбирается из условий достижения минимальной удельной массы в ЭМПЭ. На этом этапе выполняются расчеты обмоточных данных и механические расчеты ротора. Сравнивается несколько рассмотренных конструкций и определяется оптимальное число пар полюсов ротора. Электромагнитные расчеты проводятся известными аналитическими методиками, а также с помощью специальных программных пакетов, реализующих метод конечных элементов (МКЭ). При проведении электромагнитных расчетов методами МКЭ необходимо учитывать коэффициент заполнения магнитопровода статора железом.

То есть результаты расчетов МКЭ по напряжению, магнитному потоку необходимо умножать на коэффициент 0,7–0,8 в зависимости от типа

магнитопровода и технологии его реализации. По окончании данного этапа фиксируется число полюсов ЭМПЭ. Число полюсов выбирается исходя из двух критериев; удельная масса ЭМПЭ и КПД. На данном этапе также необходимо учесть температурные зависимости потерь в магнитопроводе статора, полученные в разделе 6.2.1 по представленным в данном разделе выражениям. Нелиненйость потерь на гистерезис и вихревые токи учитывается полученным выше уравнениям для широкого диапазона частот:

$$p_{5E\mathcal{A}CP(B)} = (2 \cdot 10^{-5} f^2 - 0,019 f + 4,372) \cdot B^2 + (-5 \cdot 10^{-6} f^2 + 0,027 f - 4,479) \cdot B + (9 \cdot 10^{-7} f^2 - 0,003 f + 0,943).$$

– шаг 2. Выбор подшипниковых опор. На данном этапе рассматриваются различные варианты подшипниковых опор, которые могут применяться в ЭМПЭ;

—шаг 3. Анализ роторной динамики ЭМПЭ совместно с валом силовой установки СГЭ ЛА или привода постоянных оборотов, на которой он установлен. В случае неудовлетворительных результатов необходимо повторить шаг 2 и выбрать другой тип подшипников. Если это не помогает, то необходимо вернуться на шаг 1 и выбрать новые геометрические размеры ротора;

– шаг 4. Производится оптимизация пазовой зоны ЭМПЭ по критерию минимальных потерь и минимальной удельной массы. Оптимизационные задачи решаются с помощью генетических алгоритмов. Оптимизация происходит при фиксированном числе пазов и полюсов, изменяемыми переменными являются только геометрические размеры паза и величина воздушного зазора. Критерием оптимальности является максимальный КПД ЭМПЭ с ВПМ и магнитопроводом из AMM;

– шаг 5. Следующим этапом являются тепловые расчеты ЭМПЭ и исследования электрофизических процессов в нем при работе совместно с другими агрегатами СГЭ ЛА.

Предлагаемый алгоритм отличается от сложившихся методологий проектирования ЭМПЭ с ВПМ. Основным отличием является выбор и фиксация числа пазов, а также системы охлаждения и отсутствие ограничений на число полюсов и частоту перемагничивания магнитопровода статора. Эти отличия обусловлены технологическими особенностями использования AMM и их низкой индукцией насыщения. На основе предлагаемого алгоритма проектирования ЭМПЭ с ВПМ и АММ, были разработаны три ЭМПЭ с ВПМ и магнитопроводом из АММ. Характеристики данных ЭМПЭ приведены в таблице 6.3.

Таблица 6.3 – Параметры ЭМПЭ сАММ, созданных ФГБОУ ВО «УГАТУ» при участии автора

Номер образца	A	В	С
Мощность, кВт	120	5	0,3
Тип обмотки	распределенная	зубцовая	распределенная
Тип ЭМ	пазовая	пазовая	беспазовая
Число полюсов ротора	2	2	10
Число пазов статора	6	6	_
Частота вращения /частота, об/мин	50000	50000	50000
Напряжение холостого хода, фазное,	125	115	12
действующее, В			
Число витков в фазе	4	58	208
Внешний диаметр статора, мм	160	68	56
Диаметр ротора по магнитам, мм	60	28	28
Диаметр ротора по бандажу, мм	68	31	31
Активная длина статора, мм	150	48	52
Индукция насыщения, Тл	1,35	1,35	1,35
Толщина бандажной оболочки, мм	4	3	3
Материал бандажной оболочки	Инконель 718	Карбон	Карбон
Длина статора с учетом лобовых	220	60	60
частей, мм			
Хладагент	воздух	воздух	воздух

На рисунке 6.14 приведены результаты исследования МКЭ для всех трех рассматриваемых ЭМПЭ с ВПМ с магнитопроводом из АММ. Электромагнитные расчеты выполнялись в программном комплексе Ansys Maxwell. Механическая прочность роторов рассчитывалась в Solid Works. Механическое напряжение в бандажной оболочке ротора составило 580 Мпа. При данных напряжениях в бандаже ротора обеспечивается коэффициент механического запаса 2,5 (бандаж выполнен из Инконель 718).

Подобный коэффициент запаса обеспечивает высокую надежность изделия. Очевидно, что при этом из-за увеличенного зазора снижается магнитная индукция в зазоре ЭМПЭ на 15–18 %, но данное снижение компенсируется увеличенной частотой вращения ротора для короткоресурсных объектов. На рисунке 6.15 представлен анализ динамики ротора для всех трех созданных прототипов. Анализ роторной динамики выполнялся для ротора ЭМПЭ с ВПМ совместно с турбиной, на которой он установлен, и производился в программном комплексе Ansys.



Рисунок 6.14 – Результаты МКЭ для трех рассматриваемых ЭМПЭ с ВПМ и АММ: *a* – прототип А; *b* – прототип В; *c* – прототип С

Важно отметить, что ротор для прототипов В и С отличается только числом пар полюсов. Геометрические размеры обоих роторов фиксированные, и поэтому на рисунке 6.15 представлен только анализ роторной динамики для прототипов А и В. Также для упрощения создания на данном этапе во всех наших прототипах используются механические подшипники. Тепловые расчеты выполнялись в Ansys Ice Pack.



Рисунок 6.15 – Колебания ротора исследуемых ЭМПЭ с ВПМ на первой критической частоте с учетом параметров турбины: *а* – прототип А; *b*– прототип В

Из рисунка 6.15 видно, что для прототипа А критическая частота составляет 69 000 об/мин, с учетом параметров турбины, а для прототипа В – 70 600 об/мин.

Далее описаны экспериментальные прототипы и результаты экспериментальных исследований для каждой из описанной топологии.

Как было сказано выше, предлагаемый подход к проектированию был апробирован на трех различных экспериментальных образцах ЭМПЭ с ВПМ, детальное описание которых приведено далее.

Α. ЭМПЭ с ВПМ мощностью 120 кВт с частотой вращения ротора 50 000 об/мин. Данный ЭМПЭ предназначен для использования в вспомогательной СГЭ ЛА (для прямой интеграции в ВСУ) перспективных летательных аппаратов и разработана в интересах ФГУП «ГосНИИАС» в рамках Государственной программы «Развитие авиационной промышленности на 2013–2025 годы». Также на основе теоретических исследований, приведенных в диссертации, разработан статический преобразователь для данного СГЭ (рисунок 6.16). Ротор ЭМПЭ 6 ИЗ магнитов *SmCo* выполнялся цилиндрических марки $(B_{x} = 1,07 T; H_{a} = 756 kA/m)$ диаметром 60 мм и осевой длиной 25 MM. Выполнение ротора с составными магнитами было сделано для снижения потерь на вихревые токи в постоянных магнитах, обусловленных пространственными и временными гармониками. Особенности расчета данных потерь в ЭМПЭ с ВПМ рассмотрены в следующем параграфе. Механические расчеты ротора позволили определить толщину бандажной оболочки из Инконеля 718, которая составила 4 мм. Обмотка ЭМПЭ была выполнена из многожильного провода с диаметром жилы 1,6 мм. Диаметр жилы был выбран исходя из глубины проникновения магнитного поля в проводник статора для минимизации потерь на вихревые токи между проводниками статора. Выбран обмоточный провод марки ПЭТ-имид с температурным индексом 220°С. Число пазов на полюс и фазу в случае распределенной обмотки равнялось 1. Плотность тока составляла 10 А/мм².

На рисунке 6.16 приведен магнитопровод статора из АММ, созданный по разработанной и запатентованной технологии без обмотки и с уложенной обмоткой после пропитки. Из рисунка 6.16 видно, что магнитопровод статора набран из множества секторов в аксиальном направлении. Это сделано для уменьшения потерь на вихревые токи и гистерезис в нем. Аксиальная длина сектора составляла 5 мм. Это усложнило технологию сборки магнитопровода, так как для экспериментального образца она выполнялось вручную. В дальнейшем данная технология может быть автоматизирована.



Рисунок 6.16 – Магнитопровод статора из аморфного железа без обмотки (*справа*) и пропитанный магнитопровод с уложенной обмоткой (*слева*)

На рисунке 6.17 приведен ротор и экспериментальный образец ЭМПЭ в сборе. Необходимо отметить, что полная масса ЭМПЭ с учетом массы корпуса и подшипниковых щитов составила 28 кг при мощности 120 кВт. То есть полученная плотность энергии для экспериментального макета составила 0,23 кг/кВт. Очевидно, что при серийном производстве данный показатель будет улучшен.



Рисунок 6.17 – Испытательный стенд (*слева*), экспериментальный образец ЭМПЭ (*справа, сверху*) и ротор ЭМПЭ (*справа, снизу*): 1 – нагрузка; 2 – испытательный стенд; 3 – ЭМПЭ; 4 – осциллограф

Результаты испытаний ЭМПЭ, установленного на испытательном стенде (рисунке 6.17), на пониженных частотах вращения приведены в приложениях к диссертации. (Приложение 7) Также были проведены испытания данного ЭМПЭ на частоте вращения 60 000 об/мин (акт об испытаниях приведен в Приложении 2).

На первом этапе было измерено фазное напряжение в режиме холостого хода и различных частотах вращения. Напряжение холостого хода отличалось на 25% от результатов расчетов по предложенной методике. Это обусловлено тем, что при

проектировании был принят коэффициент заполнения магнитопровода, равный 0,95. А практический коэффициент заполнения магнитопровода статора, как видно из результатов расчетов, составлял 0,75.

Основной задачей при проектировании данного ЭМПЭ была оценка КПД. Для этого на холостом ходу оценивалась механическая мощность, потребляемая генератором без нагрузки. В этом случае оцениваются все потери в генераторе (магнитные, механические и добавочные при холостом ходе (но еще есть добавочные при нагрузке)) за исключением электрических потерь в обмотке. Электрические потери в обмотке оценивались при нагрузке. Показания снимались с датчика момента, установленного на валу измерительного стенда. Для обеспечения точности измерений показания снимались в трех временных точках: через 10 мин эксплуатации, через 40 и через 60 мин. В результате испытаний было установлено, что потери в магнитопроводе статора при 400 Гц не превышают 10 Вт. То есть удельные потери в магнитопроводе статора при 400 Гц и индукции 1,2 Тл составляют 1,11 Вт/кг. При частоте 1000 Гц и индукции 1,25 Тл удельные потери, измеренные экспериментально, составляли 8 Вт/кг. То есть потери в железе магнитопровода статора на номинальных частотах вращения составляют 72-80 Вт. Данные величины в 3–5 раз меньше, чем у электротехнических сталей. То есть по результатам экспериментальных исследований был достигнут необходимый результат по минимизации потерь в железе статора.

Результаты оценки потерь приведены в таблице 6.4. В целом испытания данного образца показали эффективность предлагаемой методологии проектирования ЭМПЭ с магнитопроводом из АММ.

таолица 0.4 — потери в ЭмптЭ с Бтим и магнитопроводом из Ами
--

Аэродинамические потери и механические, Вт	1253
Потери в обмотке статора, Вт	608,6
Потери в магнитопроводе статора, Вт	190
Потери на вихревые токи в постоянных магнитах и бандаже ротора, Вт	75
Суммарные потери, Вт	2026
Коэффициент полезного действия, %	97,8

Результаты экспериментальных исследований и сравнение с данными компьютерного моделирования для данного ЭМПЭ с ВПМ приведены на рисунке 6.18.



Рисунок 6.18 – Напряжение холостого хода ЭМПЭ с ВПМ и магнитопроводом из АММ (*слева*) и внешняя характеристика ЭМПЭ с ВПМ и магнитопроводом из АММ (*справа*)

В. ЭМПЭ мощностью 5 кВт с частотой вращения ротора 60 000 об/мин. Данная электрическая машина предназначена для использования в беспилотных летательных аппаратах. Подробно ее характеристики изложены в работе [316]. Экспериментальный образец приведен на рисунке 6.19.





Потери в магнитопроводе для данного образца составили с учетом массы магнитопровода 11,25 Вт/кг. Измерение потерь осуществлялось таким же образом, как и для предыдущего макета.

Данный макет был выполнен сборным только в радиальном направлении. В аксиальном его длина составляла 48 мм. Именно этим были вызваны увеличенные потери в магнитопроводе. Но при этом исходя из анализа данных компьютерного моделирования и данных экспериментальных испытаний было установлено, что коэффициент заполнения магнитопровода статора железом составляет 0,8–0,85. Это является хорошим результатом для ЭМПЭ с АММ.

В целом описанный выше подход к проектированию ЭМПЭ с магнитопроводом из АММ был подтвержден и на данном прототипе.

С. ЭМПЭ мощностью 0,3 кВт с частотой вращения ротора 12 000 об/мин. Данная электрическая машина предназначена для использования в системах электроснабжения робототехнических комплексов. Исследования данной электрической машины приведены в работе [316]. На рисунке 6.20 приведен прототип ЭМПЭ и экспериментальная установка для его исследований.



Рисунок 6.20 – Экспериментальная установка и беспазовый ЭМПЭ: 1 – анализатор спектра; 2 – осциллограф; 3 – регулируемая резистивная нагрузка; 4 – блок управления приводным двигателем; 5 – приводной двигатель; 6 – соединительная муфта; 7 – исследуемый макет

В результате испытаний данного макета также была подтверждена эффективность использования аморфного железа и методологии его проектирования. При этом плотность энергии беспазового ЭМПЭ получилась много меньше, чем пазового из-за увеличенного воздушного зазора.

На основе проведенных исследований был выполнен анализ созданных ЭМПЭ с ВПМ и магнитопроводом из АММ и сравнение их характеристик с мировыми разработками в области ЭМПЭ с ВПМ и магнитопроводом из АММ. Результаты сравнения приведены в таблице 6.5.

Из таблицы 6.5 видно, что созданный и исследованный при участии автора ЭМПЭ с ВПМ с магнитопроводом из АММ для СГЭ ЛА является в настоящий момент наиболее мощной электрической машиной, созданной с использованием АММ, по данным открытых источников.
	T	14	C	D	ICTT	
Год/ учреждения	Тип двигателя	Мощност	Скорость	Размер,	KII	КПД при
		ь, кВт	(об/мин)	MM	Д	использова
					(%)	нии
						электротех
						нической
						стали (%)
2008	Индукторный	2,4	8500	139×70	95,1	89
TUS	генератор					(35A300)
2005	ЭМПЭ с ВПМ	0,4	3000	70	90,5	88,5
Hitachi						(35A300)
2010	ЭМПЭ с ВПМ	0,2	2000	100×60	85	
Hitachi0,4						
2011	ЭМПЭ с ВПМ	0,4	15000	100×250	93	
Hitachi						
2012	Асинхронный	0,402	1500	118×102	77,1	76
LTU	двигатель	0,88	3000		86,5	84,5
2013	ЭМПЭ с ВПМ	1	70000	57×40	73	
INFM						
2011	ЭМПЭ с ВПМ	5	8000		90,1	85,5
CISRI						
2013	ЭМПЭ с ВПМ	20	2500	210×65	95,9	94,3
IEECAS						
2015	ЭМПЭ с ВПМ	1,5	7000		90	
UAD						
2016	ЭМПЭ с ВПМ	15	30000	130×70	93,8	92,2
SUT						
2017 г. ФГБОУ	ЭМПЭ с ВПМ	120	50000	220×390	94	92,7
ВО УГАТУ						

Таблица 6.5 – Сравнение разработанных образцов ЭМПЭ с ВПМ и магнитопроводом из АММ с мировыми аналогами (по открытым публикациям)

6.2 Потери на вихревые токи в постоянных магнитах ЭМПЭ с ВПМ

В ЭМПЭ с ВПМ пространственные гармоники (вызванные конструктивными особенностями ЭМПЭ, зубчатостью статора, схемой обмоток), а также временные гармоники ЭМПЭ (обусловленные внешней цепью, например, инвертором или выпрямителем) будут индуцировать в электропроводящих бандаже и ВПМ потери на вихревые токи. Эти потери при неверном расчете параметров ЭМПЭ могут привести как к перегреву ВПМ, так и к их температурному размагничиванию. Для снижения данных потерь ВПМ обычно выполняют шихтованными составными в осевом направлении.

Для более точного определения данных потерь необходимо отдельно определять потери, обусловленные временными гармониками (внешней цепью), и потери, обусловленные пространственными гармониками (конструктивными особенностями ЭМПЭ). Обычно считается, что потери, обусловленные временными гармониками, больше, чем потери, обусловленные пространственными гармониками [68]. Это утверждение справедливо только для ряда конструктивных схем ЭМПЭ с ВПМ. Так, например, ЭМПЭ с зубцовой обмоткой имеют значительные пространственные гармоники и потери в них, обусловленные этими гармониками, больше, чем потери, обусловленные временными гармониками.

А) потери на вихревые токи в ВПМ и бандаже, создаваемые временными гармониками, формируются внешней цепью (выпрямителем или инвертором) которая устанавливается на выходе ЭМПЭ для передачи в сеть стандартной частоты. Для оценки этих потерь наиболее удобно использовать выражения, полученные H. Poliender для расчетной схемы ЭМПЭ (рисунок 6.21).



Рисунок 6.21 – К расчету потерь от временных гармоник

$$P_{\text{BIIM}} = \frac{rlh_m b_m^2}{12\rho_m} \left\{ \left\{ \left(pa_m + \sin(pa_m) \right) \left(\frac{d}{dt} \left(\hat{B}\cos(p\beta) \right) \right) \right\}^2 + \left\{ \left(pa_m - \sin(pa_m) \right) \left(\frac{d}{dt} \left(\hat{B}\cos(p\beta) \right) \right) \right\}^2 \right\},$$

где p – число пар полюсов; l – длина ВПМ; h_m – высота ВПМ; ρ_m – удельное сопротивление постоянных магнитов; r – средний радиус воздушного зазора; a_m – угол полюса; b_m – длина полюсной дуги; \hat{B} – магнитная индукция, создаваемая временной гармоникой, для которой рассчитываются потери.

Для оценки величины данных потерь были выполнены расчеты для ЭМПЭ с ВПМ с частотой вращения ротора 5000 и 32 000 об/мин при активно-индуктивной нагрузке. В результате было установлено, что для несегментированных ВПМ потери в ВПМ на вихревые токи при частоте 5000 об/мин составляют порядка 8 Вт, а при частоте 32 000 об/мин – более 280 Вт.

Б) потери на вихревые токи в ВПМ и бандаже, создаваемые пространственными гармониками, определяются типом паза, размером его шлица, типом обмотки, т. е. зависят от множества различных факторов. Аналитически определение данных потерь является затруднительным и не дает необходимой точности. Теоретические выражения для оценки данных потерь приведены в работах А. Г. Приступа и В. В. Корнеева В то же время сложная конфигурация пазовой и полюсной зон ЭМПЭ с ВПМ не позволяет в полной мере определять данные потери с помощью аналитических выражений с достаточной точностью. Более эффективно для анализа потерь в ВПМ и бандажной оболочке ротора использовать метод конечных элементов.

Для оценки потерь на вихревые токи в постоянных магнитах, вызванных зубцовыми гармониками, было проведено компьютерное моделирование данных потерь в ЭМПЭ с ВПМ в двухмерной постановке для различных конфигураций обмоток ЭМПЭ с ВПМ. Результаты моделирования приведены на рисунках 6.22–6.24.



Рисунок 6.22 – Распределение магнитного поля (*слева*) и потерь на вихревые токи в постоянных магнитах (*справа*) в ЭМПЭ с зубцовой обмоткой



Рисунок 6.23 – Распределение магнитного поля (*слева*) и потерь на вихревые токи в постоянных магнитах (*справа*) в беспазовом ЭМПЭ



Рисунок 6.24 – Распределение магнитного поля (*справа*) и потерь на вихревые токи в постоянных магнитах (*слева*) в ЭМПЭ с распределенной обмоткой

Из анализа рисунков 6.22–6.24 видно, что минимальные потери на вихревые токи в ВПМ, обусловленные пространственной гармоникой, имеет беспазовый ЭМПЭ с распределенной обмоткой, а максимальные – ЭМПЭ с зубцовой обмоткой. Потери в ЭМПЭ с распределенной обмоткой отличаются от потерь в ЭМПЭ с зубцовой обмоткой более чем в 6 раз. Поэтому в ЭМПЭ с зубцовой обмоткой потери на вихревые токи, обусловленные пространственными гармониками, превышают потери на вихревые токи в ВПМ и бандаже ротора, обусловленные временными гармониками.

Также необходимо оценить влияние типа магнитной системы (MC) ротора на потери от вихревых токов в ВПМ ЭМПЭ.

Эта задача также решалась методами компьютерного моделирования. Результаты решения данной задачи приведены на рисунке 6.25.



Рисунок 6.25 –Зависимость потерь на вихревые токи в ВПМ от частоты и типа MC: *А* – для MC с цилиндрическими ВПМ; *В*– для MC с полукруглыми ВПМ

Из анализа рисунка 6.25 видно, что тип MC ротора несущественно влияет на потери в ВПМ. Это объясняется тем, что потери в ВПМ формируются магнитным полем статора, а при неизменной пазовой зоне магнитное поле статора также остается неизменным. При проведенных исследованиях имел место именно такой случай: в ЭМПЭ изменялась только магнитная система ротора.

Также из полученных зависимостей видно, что с ростом частоты вращения потери в ВПМ имеют точку максимума, после которой они начинают убывать. Это объясняется тем, что с увеличением частоты вращения ротора уменьшается глубина проникновения магнитного поля в тело постоянного магнита и бандажа, и тем самым потери снижаются.

Таким образом, из анализа потерь на вихревые токи в ВПМ, создаваемые пространственными гармониками, очевидно, что конструкция индуктора не оказывает значительного влияния на их величину. При этом из-за изменения угла нагрузки потери на вихревые токи в ВПМ могут значительно изменяться. Это необходимо учитывать при проектировании ЭМПЭ с ВПМ.

Снижение потерь ЭМПЭ на вихревые токи в бандаже и ВПМ может быть достигнуто следующими способами:

• для потерь, создаваемых временными гармониками:

– увеличение числа фаз и снижение тем самым пульсаций;

 увеличение воздушного зазора и снижение глубины проникновения магнитного поля в тело ВПМ и бандажа ротора;

 выполнение бандажной оболочки ротора и ВПМ сегментированными в осевом направлении; • для потерь, создаваемых пространственными гармониками:

 использование скоса пазов и выбора коэффициента распределения обмотки;

– выполнение бандажной оболочки ротора из углеволокна, а ВПМ – сегментированными в осевом направлении;

Для ЭМПЭ с зубцовой обмоткой минимизация потерь на вихревые токи, обусловленных пространственными гармониками, может быть достигнута правильным выбором соотношения числа пазов статора и числа полюсов ротора.

Одним из наиболее эффективных методов снижения влияния вихревых токов является сегментирование постоянных магнитов в аксиальном направлении и электрическая изоляция секторов постоянных магнитов друг относительно друга. При этом контур прохождения вихревых токов в теле каждого постоянного магнита уменьшается, таким образом, минимизируется влияние вихревых токов в постоянных магнитах. При этом на этапе оптимизации важно определить такую аксиальную длину постоянных магнитов, при которой потери на вихревые токи в постоянных магнитах будут минимальны при минимальной сложности изготовления и стоимости. Кроме того, аксиальная длина сектора постоянного магнита влияет на коэффициент заполнения ротора постоянными магнитами. Для изучения влияния сегментирования постоянных магнитов на потери в них на вихревые токи, были произведены исследования в трехмерной постановке для ЭМПЭ с ВПМ с зубцовой обмоткой.

На рисунке 6.26 представлены картины распределения потерь на вихревые токи с толщинами секторов постоянных магнитов 5 и 15 мм соответственно.

Из рисунка 6.26 видно, что выполнение сектора длиной 5 мм позволяет уменьшить потери в постоянных магнитах практически в 96 раз, длиной 15 мм в 16 раз, по сравнению с нешихтованным ротором. При этом важно отметить, что уже при толщине магнита 15 мм потери были снижены до 20–30 Вт (незначительный уровень).



Рисунок 6.26 – Картина распределения потерь на вихревые токи с толщиной секторов постоянных магнитов 5 мм (*слева*) и 15 мм (*справа*)

Как было сказано выше, толщина сегментирования ВПМ также влияет на стоимость ВПМ. На рисунке 6.27 приведено изменение стоимости сегмента призматического постоянного магнита из *NdFeB*N42, кривая построена исходя из данных поставщиков ВПМ.



Рисунок 6.27 – Изменение стоимости постоянных магнитов в зависимости от аксиальной длины сектора

Как видно из рисунка 6.27, стоимость магнитов в интервале длин сектора 5– 15 мм изменяется незначительно, поэтому для минимизации потерь более выгодно использовать ВПМ с длиной сектора 5 мм.

Совместно с шихтованием постоянных магнитов для минимизации потерь на вихревые токи эффективно использовать установку ферромагнитного пазового клина. Оптимизируемым параметром при выборе геометрии ферромагнитного клина является его толщина, т.к. именно этот параметр влияет на коэффициент

заполнения обмоткой паза и определяет плотность тока в обмотке. При этом чем больше толщина ферромагнитного клина, тем меньше потери в постоянных магнитах и тем больше плотность тока в обмотке статора. Для данного случая также были проведены численные расчеты, и было установлено, что за счет использования ферромагнитного клина потери на вихревые токи в постоянных магнитах могут быть снижены на 25–30%, при увеличении потерь в обмотке на 10–12 %. Ввиду того, что потери от ВПМ отводить значительно сложнее, чем от обмотки, данный способ является эффективным для ряда ЭМПЭ с ВПМ.

6.3 Потери на вихревые токи в механических подшипниках ЭМПЭ с ВПМ

При ограниченных осевых размерах ротора ЭМПЭ и незначительном удалении подшипниковых узлов от ВПМ в ЭМПЭ с ВПМ может проявляться намагничивание тел подшипника (шариков) под действием магнитного поля рассеяния постоянных магнитов ротора. В результате намагничивания шариков в неподвижном электропроводящем сепараторе подшипника, обладающем магнитной проницаемостью, наводятся вихревые токи, которые появляются в результате перемагничивания неподвижного сепаратора вращающимся магнитным полем намагниченных шариков. Это приводит к перегреву сепаратора, обусловленного потерями на его перемагничивание. Очевидно, что с увеличением частоты вращения шариков перегрев сепаратора значительно возрастает. Поэтому исследования данных процессов особенно важны для высокооборотных ЭМПЭ.

Величина магнитного поля, протекающего через подшипник, определяется удалением подшипника от постоянных магнитов. Для численной оценки этого утверждения было выполнено компьютерное моделирование трехмерного магнитного поля ЭМПЭ с ВПМ. Результаты данного моделирования представлены на рисунке 6.28.



Рисунок 6.28 – Магнитные поля рассеяния в подшипниковой опоре (*слева*) и трехмерное магнитное поле ЭМПЭ с ВПМ (*справа*)

Из рисунка 6.28 видно, что при удалении от ВПМ величина магнитного поля, замыкающегося через подшипник, составляет 0,32 Тл и является вполне достаточной величиной для намагничивания шариков и проявления потерь от вихревых токов в подшипниковом узле.

Объектом исследования при оценке потерь в подшипниковых опорах является ЭМПЭ с ВПМ, геометрические размеры ротора которого представлены на рисунке 6.29 (геометрические размеры соответствуют генератору МЭГ-100Ч, созданному при непосредственном участии автора). Вал выполнен из стали 30 ХГСА с индукцией насыщения 1,7 Тл. При этом действующее значение индукции в сердечнике ротора близко к насыщению (1,6–1,65 Тл).

При решении поставленной задачи используются следующие допущения:

 магнитная проницаемость окружающей среды и воздушного зазора равна магнитной проницаемости вакуума; магнитная проницаемость магнитопровода, вала и подшипников равны бесконечности;

 – обмотка статора представляется в виде тонкого электропроводящего слоя, распределенного по диаметру расточки магнитопровода статора;

 – плотность индуцированных токов по толщине обмотки, а также по толщине сепаратора подшипникового узла постоянна;

- взаимовлияние температурных и магнитных полей не учитывается;

 – влияние лобовых частей на намагниченность шариков подшипниковых опор не учитывается.



Рисунок 6.29 – Расчетная и экспериментальная модели объекта исследования

При разработке аналитических выражений для анализа потерь в сепараторе подшипника рассматривается расчетная схема ЭМПЭ, представленная на рисунке 6.30.



Рисунок 6.30 – Расчетная схема ЭМПЭ

В задачу анализа потерь на вихревые токи входит определение трех составляющих магнитного поля ЭМПЭ с ВПМ конечной длины.

Используя математическую модель, полученную в главе 3, с учетом того, что составляющая H_z при $l = l_1$ является первичным магнитным полем для вращающихся тел подшипникового узла, появляется возможность расчета магнитного поля в телах качения. Именно данная составляющая намагничивает

тела вращения в подшипниковых узлах и индуцирует вихревые токи в сепараторе подшипникового узла.

В этом случае подшипниковый узел представляется как электрическая машина. Допускается, что число полюсов данной электрической машины равно числу тел вращения, а сепаратор подшипникового узла в данном случае играет роль короткозамкнутой обмотки (рисунок 6.31). Зазор в этом случае стремится к нулю.



Рисунок 6.31-Расчетная схема подшипника

Необходимо отметить, что процесс намагничивания шариков имеет сложный характер, учитывая возможные взаимодействия между соседними шариками, и на практике число полюсов образуемой ЭМПЭ может не равняться числу тел вращения.

Результирующее магнитное поле подшипниковой опоры может быть представлено суммой двух магнитных полей (поля тел вращения подшипника и поля, созданного вихревыми токами в сепараторе), тогда поле на поверхности тел вращения подшипников (первичное поле) может быть описано в виде:

$$H_{1p} = H_{z0m} (\operatorname{ch} q_3 D_0 - \operatorname{th} q_3 \delta \operatorname{sh} q_3 D_0) \cos q_1 x \cos q_2 l_1.$$

Решая систему уравнений Максвелла относительно напряженности вторичного поля, имеем следующее:

$$\Delta \vec{H}_2 - \mu_0 \sigma \left(\frac{\mathrm{d}\vec{H}_2}{\mathrm{d}t} - \operatorname{rot}\left(\vec{V} \times \vec{H}_2\right) \right) = -\mu_0 \sigma \left(\frac{\mathrm{d}\vec{H}_1}{\mathrm{d}t} - \operatorname{rot}\left(\vec{V} \times \vec{H}_1\right) \right).$$

Конечное решение данной системы здесь не приводится. При этом потери в сепараторе определяются исходя из того, что:

$$j_{2y} = -\frac{\partial H_{2z}}{\partial x}$$

Соответственно, потери в сепараторе определяются в виде:

$$P = \frac{j_{2y}^2}{\sigma_s},$$

где $\sigma_{\!S}^{}- y$ дельная проводимость материала сепаратора.

Так как подшипниковый узел при намагничивании тел вращения представляется в виде электрической машины, то очевидно, что поле сепаратора будет создавать размагничивающую реакцию (реакцию якоря), способную размагнитить тела вращения, а также индуцировать в телах вращения вихревые токи.

Потери от данных вихревых токов, по аналогии потерь от вихревых токов в ЭМПЭ с ВПМ, могут быть определены в виде:

$$P_{sh} = l_s d^2 \sum_{n=1}^n \frac{d^2}{12\rho} \left(\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} \left\{ B_2 \cos\left(p\left(a-\beta\right)\right) \right\} \right)^2,$$

где ρ – удельное сопротивление материала сепаратора; d – диаметр шарика; p – число пар полюсов электрической машины, эквивалентной подшипниковому узлу.

Необходимо отметить, что разработанные математические выражения дают общее понимание о процессах проявления потерь в сепараторе подшипника и получены при множестве допущений, основное из которых - допущение о равенстве числа полюсов числу тел вращения подшипника. Поэтому разработанный математический аппарат может быть использован ДЛЯ предварительных расчетов потерь в подшипниках и выбора их места установки на валу ЭМПЭ с ВПМ.

6.4 Методология создания систем генерирования электроэнергии летательных аппаратов с магнитоэлектрическими преобразователями энергии

Обобщая результаты исследований, приведенные в диссертационной работе, появляется возможность сформировать методологию создания СГЭ ЛА с магнитоэлектрическими преобразователями энергии, которая представляет собой набор методик, обобщенных матриц и обобщенных математических моделей, разработанных в предыдущих главах. На рисунке 6.32 приведена обобщенная структурная схема методологии создания СГЭ ЛА.

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 основному энерговырабатывающему элементу с использованием предложенной обобщенной математической модели. Представлены в главе 3, диссертации. 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, раскрыт в главе 6). По результатам выполнения всех блоков, согласно предложенной методологии появляется возможность создания высокомощной СГЭ ЛА на основе ЭМПЭ с ВПМ с учетом всех технологических и технических особенностей при минимальных затратах времени и средств.



Рисунок 6.32 – Структурная схема методологии создания СГЭ ЛА



Рисунок 6.32 – Окончание

267

ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 6

1. Предложен 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.

2. Проведены исследования потерь в магнитопроводах агрегатов СГЭ ЛА на гистерезис и вихревые токи и установлено, что:

– выражения, представленные в отечественной литературе, справедливы для частоты 50–400 Гц при индукциях ниже индукции насыщения. При более высоких частотах расчеты по данным выражениям приводят к значительной погрешности, размер которой варьируется от 2 до 3 раз в зависимости от частоты. Большой частоте соответствует большая погрешность. Для магнитопроводов, эксплуатирующихся в более высоких частотах перемагничивания, разработаны функции, аппроксимирующие удельные потери, при этом для каждого типа материалов коэффициенты аппроксимации в данных функциях были получены индивидуальные (для анизотропных, изотропных, магнитомягких и т.д.).

3. Проведены исследования магнитопроводов статора, изготовленных с помощью различных технологий, и установлено:

– что при ЛР без ТО при индукции 1,2 Тл и частоте 400 Гц удельные потери составляют 33 Вт/кг. При этом термообработка 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 удельные потери в магнитопроводах, полученных с помощью ЭО с ТО и без ТО, становятся практически одинаковыми. Для исследуемого случая это наблюдается при 2000 Гц;

– ЛР с ТО при условии соблюдения режимов резки является более перспективной технологий изготовления магнитопроводов для микроЭМПЭ, а также для опытных образцов.

4. Доказано расчетным путем, что добавочные потери в обмотке статора ЭМПЭ с ВПМ могут значительно превышать установленные в известных методиках 0,5 %.

5. Проведены исследования потерь на вихревые токи в постоянных магнитах ротора от пространственных и временных гармоник и установлено, что:

– для ЭМПЭ с ВПМ с частотой вращения ротора 5000 и 32 000 об/мин при активно-индуктивной нагрузке для нешихтованных ВПМ потери в ВПМ на вихревые токи при частоте 5000 об/мин составляют порядка 8 Вт, а при частоте 32 000 об/мин – более 280 Вт;

 тип магнитной системы ротора несущественно влияет на потери в ВПМ.
Это объясняется тем, что потери в ВПМ формируются магнитным полем статора, а при неизменной пазовой зоне магнитное поле статора также остается неизменным;

 – с ростом частоты вращения потери в ВПМ имеют точку максимума, после которой они начинают убывать.

6. Обобщая результаты исследований, приведенные в диссертационной работе, сформирована методология создания генерирования систем электроэнергии магнитоэлектрическими летательных аппаратов с преобразователями энергии, которая представляет собой набор методик, обобщенных матриц и обобщенных математических моделей, разработанных в главах диссертации. Предложена методология приведена в виде структурной схемы, учитывающей все взаимосвязи процесса проектирования СГЭ ЛА, что позволяет минимизацию временных и материальных затрат.

ГЛАВА 7 ВОПРОСЫ ПРАКТИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ СИСТЕМ ГЕНЕРИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ С ВЫСОКОКОЭРЦИТИВНЫМИ ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ И ИХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

В данной главе рассматриваются вопросы, связанные с созданием ЭМПЭ с ВПМ и СГЭ ЛА на их основе и подготовке их внедрения в промышленность. В частности, описываются экспериментальные исследования и приводятся результаты испытаний:

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

– СГЭ, состоящей 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, состоящей 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 «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;

– создан 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.

– создан высокоскоростной генератор с постоянными магнитами переменной частоты вращения, унифицированный с генератором наземной газотурбинной установки (договор АП-ЭМ-09-14-ХГ между ФГБОУ ВПО «УГАТУ» и ОАО «УАПО» и договор между ОАО «УАПО» и ОАО «УАП «Гидравлика», № 89-200-13/2). 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;

– создан 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.

Ротора представленных ЭМПЭ с ВПМ были изготовлены ООО «Эрга+» по разработанным автором комплекту конструкторской документации и запатентованным техническим решениям (патент РФ 2656863), статора исследуемых образцов были изготовлены на АО «УАПО».

В главе представлены результаты общих исследований некоторых серийных и экспериментальных (разработанных при непосредственном участии автора) ЭМПЭ с ВПМ, а также испытания СГЭ ЛА на основе ЭМПЭ с ВПМ для подтверждения математических моделей и используемых компьютерных моделей. Результаты испытаний различных ЭМПЭ с ВПМ, подтверждающие правильность используемых методик и разработанных в диссертации новых технических решений, приведены в приложениях к диссертации (Приложения 5–13).

7.1 Экспериментальные исследования электромеханических преобразователей энергии с высококоэрцитивными постоянными магнитами

Задачей экспериментальных исследований, представленных в данном параграфе, является верификация разработанной теоретической базы и методологии проектирования на серийных и экспериментальных ЭМПЭ с ВПМ и СГЭ ЛА на их основе, а также экспериментальные исследования влияния РН на характеристики СГЭ ЛА.

7.1.1 Методика экспериментальных исследований

В данном параграфе приведена методика экспериментальных исследований СГЭ ЛА и их ЭМПЭ.

Все экспериментальные исследования и испытания проводились в нормальных климатических условиях по ГОСТ 15150-69 на специальном стенде.

При испытаниях обеспечивается циркуляция хладагента (воздух или масло) через входные штуцера охладительной системы.

Перед испытаниями и экспериментальными исследованиями необходимо провести измерение сопротивления изоляции обмотки относительно корпуса ЭМПЭ. Измерение сопротивления изоляции производят в практически холодном состоянии в соответствии с ГОСТ 11828- 86 мегомметром класса 500 В.

Результаты измерения считаются удовлетворительными, если значение сопротивления изоляции не менее 100 МОм

Далее снимаются осциллограммы напряжения ЭМПЭ при холостом ходе, частотах 20 % от номинальной, 40 % от номинальной, 80 % от номинальной, 100 %

от номинальной. Время работы на каждой частоте составляет 5 мин. Измеряется уровень вибраций ротора ЭМПЭ для каждой частоты. Оценивается гармонический состав выходного напряжения для каждой частоты вращения.

После перерыва не менее 10 мин ЭМПЭ разгоняется до номинальной частоты вращения и к выводным клеммам генератора подключается нагрузка, равная 25 % от номинальной. Снимаются осциллограммы выходного напряжения и тока, а также осциллограммы переходного процесса наброса нагрузки. Измеряется уровень вибраций ротора ЭМПЭ. Оценивается гармонический состав выходного напряжения.

ЭМПЭ разгоняется до номинальной частоты вращения и к выводным клеммам генератора подключается нагрузка, равная 80 % от номинальной. Снимаются осциллограммы выходного напряжения и тока, а также осциллограммы переходного процесса наброса нагрузки. Измеряется уровень вибраций ротора ЭМПЭ. Оценивается гармонический состав выходного напряжения.

Через 5 мин к выводным клеммам ЭМПЭ подключается номинальная нагрузка. Снимаются осциллограммы выходного напряжения и тока. Измеряется уровень вибраций ротора. Оценивается гармонический состав выходного напряжения.

ЭМПЭ работает при номинальной частоте вращения с номинальной нагрузкой в течение 10 мин. После чего нагрузка понижается каждые 5 мин на 20 % и строится внешняя характеристика ЭМПЭ при постоянной частоте вращения ротора.

После перерыва не менее 30 мин ЭМПЭ разгоняется до номинальной частоты вращения и к выводным клеммам ЭМПЭ подключается нагрузка, равная 50% от номинальной. Снимаются осциллограммы выходного напряжения и тока.

Через 5 мин к выводным клеммам ЭМПЭ подключается номинальная нагрузка.

Через 5 мин генератор подвергается перегрузке 150 % от номинальной мощности в течение 5 мин. Снимаются осциллограммы выходного напряжения и тока, измеряется температура хладагента на выходе из системы охлаждения

После перерыва не менее 30 мин к ЭМПЭ подключается регулятор напряжения или управляемый выпрямитель или ТВУ, в зависимости от технических требований к СГЭ. СГЭ считают выдержавшей испытания, если во всем диапазоне нагрузок выходное напряжение на выходе СГЭ оставалось в пределах ГОСТ 52776-2017 (108–118 В).

Испытания и экспериментальные исследования на воздействие повышенной частотой вращения проводят по ГОСТ 11828-86 и ГОСТ 52776-2007. Испытания проводят на нагретом генераторе при разгоне ротора от 0 до частоты на 20 % выше номинальной.

После достижения ЭМПЭ номинальной частоты вращения из режима холостого хода к клеммам СГЭ подключается нагрузка, близкая к режиму короткого замыкания, такая, чтобы выходное фазное напряжение составило 0,5...0,7U_н. Снимаются осциллограммы выходного напряжения и тока. Длительность данного режима не более 10 с.

При экспериментальных исследованиях необходимо производить оценку погрешностей. Оценка погрешностей испытательных стендов производится по методике, представленной в [317]. Для этого проводится определенное число измерений.

Тогда случайные погрешности определяются в виде [318]:

$$x_{o} = \frac{x_1 + x_2 \dots x_{10}}{n}$$

где *x₀* – среднеарифметическое измерение; *n* – число измерений.

Относительная погрешность измерений принимается в виде:

$$k = \frac{\Delta x}{x} 100\% \,.$$

7.1.2 Экспериментальные исследования высокооборотного электромеханического преобразователя энергии для СГЭ ЛА и серийного высокооборотного ЭМПЭ для короткоресурсных объектов

По договору №89-200-13/2 и по техническому заданию № 89-000/13-13 на составную часть научно-исследовательской работы «Разработка эскизного проекта системы генерирования электроэнергии на основе использования высокоскоростного генератора с постоянными магнитами переменной частоты вращения, унифицированного с генератором наземной ГТУ», на основе исследований, представленных в данной диссертации, при непосредственном участии автора был разработан высокооборотный генератор, который может найти применение в короткоресурсных ЛА. Изготовление осуществлялось на АО «УАПО», номинальные характеристики генератора представлены в таблице 7.1.

Подходы к созданию подобных ЭМПЭ изложены в работах [1, 3, 4, 9, 115, 116, 319, 320 и др].

На рисунке 7.1 представлен эскизный чертеж высокооборотного генератора на постоянных магнитах. На рисунке 7.2 представлен общий вид разработанного высокооборотного ЭМПЭ. На рисунке 7.3 представлен магнитопровод статора, разработанного ЭМПЭ с ВПМ, на рисунке 7.4 представлен эскизный чертеж ротора высокооборотного генератора.

Таблица 7.1 – Номинальные характеристики высокооборотного экспериментального ЭМПЭ с ВПМ

Номинальные характеристики	Значение
Мощность, кВА	120
Максимальная мощность, кВА	185
Номинальная частота вращения, об/мин	50000
Номинальное выходное напряжение, В	115/200



Рисунок 7.1 – Общий вид генератора и статор в сборе



Рисунок 7.2 – Эскизный чертеж ротора генератора



Рисунок 7.3 – Технологическая схема испытательного стенда



Рисунок 7.4 – Макет безредукторной ВСУ и генератора на испытательном стенде

Экспериментальные исследования проводились на УАП «Гидравлика». Раскрутка макета генератора осуществляется путем подачи сжатого воздуха на турбину макета безредукторной вспомогательной силовой установки (ВСУ) от технологического двигателя ТА6А. Технологическая схема испытательного стенда представлена на рисунке 7.3. На рисунке 7.4 представлен макет безредукторной ВСУ с генератором

Электрическая нагрузка с макета генератора передавалась на активные сопротивления блока загрузки с шагом $\Delta N=5$ кВт при общем диапазоне $N_{\rm max}=180$ кВт, рисунок 7.5.



Рисунок 7.5 – Структурная схема стенда

Совместно с экспериментальным генератором (спроектированным и разработанным при непосредственном участии автора) испытывался серийный высокооборотный ЭМПЭ с ВПМ (*Turbec*T100), номинальные характеристики которого представлены в таблице 7.2.

Таблица 7.2 – Номинальные характеристики высокооборотного экспериментального ЭМПЭ с ВПМ

Номинальные характеристики	Значение
Мощность, кВт	100
Номинальная частота вращения, об/мин	70000
Номинальное выходное напряжение, В	220/400

Отличительными особенностями двух ЭМПЭ является то, что ротор экспериментального ЭМПЭ выполнен с цилиндрическими ВПМ, а ротор серийного ЭМПЭ выполнен с полукруглыми ВПМ, кроме того, на роторе экспериментального генератора установлены ВПМ *NdFeB* 38SH. На роторе серийного ЭМПЭ ВПМ Sm_2Co_{17} . Также ввиду того, что серийный и экспериментальный ЭМПЭ рассчитаны на разные напряжения, число витков в фазе серийного ЭМПЭ в два раза больше, чем у экспериментального.

Экспериментальные исследования двух высокооборотных ЭМПЭ (серийного *TurbecT*100, экспериментального ИГУР.684222.041СБ) производились при одинаковой нагрузке 20 Ом на каждую фазу при частоте вращения ротора до 50 000 об/мин и температуре окружающей среды не ниже 10 °C.

За период с 2013 г. было произведено несколько испытаний высокооборотных ЭМПЭ с ВПМ при различных компоновках, таблица 7.3.

В результате экспериментальных исследований было установлено, что разработанные теоретические положения по аналитическому расчету магнитного поля в воздушном зазоре ЭМПЭ с ВПМ имеют погрешность не более 12–15 %. Кроме того, было показано, что благодаря применению при невысоких температурах ВПМ магнитов *NdFeB* является предпочтительным. Также было установлено, что применение полукруглых ВПМ позволяет достичь более высоких критических частот вращения ротора.

Дата	Компоновка
23.10.2013	Ротор и статор экспериментального ЭМПЭ
29.10.2013	Ротор и статор экспериментального ЭМПЭ
14.11.2013	Ротор и статор экспериментального ЭМПЭ
21.11.2013	Ротор экспериментального ЭМПЭ и статор <i>TurbecT</i> 100
11.12.2013	Ротор экспериментального ЭМПЭ и статор <i>TurbecT</i> 100
27.01.2014	Статор экспериментального ЭМПЭ и ротор <i>TurbecT</i> 100
11.02.2014	Ротор и статор <i>TurbecT</i> 100
20.03.2014	Ротор и статор <i>TurbecT</i> 100
19.06.2014	Ротор и статор <i>TurbecT</i> 100
09.09.2014	Ротор и статор <i>TurbecT</i> 100

Таблица 7.3 – Испытания ЭМПЭ с ВПМ при различных компоновках

Важно отметить, что разработанный по расчетным методикам и теоретическим положениям автором экспериментальный высокооборотный ЭМПЭ обладает более высокой удельной мощностью по сравнению с серийным зарубежным аналогом.

Кроме того, необходимо отметить, что при создании данного ЭМПЭ с ВПМ использовалась разработанная автором математическая многодисциплинарная модель, которая также подтвердила свою высокую эффективность.

Для оценки эффективности созданного высокооборотного ЭМПЭ с ВПМ производится его сравнение с серийным высокооборотным ЭМПЭ для короткоресурсных объектов, в частности с генератором ТГ-4, оснащенным блоком коммутации БВРК-78. Также в таблицу 7.4 для сравнения был внесен разработанный ЭМПЭ с ВПМ с магнитопроводом из аморфного железа, описанный в главе 6 и ЭМПЭ с ВПМ, разрабатываемые ООО «Эрга+» (ВЭЛМА).

Таблица 7.4 – Сравнение высокооборотного ЭМПЭ с серийным электрогенератором для короткоресурсных объектов

	ВМГ-120	ΤΓ-4	ЭМПЭ с	ВЭЛМА-	ВЭЛМА-
	(ФГБОУ ВО		статором из	100	200
	УГАТУ)		аморфного		
			железа		
			(ФГБОУ ВО		
			УГАТУ)		
Частота вращения,	50000	50000	50000	60000	46000-
об/мин					48300
Используемый	масло	керосин	воздух	—	масло
хладагент					
Материал бандажной	углеволокно	титан	Инконель 718	—	—
оболочки					
Удельная мощность	0,25	0,8	0,25	0,7	0,64
генератора, кг/кВт					
Удельная мощность	0,4	1	0,4	—	—
системы управления,					
кг/кВт					
Удельная мощность	0,65	1,8	0,65	—	—
генератора и системы					
управления, кг/кВт	2	2	2		
Интенсивность	0,3×10-3	1×10-3	0,5×10-3	—	—
отказов СГЭ					
(рассчитывалась по					
[215, 216] для изделия					
аналога ТГ-4Р), 1/ч					
Вероятность	0,99985	0,9995	0,99975	—	—
безотказной работы	(расчетная)	(эксп,)	(расч.)		
СГЭ для 30 мин					
Вероятность	0,9976	0,992	0,996	—	—
безотказной работы	(расчетная)	(эксп.)	(расч.)		
СГЭ для 8 ч					

Из полученных результатов видно, что вероятность безотказной работы у высокооборотных ЭМПЭ с ВПМ значительно ниже при одинаковом времени

работы по сравнению с ЭМПЭ с ВПМ, работающих на частотах 12 000-24 000 об/мин (таблица 2.7)

Разработанные образцы СГЭ с высокооборотными ЭМПЭ с ВПМ для короткоресурсных объектов обладают сравнимой расчетной надежностью по сравнению с аналогом при минимальных массогабаритных показателях.

Результаты экспериментальных исследований представлены в Приложении 18.

Таким образом, видно, что созданные высокооборотные ЭМПЭ с ВПМ и их система управления превосходит аналогичные разработки по удельной мощности при одинаковых частотах вращения и интенсивности отказов. Что подтверждает эффективность созданных ЭМПЭ и предложенных теоретических положений.

7.1.3 Экспериментальные исследования динамики ротора высокооборотного СГ ЛА для короткоресурсных объектов

Испытания высокооборотного стартер-генератора для короткоресурсных объектов при частоте вращения ротора 50 000 об/мин в электродвигательном режиме для исследований динамики ротора выполнялись на стенде ООО «ЭРГА+», г. Калуга. Испытуемым объектом являлся высокооборотный СГ для короткоресурсных объектов с магнитопроводом из аморфного железа, описанный в параграфе 6.1.4, рисунок 6.17.

Стенд для испытаний высокооборотного СГ представляет собой частотный преобразователь, соединенный с СГ. СГ был установлен на станине. При раскрутке СГ в режиме электродвигателя (стартера) используется векторное управление. Для исследований динамики ротора СГ были установлены датчики вибраций и температуры. Управление частотным преобразователем в процессе испытаний осуществлялось с пульта управления.

На рисунке 7.6 приведен СГ, установленный на фундаментной плите и подключенный к преобразователю частоты.

В процессе испытаний регистрировались данные о вибрациях, температуре, токе холостого хода и частоте вращения ротора ЭМПЭ.

Испытания осуществлялись следующим образом: СГ от преобразователя частоты разгонялся до необходимой скорости вращения, согласно программе и методике испытаний. После достижения установившейся частоты вращения оценивался ток холостого хода, уровень вибраций и температура СГ.



Рисунок 7.6 – Высокооборотный СГ, установленный на стенде

На СГ на момент проведения испытаний были установлены подшипники S7005 CE/HCP4A (SKF) с консистентной смазкой. При этом помимо испытаний на номинальных частотах вращения были произведены испытания на повышенных частотах 60 000 об/мин для оценки поведения ротора при аварийных режимах работы.

Необходимо отметить, что предельная частота вращения ротора на используемых подшипниках без жидкой смазки составляет 56 000 об/мин.

На рисунке 7.7 приведен разобранный СГ для дефектовки после испытаний при частоте вращения 50 000 об/мин.



Рисунок 7.7 – СГ после испытаний на частоте 50000 об/мин

На рисунке 7.8 и в Приложении 17 приведены численные характеристики динамики ротора СГ, полученные по результатам испытаний.



Рисунок 7.8– Виброускорения ротора СГ при частоте 10000 об/мин (а); 30000 об/мин (б);50000 об/мин (в); 60000 (г)

Из анализа приведенных виброускорений видно, что испытуемый СГ имеет первую критическую частоту на частоте вращения ротора 10 000–12 000 об/мин. В данном случае первое и второе виброускорение ротора имеют практически одинаковые значения (5 м/c²). При прохождении данной критической частоты происходит спад второго виброускорения до нулевых значений и уже на частоте 20 000 об/мин остается только собственное виброускорение ротора до 30 000 об/мин собственное виброускорение ротора несколько уменьшается до 9 м/c². На частоте вращения ротора 45 000 об/мин имеет место вторая критическая частота вращения, при которой виброускорения ротора увеличиваются до 25 м/c². При прохождении данной частоты виброускорения ротора значения не выходят за данный предел. На частоте 58 000 об/мин, перед разрушением подшипниковой опоры происходит резкое возрастание виброускорений ротора в 8 раз (до 80 м/c²), что

282

вероятнее всего связано с отсутствием жидкой смазки подшипников. Таким образом, при анализе виброускорений ротора видно, что во всем диапазоне имеется две критические частоты вращения ротора, которые не являются рабочими для испытуемого СГ. Значительное увеличение виброускорений на повышенной частоте (60 000 об/мин) относительно номинальной частоты вращения является следствием разрушения подшипниковой опоры. Протокол испытаний приведен в Приложении 17.

7.1.4 Экспериментальные исследования электротехнического комплекса «магнитоэлектрический генератор – нелинейная нагрузка»

С целью подтверждения данных компьютерного моделирования, представленных в главе 4, была разработана экспериментальная установка (рисунок 7.9) для оценки полученных результатов эксплуатации ЭМПЭ с ВПМ совместно с РН и нелинейной нагрузкой. Выходы обмотки статора ЭМПЭ с ВПМ через трехфазный выпрямитель подключены к нагрузке последовательно включенными трансформаторами тока типа LTS-6NP.



Рисунок 7.9 – Принципиальная схема экспериментального стенда для исследований

В результате экспериментальных исследований были получены осциллограммы напряжения и тока и их спектральные характеристики, которые представлены на рисунках 7.10–7.12. Данные эксперимента обрабатывались в программном комплексе Matlab.



Рисунок 7.10 – Кривые напряжения и тока экспериментального макета



Рисунок 7.12 – Спектр гармоник фазного напряжения ЭМПЭ с ВПМ

Результаты экспериментальных исследований соответствуют данным имитационного моделирования, что позволяет судить об адекватности разработанной схемы имитационной модели (см. глава 4) и полученным на ней теоретическим результатам: частота основной гармоники – 396 Гц; коэффициент гармоник – 29,6%.

7.2 Испытания СГЭ ЛА на основе ЭМПЭ с ВПМ

Для подтверждения методики многодисциплинарного проектирования СГЭ ЛА на основе ЭМПЭ с ВПМ была разработана СГЭ ЛА по расчетам, приведенным в главе 2, и проведены экспериментальные исследования. Экспериментальные исследования СГЭ производились на стенде мощностью 20 кВт с максимальной частотой вращения ротора 12 000 об/мин. Охлаждение производилось продувом воздуха. Геометрические размеры агрегатов СГЭ полностью соответствовали данным, приведенным в главе 2. На рисунке 7.13 приведена СГЭ, установленная на стенде.



Рисунок 7.13 – СГЭ на испытательном стенде: *1*– нагрузка, 2 – привод стенда; *3* – ТВУ; *4* – ЭМПЭ с ВПМ

Испытания проводились в нормальных климатических условиях. На стенде производилось снятие осциллограмм напряжения в фазах генератора при разгоне ротора от 0 до 12 000 об/мин при холостом ходе. Результаты испытаний приведены в таблицах 7.5 и 7.6.

Для снятия напряжения и тока на выходе генератора выводные концы подключались к измерительным приборам испытательного стенда: амперметр, вольтметр, частотомер. Производилось включение системы охлаждения. Производился плавный разгон генератора от 0 до 12 000 об/мин в течение 10 мин. После этого генератор эксплуатировался на номинальной частоте 12 000 об/мин 90 мин. Частота вращения вала контролировалась по частотомеру, подключенному к выводным концам генератора. Температура лобовых частей генератора после 90 мин эксплуатации без нагрузки составляла не более 55 °C, при охлаждении

генератора воздухом с температурой 38 °С. Температура измерялась встроенными в генератор датчиками температуры.

Частота вращения,	Напряжение	Напряжение	Ток фазы	Ток фазы
об/мин	фазы	фазы	действующий	действующий
	действующее	действующее	(эксперимент),	(расчет), А
	(эксперимент),	(расчет), В	А	
	В			
Холостой ход				
9000	100,1	100,4	0	
12000	153,76	154,1	0	
Работа под нагрузкой, напр	ояжение на выход	де ЭМПЭ		
12000	149,38	150,03	22,11	22,2
12000	140,26	140,9	31,1	31,5
12000	132,45	132,8	37,7	38
12000	130	130,2	45,5	45,9
Работа под нагрузкой, напр	ояжение на выход	де ТВУ		
12000	27,15	28,1	300	301
12000	26	26,2	600	603,5
Потери				

	ח		v
$120\pi M H = 120\pi M = 120\pi M H = 120\pi M = 120\pi M H = 12$	Ρεзνπιτяты	экспериментальных	исспеповании
таолица 7.5	i csymbrarbi	JKenephinentanbildik	пселедовании

Таблица 7.6 – Результаты экспериментальных и аналитических исследований потерь

	Эксперимент	Расчет
Потери в меди ЭМПЭ, Вт	210	208
Потери в стали ЭМПЭ,	125	140
механические и		
аэродинамические, Вт		
Потери в меди	507	505
трансформатора, Вт		
Потери в стали, Вт	15	13

После 90 мин эксплуатации ЭМПЭ снимался со стенда и разбирался для оценки состояния внутренних частей и определения размеров ротора. В результате осмотра дефектов не обнаружено, изменение формы бандажной оболочки ротора и ее размеров не выявлено. Результат визуального осмотра, а также проведенные измерения размеров ротора показали, что нарушений механической прочности и

посадок не обнаружено. Данный анализ подтвердил правильность проведенных механических расчетов.

Следующим этапом испытаний было измерение КПД ЭМПЭ в частности и СГЭ в целом. Для этого на холостом ходу оценивалась механическая мощность, потребляемая генератором без нагрузки. В этом случае оцениваются все потери в (магнитные, механические И добавочные) генераторе за исключением электрических потерь в обмотке. Электрические потери в обмотке оценивались при нагрузке. Показания снимались с датчика момента при известном моменте приводного двигателя. Для обеспечения точности измерений показания снимались в трех временных точках через 10, 40 и 60 мин эксплуатации. Во всех трех временных точках показания датчика момента составляли 0,1 Нм при частоте 12 000 об/мин. Следовательно, потребляемая генератором мощность составила 125 Вт (механические, аэродинамические и магнитные потери).

При мощности 13,66 кВт ток на выходе ЭМПЭ с ВПМ составлял 37,7 А, электрические потери в обмотке СГ составили 210 Вт. Полные потери энергии в СГЭ составили 522 Вт. То есть КПД всего СГЭ составил не менее 92 %. Данный показатель соответствует расчетам и техническому заданию.

После этого было выполнено снятие осциллограмм напряжения и тока в фазах ЭМПЭ при частоте вращения 12 000 об/мин при различной величине активной нагрузки. Выводные концы ЭМПЭ подключаются к регулируемой нагрузке (величина нагрузки устанавливается 20, 40, 60, 80 и 100%) от номинальной.

Для снятия напряжения на выходе ЭМПЭ выводные концы подключались к нагрузке и измерительным приборам испытательного стенда. Производилось включение системы охлаждения и плавный разгон ЭМПЭ от 0 до 12 000 об/мин в течение 10 мин. Частота вращения вала ЭМПЭ контролировалась по частотомеру, подключенному к выводным концам ЭМПЭ. Температура частей ЭМПЭ определялась в конце теплового режима с помощью термопары, плотно прижатой к поверхности измеряемого элемента. Температура нагрева лобовых частей, магнитопровода статора определялась путем суммирования температуры среды, окружающей генератор, и температуры, измеренной с помощью термопары.

Далее генератор плавно нагружался через ТВУ с перегрузочной мощностью до 20 кВт нагрузками 4,6; 8,5; 11,2; 13,6 кВт и полуторакратной перегрузкой по

мощности. Возможности нагрузки ограничивались технологическими возможностями. Результаты испытаний приведены на рисунке 7.15. Измерения выполнялись при частотах 11 000 и 12 000 об/мин. Также на рисунке 7.15 приведены сравнения результатов эксперимента с результатами расчета по нашей методологии.

Из сравнения полученных результатов видно, что предлагаемая методология обеспечивает не более 10–12% расхождения с данными эксперимента. Причем этот результат получен как для ЭМПЭ, так и для ТВУ и всей СГЭ в целом. Сходимость была обеспечена при сравнениях электромагнитных расчетов, тепловых и механических расчетов с результатами эксперимента. Также предложенная методология показала высокую сходимость с опытом в части расчета потерь.

Важно отметить, что использование предложенной методологии проектирования позволило в краткие сроки создать образец СГЭ в соответствии со всеми требованиями ТЗ и авиационных стандартов. Масса разработанной СГЭ составила порядка 18 кг при КПД 92%, что на 25–40% лучше, чем у серийных аналогов.(согласно таблице 2.7)



Рисунок 7.15 – Внешние характеристики ЭМПЭ при различных частотах вращения: *1* –11 000 об/мин, расчет; *2* –11 000 об/мин, эксперимент; *3* –12 000 об/мин, расчетные данные; *4* –12 000 об/мин, эксперимент

7.3 Экспериментальные исследования ВЭД с ВПМ для насоса ЭЦН-91

С использованием предложенного математического аппарата было разработано два макета ЭД (оптимизированный и не оптимизированный). На рисунке 7.16 представлены роторы оптимизированного и неоптимизированного
вариантов, а также приведен статор оптимизированного ЭД. Внешний вид макета ЭД с ВПМ для ЭЦН-91 представлен на рисунке 7.17. ЭД были выполнены с интегрированной в корпус системой управления, определение положения ротора ЭД осуществлялось с помощью датчиков Холла. Испытания ЭД выполнялись как на нагрузочном стенде, так и в составе насоса с топливом типа TC-1. Акты испытаний в составе насоса с топливом TC-1 приведены в Приложении 9. При испытаниях на стенде использовались шариковые подшипники качения, при испытаниях с керосином TC-1 применялись графитовые подшипники скольжения.



Рисунок 7.16 – Роторы исследуемых макетов: *a* – ротор сверху – первоначальный ЭД, ротор снизу – оптимизированный ЭД; *б* – статор оптимизированного ЭД



Рисунок 7.17 – Экспериментальный образец созданного ВЭД с ВПМ

Испытания в составе насоса выполнялись на двух скоростях вращения ротора ЭД: 5500 и 7000 об/мин и при трех режимах подачи топлива насосом: 3000 л/час, 1500 л/час и нулевая подача (под нулевой подачей понимается эксплуатация TH с заглушенным выводом TH). В результате испытаний измерялся ток, потребляемый ЭД в составе TH, производилась верификация результатов эксперимента с результатами компьютерного и математического моделирования. Результаты приведены на рисунке 7.18.



Рисунок 7.18 – Результаты испытаний ЭД в составе насоса с топливом: *1* – ЭД при частоте вращения ротора 7000 об/мин; *2* – серийный ЭД коллекторного типа при частоте вращения ротора 5500 об/мин; *3* – ЭД при частоте вращения ротора 5500 об/мин

Из рисунка 7.18 видно, что использование ЭД в качестве ЭД ТН позволяет уменьшить энергопотребление не менее чем на 25%, при неизменном расходе и перепаде давления, создаваемым насосом. Кроме того, результаты экспериментальных исследований показали высокую сходимость с результатами проектирования. Важно отметить, что практически оба созданных ЭД показали одинаковые характеристики в составе насоса, при одинаковой нагрузке.

Для оценки соответствия результатов эксперимента результатам расчетов с использованием предложенной теоретической базы также была измерена моментная характеристика ЭД, приведенная на рисунке 7.19.



Рисунок 7.19 – Моментная характеристика ЭД: 1– с первоначальными геометрическими размерами; 2–с оптимизированными геометрическими размерами

На основе приведенных в диссертации исследований, помимо самих агрегатов СГЭ ЛА, при непосредственном участии автора, были разработаны испытательные стенды для испытания СГЭ ЛА в алгоритмах функционирования которых были заложены структурные модели, предложенные в главе 2.

290

В частности, был разработан стенд на АО «УНПП «Молния» для испытания СГЭ (генератор ГСА и преобразователь ПЧА) для самолетов ТУ-204/ТУ-214. Разработанный стенд приведен на рисунке 7.20. Акт внедрения, подтверждающий создание стенда представлен в приложениях к диссертационной работе. (Приложение 20)

Также на основе исследований, представленных в диссертации (подходов к расчету механической прочности), была разработана испытательная центрифуга для УАП «Гидравлика». Акт внедрения приведен в приложении к диссертации.



Рисунок 7.20 – Стенд на АО «УНПП «Молния» для испытания СГЭ (генератор ГСА и преобразователь ПЧА) для самолетов ТУ-204/ТУ-214

На основе приведенных в диссертации исследований в период с 2010 г. были разработаны ряд программных приложений и комплексов, на которые были получены свидетельства о регистрации программ для ЭВМ [321–339]. Часть программных комплексов была разработана автором единолично [326–328, 331, 332].

Разработанные программные комплексы решают широкий спектр задач по проектированию и исследованию СГЭ ЛА на основе ЭМПЭ с ВПМ. В частности, ряд программ предназначены для исследований и расчета гибридных магнитных подшипников как элемента СГЭ ЛА.

Таким образом, на основе исследований в диссертации разработаны 23 программных продукта, которые решают широкий спектр задач по проектированию, исследованию и диагностике высокооборотных ЭМПЭ с ВПМ для СГЭ ЛА и их узлов.

ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 7

1. Разработаны 23 программных продукта, которые решают широкий спектр задач по проектированию, исследованию и диагностике ЭМПЭ с ВПМ, и СГЭ ЛА на их основе. Разработанные программные продукты прошли экспериментальную верификацию. При верификации разработанные программные программные продукты показали свою высокую эффективность.

2. Разработанные в диссертационной работе положения прошли верификацию при создании следующих ЭМПЭ с ВПМ:

– высокоскоростного генератора с постоянными магнитами переменной частоты вращения, унифицированного с генератором наземной газотурбинной установки (договор АП-ЭМ-09-14-ХГ между ФГБОУ ВПО «УГАТУ» и ОАО «УАПО» и договор между ОАО «УАПО» и ОАО «УАП «Гидравлика», № 89-200-13/2). 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;

– ЭМПЭ с ВПМ МЭГ-100Ч (договор НР 574-15 между ФГБОУ ВПО «УГАТУ» и ОАО «Технодинамика»). Мощность генератора 100 кВт, частота вращения 24 000 об/мин, охлаждение жидкостное. Генератор предназначен для использования в привод-генераторе ДПГЛ-150;

– проекта перспективного магнитоэлектрического генератора мощностью 120 кВт для ВСУ ТД 901, планируемой к применению на МС-21. Работа выполнена в рамках проекта «Проведение работ для создания демонстратора перспективного магнитоэлектрического генератора (ПМГ), в комплекте с модулем управления (МУ), для перспективной СЭС» в интересах АО «Технодинамика»;

– ЭМПЭ с ВПМ ГМЭТСЧ (в интересах ОАО «ОКБ «Кристалл»). Мощность генератора 150 кВт, частота вращения 24 000 об/мин, охлаждение жидкостное. Объект применения – магистральный генератор перспективных ЛА;

– магнитоэлектрического генератора 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; – высокооборотного СГ с магнитопроводом из аморфного железа. Мощность СГ 120 кВт, частота вращения ротора 50 000 об/мин. КПД – более 98%. Объект применения – перспективная безредукторная ВСУ для перспективных ЛА;

 высокооборотного СГ мощностью 20 кВт с частотой вращения ротора 12 000 об/мин;

– энергоэффективных электродвигателей с постоянными магнитами и частотным пуском для топливных насосов типа ЭЦН-91, используемых в системе охлаждения элементов СГЭ, в интересах АО «АО «УАПО» (Уфа). Предназначены для использования в вертолетах Ми-8.

 – энергоэффективных электродвигателей с постоянными магнитами и частотным пуском для топливных насосов типа ЭЦН-73, используемых в системе охлаждения элементов СГЭ, в интересах АО «ОКБ Кристалл» (Уфа);

– отказоустойчивых многофазных электродвигателей с постоянными магнитами и частотным пуском для топливных насосов, используемых в системе охлаждения элементов СГЭ, в интересах ФГУП «ЦИАМ им. П. И. Баранова».

– опытного образца СГ для авиационного двигателя ПД-35, частота вращения ротора 12 000 об/мин, мощность 250 кВт, по техническому заданию на стартергенератор для авиационного двигателя ПД-35 (планируемый объект применения – ШФМДС);

– опытного генератора для межрегионального ЛА с гибридной силовой установкой, частота вращения ротора 12 000 об/мин, мощность 400 кВт, по техническому заданию на электрогенератор для межрегионального самолета с гибридной силовой установкой (шифр Электролет).

3. Спроектирован, разработан И экспериментальный испытан высокооборотный ЭМПЭ с ВПМ с частотой вращения 50 000 об/мин. В результате экспериментальных исследований высокооборотного ЭМПЭ с ВПМ было установлено, что разработанные теоретические положения по определению магнитного поля в воздушном зазоре ЭМПЭ с ВПМ имеют погрешность не более 12–15 %. Также в результате экспериментальных исследований было установлено, что применение полукруглых ВПМ позволяет достичь более высоких критических частот вращения ротора. Важно отметить, что разработанный по расчетным теоретическим положениям, методикам И защищаемым автором, высокооборотный экспериментальный ЭМПЭ облалает более низкими

массогабаритными показателями при более высокой мощности по сравнению с серийным зарубежным аналогом (*TurbecT*100).

Таким образом, применение разработанных автором методик позволяет решить существующие проблемы перспективных разработок и импортозамещения в области автономной энергетики, что является одной из приоритетных задач промышленности РФ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные и практические результаты исследований. заключаются в следующем:

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 электромагнитных И процессов, a 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 математических моделей, структурных диссертации матриц, методик проектирования и подходов к созданию агрегатов СГЭ ЛА предложена СГЭ ЛА. процесс методология создания позволяющая выполнять 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°С, 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°С 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 10–15%. увеличивается на 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 обмотка подмагничивания. Проведены выполняет экспериментальные И компьютерные исследования данного метода, которые позволили установить, что ток трехфазного генератора МЭГ-100Ч короткого замыкания без для 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 РΦ № 2498473 системой» патент «Устройство управления И 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.

ЭМПЭ 13. Предложен алгоритм проектирования с BΠM 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.

Перспективами дальнейшей разработки темы является решение проблем создания систем генерирования ЛА с установленной единичной мощностью более 1 МВт (выбор оптимальных структур СГЭ ЛА, комплексная оптимизация и т.д.), а также формирование теоретических основ по проектированию и созданию высокомощных СГЭ ЛА с повышенным уровнем напряжения более 1 кВ переменного или постоянного тока.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

- АД авиационный двигатель
- АКБ аккумуляторные батареи
- АСГЭ агрегаты канала генерирования электроэнергии (автономная система)
- АММ аморфный магнитный материал
- АО автономные объекты
- БПО бесконтактные подшипниковые опоры
- ВПМ высококоэрцитивные постоянные магниты
- ВСУ вспомогательная силовая установка
- ГМП гибридные магнитные подшипники
- ЗВКЗ защита от витковых коротких замыканий
- ИС измерительная система
- КГИ коэффициент гармонических искажений
- СГЭ канал генерирования электроэнергии
- КЗ короткое замыкание
- КПД коэффициент полезного действия
- КТУ комплексные турбокомпрессорные установки
- КО короткоресурсный объект
- ЛА летательный аппарат
- ЛР лазерная резка
- МДС магнитодвижущая сила;
- МКЭ метод конечных элементов
- МН масляный насос
- МС магнитная система
- ППС привод постоянной скорости
- ППЧ привод постоянной частоты
- РН регулятор напряжения
- СГ стартер-генератор
- СУ системы управления
- СУЛА силовая установка ЛА
- ТВУ трансформаторно-выпрямительное устройство
- ТГИ турбогенераторные источники

ТО – термообработка

ЦРУ – центральное распределительное устройство

ШИМ – широтно-импульсная модуляция

ЭГ – электрогенератор

ЭД – электродвигатель

- ЭМПЭ электромеханический преобразователь энергии
- ТХА турбохолодильный агрегат
- ЭО электроэрозионная резка

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Специальные электрические машины. Источники и преобразователи энергии: учебное пособие / под ред. А. И. Бертинова. – М.: Энергоиздат, 1982. – 552 с.

 Кулебакин, В. С. Производство, преобразование и распределение электрической энергии на самолетах : учебное пособие для авиационных вузов / В. С. Кулебакин, В. Т. Морозовский, И. М. Синдеев. – М. : Оборонгиз, 1956. – 479 с.

Балагуров, В. А. Электрические генераторы с постоянными магнитами.
 М.: Энергоатомиздат, 1988. – 279 с.

4. Ледовский, А. Н. Электрические машины с высококоэрцитивными постоянными магнитами. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 169 с.

5. Геча, В. Я. Комплексная математическая модель высокоскоростного электрогенератора / В. Я. Геча, А. Б. Захаренко, И. А. Мещихин [и др.] // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. – 2011. – Т. 122, № 3 – С. 3 – 10.

6. Морозовский, В. Т. Электроэнергетические системы летательных аппаратов / В. Т. Морозовский, К. Д. Рунов .– М. : ВВИА им. Н. Е. Жуковского, 1964 .– 244 с.

7. Лазарев, И. А. Синтез структуры систем электроснабжения летательных аппаратов / И. А. Лазарев. – М.: Машиностроение, 1976. – 256 с.

8. Бертинов, А. И. Сверхпроводящие авиационные синхронные генераторы : пособ. для курсового и дипломного проектирования / А. И. Бертинов, О. М. Миронов ; МВССО СССР. МАИ.– М., 1973.– 96 с.

9. Бертинов, А. И. Авиационные электрические генераторы : учебное пособие для втузов / А. И. Бертинов .– М. : Оборонгиз, 1959 .– 594 с.

10. Левин, А. В. Электрический самолет: концепция и технологии / А. В. Левин, С. М. Мусин, С. А. Харитонов, К. Л. Ковалев, А. А. Герасин, С. П. Халютин. – Уфа: УГАТУ, 2014. – 388 с.

11. Левин, А. В. Стартер-генераторная система со встроенным в авиадвигатель электромашинным агрегатом для полностью электрифицированного самолета / А. В. Левин, И. И. Алексеев, Э. Я. Лившиц // Авиационная промышленность. – 2007. – № 1. – С. 50 – 52.

12. Комисар, М. И. Авиационные электрические машины : учеб. пособие

для авиац.техникумов / М. И. Комисар. – М. : Оборонгиз, 1959.

13. Комисар М. И. Авиационные электрические машины и источники питания : учебник для авиационных техникумов / М. И. Комисар. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1990.– 304 с.

14. Паластин, Л. М. Синхронные машины автономных источников питания / Л. М. Паластин. – М. : Энергия, 1980.– 384 с.

15. Паластин, Л. М. Электрические машины автономных источников питания / Л. М. Паластин. – М. : Энергия, 1972.– 464 с.

16. Сугробов, А. М. Проектирование электрических машин автономных объектов / А. М. Сугробов, А. М. Русаков. – М.: Изд.дом МЭИ, 2012. – 304 с.

17. Зечихин, Б. С. Авиационные генераторы с постоянными магнитами /
Б. С.Зечихин, С. В. Журавлев, Р. Ю. Мисютин // Электричество. – 2018. – № 6. –
С. 49–59.

18. Кушнерев, В. В. Электротехнический комплекс самолетов нового поколения / В. В. Кушнерев // Датчики и системы. – 2002. – № 7. – С. 29–34.

19. Jones, R.I. The More Electric Aircraft: the past and the future / R. I. Jones // Electrical Machines and Systems for the More Electric Aircraft. – 1999.– P. 1/1–1/4.

20. Boglietti, A. Experimental assessment of end region cooling arrangements in induction motor endwindings / A. Boglietti, A. Cavagnino, D. A. Staton, M. Popescu // IET Electric Power Applications.February. – 2011. Vol. 5,№2. – P. 203–209.

21. Cavagnino, A. Integrated generator for more electric engine: Design and testing of a scaled-size prototype / A. Cavagnino, Z. Li, A. Tenconi, S. Vaschetto // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2013. – Vol. 49, Iss. 5. – P. 2034–2043.

22. Besnard, J.-P. Electrical rotating machines and power electronics for new aircraft equipment systems / J.-P. Besnard, F. Biais, M. Martinez // ICAS-Secretariat - 25th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences. – 2006. – P. 1–9.

23. Wang, J. Advanced electrical machines for new and emerging applications / Wang J., Howe D. // Nordic Seminar on 'Advanced Magnetic Materials and their Applications' .– 2007. – P. 1-54.

24. Куприн, Б. В. Системы электроснабжения летательных аппаратов : / Б. В. Куприн, К. Д. Рунов, И. М. Синдеев ; под ред. И. М. Синдеева .– М.: ВВИА им. Н. Е. Жуковского, 1975.–317 с.

25. Гизатуллин, Ф.А. Емкостные системы зажигания: монография /

Ф. А. Гизатуллин ; УГАТУ .- Уфа, 2002 .- 249 с.

26. Власов, Г. Д. Проектирование систем электроснабжения летательных аппаратов / Г. Д. Власов. – М. : Машиностроение, 1967. – 412 с.

27. Ismagilov, F. R. A high-temperature frameless starter-generator integrated into an aircraft engine / Ismagilov F. R., Khairullin I.,Vavilov V., Farrakhov D., Yakupov A., Bekuzin V. // Russian Aeronautics. – 2016. – Vol. 59, Iss. 1. – P 107–111.

28. Nagorny A. Design Aspects of a High Speed Permanent Magnet Synchronous Motor/Generator for Flywheel Applications / Nagorny A., Dravid N., Jansen R., Kenny B. // NASA/TM-2005-213651. – 2005. – P. 1–7.

29. Брускин, Д. Э. Электроснабжение летательных аппаратов : [учебник для вузов] / Д. Э. Брускин, И. М. Синдеев. – М. : Высшая школа, 1988. – 263 с.

Брускин, Д. Э. Электрооборудование самолетов / Д. Э. Брускин .– М. ;
 Л. : Госэнергоиздат, 1956 .– 336 с.

31. Брускин, Д. Э. Электропривод на самолете / Д. Э. Брускин, Л. В. Бокшицкий ; под ред. А. И. Усика .– М. : Воениздат, 1949 .– 176 с. Автоматическое и электрическое оборудование летательных аппаратов : под ред. Д. Э. Брускина .– М. : Воениздат, 1969 .– 560 с.

32. Брускин, Д. Э. Электрооборудование самолетов : учеб. для энергетич. и электротехнич. вузов / Д. Э. Брускин. – М. : Госэнергоиздат, 1948. – 464 с.

Злектрооборудование летательных аппаратов: в 2-х т. / под ред.
С. А. Грузкова. – М.: МЭИ, 2005. – 568 с.

34. Batteries and Advanced Airplanes787 Electrical System [Электронныйресурс]. URL: http://787updates.newairplane.com/787-Electrical-Systems/787-electrical-system

35. Airbus A380 Secondary Electrical Power and Distribution System (SEPDS) [Электронный pecypc]. URL: <u>https://www.aversan.com/our-work/airbus-a380-</u> secondary-electrical-power-and-distribution-system-sepds/

36. Высокоскоростные электрические машины [Электронный ресурс]. URL: <u>https://w-elma.com/catalog/vsem/</u>

37. Xiuxian Xia. Dynamic Power Distribution Management For All Electric Aircraft / Xia Xiuxian // MSc by Research Thesis, Cranfield University – 2011. – P. 1–114.

38. Ganev, E. Selecting the Best Electric Machines for Electrical Power

Generation Systems / E. Ganev // IEEE Electrication Magazine. – 2014. – P. 1–13.

39. Moir, I. Electrical Systems / I. Moir, A. Seabridge, M. Jukes // Civil Avionics Systems 2nd Edition. – 2013. – P. 235–290.

40. Rosero, J. A. Moving towards a more electric aircraft / J. A. Rosero, J. A. Ortega, E. Aldabas, L. Romeral // IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine. – 2007. – Vol. 22. – P. 3–9

41. Sarlioglu, B. More Electric Aircraft: Review, Challenges, and Opportunities for Commercial Transport Aircraft / B. Sarlioglu and C. T. Morris // IEEE Transactions on Transportation Electrification. – 2015. – Vol. 1. – P. 54–64.

42. Galea, M. Design of a high force density tubular permanent magnet motor /
M. Galea, C. Gerada, T. Raminosoa, P. Wheeler // The XIX International Conference on
Electrical Machines – ICEM. – 2010. – P. 1–6.

43. Avery, C. R. Electrical generation and distribution for the more electric aircraft / C. R. Avery, S. G. Burrow, and P. H. Mellor // Universities Power Engineering Conference. 42nd International. – 2007. – P. 1007–1012.

44. Roboam, X. New trends and challenges of electrical networks embedded in more electrical aircraft / X. Roboam // Industrial Electronics (ISIE), 2011 IEEE International Symposium. – 2011. – P. 26–31.

45. Roboam, X. More electricity in the air: Toward optimized electrical networks embedded in more-electrical aircraft / X. Roboam, B. Sareni, and A. De Andrade // IEEE industrial electronics magazine. -2012. -Vol. 6. -P. 6–17.

46. Sinnett, M. Boeing: 787 No-Bleed Systems: Saving Fuel and Enhancing Operational Efficiencies. AERO Quaterly QTR_04 07, 2007 / M. Sinnett. – URL: http://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/articles/ qtr_4_07/AE RO_Q407.pdf

47. Nelson, T. 787 Systems and performance / T. Nelson. – URL: http://myhres.com/Boeing-787-Systems-and-Performance.pdf

48. Hockmeyer, I. O. The generation and regulation of electric power in aircraft: a survey of design features of generators and their control / I. O. Hockmeyer // Electrical Engineers - Part II: Power Engineering. – 1946. – Vol. 93. – P. 2.

49. Карасев, Д. А. К вопросу создания магистральных транспортных самолетов с электрическими силовыми установками / Д. А. Карасев, А. Г. Арутюнов, А. А. Загордан // Вестник Московского авиационного института. – 2015. – Т. 22, № 1. – С. 132–139.

50. Резников, С. Б. Электроэнергетическая и электромагнитная совместимость транспортного электрооборудования с высоковольтными цепями питания / С. Б. Резников, В. В. Бочаров, В. Ю. Кириллов, В. А. Постников ; под ред. д.т.н, проф. С. Б. Резникова. – М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2010. – 512 с.

51. Энергоэкономические комбинированные системы электроснабжения с высоким качеством электроэнергии для концепции «полностью электрифицированного самолета» / В. В. Бочаров, В. А. Постников, С. Б. Резников, И. А. Харченко // Труды МАИ. – 2012. – №58. – С. 1-14.

52. Clardy, W. J. Electric power for airplanes / W. J. Clardy // Electrical Engineering. IEEE Transactions On Transportation Electrification. – 1940. – Vol. 59. – P. 385–388.

53. Научно-технический отчет по теме «Исследование динамических режимов, способов защиты от перегрузок, оптимизация массогабаритных показателей высокоскоростного магнитоэлектрического генератора и силового электромеханического преобразователя», шифр «ИМА-Интеграция – УГАТУ-ЭМ 2». –Уфа: ФГБОУ ВО «УГАТУ». – 2012. – 610 с.

54. Брускин, Д. Э. Самолеты с полностью электрифицированным оборудованием/ Д. Э. Брускин, С. И. Зубакин // Итоги науки и техники. Электрооборудование транспорта. 1986. – Т.6. – 108 с.

55. Галимова, А. А. Определение структуры и параметров автономных комбинированных систем электроснабжения космических летательных аппаратов на этапе аванпроекторования : автореферат дис. ... канд. техн. наук / А. А. Галимова. – Самара, 1998. – 22 с.

56. Madonna, V. Electrical Power Generation in Aircraft: Review, Challenges, and Opportunities / V. Madonna, P. Giangrande, M. Galea // IEEE Transactions on Transportation Electrification. – 2018. – Vol. 4, Iss. 3. – P. 646–659.

57. Hyder A. K. A Century of Aerospace Electrical Power Technology / A. K. Hyder // J. of Propulsion and Power. – 2003. – Vol. 19. – P. 1155–1179.

58. С. П. Халютин, Развитие структурно-функционального моделирования электроэнергетических систем самолета / С. П. Халютин, Б. В. Жмуров, С. В. Корнилов // Проблемы безопасности полетов. – 2009. – № 8. – С. 53–62.

59. Жмуров, Б. В. Информационно-энергетическая методика проектирования энергокомплекса летательных аппаратов с электрической тягой /

Б. В. Жмуров, С. П. Халютин, А. О. Давидов // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. – 2017. – Т. 20, № 1. – С. 167–176.

60. Халютин, С. П. Перспективные интеллектуальные системы электроснабжения летательных аппаратов / С. П. Халютин // Электропитание. – 2015. – № 3. – С. 13–17.

61. Ларин, В. П. Структурный синтез системы электроснабжения гиперзвукового летательного аппарата / В. П. Ларин, К. В. Желудева // Научная сессия ГУАП: сборник докладов. – 2016. – С. 72–77.

62. Ларин, В. П. Исследование емкостных характеристик аккумуляторных батарей системы электроснабжения гиперзвукового летательного аппарата / В. П. Ларин, К. В. Желудева // Научная сессия ГУАП сборник докладов: в 3 частях. – 2017. – С. 65–69.

63. Гуревич, О. С. Газотурбинный двигатель для "электрического" самолета: направления электрификации газотурбинных двигателей / О. С. Гуревич, Ю. С. Белкин, А. И. Гулиенко // Системы автоматического управления авиационными газотурбинными двигателямиТруды ЦИАМ №1346. – М., 2010. – С. 21–29.

64. Гуревич, О. С. Демонстрационная система управления и топливопитания газотурбинного двигателя на базе электрических приводов / О. С. Гуревич, Ю. С. Белкин, А. С. Трофимов, В. И. Чернышов // Системы автоматического управления авиационными газотурбинными двигателямиТруды ЦИАМ №1346. – М., 2010. – С. 30–38.

65. Гуревич, О. С. Демонстрационная система смазки газотурбинного двигателя с электрическим приводом насосов / О. С. Гуревич, А. И. Гулиенко, Ю. С. Белкин, В. И. Чернышов // Системы автоматического управления авиационными газотурбинными двигателями: Труды ЦИАМ №1346. – М., 2010. – С. 39–45.

66. Зубков Ю.В. Экспериментальное исследование бесщеточного генератора с интегрированным возбудителем. // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2018.№ 2 (58). С. 110-117.

67. Adkins, B. Electrical machines for aircraft / B. Adkins // Proceedings of the

IEEE - Part A: Power Engineering. – 103(1S). – P. 116–127. – URL: http://digitallibrary.theiet.org/content/journals/10.1049/pi-a.1956.0017.

68. Geest, Van Der M. Machine selection and initial design of an aerospace starter/generator / Van Der Geest M., H. Polinder, J. A. Ferreira, D. Zeilstra // IEEE International Electric Machines and Drives Conference, IEMDC 2013; Chicago, IL; United States. – Code 98445.

69. Мисютин, Р. Ю. Автоматизированное конструирование авиационных электрических генераторов с постоянными магнитами / Р. Ю. Мисютин, А. В. Левин, С. В. Журавлев, Б. С. Зечихин // Вестник Московского авиационного института. – 2013. – Т. 20, № 2. – С. 132–139.

70. Кузьмичев, Р. В. Авиационные генераторы повышенной мощности /
Р. В. Кузьмичев, Д. В. Левин, Р. Ю. Мисютин, Б. С. Зечихин // Вестник Московского авиационного института. – 2011. – Т. 18, № 6. –С. 39–46.

71. Корнилов, Д. С. Моделирование магнитного поля и совершенствование конструкции магнитной системы торцевого генератора с постоянными магнитами / Д. С. Корнилов, Ю. Б. Казаков, В. П. Шишкин // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2013. № 2. – С. 29–32.

72. Бут, Д. А. Бесконтактные электрические машины : [учебное пособие для студентов] / Д. А. Бут. – М. : Высшая школа, 1985. – 255 с.

73. Бут, Д. А. Бесконтактные электрические машины : [учебное пособие для студентов электромеханических и электроэнергетических специальностей втузов] / Д. А. Бут. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1990. – 415 с.

74. Бут, Д. А. Системы генерирования электроэнергии летательных аппаратов : тексты лекций / Д. А. Бут, С. Р. Мизюрин .– М. : Изд-во МАИ, 1982.– 57 с.

75. Балагуров, В. А. Авиационные генераторы переменного тока комбинированного возбуждения / В. А. Балагуров, Ф. Ф. Галтеев.– М.: Машиностроение, 1977.– 94 с.

76. Вавилов, В. Е. Integrated High-Temperature Starter-Generator for Aerospace Vehicles. Testing of a Scaled-Size Prototype /B. Е. Вавилов // International Review of Aerospace Engineering (IREASE). – 2017. – Vol. 10, №1. – Р. 24–30.

77. Ganev, E. High-reactance permanent magnet machine for high-performance power generation systems / Ganev E. // SAE Tech. Papers, Power Syst. Conf.– 2006.

DOI: 10.4271/2006-01-3076

78. Ganev, E. D.Electric Drives for Electric Green Taxiing Systems: Examining and Evaluating the Electric Drive System / E. D. Ganev // IEEE Electrification Magazine. –Vol. 5(4). – P. 10–24.

79. Papini, L. A high-speed permanent-magnet machine for fault-tolerant drivetrains / L. Papini, T. Raminosoa, D. Gerada, C. Gerada // IEEE Trans. Ind. Electron.
2013.– Vol. 61, № 6. – P. 3071–3080. DOI: 10.1109/TIE.2013.2282604

80. Hyder A. K. A Century of Aerospace Electrical Power Technology / A.K. Hyder // J. of Propulsion and Power. – 2003. –Vol. 19№6. – P. 1155–1179.

81. Sarlioglu, B. More Electric Aircraft: Review, Challenges, and Opportunities for Commercial Transport Aircraft / B. Sarlioglu, C. T. Morris // IEEE Trans. on Transportation Electrification. – 2015. – Vol. 1, №1. – P. 54–64. DOI: 10.1109/TTE.2015.2426499.

82. Arumugam, P. Permanent Magnet Starter-Generator for Aircraft Application / P. Arumugam, C. Gerada, S. Bozhko, H. Zhang, et al. // SAE Tech. – 2014. – P. 2014-01-2157. DOI: 10.4271/2014-01-2157,.

83. Gieras, J. F. PM synchronous generators with hybrid excitation systems and voltage control Capabilities: A review / J. F. Gieras // XXth Int. Conf. Elect. Mach., 13132472. – 2012. – P. 2573–2579. DOI: 10.1109/ICElMach.2012.6350248.

84. Gerling, D. Six-Phase Electrically Excited Synchronous Generator for More Electric Aircraft / D. Gerling, M. Alnajjar // Int. Symp. on Power Electron., Elect. Drives, Automat. and Motion (SPEEDAM), 16193041. 2016.– P. 7–13. DOI: 10.1109/SPEEDAM.2016.7525938.

85. Ismagilov, F. R. Multidisciplinary Design of Ultra-High-Speed Electrical Machines / F. R. Ismagilov, N. Uzhegov, V. E. Vavilov, V. I. Bekuzin, V. V. Ayguzina // IEEE Trans. Energy Convers. – 2018. – Vol. 33, №3. P. 1203–1212. DOI: 10.1109/TEC.2018.2803146.

86. Ismagilov, F. R. Design Features of Liquid-Cooled Aviation Starter Generators / F. R. Ismagilov, V. E. Vavilov, D. V. Gusakov // 5th Int. Conf. on Elect. Syst. for Aircraft, Railway, Ship Propulsion, and Road Vehicles & Int. Transportation Electrification Conf. (ESARS-ITEC). – 2018. – P. 1-5.

87. Teo, A. Examination of aircraft electric wheel drive taxiing concept / A. Teo, K. Rajashekara, J. Hill, B. Simmers // Soc. Automotive Engineers Power Syst.

Conf. –2008. – pp. 9

88. Re, F. Assessing environmental benefits of electric aircraft taxiing through object-oriented simulation / F. Re // Soc. Automotive Engineers Int. J. Aerosp. -2012/- Vol. 5, No. - P. 503–512.

89. Oyori, H. Power management system for the electric taxiing system incorporating the more electric architecture / H. Oyori, N. Morioka // SAE AeroTech Congr. Exhibition. – 2013. – pp. 8

90. Kjelgaard C. Runway taxiing goes green / C. Kjelgaard // Aerospace America – February 2014 – Vol. 52, №2. – P. 16–17.

91. Cristian A. Hybrid electric propulsion technologies 1mw high efficiency
generatorgenerator[Электронныйресурс].http://www.nianet.org/ODM/presentations/Cristian_Anghel_-

_Honeywell_Honeywell_Technologies_for_Hybrid_Electric_Propulsion_(002).pdf

92. Jahns, T. M. Flux-weakening regime operation of an interior permanentmagnet synchronous motor drive / T. M. Jahns // IEEE Trans. Ind. Appl. – 1987. – Vol. IA-23, №4. – P. 681–689.

93. Данилевич, Я. Б. Моделирование электромагнитных процессов в преобразователях энергии, содержащих сверхпроводящие элементы / Я. Б. Данилевич, А. В. Кочнев, Д. В. Сиротко, В. А. Тутаев, Л. И. Чубраева // Отчет о НИР № 97-02-18013 (Российский фонд фундаментальных исследований).

94. Альтов, В. А. Сверхпроводниковые технологии в электромеханических преобразователях энергии / В. А. Альтов, Д. С. Дежин, Ю. Ю. Кавун, К. Л. Ковалев, Л. К. Ковалев, В. Т. Пенкин // Электричество. – 2009. – № 5. – С. 27–36.

95. Высоцкий, В. С. Сверхпроводимость в электромеханике и электроэнергетике / Высоцкий В.С., Сытников В.Е., Илюшин К.В., Ковалев Л.К., Ковалев К.Л., Егошкина Л.А. // Электричество. – 2005. – № 7. –С. 31–40.

96. Вержбицкий, Л. Г. Экспериментальные исследования криогенного синхронного двигателя с радиально тангенциальными постоянными магнитами и высокотемпературными сверхпроводящими элементами в роторе / Л. Г. Вержбицкий, Л. К. Ковалев, К. Л. Ковалев, В. Н. Полтавец, Д. С. Дежин, Р. И. Ильясов, Д. В. Голованов // Электричество. – 2010. – № 6. – С. 29–34.

97. Конеев, С. М. Электрические машины и устройства на основе массивных высокотемпературных проводников / С. М. Конеев, К. Л. Ковалев,

Л. К. Ковалев. – М., 2010.– 395 с.

98. Ковалев, К. Л. Характеристики сверхпроводниковых синхронных машин с когтеобразными полюсами для летательных аппаратов / К. Л. Ковалев, В. Т. Пенкин, К. А. Модестов, А. А. Дубенский // Вестник Московского авиационного института. – 2014. – Т. 21, № 5. – С. 124–128.

99. Авербух, В. Я. Электромеханические комплексы: внииэмовские хроники / В. Я. Авербух. – М.: ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2011. – 167 с.

100. Шымчак, П. Дисковые синхронные машины с постоянными магнитами: современное состояние и тенденции развития / П. Шымчак // Электричество. – 2009. – №8. – С. 36–46.

101. Ismagilov, F. R. A mathematical model of a three-axis electromechanical converter of oscillatory energy / Ismagilov, F. R., Khairullin, I. H., Riyanov, L. N., & Vavilov, V. E. // Russian Electrical Engineering. – 2013. – Vol. 84, Iss. 9. – P. 528–532. DOI: 10.3103/S106837121309006X.

102. Хайруллин, И. Х. Трехкоординатный колебательный электромеханический преобразователь энергии / И. Х. Хайруллин, Л. Н. Риянов, В. Е. Вавилов // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – №5. URL: http://www.science-education.ru/105-7245 (дата обращения: 23.10.2012).

103. Хайруллин, И. Х. Математическая модель установившегося режима работы трехкоординатного электромеханического преобразователя энергии / И. Х. Хайруллин, Л. Н. Риянов, В. Е. Вавилов // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 6. URL: http://www.science-education.ru/106-7460.

104. Ismagilov, F. R. Permanent Magnet Generator with the Tooth-Coil Winding and Saturation Magnetization of the Magnetic Core / Ismagilov, F. R., Vavilov, V. E., Gusakov, D.V., Tarasov, N.G. // International Review of Aerospace Engineering (I.RE.AS.E) -2017 - Vol. 10 - N. 4 - P. 250-258.

105. Ismagilov, F. R. Improving The Efficiency Of Electrical High-rpm Generators With Permanent Magnets and Tooth Winding / Ismagilov, F. R., Vavilov, V. E., Karimov, R.D. // PIERM – 2018 – Vol. 63 – P. 93–105.

106. 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.

107. Вавилов, В. Е. Уточненная математическая модель гибридных магнитных подшипников / В. Е. Вавилов // Вестник машиностроения. – 2014. – №4. – С. 30–35.

108. Вавилов, В. Е. Параметры гибридного магнитного подшипника при осевом смещении магнитных колец / В. Е. Вавилов // Вестник машиностроения 2014. – №12. – С. 32–34.

109. Ismagilov, F. R. High-Speed Magneto-Electric Slotless Generator, Integrated into Auxiliary Power Unit / Ismagilov F. R., Vavilov V. E., Bekuzin V.I., AyguzinaV.V. // Design and Experimental Research of a Scaled-Size Prototype International Review of Aerospace Engineering. – 2016.– Vol. 9 (5). – P. 173–179.

110. Ismagilov, F. R. Topology evaluation of a slotless high-speed electrical machine with stator core made of an amorphous alloy for the aerospace industry / Ismagilov, F. R., Vavilov, V. E., Bekuzin, V.I., Ayguzina, V.V.// International Review of Aerospace Engineering (IREASE). -2017. - Vol. 10, No 3. - P. 131-139.

111. Ismagilov, F. R. Design Aspects of a High-Speed High-Voltage PMSM for Aerospace Application / Ismagilov, F. R., Uzhegov, N., Vavilov, V. E., Gusakov, D.V. // International Review of Aerospace Engineering (IREASE). – 2017. – Vol. 10, N_{2} 3. – P. 122–129.

112. Левин А. В. Проектирование и обеспечение требуемого качества конструкции электрических агрегатов авиационной техники нового поколения // Диссертация на соискание ученой степени доктора тех. наук, М.–2004

113. Исмагилов, Ф. Р. К вопросу применения композитных материалов в электрических машинах (обзор) / Ф. Р. Исмагилов, В. Е. Вавилов, И. Ф. Саяхов // Новое в российской электроэнергетике. – 2018. – № 9. – С. 17–32.

114. Ismagilov, F. R. Magnetic-system topology selection for the high-speed electrical machine with interior permanent magnets / F. R. Ismagilov, V. Ye. Vavilov, V. V. Ayguzina // Elektrotehniski Vestnik /Electrotechnical Review. – 2017. –Vol. 84(4). – P. 181–188.

115. Сверхвысокооборотные электромеханические системы : монография
 / Ф. Р. Исмагилов, В. Е. Вавилов, И. Х. Хайруллин, В. В. Айгузина. – М.:
 Инновационное машиностроение, 2018. – 193 с.

116. Исмагилов, Ф. Р. Высокооборотные электрические машины с высококоэрцитивными постоянными магнитами : учебное пособие /

Ф. Р. Исмагилов, И. Х. Хайруллин, В. Е. Вавилов– М.: Инновационное машиностроение, 2017. – 248 с.

117. Сверхпроводниковые синхронные электрические машины с когтеобразными полюсами и постоянными магнитами на роторе для систем электроснабжения перспективных летательных аппаратов / К. А. Боярчук, Л. Г. Вержбицкий, А. А. Дубенский, Л. К. Ковалев, К. Л. Ковалев, И. К. Кондратюк, К. А. Модестов // Электричество. – 2013. – № 10. – С. 2–6.

118. Магнитная система ротора с постоянными магнитами и способ ее изготовления / Исмагилов Ф. Р., Хайруллин И. Х., Вавилов В. Е., Бекузин В. И., Айгузина В. В. : патент RU 2 646 543, МПК H02K 1/27 (2006.01) H02K 21/14 (2006.01) H02K 15/03 (2006.01). заявл. 14.07.2017; опубл. 06.03.2018.

119. Гейтенко, Е. Н. Классификация преобразователей напряжения на основе параллельно соединенных инверторов / Е. Н. Гейтенко // II Научный форум телекоммуникации: теория и технологии ТТТ-2017. Физика и технические приложения волновых процессов ФиТПВП-2017 : материалы XV Международной научно-технической конференции. – 2017. – С. 285–286.

120. Силкин, Е. Элементы классификации автономных инверторов и свойства согласованного инвертора с резонансной коммутацией. Часть 4 / Е. Силкин // Силовая электроника. – 2018. – Т. 1, № 70. – С. 28–34.

121. Силкин Е. Элементы классификации автономных инверторов и свойства согласованного инвертора с резонансной коммутацией. Часть 1 / Е. Силкин // Силовая электроника. – 2017. – Т. 4, № 67. –С. 30–40.

122. Мальнев, А. И. Обзор многоуровневых инверторов тока ветроэнергетических станций / А. И. Мальнев, И. А. Баховцев, Г. С. Зиновьев // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2015. – Т. 326, № 7. – С. 15–26.

123. Васильев, Б. Ю. Повышение эффективности работы силовых полупроводниковых преобразователей на основе векторных алгоритмов управления / Б. Ю. Васильев // Электричество. – 2014. – № 9. – С. 44–51.

124. Сингаевский, Н. А. Принципы построения, особенности конструкции и классификация многофазных трансформаторов силовых полупроводниковых выпрямителей / Н. А. Сингаевский, А. Г. Кудряков // Фундаментальные и прикладные науки сегодня : материалы IV международной научно-практической

конференции. – 2014. – С. 120.

125. Chebak, A. Optimal design of a high-speedslotless permanentmagnet synchronous generator with soft magnetic composite stator yoke and rectifier load / A. Chebak, P. Viarouge, J. Cros // Mathematics and Computers in Simulation. – 2010. – Vol. 81, No 2. Special No SI. – P. 239–251.

126. Saban, M. Test Procedures for High-Speed Multimegawatt Permanent-Magnet Synchronous Machines / M. Saban, D. Gonzalez-Lopez, C. Bailey // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2010. – Vol. 46, № 5. – P. 1769–1777.

127. Borisavljevic, A. On the Speed Limits of Permanent-Magnet Machines /
A. Borisavljevic, H. Polinder, J. Ferreira // IEEE Transactions on Industrial Electronics.
2010. – Vol. 57, № 1. – P. 220–227.

128. Bailey, C. Design of High-Speed Direct-Connected Permanent-Magnet Motors and Generators for the Petrochemical Industry /C. Bailey, D. Saban, P. Guedes-Pinto // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2009. – Vol. 45. № 3. – P. 1159– 1165.

129. Abdi, B. Simplified Design and Optimization of Slotless Synchronous PM Machine for Micro-Satellite Electro-Mechanical Batteries / B. Abdi, J. Milimonfared, J. Moghani // Advances in Electrical and Computer Engineering. – 2009. – Vol. 9. № 3. – P. 84–88.

130. Bahrami, H. Design, Prototyping, and Analysis of a Novel Permanent-Magnet Doubly Salient Generator / H. Bahrami, M. Mirsalim, A. Taheri // International Review of Electrical Engineering. – 2012. – Vol. 7. № 5. – P. 5515–5521.

131. Li, J. A New Efficient Permanent-Magnet Vernier Machine for Wind Power Generation /J. Li, K. Chau, J. Jiang // IEEE Transactions on Magnetics. -2010. - Vol. 46, $N_{2} 6. - P. 1475-1478.$

132. Alberti, L. IPM Machine Drive Design and Tests for an Integrated Starter-Alternator Application / L. Alberti, M. Barcaro, D. Michele // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2010. – Vol. 46, № 3. – P. 993–1001.

133. Jian, L. A Magnetic-Geared Outer-Rotor Permanent-Magnet Brushless Machine for Wind Power Generation / L. Jian, K. Chau, J. Jiang // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2009. – Vol. 45. № 3. – P. 954–962.

134. Huynh, C. Design and development of a two-megawatt, highspeedpermanentmagnet alternator for shipboard application /C. Huynh, L. Hawkins,

A. Farahani // Naval Engineers J. – 2005. – Vol. 117, № 4. – P. 23–29.

135. Scridon, S. BEGA-A biaxial excitation generator for automobiles: Comprehensive characterization and test results /S. Scridon, I. Boldea, L. Tutelea // IEEE Transactions on Industry Applications. -2005. - Vol. 41, No 4. - P. 935-944.

136. Mellor, P. A wide-speed-range hybrid variable-reluctance/permanentmagnetgenerator for future embedded aircraft generation systems / P. Mellor, S. Burrow, T. Sawata // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2005. – Vol. 41, № 2. – P. 551–556.

137. Пат. РФ № 123254 U1, МПК Н02К1/27, Н02К21/12. Ротор электрической машины с возбуждением от постоянных магнитов / Глазков В. П., Глазков О. В., Глазкова И. В. [и др.]; патентообладатель Глазков В. П. – № 2014109625/11; заявл. 15.06.2012; опубл. 20.12.2012.

138. Пат. РФ № 2308139 С2, МПК Н02К1/27, Н02К21/12. Ротор магнитоэлектрической машины, преимущественно синхронного генератора с возбуждением от постоянных магнитов / Суворов И. В., Фолимонов Л. В.; патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью научно-производственная фирма "Особые сварочные агрегаты" (ООО НПФ "ОСА"); заявл. 05.08.2005; опубл. 10.10.2007.

139. Пат. РФ № 2230420 С1, МПК Н02К15/00, Н02К15/03. Способ установки постоянных магнитов в роторе электрической машины / Левин А. В., Лившиц Э. Я., Хабаров В. А; патентообладатель Открытое акционерное общество "Акционерное конструкторское бюро "Якорь-2"; заявл. 05.06.2003; опубл. 10.06.2004.

140. Sadeghierad, M. High-speed axial-flux permanent-magnet generator with coreless stator /M. Sadeghierad, H. Lesani, H. Monsef // Canadian J. of Electrical and Computer Engineering–Revue Canadienne de Genie Electrique ET Informatique. – 2009. – Vol. 34, No 1–2. – P. 63–67.

141. Abdi, B. Simplified Design and Optimization of Slotless Halbach Machine for Micro-Satellite's Electro-Mechanical Batteries / B. Abdi, J. Milimonfared, J. Moghani // International Review of Electrical Engineering. – 2009. – Vol. 4, № 2. – P. 305–311.

142. Hosseini, S. Design, prototyping and analysis of a low-cost disk permanent magnet generator with rectangular flat-shaped magnets / S. Hosseini, M. Agha-Mirsalim, M. Mirzaei // Iranian J. of Science and Technology Transaction B-Engineering. – 2009.

– Vol. 32, № B3. – P. 191–203.

143. Hosseini, S. Design, prototyping, and analysis of a low cost axial-flux coreless permanent-magnet generator / S. Hosseini, M. Agha-Mirsalim, M. Mirzaei // IEEE Transactions on Magnetics. -2008. - Vol. 44, No 1. - P. 75-80.

144. El-Hasan, T. Magnet topology optimization to reduce harmonics in highspeed axial flux generators / T. El-Hasan, P. Luk // IEEE Transactions on Magnetics. – $2003. - Vol. 39, N_{2} 5. - P. 3340-3342.$

145. Gandzha, S. A. Axial gap or axial flux motors come in a few basic configurations / S. A. Gandzha, R. L. Halstead // E-drive (magazine of electric motor and drive technology). $-2011. - N_{2} 12.$

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

147. Gandzha, S. A. Optimal design of brushless axial gap electric machines for low power windmills / S. A. Gandzha, R. L. Halstead // Job shop technology (engineering solution for product manufactures). -2012. $-N_{2}$ 1.

148. Li, W. Influence of Copper Plating on Electromagnetic and Temperature Fields in a High-Speed Permanent-Magnet Generator / W. Li, H. Qiu, X. Zhang // IEEE Transactions on Magnetics. – 2012. – Vol. 48, № 8. – P. 2247–2253.

149. Jung, J. Mechanical Stress Reduction of Rotor Core of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor / W. Li, H. Qiu, X. Zhang // IEEE Transactions on Magnetics. – Vol. 48, № 2. – P. 911–914.

150. Fei, W. Rotor Integrity Design for a High-Speed Modular Air-Cored Axial-Flux Permanent-Magnet Generator / W. Fei, P. Luk, T. El-Hasan // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2011. – Vol. 58, № 9. – P. 3848–3858.

151. Schafer R., Hubert R. Magnetic Domains / R. Schafer, R. Hubert. – Springer Berlin Heidelberg . – NewYork: Corrected, 2009. – 707 p.

152. Thomas, S. Multiphase Flux-Switching Permanent-Magnet Brushless Machine for Aerospace Application /S. Thomas, Z. Zhu, R. Owen // IEEE Transactions on Industry Applications. -2009. - Vol. 45, No 6. - P. 1971-1981.

153. Jang, S. Analysis of unbalanced force for high-speed slotless permanentmagnet machine with Halbach array /S. Jang, S. Lee, H. Cho // IEEE Transactions on Magnetics. -2003. - Vol. 39, No 5. -P. 3265-3267.

154. Zhu, Z. Halbach permanentmagnet machines and applications: a review /

Zhu Z., Howe D. // IEE Proceedings-Electric Power Applications. – 2001. – Vol. 148, № 4. – P. 299–308.

155. Вигриянов, П. Г. Общая методика исследования электромагнитных процессов вентильного двигателя с изменяемой структурой электромеханического преобразователя / П. Г. Вигриянов // Электричество. – 2012. – № 8. – С. 44–51.

156. Кручинина, И. Ю. Высокоиспользованные электрические машины для современной энергетики: проблемы создания и исследований: автореферат дис. ... д-ра техн.наук: 05.09.01 / Кручинина И. Ю. – Спб, 2012. – 34 с.

157. Man, M. A synchronous machine with amorphous core / M. Man // International Journal of Engineering Science and Technology. -2012. -Vol. 4, No6. -P. 2596-2560.

158. Man, M. An overview on amorphous core transformers / M. Man // J. of Emerging trends in Engineering and applied sciences. – 2012. – Vol. 2, №3. – P. 217–220.

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

160. TechnicalBulletin[Электронный ресурс].URL:http://www.elnamagnetics.com/wpcontent/uploads/catalogs/metglas/powerlite.pdf,(дата обращения 03.06.2015).

161. Johannes, J. H. An Evaluation of Alternative Stator Lamination Materials for a High-Speed, 1.5 MW,Permanent Magnet Generator / Johannes J. H. Paulides, Geraint W. Jewell, David Howe // IEEE Transactions on Magnetics. –2004. – Vol. 40, №. 4. – P. 2041–2043.

162. Co Huynh. Losses in High Speed Permanent Magnet Machines Used in Microturbine Applications / Co Huynh, Liping Zheng, Dipjyoti Acharya // J. of Engineering for Gas Turbines and Power. –2009. – Vol. 131. – P. 022301-1 – 022301-6.

163. Duo Chen. Modeling and design of 100 Krpm and 10 KW-class spindle motor for 5-axes blade grinding machine / Duo Chen, Ming Feng, // Electrical Machines and Systems (ICEMS). International Conference. -2011. - P. 1-4.

164. Gerasin, A. A. Permanent-magnet shaft bearing for high-speed spindles / Gerasin, A. A., Ismagilov, F. R., Khairullin, I. K., & Vavilov, V. E. // Russian

Engineering Research. – 2013. – Vol. 33, Iss. 12. – P. 718–722. DOI: 10.3103/S1068798X1312006X.

165. Ismagilov, F. R. Magnetic Bearing with Radial Magnetized Permanent Magnets / Ismagilov, F. R. Vavilov, V. Ye., Boikova, O.A. // World Applied Sciences J. – 2013. – Vol. 23(4) – P. 495–499.

166. Vavilov, V. E. Calculation of Magnetic Field of Two Coaxially Located Circular Permanent Magnet Using a Method of Physical Analogies / V. E. Vavilov // World Applied Sciences J. – 2013. – Vol. 23 (10) – P. 1345–1350. DOI:10.5829/idosi.wasj.2013.23.10.13150.

167. Vavilov, V. E. Hybrid Magnetic Bearing with Axial Displacement of the Annular Magnets / V. E. Vavilov // Russian Engineering Research. – 2015. – Vol. 35, №3. – P. 181–184. DOI: 10.3103/S1068798X1503020X.

168. Грибанов С. В. Разработка магнитного подшипника на основе высокотемпературных сверхпроводящих материалов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. 05.09.01 / Грибанов Сергей Владимирович – М.: МАИ. 2010. – 20 с.

169. Epstein, A. H. Aeropropulsion for commercial aviation in the 21st century and research directions needed / A. H. Epstein // 51st AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. 2013. – Vol. 1 – P. 1–18.

170. Howse, M. All electric aircraft / M. Howse // IEE Power Engineer. –2003.
– Vol. 17, Iss. 4. – P. 35–37.

171. Nelson, F. C. An Aircraft gas turbine configured as a smart machine /
F. C. Nelson, A. M. Cerminaro // IMAC-XVIII: A Conference on Structural Dynamics
'Computational Challenges in Structural Dynamics'. – San Antonio, TX, USA. – 2000. –
P. 1119–1123.

172. Zeng, Z. 2D simulation of the aerodynamic micro air journal bearing for micro gas turbine engine / Z. Zeng, Y.Wang, Z. Wang // 2nd International Conference on Frontiers of Manufacturing and Design Science, ICFMD 2011. – Taichung; Taiwan; December 11–13 2011. – Vol. 121–126. – P. 3087–3091.

173. Cojocaru, C.V. Performance of thermally sprayed Simullite/BSAS environmental barrier coatings exposed to thermal cycling in water vapor environment / C. V. Cojocaru, D. Lévesque, C. Moreau, R. S. Lima // Surface and Coatings Technology. – 2013 – Vol. 216 – P. 215–223.

174. Ryu, K. On the failure of a gas foil bearing: High temperature operation without cooling flow / K. Ryu, L. S. Andres // J. of Engineering for Gas Turbines and Power. -2013. – Vol. 135, Iss. 11. – 112506 (1–10).

175. Giri, L. Agrawal FOIL Air/gas bearing technology ~ an overview / L. Giri // ASME Publication 97-GT-347. – 1997. – P. 2–11.

176. Bulat P.V. The history of the gas bearings theory development / P. V. Bulat // World Applied Sciences Journal. – 2013. – Vol. 27. Iss. 7. – P. 893–897.

177. SpecBearings[Электронный ресурс].URL:http://www.techlab.cz/en/SpecBearings.pdf (дата обращения 3.06.2015)

178. Бесчастных, В. Н. Газовый подшипник тяжелого ротора газотурбинных двигателей. Опыт разработки и перспективы внедрения / В. Н. Бесчастных, Ю. А. Равикович // Вестник МАИ. – 2010. – Т.17, №3. – С. 91–98.

179. Foil Bearings Example Applications [Электронный ресурс] URL: http://www.nano-nano.cc/foil-bearings-applications.html. (дата обращения 4.06.2015).

180. Вавилов В. Е. Hybrid magnetic bearing with axial displacement of the annular magnets // Russian Engineering Research. – 2015. – Vol. 35, №3. – Р. 181–184.

181. Штейн, Д. А. Сопоставление схемотехнических вариантов инверторов в автономной авиационной системе электроснабжения / Д. А. Штейн // Наука. Технологии. Инновации Материалы Всероссийской научной студенческой конференции молодых ученых. – 2012. – С. 215–217.

182. Моделирование работы инвертора напряжения в авиационных электросистемах / А. И. Чивенков, И. С. Панфилов, С. Ю. Панфилов, Н. Н. Вихорев, А. Ghedifa // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2015. – № 1 (108). – С. 217–224.

183. Войтович, В. Si, GaAs, SiC, GaN – силовая электроника. Сравнение, новые возможности / В. Войтович, А. Гордеев, А. Думаневич // Силовая электроника. – 2010. – № 5. – С. 4–10.

184. Мыцык, Г. С. Трехфазные инверторы напряжения, нечувствительные к несимметрии нагрузки / Г. С. Мыцык, М. У. Хлаинг // Вестник Московского энергетического института. – 2016. – № 4. – С. 62–68.

185. Демут, Ф. Технология SiC в модулях SEMIKRON./ Ф. Демут, А. Колпаков // Силовая электроника. – 2014. – № 1. – С. 34–38.

186. Кирстед, П. Второе поколение SiCMOSFET с повышенной эффективностью и сниженной стоимостью / П. Кирстед // Силовая электроника. –

 $2013. - N_{2} 6. - C. 24-26.$

187. Vaviliv, V. E. Selecting the Rotor's Magnetic System in Electromechanical Energy Converters with Highly Coercive Permanent Magnets / V. E. Vavilov // Russian Engineering Research. – 2018. – Vol. 38, №4. – P. 256–259.

188. Vaviliv, V. E. Influence of Rotor Eccentricity in Ultrahigh-Speed Electrical Machines on Their Characteristics / V. E. Vavilov // Russian Engineering Research. – 2018. – Vol. 38 – No. 8 – pp. 617–622

189. Ismagilov, F. R. Application of hybrid magnetic bearings in aviation startergenerators / Ismagilov, F. R., Khairullin I.Kh., Vavilov, V.E., Gumerova, M.B.// International Review of Electrical Engineering. –2014. – Vol. 9, №3. – P. 506–510.

190. Ismagilov, F. R. Electromagnetic processes in the rotor shroud of a High-Speed Magneto-Electric generator under sudden Short-Circuit / Ismagilov, F. R.6 Khairullin I.Kh., Vavilov, V.E. // International Review of Electrical Engineering. -2014. - Vol. 9, No. - P. 913–918.

191. Ismagilov, F. R. Mathematical model of high-frequency electromechanical energy transducer with high-coercitive permanent magnets / Ismagilov, F. R., Khairullin I.Kh., Vavilov, V.E., Yakupov, A.M. // IAENG International Journal of Applied Mathematics. – 2016. – No. 46 – P. 282–290.

192. Ismagilov, F. R. Research of the magnetic field of high-speed magnetoelectric generator / Ismagilov, F. R., Vavilov, V.E. // International Review of Electrical Engineering. – 2016. – Vol. 11, №2. – P. 136–141.

193. Ismagilov, F. R. Transients in Ultra-High-Speed Generators of Micro-Sized Gas Turbines / Ismagilov, F. R., Vavilov, V.E., Yamalov, I.I., Ayguzina, V.V. // Progress In Electromagnetics Research M. – 2017. – Vol. 59. – P. 123–133.

194. Ismagilov, F. R. Topology evaluation of a slotless high-speed electrical machine with stator core made of an amorphous alloy for the aerospace industry. / Ismagilov, F. R., Vavilov, V.E., Bekuzin, V.I., Ayguzina, V.V. // International Review of Aerospace Engineering (IREASE) . -2017. - Vol. 10, No 3. - P. 131-139.

195. Ismagilov, F. R. Magnetic-System Topology Selection for the High-Speed Electrical Machine with Interior Permanent Magnets / / Ismagilov, F. R., Vavilov, V.E., Ayguzina, V.V. // ELEKTROTEHNIŠKI VESTNIK . – 2017. – Vol. 84(4). – P. 181–188

196. Ismagilov, F. R. On the Interaction of Temperature and Magnetic Field in

Electromechanical Energy Converters with Permanent Magnets / / Ismagilov, F. R., Vavilov, V.E., Yamalov, I.I. // Engineering Letters. – 2017. – Vol. 25, № 4. – P. 416–423.

197. Thales Avionics Electrical Systems (2018, March 27). Electrical Power Conversion Solutions - AC to DC. Transformer Rectifier Unit. [On-line]. URL: https://customeronline.thalesgroup.com/sites/default/files/asset/document/transformer_r ectifier_unit.pdf.

198. L3 Communication (2018, March 27). Transformer Rectifier Unit. [On-line]. URL: http://www.l-3mps.com/products/datasheet/EUROATLAS/B6409.pdf

199. Crane Aerospace & Electrinics (2018, March 27). ELDEC TRUs for Upgrades.[On-line].URL:

http://www.craneae.com/Products/Power/Downloads/ELDEC%20TRUs%20for%20Up grades.pdf

200. Yang, T. Functional Modelling of Symmetrical Multi-pulse Auto-Transformer Rectifier Units for Aerospace Applications / T. Yang, S. Bozhko, G. Asher // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2015. – Vol. 30, №9. – P. 4704-4713. DOI: 10.1109/TPEL.2014.2364682.

201. Ismagilov, F. R. 18-Pulse Transformer Rectifier Unit with an Amorphous Magnetic Core for Aircraft / Ismagilov, F. R., Vavilov, V.E., Gusakov, D.V., Vavilova, V.S., Mednov, A.A. // International Review of Electrical Engineering (IREE). – 2018. – Vol. 13, №1. – P. 9–14

202. Исмагилов, Ф. Р. 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

203. Ismagilov, F. R. Reduction of idling losses of eighteen-pulse transformer rectifier unit for aerospace application / Ismagilov, F. R., Vavilov, V. E., Yalalova, Z. I., Gusakov, D. V., & Karimov, R. D. // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science – 2017. – No. 87 – P. 1-6. DOI :10.1088/1755-1315/87/3/032012

204. Гусаков, Д. В. Компьютерное моделирование трансформаторновыпрямительного устройства с магнитопроводом из аморфной стали / Д. В. Гусаков, Д. Р. Масалимов // Электронный научно-практический журнал «Молодежный научный вестник». – 2019. – С. 1–7. 205. Гусаков, Д. В. Повышение энергетической эффективности трансформаторно-выпрямительных устройств летательных аппаратов / Д. В. Гусаков // Материалы международной научно-практической конференции «Электротехнические комплексы и системы». – Уфа: РИК УГАТУ, 2018. – С. 149–150.

206. Гусаков, Д. В. Экспериментальная верификация трансформаторновыпрямительного устройства с гибридным магнитопроводом / Д. В. Гусаков // Межвузовский сборник научных трудов «Повышение надежности и энергоэффективности электротехнических систем и комплексов». – Уфа: Изд-во Энергодиагностика, 2018. – С. 238–240.

207. Гусаков, Д. В. Экспериментальное исследование гибридного магнитопровода трансформатора / Д. В. Гусаков // Электронный научно-практический журнал «Молодежный научный вестник». – 2018. – С. 1–6.

208. Гусаков, Д. В. Трансформаторно-выпрямительное устройство с гибридным магнитопроводом / Д. В. Гусаков // Электронный научно-практический журнал «Молодежный научный вестник». – 2018. – С. 124–127.

209. Spas, S. Energy-based analytical inductance calculation of the novel stator cage machine / S. Spas, D. Gerling, G. Dajaku, A. Greifelt // IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems. – 2016. – P. 1–6.

210. Dajaku, G. Low Costs and High Efficiency Asynchronous Machine with Stator Cage Winding / G. Dajaku, D. Gerling // IEEE International Electric Vehicle Conference (IEVC 2014). – 2014. – P. 1–6.

211. Gerling, D. Analytical Calculation of the Novel Stator Cage Machine / D. Gerling, G. Dajaku, F. Bachheibl, A. Patzak // International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS 2015). – 2015. – P. 1346–1352.

212. Ismagilov, F. R. Optimization of Synchronous Electric Motors with Asynchronous start by genetic algorithms / Ismagilov, F. R., Vavilov, V. E., Urazbakhtin, R.R. // International Review of Aerospace Engineering (I.RE.AS.E). – 2018. – Vol. 11, N_{2} . – P. 66.

213. Исследование синхронных электродвигателей с постоянными магнитами и асинхронным пуском / Ф. Р. Исмагилов, В. Е. Вавилов, В. И. Бекузин, В. В. Айгузина // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2018. – № 1. – С. 26–30.

214. Выбор конструкции синхронного двигателя с постоянными

инкорпорированными магнитами и асинхронным пуском / Ф. Р. Исмагилов, В. Е. Вавилов, В. И. Бекузин, В. В. Айгузина // Вестник МАИ. – 2018. – Т. 25, № 1. – С. 143–156.

215. Медведев, Ю. А. Надежность многодвигательных электрогидроприводов со случайными вариациями параметров / Ю. А. Медведев, В. П. Кузнецов // Вестник машиностроения. – 2010.– № 11.– С. 7–10.

216. Кузнецов, Н. Л. Надежность электрических машин и планирование эксперимента / Кузнецов Н. Л., Котеленец Н. Ф. // Электричество. – 2007. – № 10. – С. 42–44.

217. Фланцевые соединения: конструкции, размеры, расчет на прочность : методические указания / сост. : В.Б. Коптева, А.А. Коптев. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2011. – 24 с.

218. Гольдберг, О. Д. Качество и надежность асинхронных двигателей / О. Д. Гольдберг // Надежность асинхронных двигателей. – М. : Энергия, 1968.– 176 с.

219. Применение постоянных магнитов в электрических системах / гл. ред.
 В. А. Балагуров. – М. : МЭИ, 1984. – 154 с.

220. Постников, И. М. Обобщенная теория и переходные процессы электрических машин / И. М. Постников .– 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1975.–319 с.

221. Masoud Mohammadi . Mathematical modelling of the ventilation system of large turbo generators: Using lumped-parameter model/ Masoud Mohammadi ; Hassan Ansari ; Ali Ashraf Kharamani // The 3rd Conference on Thermal Power Plants. – 2011. – P. 1–5.

222. Bogdan A. V. Asynchronous generator mathematical model for of asymmetrical modes calculation / A. V. Bogdan, N. S. Barakin // 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – 2017. - P. 1-6

223. Wu Xusheng. Research on mathematical models and leakage reactances measurement of double-winding AC-DC generator / Wu Xusheng; Zhang Junhong; Huang Nan; Li Zhongyan // 2008 International Conference on Electrical Machines and Systems. – 2008. – P. 4164–4166.

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

225. Boglietti, A. TEFC induction motors thermal models: A parameter sensitivity analysis / A. Boglietti, A. Cavagnini, D. A. Staton // IEEE Trans. Ind. Appl. – 2005. – Vol. 41, №3. – P. 756–763.

226. Staton D. A. Solving the more difficult aspects of electric motor thermal analysis in small and medium size industrial induction motors / D. A. Staton, A. Boglietti, A. Cavagnini // IEEE Trans. Energy Convers.. – 2005. – Vol. 20, №3. – P. 620–628.

227. Mellor, P. H. Lumped parameter thermal model for electrical machines of TEFC design / P. H. Mellor, D. Roberts, D. R. Turner // Proc. Inst. Elect. Eng. BElectric Power Applications. – 1991. – Vol. 138, №5. – P. 205–218.

228. Bousbaine, A. In-situ determination of thermal coefficients for electrical machines / A. Bousbaine, M. McCormick, W. F. Low // IEEE Trans. Energy Convers. – 2005.– Vol. 10, №3. – P. 385–391.

229. Improved cooling performance of large motors using fans / T. Nakahama,
D. Biswas, K. Kawano, F. Ishibashi // IEEE Trans. Energy Convers. – 2006. – Vol. 21,
№2. – P. 324–331.

230. Vilijan MATOŠEVIĆ. 2D Magneto-thermal analysis of synchronous generator / Vilijan MATOŠEVIĆ, Željko ŠTIH Uljanik TESU d.d // PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY, R. 90 NR. –2014. Vol. 12. – P. 157–160.

231. Vong, P. K. Coupled electromagnetic–thermal modeling of electrical machine / P. K. Vong, D. Rodger IEEE Trans. Magn. – 2003 Vol. 39, №3. – P. 1614–1617.

232. Driesen, J. Finite-element modeling of thermal contact resistances and insulation layers in electrical machines / J. Driesen, R. J. M. Belmans, K. Hameyer // IEEE Trans. Ind. Appl. – 2001. – Vol. 37, №1. – P. 15–20.

233. Zhang, Xiaochen. Electrothermal combined optimization on notch in aircooled high-speed permanent-magnet generator / Zhang, Xiaochen and Li, Weili and Baoquan, Kou and Cao, Junci and Cao, Haichuan and Gerada, C. and Zhang, He // IEEE Transactions on Magnetics. – 2014. – Vol. 51 (1). – P. 8200210.

234. Казаков, Ю. Б. Численное моделирование и разработка конструкций электрических машин с учетом взаимного влияния физических полей / Ю. Б. Казаков // дис. ... д-ра. техн. наук. – Иваново, 2000. – 380 с.

235. Pfister, P.-D. Permanent-Magnet Machines: General Analytical Magnetic Field Calculation / Pierre-Daniel Pfister and Yves Perriard Slotless // IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS. – 2011. – Vol. 47, №6. – P. 1739–1752.

236. LI Wei Li . Thermal analysis of high speed permanent magnetic generator / LI Wei Li Zhang Xiao Chen, Cheng Shu Kang Cao Jun Ci Zhang Yi Huang//Technological Sciences. – 2012. – Vol. 55(5)/– P. 1419–1426.

237. Патент РФ на изобретение № 2626412 Магнитотепловой генератор для космического аппарата / Ф. Р. Исмагилов, И. Х. Хайруллин, В. Е. Вавилов, В. И. Бекузин, В. В. Айгузина. – МПК Н02N10/00, Н02N11/00. Заявка: 2016106903; заявл. 25.02.2016. опубл. 27.07.2017; Бюл. № 21.

238. Вавилов, В. Е. Гибридные магнитные подшипники и их системы управления (исследование и разработка) : автореф. дис. ... канд. техн. наук : Специальность 05.09.03 – Электроэнергетические комплексы и системы / В. Е. Вавилов ; УГАТУ Защищена 20.09.2013 ; Утверждена 05.11.2013 .– Уфа, 2013 .– 16 с.

239. Flyur R. Ismagilov, Gennadiy G. Kulikov, Viacheslav Ye. Vavilov, Valentina V. Ayguzina Improving the quality of designing electromechanical energy converters for aircrafts by using a system-analytical modeling with the application of intelligent information technologies // ICOES 2019, pp.1-6

240. Вавилов, В. Е. Параметры гибридного магнитного подшипника при осевом смещении магнитных колец / В. Е. Вавилов // Вестник машиностроения. – 2014. – №12. – С. 32–34.

241. Вавилов, В. Е. Новые технические решения для создания сверхвысокооборотных электромеханических преобразователей энергии / В. Е. Вавилов // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2016. – № 6. – С. 3–6.

242. Вавилов, В. Е. Многокольцевые радиальные пассивные магнитные подшипники / В. Е. Вавилов // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2016. – № 8. – С. 3–7.

243. Вавилов, В. Е. Математическая модель магнитных подшипников на силах Лоренца для высокооборотных электромеханических преобразователей энергии // Авиакосмическое приборостроение. – 2017. – №5. – С. 33–41.

244. Вавилов, В. Е. Компьютерная модель и экспериментальные исследования сверхвысокооборотного электродвигателя с частотой вращения ротора 500 000 об/мин // СТИН. – 2017. – № 6. – С. 17–21.

245. Вавилов, В. Е. Новая конструкция однополярных магнитных

подшипников// Известия высших учебных заведений / В. Е. Вавилов // Электромеханика. –2018. – № 6. – С. 19–25.

246. Вавилов, В. Е. Влияние эксцентриситета ротора сверхвысокооборотных электрических машин на их характеристики. Аналитическая модель и экспериментальные исследования / В. Е. Вавилов // Станки и инструмент. – 2018. – №2. – С. 5–11.

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

248. Вавилов, В. Е. Оптимизация новой конструкции гомополярного магнитного подшипника / В. Е. Вавилов // СТИН. – 2018. – №8. – С. 17–20.

249. Хайруллин, И. Х. 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.

250. Лохнин В. В. Высокоиспользованные магнитоэлектрические машины: Теория и разработка. Диссертация на соискание уч. степени д.т.н. 1998 г.

251. Анализ устойчивости гибридных магнитных подшипников /
В. Е. Вавилов, А. А. Герасин, Ф. Р. Исмагилов, И. Х. Хайруллин // Известия РАН.
Теория и системы управления. – 2014. – № 1. – С. 137–143.

252. Журавлев, Ю. Н. Активные магнитные подшипники : теория, расчет, применение / Ю. Н. Журавлев .– СПб. : Политехника, 2003 .– 206 с.

253. Хайруллин, И. Х. Исследование электромагнитных демпфирующих элементов систем управления амортизаторами стыковочных механизмов : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : Специальность 05.13.05 – Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления / И. Х. Хайруллин ; Уфимский авиационный институт. – Защищена 25.12.1979. – Уфа, 1979. – 38 с.

254. Исмагилов, Ф. Р. Электромеханические элементы систем управления со сложной геометрией подвижной части : Спец. 05.13.05 – Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления : дис. ... д-ра техн. наук / Ф. Р. Исмагилов.–Уфа : Изд-во УГАТУ, 1998.– 339 с.

255. Саттаров, Р. Р. Электромеханические вибрационные элементы систем управления (развитие теории, разработка и исследование) : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : специальность: 05.13.05 – Элементы и устройства вычислительной

техники и систем управления / Р. Р. Саттаров ; ФГБОУ ВПО Уфимский государственный авиационный технический университет ; науч. рук. Ф. Р. Исмагилов. – 32 с.

256. Метод управления и стабилизации выходного напряжения системы генерирования переменного тока стабильной частоты на базе магнитоэлектрического генератора / В. Е. Вавилов, А. А. Герасин, Ф. Р. Исмагилов, И. Х. Хайруллин, Д. Р. Фаррахов, И. И. Ямалов // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2016. – № 5. – С. 100–106.

257. Иванов-Смоленский, А. В. Электромагнитные поля и процессы в электрических машинах и их физическое моделирование / А. В. Иванов-Смоленский.– М. : Энергия, 1969.– 304 с.

258. Власов, А. И. Исследования по определению оптимальных параметров и структуры системы электроснабжения полностью электрифицированного самолета / А. И. Власов // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2010. – № 4. – С. 2–7.

259. Имитационная модель авиационного стартер-генератора / Ф. Р. Исмагилов, Д. Р. Фаррахов, В. Е. Вавилов и др. // Авиакосмическое приборостроение. – 2014. – №9. – С. 27–32.

260. Патент РФ на изобретение № 2582593 Система защиты магнитоэлектрического генератора от короткого замыкания и способ управления системой / Ф. Р. Исмагилов, В. А. Чигвинцев, И. Х. Хайруллин, В. Е. Вавилов, Д. Р. Фаррахов–Заявка: 2015112532/07, заявл. 06.04.2015. опубл. 27.04.2016; Бюл. № 12.Система стабилизации напряжения и защиты магнитоэлектрического генератора / патент РФ № 2582593

261. 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.

262. Рогинская Л.Э., Стыскин А.В., Караваев А.А. Трехфазный компенсатор реактивной мощности и способ управления им // Пат. России № 2368992. 2009. Бюл. № 27.

263. Design Methodology of the Aircraft Power Generation System / F. R. Ismagilov, V. E. Vavilov, D. V. Gusakov, M. A. Kiselev // 2nd Int. Conf. Electron.

Commun. and Aerospace Technol. (ICECA). – 2018. – P. 1923–1928. DOI: 10.1109/ICECA.2018.8474785

264. Ismagilov, F. R. High-Speed Starter-Generator for Aerospace Applications: Design and Initial Testing, / F. R. Ismagilov, V. E. Vavilov, D. V. Gusakov // XIII Int. Conf. Elect. Mach. (ICEM). – 2018. – P. 2593–2599. DOI: 10.1109/ICELMACH.2018.8507246

265. Shervington, R. Quasi-regulated permanent magnet generator: US Patent 5714823/ R. Shervington, H. Mansir, D. M. Kramer. – 1998.

266. Анализ симметричного короткого замыкания синхронного генератора с возбуждением от постоянных магнитов с учетом изменения частоты вращения ротора / Д. Р. Фаррахов, Ф. Р. Исмагилов, В. И. Мурач, В. Е. Вавилов, С. В. Пантелеев // Авиакосмическое приборостроение. – 2016. – № 9. – С. 31–38.

267. Strength Design on Permanent Magnet Rotor in High Speed Motor Using Finite Element Method / Z. Tao, Y. Xiaoting, Z. Huiping, J. Hongyun // Telkomnika Indonesian J. of Electrical Engineering. –2014.– Vol. 12, №3. – P. 1758–1763.

268. A hybrid analytical model for open-circuit field calculation of multilayer interior permanent magnet machines / Zhang, Z., Xia, C., Yan, Y., Geng, Q. and Shi, T. // J. of Magnetism and Magnetic Materials. –2017. – Vol. 435. – P. 136–145.

269. Исмагилов, Ф. Р. Процессы в бесконтактных магнитоэлектрических генераторах при коротком замыкании / Ф. Р. Исмагилов, И. Х. Хайруллин, В. Е. Вавилов // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2014. – № 3. – С. 14–17.

270. Встовский, А. Л. Токи внезапного короткого замыкания в синхронном генераторе с магнитоэлектрическим возбуждением / А. Л. Встовский, М. Г. Архипцев, К. С. Федий // Ж. Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. – 2013. – Т. 6, № 8. – С. 920–929.

271. Wang, W.Common model predictive control for permanent-magnet synchronous machine drives considering single-phase open-circuit fault / Wang, W., Zhang, J. and Cheng, M. // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2016. – Vol. 32. – $N_{2}7. - P.5862-5872.$

272. Thermal Effect of the Recloser Operation Cycle on Bare Overhead Conductors / Constantinos D. Halevidis, Constantinos G. Karagiannopoulos, Perikles D. Bourkas // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2012. – Vol. 27, № 2. – P. 568–574.

273. Detection of demagnetization faults in permanent-magnet synchronous motors under nonstationary conditions / J.-R. Riba Ruiz, J. A. Rosero, A. G. Espinosa, L. Romeral // IEEE Trans. Magn. – 2009. – Vol. 45, №7. – P. 2961–2969.

274. Mitcham, A. J. Implications of shorted turn faults in bar wound PM machines / A. J. Mitcham, G. Antonopoulos, J. J. A. Cullen // IEEE Proc.-Electr. Power Appl. – 2004. – Vol. 151, №6. – P. 651–657.

275. Arumugam, P. Modeling of different winding configurations for faulttolerant permanent magnet machines to restrain interturn short-circuit current / P. Arumugam, T. Hamiti, C. Gerada // IEEE Trans. Energy Convers. – 2012. – Vol. 27, N $_2$. – P. 351–361.

276. Исмагилов, Ф. Р. 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. – № 2 (538). – С. 12–19.

277. Костенко, М. П. Электрические машины / М. П. Костенко. – М.-Л. :Госэнергоиздат, 1944. – 814 с.

278. Шуйский, В. П. Расчет электрических машин / В. П. Шуйский. Л. : Энергия, 1968. – 731 с.

279. Иванов-Смоленский, А. В. Электрические машины / А. В. Иванов-Смоленский. – М. : Энергия, 1980. – 927 с.

280. Магин, В. В. Высокооборотный генератор на электромагнитных подшипниках для энергетических установок космического назначения / В. В. Магин, А. А. Клабуков, А. В. Рогоза // Электронный журнал «Труды МАИ». – 2011. – № 45. – С. 1–15.

281. Vacuumschmelze//ЭлектронныйресурсURL:http://www.vacuumschmelze.com/ (дата обращения 25.02.2016)

282. Co Huynh. Losses in High Speed Permanent Magnet Machines Used in Microturbine Applications / Co Huynh, Liping Zheng, Dipjyoti Acharya // J. of Engineering for Gas Turbines and Power. – 2009. – Vol. 131, Iss. 2. – P. 1–6.

283. Borisavljevic, A. Limits, Modeling and Design of High-Speed Permanent Magnet Machines / A. Borisavljevic // Printed by Wormann Print Service. – Zutphen, the Netherlands. – 2011. – P. 209. 284. Daniel M. Saban. Experimental Evaluation of a High-speed Permanentmagnet Machine / Daniel M. Saban, Cassandra Bailey, Delvis Gonzalez-Lopez, Ladislau Luca // Experimental evaluation of a high-speed permanent-magnet machine. 2008 55th IEEE Petroleum and Chemical Industry Technical Conference. – 2008. –Vol. 9. – P. 1– 9.

285. Копылов, И. П. Электрические машины / И. П. Копылов. – М. :Энергоатомиздат, 1986. – 360 с.

286. Гольдберг, О. Д. Проектирование электрических машин :учебник для вузов / О. Д. Гольдберг. – М. : Высшая школа, 1984. – 431 с.

287. Балагуров, В. А. Проектирование специальных электрических машин переменного тока / В. А. Балагуров. – М. : Высшая школа, 1982. – 272 с.

288. Slemon, G. R. Core loss in permanent-magnet motors / G. R. Slemon, L. Xian // IEEE Trans. Magn. – 1990. – Vol. 26, №5. – P. 1653–1655.

289. J. G. Zhu, V. S. Ramsden. – P. A. Watterson, "Finite element calculation of core losses in motors with nosinusoidal fields / J. G. Zhu, V. S. Ramsden, P. A. Watterson // Proc. ICEM'92. 1992. – P. 1182–1186.

290. Исмагилов, Ф. Р. Магнитомягкие и магнитотвердые материалы для перспективных электромеханических преобразователей энергии и электрических аппаратов / Ф. Р. Исмагилов, В. Е. Вавилов, В. И. Бекузин. – М. : Инновационное машиностроение, 2017. – 183 с.

291. 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.

292. Dickmann, K. Influence of the laser cutting process on the magnetic properties of electrical sheets / K. Dickmann // Anales de Fisica. – 1990. – Vol. 86. – P. 33–45.

293. Effect of laser cutting on microstructure and magnetic properties of nonoriented electrical steels / A. Belhadj, Y. Houbaert, M. DeWulf, D. Depret, F. Breaban // J. of Magnetism and Magnetic Materials. – 2001. – Vol. 256. – P. 20–31.

294. Schoppa, A. Influence of manufacturing processes on the magnetic properties of N.O. electrical steels / A. Schoppa, J. Schneider, C.D. Wuppermann // J. of Magnetism and Magnetic Materials. -2000. - Vol. 215/216. - P. 74–78.

295. Effect of laser cutting on microstructure and on magnetic properties of grain non-oriented electrical steels / A. Belhadja, P. Baudouinb , F. Breabanc , A. Deffontainec , M. Dewulfd , Y. Houbaert // J. of Magnetism and Magnetic Materials. – 2003. – Vol. 256. – P. 20–31.

296. Loisos, G. Effect of mechanical and Nd:YAG laser cutting on magnetic flux distribution near the cut edge of non-oriented steels / G. Loisos, J. Anthony // J. of Materials Processing Technology. – 2005. – Vol. 161. – P. 151–155.

297. Magnetic Properties and Structure of Non-Oriented Electrical Steel Sheets after Different Shape Processing / T. Bulín , E. Švábenská , M. Hapla , Č. Ondrůšek, O. Schneeweis // ACTA PHYSICA POLONICA A. – 2017. – Vol. 131. – P. 819–821.

298. Lazari, P. Effect of Laser Cut on the Performance of Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Machines / P. Lazari, K. Atallah, J. Wang // IEEE Transactions on Magnetics. – 2015. – Vol. 51, №11. – P. 1.

299. An Evaluation of Alternative Stator Lamination Materials for a High-Speed, 1.5 MW, Permanent Magnet Generator / J. Johannes, H. Paulides, G. W. Jewell, D. Howe // IEEE Transactions on Magnetics. -2004. - Vol. 40, No4. - P. 2041–2043.

300. Яковлев, А. И. Электрические машины с уменьшенной материалоемкостью / А. И. Яковлев. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 235 с.

301. Исмагилов Ф. Р. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014617266. Методика критериального выбора материала магнитопровода статора электромеханических преобразователей / Исмагилов Ф. Р., Хайруллин И. Х., Вавилов В. Е., Якупов А. М. // заявитель и правообладатель Исмагилов Ф. Р., Хайруллин И. Х., Вавилов В. Е., Якупов А. М.; заявл. 2014614782, 22.05.2014; опубл. 20.08.2014.

302. Tong, W., Wu, S., Sun, J., Zhu, L., "Iron Loss Analysis of Permanent Magnet Synchronous Motor with an Amorphous Stator Core," Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2016 IEEE, Hangzhou, China, 7791716, Oct. 2016.

303. Jensen, C. C. A Low-Loss Permanent Magnet Brushless dc Motor Utilizing Tape Wound Amorphous Iron / C. C. Jensen, F. Profumo, T. A. Lipo // IEEE Trans. Ind. Appl. – 1992. – Vol. 28, №3. – P. 646–651.

304. Development of an axial gap motor with amorphous metal cores / Wang, Z., Masaki, R., Morinaga, S., Enomoto, Y., Itabashi, H., Ito, M., Tanigawa, S. // IEEE Trans. Ind. Appl. – 2011. – Vol. 47, №3. – P. 1293–1299.

305. A Novel Tapered Rotating Electrical Machine Topology Utilizing Cut Amorphous Magnetic Material / Ertugrul, N., Hasegawa, R., Soong, W. L., Gayler, J., Kloeden, S., Kahourzade, S. // IEEE Trans. Magn. – 2015. – Vol. 51, №7. P. 8106006.

306. Radam motors [Online]. URL: http://www.radamllc.com/ AmorphousMotors[Online].URL: http://www.brown.edu/Departments/Engineering/Courses/ENGN1931F/AmorphousMotors.pdf.

307. Tang, R. Overview on amorphous alloy electrical machines and their key technologies / Tang, R., Tong, W., Han, X., Chinese // Journal of Electrical Eng. -2016. - Vol. 2, No1. - P. 1–12.

308. Borisavljevic, A. On the Speed Limits of Permanent-Magnet Machines / Borisavljevic, A., Polinder, H., Ferreira, J. // IEEE Trans. Ind. Electron. – 2010. – Vol. 57, №1. – P. 220–227.

309. Ganev, E. High-Performance Electric Drives for Aerospace More Electric Architectures / E. Ganev // IEEE Power Engineering Society Meeting, Tampa, FL, USA. – 2007. – P. 1–8.

310. Zwyssig, C. Mega-Speed Drive Systems: Pushing Beyond 1 Million RPM / Zwyssig, C., Kolar, J.W., Round, S. D. // IEEE/ASME Trans. Mechatronics. – 2009. – Vol. 14, №5. – P. 564–574.

311. Amorphous Motor with IE5 Efficiency Class / Enomoto, Y., Tokoi, H., Imagawa, T., Suzuki, T., Obata, T., Souma, K. // Hitachi Review. – 2015. – Vol. 64, №8. – P. 60–67.

312. Caamano, R.A. Electric motor or generator having laminated amorphous metal core //. Patent US, no. 5903082 A, 1996.

313. Development of a permanent magnet motor utilizing amorphous wound cores //Wang, Z., Enomoto, Y., Ito, M., Masaki, R., Morinaga, S., Itabashi, H., Tanigawa, S. // IEEE Trans. Magn. 2010. – Vol. 46, №2. – P. 570–573.

314. Rührig, M. Stator für eine elektrische Maschine und Verfahren zum Herstellen eines Stators für eine elektrische Maschine / Rührig, M. // Patent DE, no.102012207508 A1, 2012.

315. Amorphous metal stator for a radial-flux electric motor / DeCristofaro, N. J., Ngo, D.A., Bye, R.L., Stamatis, P.J., Fish, G.E. // U.S. Patent 6960860 B1. – 1998. – June 18.

316. Design, Optimization and Initial Testing of a High-Speed 5-kW Permanent

Magnet Generator for Aerospace Application / F. Ismagilov, V. Vavilov, A. Miniyarov, A. Veselov, V. Ayguzina // Progress In Electromagnetics Research C. – 2017. – Vol. 79. – P. 225–240.

317. Тейлор, Д, Ж. Введение в теорию ошибок / Пер.с англ. –М. : Мир, 1985 .–272с.

318. Зайдель, А.Н. Ошибки измерений физических величин .-Перераб.и доп.изд-ние книги "Элементарные оценки ошибок измерений" .-Л. : Наука, 1974 .- 108с.

319. Ануфриев А.С., Макаричев Ю.А., Зубков Ю.В. Энергоэффективность генератора ветроэнергетической установки в условиях изменяющейся частоты вращения. // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2018. № 1 (57). С. 77-82.

320. Смирнов А.Ю. Проектирование высокооборотных генераторов большой мощности с постоянными магнитами на роторе. // Электричество. 2017. № 11. С. 40-45.

321. Исмагилов, Ф. Р. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018661454 Расчет высокомоментного вентильного электродвигателя /; заявитель и правообладатель Ф. Р. Исмагилов, В. Е. Вавилов, И. Ф. Саяхов; заявл. 2018619250, 30.08.2018; опубл. 07.09.2018.

322. Исмагилов, Ф. Р. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018661375 Расчет вентильного электродвигателя для электромеханического привода / Ф. Р. Исмагилов, В. Е. Вавилов, И. Ф. Саяхов; заявитель и правообладатель Ф. Р. Исмагилов, В. Е. Вавилов, И. Ф. Саяхов; заявл. 2018619264, 30.08.2018; опубл. 06.09.2018.

323. Исмагилов, Ф. Р. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018616984 Программа для автоматизированного проектирования электротехнических комплексов генерации / И. Х. Хайруллин, Ф. Р. Исмагилов, В. Е. Вавилов, А. М. Якупов, Р. А. Нургалиева, Г. Ф. Якупова; заявитель и правообладатель И. Х. Хайруллин, Ф. Р. Исмагилов, В. Е. Вавилов, А. М. Якупова; заявл. 2018614124 23.04.2018; опубл. 09.06.2018.

324. Исмагилов, Ф. Р. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017661945 Тепловой расчет авиационных электрических

машин / Ф. Р. Исмагилов, В. Е. Вавилов, А. Х. Минияров, А. А. Меднов; заявитель и правообладатель Ф. Р. Исмагилов, В. Е. Вавилов, А. Х. Минияров, А. А. Меднов; заявл. 2017616943 14.07.2017; опубл. 25.10.2017.

325. Исмагилов, Ф. Р. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016619135 Программа расчета интеллектуальных генераторов с возможностью самодиагностики, позволяющая синтез тепловых, механических и электромагнитных расчетов / Ф. Р. Исмагилов, И. Х. Хайруллин, В. Е. Вавилов, Д. Ю. Пашали, А. Х. Минияров, А. А. Меднов, Н. Г. Тарасов; заявитель и правообладатель Ф. Р. Исмагилов, И. Х. Хайруллин, В. Е. Вавилов, Д. Ю. Пашали, А. А. Меднов, Н. Г. Тарасов; 29.06.2016; опубл. 15.08.2016.

326. Исмагилов, Ф. Р. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016661504 Компьютерная модель, позволяющая робастное проектирование генераторов с возможностью самодиагностики в широком диапазоне выходных параметров / Ф. Р. Исмагилов, И. Х. Хайруллин, В. Е. Вавилов, Д. Ю. Пашали, А. Х. Минияров, А. А. Меднов, Н. Г. Тарасов ; заявитель и правообладатель Ф. Р. Исмагилов, И. Х. Хайруллин, В. Е. Вавилов, Д. Ю. Пашали, А. А. Меднов, Н. Г. Тарасов ; 19.08.2016; опубл. 12.10.2016.

327. Исмагилов, Ф. Р. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016610593 Автоматизированный расчет площади поверхности радиаторов для охлаждения силовой электроники / Ф. Р. Исмагилов, И. Х. Хайруллин, В. Е. Вавилов, Д. Р. Фаррахов, А. Х. Минияров, А. А. Меднов; заявитель и правообладатель Ф. Р. Исмагилов, И. Х. Хайруллин, В. Е. Вавилов, Д. Р. Фаррахов, И. Х. Хайруллин, В. Е. Вавилов, Д. Р. оберахов, И. Х. Хайруллин, В. Е. Вавилов, О. Р. Исмагилов, И. Х. Хайруллин, В. Е. Вавилов, О. Р. Исмагилов, И. Х. Хайруллин, В. Е. Вавилов, О. Р. Исмагилов, И. Х. Хайруллин, В. Е. Вавилов, О. Р. Исмагилов, И. Х. Хайруллин, В. Е. Вавилов, О. Р. Исмагилов, И. Х. Хайруллин, В. Е. Вавилов, О. Р. Исмагилов, И. Х. Хайруллин, В. Е. Вавилов, О. Р. Фаррахов, А. А. Меднов; заявл. 2015661448 25.11.2015; опубл.14.01.2016.

328. Исмагилов, Ф. Р. Свидетельство о государственной регистрации топологии интегральной микросхемы № 2016630079 Микросхема управления силовыми транзисторами с контролем перегрузки по току / Ф. Р. Исмагилов, И. Х. Хайруллин, В. Е. Вавилов, Д. Р. Фаррахов, А. М. Веселов; заявитель и правообладатель / Ф. Р. Исмагилов, И. Х. Хайруллин, В. Е. Вавилов, Д. Р. Фаррахов, А. М. Веселов; заявл. 2016630047, 11.05.2016; опубл. 06.07.2016.

329. Исмагилов, Ф. Р. Свидетельство о государственной регистрации

программы для ЭВМ № 2016662402 Программа управления гибридным магнитным подшипником с использованием сил Лоренца / Ф. Р. Исмагилов, И. Х. Хайруллин, В. Е. Вавилов, Д. Р. Фаррахов, А. М. Веселов, А. М. Леонтьев; заявитель и правообладатель Ф. Р. Исмагилов, И. Х. Хайруллин, В. Е. Вавилов, Д. Р. Фаррахов, А. М. Веселов, А. М. Веселов, А. М. Леонтьев; заявитель и правообладатель Ф. Р. Исмагилов, И. Х. Хайруллин, В. Е. Вавилов, Д. Р. Фаррахов, А. М. Веселов, А. М. Веселов, А. М. Леонтьев; заявл. 2016619794, 19.09.2016; опубл. 09.11.2016

330. Вавилов, В. Е. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015611429 Расчет высокомоментного синхронного двигателя с постоянными магнитами / Р. Р. Мирзаянов, В. Е. Вавилов; заявитель и правообладатель Р. Р. Мирзаянов, В. Е. Вавилов; заявл. 2014663032, 12.12.2014; опубл. 29.01.2015.

331. Вавилов, В. Е. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013617460 Имитационная модель гибридного магнитного подшипника с учетом дисбаланса ротора / В. Е. Вавилов; заявитель и правообладатель В. Е. Вавилов; заявл. 2013615345, 27.06.2013; опубл. 27.06.2013 2013.

332. Вавилов, В. Е. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013617461 Автоматизированный расчет силовых характеристик гибридного магнитного подшипника / В. Е. Вавилов; заявитель и правообладатель В. Е. Вавилов; заявл. 2013615348, 27.06.2013; опубл. 27.06.2013

333. Вавилов, В. Е. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013618555 Расчет тепловых процессов в гибридном магнитном подшипнике / В. Е. Вавилов; заявитель и правообладатель В. Е. Вавилов; заявл. 2013616430, 23.07.2013; опубл. 23.07.2013

334. Вавилов, В. Е. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015616494 Расчет солнечной электроустановки / В. Е. Вавилов, Р.Ф. Афлятонов, Р.З. Ахмадуллин; заявитель и правообладатель В. Е. Вавилов, Р.Ф. Афлятонов, Р.З. Ахмадуллин; заявл. 2015613414, 22.04.2015; опубл. 10.06.2015.

335. Исмагилов, Ф. Р. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015618096 Программа расчета магнитных сопротивлений магнитоэлектрических электромеханических преобразователей энергии / Ф. Р. Исмагилов, И. Х. Хайруллин, В. Е. Вавилов, Н. Г. Тарасов, А. Х. Минияров; заявитель и правообладатель Ф. Р. Исмагилов, И. Х. Хайруллин, В. Е. Вавилов, И. Х. Хайрулин, В. Е. Вавилов, И. Х. Хайруллин, В. Е. Вавилов, И. Х. Хайрулин, В. Е. Вавилов, И. Х. Хайруллин, В. Е. Вавилов, И. Х. Хайрулин, В. Е. Вавилов, А. Х. Хайрулин, А. Х. Хайрулин, А. Х. Хайрулин, А. Х. Хайрулин, А. Х. Хай

Н. Г. Тарасов, А. Х. Минияров; заявл. 2015614977, 03.06.2015; опубл. 30.07.2015.

336. Вавилов, В. Е. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013661823 Трехмерная модель генератора с высококоэрцитивными постоянными магнитами / В. Е. Вавилов ; заявитель и правообладатель В. Е. Вавилов; заявл. 2013619379, 17.10.2013; опубл. 16.12.2013.

337. Вавилов, В. Е. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014614450 Двухмерная компьютерная модель магнитоэлектрического демпфера / В. Е. Вавилов ; заявитель и правообладатель В. Е. Вавилов; заявл. 2014611804, 05.03.2014; опубл. 24.04.2014.

338. Исмагилов, Ф. Р. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015618580 Построение внешних характеристик электромеханического преобразователя энергии высококоэрцитивными с магнитами температуры / P. постоянными С учетом Φ. Исмагилов, И. Х. Хайруллин, В. Е. Вавилов, Н. Г. Тарасов, А. Х.; заявитель и правообладатель Ф. Р. Исмагилов, И. Х. Хайруллин, В. Е. Вавилов, Н. Г. Тарасов, А. Х.; заявл. 2015615537, 17.06.2015; опубл. 12.08.2015

339. Герасин, А. А. Свидетельство о государственной регистрации 2015616969 ЭВМ № Автоматизированный программы для расчет высокоэффективной системы охлаждения высокоскоростного магнитоэлектрического стартер-генератора / А. А. Герасин, Г. А. Чуянов, Ф. Р. Исмагилов, И. Х. Хайруллин, Д. Ю. Пашали, В. Е. Вавилов, А. Х. Минияров, В. В. Айгузина, Н. Г. Тарасов, А. А. Меднов; заявитель и правообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уфимский государственный авиационный технический университет» (RU); заявл. 2015613685, 05.05.2015; опубл. 26.06.2015.

ТВЕРЖДАЮ енеральный директор, лавный конструктор АО «ОКБ «Кристалл» В. Родионов 2019г.

АКТ

внедрения результатов диссертационной работы Вавилова В. Е.

Мы, нижеподписавшиеся, составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Вавилова В. Е. внедрены и используются в АО «ОКБ Кристалл», а именно:

 – результаты исследования потерь в электродвигателях для топливных насосов летательных аппаратов и практические рекомендации по выбору активных материалов для авиационных электродвигателей.

С использованием результатов исследований диссертационной работы Вавилова В. Е., в рамках договора АП–ЭМ–01–18–ХК, была разработана опытная партия (5 штук) электродвигателей с постоянными магнитами ВЭП–40, испытания которых подтвердили их соответствие техническому заданию и показали высокую эффективность предложенных Вавиловым В. Е. технических решений.

Инженер-конструктор 2 категории

Инженер-конструктор 1 категории

Инженер 1 категории

Начальник Отдела перспективных разработок

В.Е. Машков

С.А. Панфилов

Т.А. Львовский

Н.Ю. Львов

УТВЕРЖДАЮ Заместитель генерального директора оГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова» UNA по науке А.И. Ланшин D3 2019 г.

АКТ внедрения результатов диссертационной работы Вавилова В. Е.

Мы, нижеподписавшиеся, составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Вавилова В.Е. внедрены и используются в ФГУП «ЦИАМ им. П. И. Баранова», а именно:

 математическая модель канала генерирования электроэнергии на основе электромеханических преобразователей энергии с высококоэрцитивными постоянными магнитами, позволяющая в том числе проводить исследования и разрабатывать каналы генерирования электроэнергии перспективных гибридных силовых установок.

С применением результатов диссертационной работы Вавилова В. Е. был разработан перспективный канал генерирования электроэнергии для демонстратора гибридной силовой установки, создаваемого ФГУП «ЦИАМ 14.09.2018 Nº госконтракта OT П.И. Баранова» рамках В ИМ. «Исследования И разработка демонстратора 18411.1730290019.18.002 технологий С применением установки гибридной силовой высокотемпературной сверхпроводимости» (НИР «Электролет СУ»). В состав канала генерирования электроэнергии, созданного на основе диссертационной работы Вавилова В.Е., входят электрогенератор мощностью 400 кВт и его система управления.

Начальник отд. 006

Alle

А.Н. Варюхин

Приложение з

УТВЕРЖДАЮ Технический директор АО «УППО», г. Уфа Шагабутдинов З. Х. 2019 г. 01 АКТ

внедрения результатов диссертационной работы Вавилова В. Е.

Мы, нижеподписавшиеся, составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Вавилова В. Е. внедрены и используются в АО «Уфимское приборостроительное производственное объединение», а именно:

 многодисциплинарная методика проектирования каналов генерирования летательных аппаратов;

 методика оптимизации агрегатов каналов генерирования с использованием генетических алгоритмов.

Использование методов, изложенных в диссертационной работе Вавилова В. Е. позволило обеспечить актуализацию и модернизацию производства преобразователей энергии для отечественных летательных аппаратов на АО «УППО».

Главный конструктор АО «УППО» В. Е. Бачманов



ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ «ЭРГА ПЛЮС»



248018, РФ, г. Калуга, ул. Хрустальная, 22 Тел./факс: +7 (4842) 922-199, 794-280 АТС: +7 (4842) 794-268, 794-278 e-mail: info@erga.ru web site: www.erga.ru

УТВЕРЖДАЮ	
Генеральный дире	ектор
ООО «Эрга плюс»	»
цилченном А	Котунов С.В.
оссия + кырул)19 г.

АКТ

внедрения результатов исследовательской работы Вавилова В. Е.

Мы, нижеподписавшиеся, составили настоящий акт о том, что результаты исследовательской работы Вавилова В. Е. совместно со специалистами НПО «ЭРГА» были использованы при изготовлении магнитных роторов T5782 и T6069 с диапазоном частот вращения от 12000 до 60000 об/мин для специальных электрических машин мощностью до 150 кВт.

Испытания изготовленных роторов показали их высокие тактико-технические характеристики, что позволило достигнуть электромеханическим преобразователям в которых они используются необходимой мощности при заданных массогабаритных показателях.

Зам. генерального директора по коммерческим вопросам

В. И.Солопов

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор ООО «АЛЬФАСТИАНО Инжиринг» бедев С. С. ALPHA C. NYDRO 2018 г. AKT

внедрения результатов докторской диссертационной работы Вавилова В.Е. при модернизации установки для испытания на центробежные (линейные) перегрузки (центрифуга) ИУ–126

Настоящий акт составлен о том, что результаты докторской диссертационной работы Вавилова В.Е. внедрены и использовались при модернизации центрифуги ИУ–126 для испытания на центробежные (линейные) перегрузки в г. Уфа на АО «Гидравлика», а именно:

 методология расчета высокооборотных электрических машин и элементов электротехнических комплексов на их основе.

С использованием результатов докторской диссертационной работы Вавилова В.Е. была произведена модернизация установки ИУ–126, работы выполнялись в рамках подпрограммы «Импортозамещение и обеспечение развития оборонно–промышленного комплекса» государственной программы Российской Федерации «Развитие оборонно–промышленного комплекса».

УТВЕРЖДАЮ Проректор по научной и инновационной ВО "УГАТУ" деятельно ександров 2017 г. AKT № 1

УТВЕРЖДАЮ Технический директор АС И. B. Japen (29

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯ МАКЕТА ПЕРСПЕКТИВНОГО ВЫСОКООБОРОТНОГО (12000 ОБ/МИН) ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО СТАРТЕР-ГЕНЕРАТОРА

1. ОБЪЕКТ ИСПЫТАНИЙ

Интеллектуальный стартер-генератор, согласно чертежу № 1207.16.1.02.0000 СБ.

2. ЦЕЛЬ ИСПЫТАНИЙ

Подтверждение соответствия интеллектуального генератора с частотой вращения ротора 12000 об/мин, мощностью 16,5 кВА техническому заданию на СЧ НИОКР «Исследования по разработке принципов и технических решений для электромеханических приводов в исполнительных устройствах воздушного судна и прототипов систем генерации электроэнергии для БЭС»

3. РЕЗУЛЬТАТ ИСПЫТАНИЙ

Испытания интеллектуального стартер-генератора выполнялись на испытательной станции АО «УАПО» при номинальной частоте вращения при номинальной нагрузке. Параметры стартер-генератора соответствовали техническому заданию на СЧ НИОКР «Исследования по разработке принципов и технических решений для электромеханических приводов в исполнительных

устройствах воздушного судна и протетипов систем генерации электроэнергии для БЭС». Протокол испытаний прилагается.

От АО «УАПО» А. А. Жеребцов А. А. Караваев А. Н. Валиахметов

Οτ ΦΓБØУ ΒΟ «УΓΑΤУ» Ф. Р. Исмагилов В. Е. Вавилов Н. Г. Тарасов

Приложение 7

УТВЕРЖДАЮ



УТВЕРЖДАЮ Технический директор АО ТУАПС И.В. Зарембо «23» 08 DA

ПРОТОКОЛ ИСПЫТАНИЙ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ СТАРТЕР-ГЕНЕРАТОР, СОГЛАСНО ЧЕРТЕЖУ № 1207.16.1.02.0000 СБ

1 ЦЕЛЬ ИСПЫТАНИЙ

Целью испытаний является проверка соответствия интеллектуального генератора (1207.16.1.02.0000 СБ) с частотой вращения ротора 12000 об/мин, мощностью 16,5 кВА техническому заданию на СЧ НИОКР «Исследования по разработке принципов и технических решений для электромеханических приводов в исполнительных устройствах воздушного судна и прототипов систем генерации электроэнергии для БЭС»

2 ОБЪЕКТ ИСПЫТАНИЙ

Интеллектуальный стартер-генератор, согласно чертежу № 1207.16.1.02.0000 СБ.

Испытания проводятся в нормальных климатических условиях по ГОСТ 15150-69 на специальном стенде.

- частота вращения ротора генератора – до 12 000 об/мин

- мощность привода при номинальной частоте вращения вала 20 кВт.

- воздушная система охлаждения путем продува воздуха.

Внешний вид генератора на стенде приведен на рисунке 1.



Рисунок 1. Генератор на испытательном стенде 1–активная нагрузка; 2–выпрямительное устройство; 3–испытательный стенд; 4– генератор; 5–воздушная система охлаждения

3 ХОД ИСПЫТАНИЙ

Проверка внешнего вида генератора на соответствие требованиям конструкторской документации (КД) производилась визуальным осмотром, при этом проверялась

• комплектность и соответствие конструкторской документации;

• отсутствие раковин, забоин, трещин, механических повреждений;

• качество кромок, должны отсутствовать острые не притупленные кромки;

• тщательность сборки, качество лакокрасочных покрытий, качество сочленения разъемных узлов, затяжки крепежа и контровки;

• консервацию неокрашенных поверхностей;

1. Измерение сопротивления изоляции обмотки относительно корпуса генератора производят в практически холодном состоянии по ГОСТ 11828-86 мегомметром на 500 В.

Результаты измерения: сопротивления изоляции обмотки относительно корпуса 2 МОм

2. Испытания изоляции обмотки относительно корпуса на электрическую прочность производят синусоидальным напряжением (действующее значение) промышленной частоты 50 Гц в течение 1 мин по ГОСТ 11828-86.

3. Далее производилось снятие осциллограмм напряжения в фазах генератора при разгоне ротора от 0 до 12000 об/мин при холостом ходе. На рисунке 2 приведена частотная характеристика испытуемого генератора, а также осциллограммы напряжения при частоте вращения ротора 6000 об/мин и 12000 об/мин.

Для снятия данных осциллограмм напряжения на выходе генератора выводные концы подключались к измерительным приборам испытательного стенда: амперметр, вольтметр, частотомер. Производилось включение системы охлаждения. Производился плавный разгон генератора от 0 до 12000 об/мин в течение 10 мин. После этого генератора эксплуатировался на номинальной частоте 12000 об/мин 90 минут. Частота вращения вала контролируется по частотомеру, подключенному к

выводным концам генератора. Температура лобовых частей генератора после часа 90 минут эксплуатации без нагрузки составила не более 55 °C, при охлаждении генератора воздухом с температурой 38 °C. Температура измерялась по встроенным в интеллектуальный генератор датчикам температуры.

Осциллограммы и температуры нагрева соответствуют расчетному формуляру. Отклонение от расчетных данных по напряжению составило 1,7 %.



Рисунок 2. Характеристика холостого хода генератора



Рисунок 3. Осциллограммы холостого хода при частоте 12000 об/мин



Рисунок 4. Осциллограммы холостого хода при частоте 6000 об/мин

4. После 90 минут эксплуатации генератор снимался со стенда и разбирался для оценки состояния внутренних частей и обмеривания размеров ротора. Разобранный генератор приведен на рисунке 8. После разбора дефектов не обнаружено, изменение формы бандажной оболочки ротора и ее размеров не выявлено. На рисунке 5 приведен разобранный ротор после 90 минут эксплуатации. Результат визуального осмотра, а также проведенные измерения размеров ротора показали, что нарушений механической прочности и посадок не обнаружено.



Рисунок 5. Ротор генератора после 90 минут эксплуатации

5. Следующим этапом испытаний было измерение КПД стартергенератора. Для этого на холостом ходу оценивалась механическая мощность потребляемая генератором без нагрузки. В этом случае оцениваются все потери в генераторе (магнитные, механические и добавочные) за исключением электрических потерь в обмотке. Электрические потери в обмотке оценивались при нагрузке. Показания снимались с датчика момента. Для обеспечения точности измерений показания снимались в трех временных точках через 10 минут эксплуатации, через 40 минут и через 60. Результаты показаний датчика момента приведены на рисунках 6-8.



Рисунок 6. Показания датчика момента после 10 минут эксплуатации



Рисунок 7. Показания датчика момента после 40 минут эксплуатации

ГЛАВНАЯ Настронки SIEMENS SIEMENS Крутящий MOMENT H"M Темп Расход Давлени 35.0 Град M3/4 999.82 0.85 76 89 Вентилятор Нагреватель Привод в РАБОТЕ Привод ГОТОВ вкл выкл вкл УПРАВЛЕНИЕ Режим управления Гемпература 12000.00 Мин-1 ABTO учной 35.0 rpa 60.0 70.0 Герц

Рисунок 8. Показания датчика момента после 50 минут эксплуатации Во всех трех временных точках показания датчика момента составляли 0,1 Нм при частоте 12000 об/мин. Следовательно потребляемая генератором мощность составила 125 Вт (механические, аэродинамические и магнитные потери).

При нагрузке, при мощности 13,66 кВт ток на выходе генератора составлял 37,7 А, а сопротивление фазы 0,13 Ом. Тогда электрические потери в обмотке генератора составляли 554,3 Вт. Полные потери в генераторе при мощности 13,6 кВт составляли 679,3 Вт. Тогда КПД генератора составляло 95,2 %.

6. Снятие осциллограмм напряжения и тока в фазах генератора при разгоне при частоте 12000 об/мин при различных активных нагрузках. Выводные концы генератора подключаются к регулируемой нагрузке (величина нагрузки устанавливается 20, 40, 60, 80 и 100%).

Для снятия осциллограммы напряжения на выходе генератора выводные концы подключаются к нагрузке и измерительным приборам испытательного стенда: амперметр, вольтметр, частотомер. Производится включение системы охлаждения. Производится плавный разгон генератора от 0 до 12000 об/мин в течение 10 мин. Частота вращения вала генератора контролируется по частотомеру,

подключенному к выводным концам генератора. Температура частей генератора определяется в конце теплового режима с помощью термопары, плотно прижатой к поверхности измеряемого элемента. Температура нагрева частей определяется путем суммирования температуры среды окружающей генератор и температуры измеренной с помощью термопары.

После этого генератор плавно нагружался через трансформаторновыпрямительное устройство с перегрузочной мощностью до 14 кВт нагрузками по току 4,6 кВт, 8,5 кВт, 11,2 кВт, 13,6 кВт и полуторакратной перегрузкой по току. Возможности нагрузки ограничивались технологическими возможностями. Результаты измерений приведены на рисунке 9. Измерения выполнялись при двух частотах 11000 и 12000 об/мин.



Рисунок 9. Результаты испытаний под нагрузкой

Генератор выдержал испытания.

7. Со всторенных в интеллектуальный генератор датчиков вибраций марки DS-1 производилась оценка виброперемещений ротора в радиальном и осевом направлении. Уровень виброперемещений не превысил допустимые значения (0,09 мкм), установленные в техническом задании на СЧ НИОКР «Исследования по разработке принципов и технических решений для электромеханических приводов в исполнительных устройствах воздушного судна и прототипов систем генерации электроэнергии для БЭС». Интеллектуальный генератор выдержал испытания.

стартер-генератора на выполнялись Испытания интеллектуального Вывод. испытательной базе АО «УАПО» при номинальной частоте вращения при Параметры стартер-генератора соответствовали номинальной нагрузке. № АП-ЭМ-05-16-ХГ СЧ НИОКР договору на техническому заданию к

(госконтракт 16411.1770290019.18.017), шифр «Эксперимент-Комплект – УГАТУ», «Исследования по разработке принципов и технических решений для электромеханических приводов в исполнительных устройствах воздушного судна и прототипов систем генерации электроэнергии для БЭС»

Зав. каф. ЭМ в.н.с. каф. ЭМ ү инженер каф. ЭМ

Ф. Р. Исмагилов В. Е. Вавилов Н. Г. Тарасов

ПРОТОКОЛ №ЦП/143-П-1116

от 08.11.2016

исследовательских испытаний макетного образца ПМГ

1 ОБЪЕКТ ИСПЫТАНИЯ

Макетный образец МЭГ-100Ч №1

. .

2 ОСНОВАНИЕ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ

Программа испытаний макетного образца МЭГ-100Ч №1 по п.5 данного протокола.

3 ЦЕЛЬ ИСПЫТАНИЯ

Подтверждение работоспособности макетного образца МЭГ-100Ч №1.

4 ИСПЫТАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Испытательный стенд с редукторным приводом (Леонардо)	зав.№: 00712103
Осциллограф цифровой GD INSTEK GDS-71022	зав.№ ЕІ 121675
Осциллограф цифровой GD INSTEK GDS- 71062	зав.№ GEO 180121
Осциллограф цифровой LeCroy WaveAce 222	зав.№000090455000
Реостат балластный РБ-302 б.н	3 шт.
Токовый щуп FLUKE 80i-110s	зав.№ 107200
Токовый шунт 75ШСММЗ-100-0,5	

5 ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ИСПЫТАНИЯ

5.1 Снять осциллограмму напряжения по фазе А на холостом ходу при частоте вращения 3000 об/мин.

5.2 Снять осциллограммы напряжения и тока по фазе А при нагрузке 50А в каждой фазе при частоте вращения 3000 об/мин.

5.3 Снять осциллограммы напряжения и тока по фазе А при нагрузке 100А в каждой фазе при частоте вращения 3000 об/мин.

6 РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЯ

Рис. 1 Осциллограмма напряжения фазы А на холостом ходу, n = 2430 об/мин.









Рис. 3 Осциллогрмма напряжения фазы А при нагрузке 100А, n = 3000 об/мин.



Рис. 4 Осциллогрмма тока фазы А при нагрузке 100А, n = 3000 об/мин.

(1 А = 0,75 мВ при измерении с использованием токового шунта)

А.А. Жеребцов Зам.гл.констр. – нач.отд.ЭМ ДСЭС А.А. Караваев Вед. инж.-технолог ДСЭС В.М. Зулкарнеев Инж. - испытатель ДСЭС В.Е. Вавилов С.н.с. кафедры ЭМ ФГБОУ ВО «УГАТУ

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель главного конструктора по направлению АО «ОКБ «Кристалл» И.В. Берсенев « 22 » 12 2017г.

AKT Nº 42/2017-KOMA. 2. OT 22.12.2017 2.

по результатам испытаний макета управляемого вентильного электропривода ЭТН-91В в составе насоса ЭЦН-91С.

1. Согласно исх. №КТС/5973 от 20.12.2017 в АО «ОКБ «Кристалл» командирован начальник отдела электрических машин АО «УАПО» Жеребцов А.А. для проведения испытаний макета управляемого вентильного электропривода ЭТН-91В (состоит из макета вентильного двигателя ВД-12.05 и плоского макета инвертора СУ-1АВ №1) (далее двигатель) в составе насоса ЭЦН-91С.

2. Программа испытаний:

2.1. Сборка электронасоса с крыльчаткой, подрезанной по внешнему диаметру до Ø46 мм.

2.1.1. Снятие характеристик электронасоса на режимах обкатки по техническим условиям 5134.000 ТУ. Частота вращения двигателя 7200 об/мин в соответствии с ТЗ на ОКР по теме: «Разработка электропривода ЭТН-91В для электроцентробежного топливного насоса ЭЦН-91В».

2.1.2. Снятие характеристик электронасоса на режимах обкатки по техническим условиям 5134.000 ТУ. Выставить перепад давления, создаваемый насосом, 0,40 кгс/см² (средний перепад давления на серийных электронасосах) на режиме подачи насоса 3800 л/ч. Перепад давления регулируется за счет изменения частоты вращения двигателя.

2.2.Сборка электронасоса со штатной крыльчаткой.

2.2.1. Снятие характеристик электронасоса на режимах обкатки по техническим условиям 5134.000 ТУ. Потребляемый ток двигателя выставить 6,20 А (средний ток для серийных двигателей МП-100С-3С на данном режиме) на режиме подачи насоса 3800 л/ч. Ток регулируется за счет изменения частоты вращения двигателя.

2.2.2. Снятие характеристик электронасоса на режимах обкатки по техническим условиям 5134.000 ТУ. Потребляемый ток двигателя выставить 8.5 А (максимально допустимый потребляемый ток двигателя МП-100С-3С по техническим условиям 5134.000 ТУ) на режиме подачи насоса 3800 л/ч. Ток регулируется за счет изменения частоты вращения двигателя.

2.2.3. Снятие характеристик электронасоса на режимах обкатки по техническим условиям 5134.000 ТУ. Выставить перепад давления, создаваемый насосом, 0,29 кгс/см² (минимально допустимый перепад давления по техническим условиям 5134.000 ТУ) на режиме подачи насоса 3800 л/ч. Перепад давления регулируется за счет изменения частоты вращения двигателя.

3. Результаты испытаний приведены в приложении.

Выводы:

1. По результатам испытаний по п. 2.1.1 электронасос не соответствует требованиям техническим условиям 5134.000 ТУ в части тока, потребляемого насосом. По ТУ, не более 8.5 А. Фактически 9.84 А при подаче 3800 л/ч. Перепад давления создаваемый насосом выше среднего значения для серийных насосов ЭЦН-91С. Значение перепада давления на выходе из насоса на 70% превышает требование технических условий 5134.000 ТУ при подаче 3800 л/ч.

2. За счет возможности изменения частоты вращения вала двигателя путем изменения сопротивления переменного резистора установленного в цепь макета инвертора СУ-1АВ №1, выставлено значение перепада давления, создаваемого насосом, до среднего значения для серийных насосов ЭЦН-91С, п. 2.1.2. Ток снизился до требований технических условий 5134.000 ТУ на всех режимах работы насоса.

3. По результатам испытаний по п.п. 2.2.1, 2.2.2, 2.23 электронасос соответствует техническим условиям 5134.000 ТУ на всех режимах работы предусмотренной программой испытаний.

Приложение: 5 листов.

АО «УАПО» Начальник отдела электрических машин

Жеребцов А.А. 22.12.12

АО «ОКБ «Кристалл»

Начальник КО

Ганькин М.А. Ame

Зам. начальника КО по направлению

Маслов К.Г.

					ГОСТ 3.1	105-84 Форі	ма 5 а	8P-534	-2	
\vec{s}_{κ}	Ja	Tipe	пожени	e 1	Трогра	амма испытан	cut n. 2	2.1.1	1	
	Дал	/				ЭЦН	91 C	Nº		
	Подпись	I	Монтаж	asbesawa ut	ооизвел:					
	Извещ.		Слесарь: Электрин	Скобе к: Ульян	елев В.В. 108 В.Н. 2950-1198 жидкост	21.12.2017 г. 21.12.2017 г. т. <u>22,67</u> °с (по ТУ t _{рж} =(25±10)°с)				
	BBed.		эстаноо Темпера	ки N=01274 Р тура рабоче	ά жидкости					
	ата Изм.	КυΜ	тель «има,мин	ение на .х эл. пеля, В	Ποдαчα	Ток, потребляемый насосом, А		Перепад давления, создаваемый насосом, кгс/см ²		
	Juich D	Pey	Продолжи ность рех	Напряж6 клема двигаг	насоса, л/ч	по ТУ не более	факти– чески	по ТУ не менее	факти– чески	
		1	10	27±0,3	3800	8,50	9,84	0,29	0,49	
		2	10	27±0,3	1500	8,50	8,93	0,29	0,86	
	Иав	3	5	30±0,3	0	измерить	9,59	измерить	1,37	
	MCN NCN	Примечание – Перепад давлений, создаваемый насосом при работе на топливе с другой плотностью, изменяеся пропорционально изменению плотности топлива. Проверка герметичности Просачивание рабочей жидкости в дренаж см ³ /ч (по ТУ не более 0.25 см Во время работы и в нерабочем состоянии герметичность по стенкам наружных деталей и в местах стыков по ОСТ 1 00128–74 группа (по ТУ группа 1–7)								
			Примеч	ание - Обнар	уженные дефект	ты записать в "Ка	арту дефектов.			
		_	Заключ	ение	Не соответстви	етствует ет. не соответств	ует)			
		lodnuce		Испытатель ОТК	ь Романов А.	И.	21	. <i>12.2017</i> г.		
$\left - \right $	+		Демон	таж агрегата	произвел					
		Инв. N ^e		Слесарь Электрик	Скобелев Ульянов В	B.B. .H.	21 21	.12.2017 г. .12.2017 г.		
	έĿ	-	Внешн	ий осмотр аг	регата произвел					
<u>Auð</u>	Под,			ОТК		11	11	г.	Concernation and	
					ĸ	מחשם טעַאַמשאו	11		10	

			•		ГОСТ 3. ⁻	1105-84 Фор	ма 5 а	8P-534	-2	
,	ma	Tipe	ІЛОЖЕНЦ	ie 2	TIPOZP	анна испытан	ний п. 2.1.2) ,	1	
	До					ЭЦН	91 C	Nº		
	органия и произвел								190	
	ßeщ.		Слесарь: Электрин	Скобе <: Ульян	елев В.В. 10в В.Н.	22.12.2017 г. 22.12.2017 г.				
	ðеð. Из		Чстанов Темпера	ка №812/4 F тура рабоче	абочая жидкосп й жидкости	ль <u>TC-1</u> _20,80 °с (по	ρ=	см ³ (по ТУ - 0,78 °с)	г/см ³)	
	Изм. ВІ		ь а,мин	, B B		Ток, потребляемый		Перепад да создавае	вления, емый	
	dama	МПЖ	ител ежим	кение ах э	НОСАЧА	ΗΔΕΟΕ	ОМ, А	насосом, н	<гс/см ²	
<u> </u>	Jnuch ,	Pe	Продолж Ность ре	Напряж клем двига	л/ч	по ТУ не более	факти– чески	по ТУ не менее	факти чески	
	Πo	1	10	27±0,3	3800	8,50	7,18	0,29	0,40	
-		2	10	27±0,3	1500	8,50	6,19	0,29	0,65	
	Изве	3	5	30±0,3	0	измерить	6,27	измерить	1,01	
\frown	Изм. В0		Приме друго Просо Во в деталей	сосом при рабо изменению пло см ³ /ч (по 1етичность по ппа	те на топливе тности топлив ТУ не более 0 стенкам наруж _(по ТУ группа	с а. 9.25 см ³ /ч ных 1–7)				
			Примеч	ание - Обнар	уженные дефект	ъ записать в "Ка	рту дефектов".			
			Заключ	ение	ТУ соотве	етствует	(OT)			
	<u>Nama</u>	(Ту соответствует, не соответствует) Направляется на переборку.								
	Подпись		Демонт	Испытатель ОТК гаж агрегата і	Романов А. произвел	<i>1. 22.12.2017</i> г.				
	NHB Nº			Слесарь Электрик	Скобелев I Ульянов В	3.B. .H.	22. 22.	12.2017 г. 12.2017 г.		
М.	<u>ј</u> л.	1	Внешни	ий осмотр агр	егата произвел					
Au5 Bad	Пог			ОТК			11	Г.		
					K	арта обкатки			1	

-

	ГОСТ 3.1105-84 Форма 5 а 8Р-534-2												
		6	1	Три	ложени	e 3		Прагр	панта испытании п. 2.2.1 1				
		ЛПП							ЭЦН 91 С №				
		odnirt.	סחומרה	١	Чонтаж (ıspesama np	оизвел	:					
-		80.11	nem.	(Слесарь: Электрик	Скобе. : Ульян	пев В.Е ов В.Н.	. 22.12.2017 г. 22.12.2017 г.					
-			060. NI		Чстановн Темпераг	ка №812/4 Р пура раδоче	абочая ū жидк	и жидкост ости	идкость <u>TC-1</u> ρ= r/см ³ (по TУ - 0,78 г/см ³) u <u>21,16</u> °c (по TУ t _{pж} =(25±10) °c)				
			IMA N3M. B	MΠ	пель кима,мин	ние на х эл. іеля, В	По	Подача	Ток, потребляемый насосом, А		Перепад давления, создаваемый насосом, кгс/см ²		
\cap	Ň		Inuce <u>4</u> 0	Pe¥	Продолжиг ность реж	Напряже клема двигат	нa	coca, n/ч	по ТУ не более	факти– чески	по ТУ не менее	факти– чески	
			ГоЛ	1	10	27±0,3	Ξ	800	8,50	6,16	0,29	0,35	
			Ш.	2	10	27±0,3	1	1500	8,50	5,58	0,29	0,65	
			Изве	3	5	30±0,3		0	измерить	5,39	измерить	0,90	
	Примечание – Перепад давлений, создаваемый насосом при работе на топливе В Примечание – Перепад давлений, создаваемый насосом при работе на топливе В другой плотностью, изменяеся пропорционально изменению плотности топлив										с а.		
Проверка герметичности Просачивание рабочей жидкости в дренажСм ³ /ч (по ТУ не более 0.25 см Во время работы и в нерабочем состоянии герметичность по стенкам наружных деталей и в местах стыков по ОСТ 1 00128-74 группа(по ТУ группа 1-7)).25 см ³ /ч) кных 1 1-7)			
					приме			T) (omenavan				
	ГТ	T	Т		Заключ	ение	(ТУ со	ответству	ет, не соответств	зует)			
Направляется на переборку.													
			lodnucb			Испытателі ОТК	5 P	Романов А	.И.	2.	<u>2.12.201</u> 7 г.		
	$\left \right $	+			Демон	таж агрегата	произв	вел					
	전 Слесарь 연구 Электрик							Скобелев Ильянов I	В.В. 3.Н.	22 22	2.12.2017 г. 2.12.2017 г.		
	.v	Σ̈́			Внешн	ий осмотр аг	регата	произвел					
	дцб	Bad	100			ОТК			II	11	Г.		
								٢	(арта обкатк	U		10	
					ГОСТ	3.110	5-84 Форм	ia 5 a	8P-534-	-2			
------------	--------------	------------------	------------------------	---	--	--------------------------------	--	--	---	--			
	U	Tin	потение	. 4	Tipa	гран	ма испытани	и́п. 2.4	2.2	1			
	Дат	1100					ЭЦН 9	91 C	Nº				
	JCb					L							
	Подп		Монтаж (ıspesama np	оизвел:								
	+		Слесарь:	Скобе.	пев В.В.			22.12	2.2017 г. 2.2017 г.				
	abeut		Электрик	: Ульян	ов В.Н.				3/202, $1/0.078$	(cm ³)			
	2		Установ: Темперал	ка №812/4 Р пипа рабоче	абочая жиді ū жидкости	кость	<u>ТС-1</u> ғ 21 <i>,</i> 48 °с (по	Ty $t_{px} = (25 \pm 10)$	°c)	/ CM /			
	BAAd								րը ըստոց	Вления			
	МсИ	1.1014	В 40 МПН				Ток, потре	абляемый	создавае	мый			
		MU	иель кима	ние х эл.	Подача	одача насо		ом, А	насосом, кгс/см ²				
		Pex	лжи реж	ряже 1ема ⊔гап	насоса	'	ρο ΤΥ	факти-	по ТУ	факти-			
\bigcirc	Dodo ocmb	Han K, JB	/\/ 4		не более	чески	не менее	чески					
			<u> </u>	27±0.3	3800		8,50	8,47	0,29	0,51			
			10	27+0.3	1500		8,50	7,44	0,29	0,82			
		Maßeщ.	5	30±0,3	0		измерить	7,55	измерить	1,20			
		Изм. Введ.	Приме друг	чание – Пер ой плотност	епад давлен ью, изменяе	ний, со ся про	оздаваемый на опорционально	сосом при рабо изменению пло	оте на топливе отности топлив	с а.			
			Прос Во б детале	Проверка г ачивание ра Зремя работ й и в места	ерметичносі бочей жидка ы и в нераб х стыков па	mu ocmu (бочем с ОСТ	3 дренаж состоянии герг 1 00128-74 грц	см ³ /ч (п метичность по јппа	о ТУ не более (стенкам нару) (по ТУ группс).25 см ³ /ч) кных 1 1–7)			
			Примеч	ание - Обна	руженные де	ефекті	ы записать в "Ка	арту дефектов"					
			Заключ	ение	ТУ со	отве	тствует						
		ıma	Happel		(ТУ соответ	тствуе	т, не соответств	syer					
		Да	Напри		Power	JOB A I	И	. 2	<i>2.12.2017</i> г.				
		nuch		отк Отк	o roiviar	100 7.0							
		Под	Демон	ітаж агрегата	произвел								
	-	-	H2	Croconi	Скобе	елев В	3.B.	22	2.12.2017 г.				
		MHB.		Электрик	Ульян	нов В.	Н.	22	2. <i>12.2017</i> г.				
		$\left \right $	Внешн	ний осмотр а	грегата прои	ізвел							
Дцбл.	Baam	1001		ОТК			п	п	۲.				
						K	арта обкатк	(U		10			

Урименение 7 Тучуний ЗЦН 91 С М ЗЦН 91 С М Вактрик: Уляннов В.В. Злектрик: Уляннов В.Н. ЗЦИ 91 С Г. 2.12.2017 г. Злектрик: Уляннов В.Н. Четанабка №812/4 Рабоча жидкости TC-1 Рег Г. 2.12.2017 г. ЗЦК Четанабка №812/4 Рабоча жидкости 21.48 °C (по ТУ 1,(25210) °C) Рег Падача Насоса, Насоса, Насоса, Падача Насоса, Паделад Насоса, 10 27±0,3 3800 8,50 8,47 0,29 0,51 11 27±0,3 1500 8,50 7,44 0,29 0,82 12 10 27±0,3 1500 8,50 7,44 0,29 0,82 13 5 30±0,3 0 измершть 1,20 14 10 27±0,3 1500 8,50 7,44 0,29 0,51 14 10 27±0,3 1500 <th>1</th> <th></th> <th></th> <th>1</th> <th>4</th> <th>Toarpa</th> <th>чних испытании</th> <th><u>и́ п. 2.</u></th> <th>2.2</th> <th>1</th>	1			1	4	Toarpa	чних испытании	<u>и́ п. 2.</u>	2.2	1
Отен Отенствии От		Jama	Тірил	омение	.7		ЭЦН 91 С №			
1 1		у Монтаж агрегата произбел Слесарь: Скобелев В.1 Электрик: Ульянов В.Н Установка №812/4 Рабочая			агрегата пр Скобел : Ульян ка №812/4 Р пура рабоче	оизвел: пев В.В. ов В.Н. абочая жидкост а жидкости	Λ: .B. 22.12.2017 г.			/см ³)
Цариан Калари		іта Изм. <u>В</u> ве	MU	пель кима,мин	ние на х эл. пеля, В	Ποσανα	Ток, потре насосо	ебляемый ом, А	Перепад да создавае насосом, к	дления, мый гс/см ²
Ген 1 10 27±0,3 3800 8,50 8,47 0,29 0,51 1 2 10 27±0,3 1500 8,50 7,44 0,29 0,82 3 5 30±0,3 0 измерить 7,55 измерить 1,20 1 10 27±0,3 0 измерить 7,55 измерить 1,20 3 5 30±0,3 0 измерить 7,55 измерить 1,20 100 20±0,0 полотностью, измерить 0,03080400000000000000000000000000000000	N.	пись Дс	Реж	Продолжиг Ность ре ^у	Напряже клема двигал	насоса, л/ч	по ТУ не более	факти- чески	по ТУ не менее	факти чески
1 2 10 27±0,3 1500 8,50 7,44 0,29 0,82 3 5 30±0,3 0 изнерить 7,55 измерить 1,20 1 <th1< th=""> 1 1</th1<>		Под	1	10	27±0,3	3800	8,50	8,47	0,29	0,51
в з 5 30±0,3 0 изиерить 7,55 измерить 1,20 Примечание - Перелад давлений, создаваемый насосом при работе на топливе с другой плотностью, изменяеся пропорционально изменению плотности топлива. Проворка герметичности Просачивание рабочей жидкости в дренаж(m ³ /ч) (по ТУ не более 0.25 см ³ /ч) Во время работы и в нерабочем состоянии герметичность по станкам наружных деталей и в местах стынов по ОСТ 1 00128-74 группа (по ТУ группа 1-7) Примечание - Обнаруженные дефекты записать в "Карту дефектов". Заключение	ŀ		2	10	27±0,3	1500	8,50	7,44	0,29	0,82
Примечание - Перепад давлений, создаваемый насосом при работе на топливе с другой плотностью, изненяеся пропорционально изменению плотности топлива. Проверка герметичности Просачивание рабочей жидкости в дренаж см ³ /ч (по ТУ не более 0.25 см ³ / Во время работы и в нерабочем состоянии герметичность по сточкам норужных деталей и в местах стыков по ОСТ 1 00128-74 группа (по ТУ группа 1-7) Примечание - Обнаруженные дефекты записать в "Карту дефектов". Заключение Сту соответствует) Направляется на переборку. Испытатель Романов А.И. 22.12.2017 г. ОТК Демонтаж агрегата произвел. Слобелев В.В. 22.12.2017 г. Убщер ОТК Ульянов В.Н. 22.12.2017 г.		Извеі	3	5	30±0,3	0	измерить	7,55	измерить	1,20
Заключение ТУ соответствует (ТУ соответствует) Направляется на переборку. Испытатель Романов А.И. 22.12.2017 г. Испытатель Романов А.И. 22.12.2017 г. ОТК Демонтаж агрегата произвел Слесарь Скобелев В.В. 22.12.2017 г. Испытатель Романов А.И. 22.12.2017 г. Слесарь Скобелев В.В. 22.12.2017 г. Внешний осмотр агрегата произвел ОТК Ульянов В.Н. 22.12.2017 г.	Примечание – Перепад давлений, создаваемый насосом при работе на топливе с другой плотностью, изменяеся пропорционально изменению плотности топлива. Проверка герметичности Просачивание рабочей жидкости в дренажсм ³ /ч (по ТУ не более 0.25 см ³ . Во время работы и в нерабочем состоянии герметичность по степкам наружных деталей и в местах стыжов по ОСТ 1 00128–74 группа(по ТУ группа 1–7) Примечание - Обнаруженные дефекты записать в "Карту дефектов".							с а.).25 см ^{3/,} кных 1 1–7)		
Image: Прессистацие (ПУ соответствует) Направляется на переборку. Image: Прессистацие (ПУ соответствует) Испытатель Романов А.И. 22.12.2017 г. Image: Прессистацие (ПУ соответствует) Испытатель Романов А.И. 22.12.2017 г. Image: Прессистацие (ПУ соответствует) Испытатель Романов А.И. 22.12.2017 г. Image: Прессистацие (ПУ соответствует) Испытатель Романов А.И. 22.12.2017 г. Image: Прессистацие (ПУ соответствует) Попытатель Романов А.И. 22.12.2017 г. Image: Прессистацие (ПУ соответствует) Слесарь Скобелев В.В. 22.12.2017 г. Image: Прессистацие (ПУ соответствует) Попытатель Романов А.И. 22.12.2017 г. Image: Прессистацие (ПУ соответствует) Попытатель Романов В.В. 22.12.2017 г. Image: Прессистацие (ПУ соответствует) Попытатель Романов В.Н. 22.12.2017 г. Image: Прессистацие (ПУ соответствует) Попытатель Романов В.Н. 22.12.2017 г. Image: Прессистацие (ПУ соответствует) Попытатель Романов В.Н. 1000000000000000000000000000000000000				Заключ	нение	ТУ сооте	emcmeyem	war		
Испытатель Романов А.И. 22.12.2017 г. ОТК ОТК Демонтаж агрегата произвел			ama	Hanpa	вляется на г	(ту соответств) переборку.	иет, не соответств			
Респользование Слесарь Скобелев В.В. 22.12.2017 г. ОТК Ульянов В.Н. 22.12.2017 г. Внешний осмотр агрегата произвел ОТК г.	+		I lodnuce	Демон	Испытател ОТК атаж агрегата	ь Романов А произвел	Л.И.		<u>22.12.2017</u> г.	
Внешний осмотр агрегата произвел		_			Слесарь	Скобелев Ульянов	в.В. В.Н.	2 2	2.12.2017 г. 2.12.2017 г.	
			NHB. N		Электрик					

					101 3.11	05-84 ФОРМО	1 5 L 1 n 2.2.	3	1
1.1		гил	Ожени	e 5	//poz.pa	MMQ UCNERILA			
	Па					ЭЦН 97	1 C	Nº	
	ПСÞ				С – а.				
	Подп	Mo	нтаж а	ispesama npo	130en:		22 12	2017 г.	
Слесарь: Скобелев В.В.			ев В.В. в В.Н.		22.12	2.2017 г.			
	13Beu	эл	ектрик.		צמותם אווקאטנש	5 ΤΓ-1 Ρ	= г/с	см ³ (по ТУ - 0,78 г ,	/см ³)
	Ē	Уc Te	тановк мперал	ка №81274 Ри пура раδочеџ	жидкости	21,32 °c (no T	ГУ t _{рж} =(25±10)	°с)	
	BBe							Перепад дав	уления,
	Изм		,MUH	на. , В		Ток, потре	оляемыц м. А	создавае	мый
			жима	ение ис хт теля				насосом, к	SC/CM
-			ы ре	пряж лем(Зига	л/ч	no TY	φακπυ-	по ТУ	φακπι
	JUCP		locm	Har K df		не более	чески	не ме нее	icen
	Подг	1	10	27±0,3	3800	8,50	5,54	0,29	0,29
-		2	10	27±0,3	1500	8,50	4,95	0,29	0,55
	13Bew	2	5	30+03	0	измерить	4,80	измер ить	0,84
8	B		эмидП ѕиаб	ачание – Пера ой плотность	enad давлении, 510, изменяеся г	создаваемый нас пропорционально	изменению пл	отности топлив	α.
	Изм. Ве		Приме друг Прос Во детало	ечание – Пере юй плотность Проверка г сачивание ра время работь ей и в места	тад довлении, мо, изменяеся г ерметичности Бочей жидкости и и в нерабоче к стыков по ОС	создаваеный нас пропорционально и в дренаж м состояний герг Т 1 00128-74 гру	сосом про рас изменению пл см ³ /ч (г четичность по јппа	оту на топлив оту не более о стенкам нару) (по ТУ группа	од. 0.25 см ³ «ных д 1–7)
	Изм. Bf		Приме друг Прос Во детала Приме	енание – Пере ой плотность Проверка г сачивание ра время работь ей и в места счание - Обнар	над девлении, мо, изманяеся г ерметичности бочей жидкости и и в нерабоче к стыков по ОС руженные дефен	создаваеный нас пропорционально и в дренаж м состояний герн Т 1 00128-74 гру кты записать в "Ка	сосом про рас изменению пл см ³ /ч (г четичность по јппа арту дефектов'	отту на топлив ото ТУ не более о стенкам нару) (по ТУ группа '.	од. 0.25 см ³ жных д 1–7)
	Изм. Bt		Приме друг Прос Во детало Приме Заклю	анание – Пере ой плотность Проверка го сачивание ра время работь ей и в места чение - Обнар чение	тад довлении, по, изменяеся г ерметичности Бочей жидкости и и в нерабоче к стыков по ОС руженные дефен ТУ соот	создаваеный нас пропорционально и в дренаж м состояний герг кты записать в "Ка ветствует	сосом про рас изменению пл см ³ /ч (г четичность по јппа арту дефектов'	оту не более о ту не более о стенкам нару) (по ту группа '.	од. 0.25 см ³ жных д 1–7)
	ша Шам. Bf		Приме друг Прос Во детало Приме Заклю	анание – Пере ой плотность Проверка го сачивание ра время работь ей и в места чание - Обнар чение	над доблении, мо, изменяеся г ерметичности Бочей жидкости и и в нерабоче к стыков по ОС руженные дефен ТУ соответств по боржи	создаваеный нас пропорционально и в дренаж м состояний герг Т 1 00128–74 гру кты записать в "Ка ветствует ует, не соответств	сосом про рас изменению пл четичность по уппа арту дефектов ^и	оту на топлив оту не более (о стенкам нару) (по ТУ группа '.	о. 0.25 см ³ жных а 1–7)
	ь Дата Bf		Приме друг Прос детало Приме Заклю Напра	анание – Пере ой плотность Проверка го сачивание ра время работь ей и в места чание - Обнар чение чение Испытател	над довлении, но, изменяеся г ерметичности бочей жизкости и в нерабоче к стыков по ОС оуженные дефе <i>ТУ соот</i> (ТУ соответств неребора). <i>Романов</i>	создаваемый нас пропорционально и в дренаж м состояний герг кты записать в "Ка ветствует ует, не соответств А.И.	сосом про рас изменению пл см ³ /ч (г четичность по јппа арту дефектов вует)	оту не более о ту не более о стенкам нару) (по ту группа	од. 0.25 см ³ жных д 1-7)
	Подпись Дата ВС		Приме друг Прос Во детало Приме Заклю Напра Демо	анание – Пере ой плотность Проверка го сачивание ра время работь ей и в места очание - Обнар чение Испытател ОТК нтаж агрегата	над доблении, мо, изманяеся п ерметичности бочей жидкости и в нерабоче к стыкоб по ОС оуженные дефен ТУ соот (ТУ соответств перебора). в Романов произвел	создаваеный нас пропорционально и в дренаж м состояний герг Т 1 00128–74 грц кты записать в "Ка ветствует ует, не соответств А.И.	сосом про рас изменению пл см ³ /ч (г четичность по јппа арту дефектов'	оту не более о ту не более о стенкам нару) (по ту группа	од. 0.25 см ³ кных д 1–7)
	№ Подпись Дата ВС		Приме друг Прос Во детало Приме Заклю Напра Демо	анание – Пере ой плотность Проверка а сачивание раб время работь ей и в места чание - Обнар чание ивляется на г Испытател ОТК нтаж агрегата	над доблении, мо, изменяеся г ерметичности Бочей жизкости и в нерабоче к стыков по ОС руженные дефе <u>ТУ соответств</u> еребораць в Романов произвел Схобеле	создаваеный нас пропорционально и в дренаж м состояний герг кты записать в "Ка ветствует ует, не соответств А.И.	сосом про рас изменению пл см ³ /ч (г четичность по јппа арту дефектов'	оту не более о ту не более о стенкам нару) (по ту группа 22.12.2017 г.	од. 0.25 см ³ жных д 1–7)
	ИнВ. № Подпись Дата Изм. ВГ		Приме друг Прос Во детало Приме Заклю Напра Демо	анание – Пере ой плотность Проверка ан сачивание ра время работь ей и в места чение чение валяется на г Испытател ОТК нтаж агрегата Слесарь Электрик	над доблении, мо, изменяеся п ерметичности Бочей жидкости и в нерабоче к стыков по ОС руженные дефен ТУ соответств произвел Скобеле Ульянов	создаваеный нас пропорционально и в дренаж м состояний герн Т 1 00128–74 грц кты записать в "Ка ветствует ует, не соответств А.И. в В.В.	сосом про рас изменению пл см ³ /ч (г четичность по јппа арту дефектов' вует) 2 2 2	опности топлив оту не более о стенкам нару) (по ТУ группа 22.12.2017 г. 22.12.2017 г.	од. 0.25 см ³ кных д 1-7)
	1. Изм. Вг Изм. Вг		Приме друг Прос Во детала Приме Заклю Напра Демо	анание – Пере проверка г сачивание ра время работь ей и в места ачание - Обнар чение воляется на г Испытател ОТК нтаж агрегата Слесарь Электрик иний осмотр а	над доблении, мо, изманяеся п ерметичности Бочей жидкости и в нерабоче к стыкоб по ОС руженные дефен <u>ТУ соот</u> (ТУ соответств произвел <u>Схобеле</u> Ульянов трегата произве	создаваеный нас пропорционально и в дренаж м состояний герг кты записать в "Ка ветствует ует, не соответств А.И. в В.В. В.Н.	сосом про рас изменению пл см ³ /ч (г четичность по уппа арту дефектов учет)	оту не более о ту не более о стенкам нару) (по ту группа 22.12.2017 г. 22.12.2017 г.	од. 0.25 см ³ жных а 1-7)
קַעַסַע.	<u>Взам.</u> Подл. ИнВ № Подпись Дата Изм. ВГ		Приме друг Прос детало Приме Заклю Напра Демо Внеш	анание – Пере ой плотности Проверка ан сачивание раб время работи ей и в места ичание - Обнар чение ивляется на г Испытател ОТК нтаж агрегата Слесарь Электрик иний осмотр ап ОТК	над доблении, мо, изменяеся п ерметичности Бочей жизкости и и в нерабоче к стыков по ОС руженные дефен <u>ТУ соот</u> (ТУ соответств произвел Слобеле Ульянов трегата произве	создаваеный нас пропорционально и в дренаж м состояний герг кты записать в "Ка ветствует ует, не соответств А.И. в В.В. В.Н. л	сосом про рас изменению пл см ³ /ч (г четичность по јппа арту дефектов' ует) 2 2 2	спетна молла отности топлив о стенкам нару) (по ТУ группа 22.12.2017 г. 22.12.2017 г. 22.12.2017 г. г.	од. 0.25 см ³ жных д 1-7)

УТВЕРЖДАЮ

Технический директор АО "УАПО" _____И.В. Зарембо «___» _____ 2018г.

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной и инновационной деятельности ФГБОУ ВО "УГАТУ" И.В. Александров 2018г.

ПРОТОКОЛ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ МАКЕТА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО СТАРТЕР-ГЕНЕРАТОРА В СТАРТЕРНОМ РЕЖИМЕ

1 ЦЕЛЬ ИСПЫТАНИЙ

Целью испытаний является экспериментальное подтверждение возможности работы интеллектуального стартер–генератора (ИСГ) с частотой вращения ротора 12000 об/мин, мощностью 16 кВт в стартерном режиме.

2 ОБЪЕКТ ИСПЫТАНИЙ

Стартер-генератор, согласно чертежу № 1205.17.61.03.0000 СБ.

Испытания проводятся в нормальных климатических условиях по ГОСТ 15150-69 на специальном стенде.

- частота вращения ротора ИСГ в генераторном режиме – до 12 000 об/мин, в стартерном режиме от 2000 до 12000 об/мин;

3 ХОД ИСПЫТАНИЙ

Проверка внешнего вида генератора на соответствие требованиям конструкторской документации (КД) производилась визуальным осмотром, при этом проверялась

комплектность и соответствие конструкторской документации;

• отсутствие раковин, забоин, трещин, механических повреждений;

• качество кромок, должны отсутствовать острые не притупленные кромки;

• Тщательность сборки, качество сочленения разъемных узлов, затяжки крепежа и контровки;

консервацию неокрашенных поверхностей;

1. Измерение сопротивления изоляции обмотки относительно корпуса генератора производят в практически холодном состоянии по ГОСТ 11828-86 мегомметром на 500 В.

Результаты измерения: сопротивления изоляции обмотки относительно корпуса 2 МОм

2. Далее выводные концы ИСГ были соединены с частотным преобразователем. На ИСГ было подано напряжение 15 В с частотой 400 Гц. Ротор ИСГ начал вращаться, ток потребляемый ИСГ составил 20 А. То есть мощность, необходимая для запуска ИСГ в стартерном режиме на холостом ходу составила 900 Вт. Результаты показания приборов приведены на рисунке 3.

После этого частота питания ИСГ была снижена до 250 Гц. Соответственно частота вращения ротора ИСГ изменилась, а также изменилось напряжение и ток потребляемый ИСГ.

Результаты приведены на рисунке 4.

3

i menteri	160V LO	DCAL	OUT	and the second	Hall
yac =	OUTPUT BE 15.0V 15.0V 15.0V	E = .	400.00)Hz)Hz)Hz	OUTPUT More Setting Measurement Setting
*3 Vac	Hr Atum 14.92	Po PF	= 153 = 0.4	. 2 5 3	Waystaim Viewei
V =	14.98	P ₀ PF	= 93 = 0.2	. 4 9 8	Limitation
	15.06	P ₀ PF	= 130 = 0.4	0 5 1	Output Mode
$\frac{1}{1}$	25 73	V23 Po	= 26 = 376	14	Measurement To Page2
Recall CH1	Recall Recall CH2 CH3	Recall CH4	Rucall CH5	More 1 of 2	2018/01/23 10.54_15

Рисунок 3. Потребляемый ток и напряжение ИСГ при частоте 400 Гц

3-	rna	58	150	VIII	-0CA	۱L		QUI			
13.35			0	UTPUT	SETTIN	G					Main
ž 1	Vac	=	15.	0 V	F	=	2	50	3	8Hz	OUTPUT:
₹2	Vac	=	15.	0 V 0	F	Ξ	2	50	3	8Hz	More Setting
¥ 3	Vac	-	15.	0 V	F	II	2	50	. 3	8Hz	Measurement
				MEASU	REHENT						Setting
	V	=	13.	76	Po			2-	11	. 4	Waysfram
X.	Ι	=	29.	13	PF		=	0	. 5	28	Viewer
-	V	=	13.	45	Po		=	1	52	. 8	Contraction of the
	Ι	=	30.	34	PF	=	=	0	. 3	74	Limitation
	V	=	13.	55	Po		=	1:	37	4	
	I	=	25.	58	PI	=	=	0	. 3	96	Output Mode
	V 12	=	23.	50	V	3	=	2	2	3.0	
	V 31	=	23.	79	Po)	=	5	01	. 5	Measurement To Page2
	Recall CH1	Re C	call H2	Recall CH3	Rec	call 14	R	ecall CH5		More 1 of 2	2018/01/23

Рисунок 4. Потребляемый ток и напряжение ИСГ при частоте 250 Гц

Вывод. В результате испытаний была доказана эффективность предложенных ФГБОУ ВО УГАТУ новых технических решений. Также в результате экспериментальных исследований и испытаний, была доказана возможность работы разработанного ИСГ в стартерном режиме. При этом для обеспечение работы ИСГ в стартерном режиме на номинальных частотах вращения необходимая использование системы управления ИСГ со скалярным управлением.

От АО «УАПО»

Ведущий инженер по испытаниям испытательной станции

В.Р. Ханнанов

От ФГБОУ ВО «УӺАТУ» Ф.Р. Исмагилов Зав. каф. ЭМ г.н.с., д.т.н. В.Е. Вавилов В.н.с., к.т.н Д.Р. Фаррахов С.Н.С., К.Т.І А. Х. Минияров M.H.C.

- мощность частотного преобразователя испытательной станции для запуска ИСГ 8 кВт.

Внешний вид ИСГ приведен на рисунке 1, ИСГ установленный на стенде и преобразователь частоты приведены на рисунке 2.



Рисунок 1. Внешний вид ИСГ ИСГ установленный на стенде приведен на рисунке 2.



Рисунок 2. ИСГ на испытательном стенде (справа) и преобразователь частоты слева

Приложение 11

«УТВЕРЖДАЮ»

И.о. проректора по НиИД ФГБОУ ВО

«УГАТУ»



ПРОТОКОЛ ИСПЫТАНИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТрТСП-10,5-115, ТрТСПА-10,5-115 С ВЫПРЯМИТЕЛЯМИ НА АО «УАПО»

 Ход испытаний: измерение сопротивления изоляции обмотки относительно корпуса производят мегомметром на 500 В, также проводят измерения сопротивления изоляции обмотки между двумя обмотками мегомметром на 500 В
 Результаты измерения: сопротивление изоляции 100 МОм.

Результаты измерения. сопротивние на 3 фазы обмотки "ВН" от 0 до 2. Ход испытаний: Подается питание на 3 фазы обмотки "ВН" от 0 до $U_{1\mu}=204 + 10 \%$ В с шагом $25 \pm 10 \%$ В и временным интервалом между шагами 60 сек +10 сек.

Результаты измерений: потери холостого хода составили 15 Вт

Ход испытания: трансформатор устанавливается в короб охлаждения. Запускается вентилятор, путем подачи напряжения из сети 220 В. Далее подается питание на 3 фазы обмотки "ВН" U_{1н}=200В±10 % с частотой *f*=400 ±10 % Гц. К выводам блока выпрямителей подключается нагрузка, при этом ток на выводах Ток контролируется таблице 2 соответствовать должен выпрямителя Контролируется вольтметру. контролируется по напряжение амперметрам, температура обмоток по встроенным в трансформатор датчикам температуры (термопарам) соединенным с мультиметром.

На рисунке 1 представлены осциллограммы напряжения на источнике. Ток на источнике составлял 27,47 А.

1



Рисунок 1. Форма напряжений на входе в трансформатор

Таблица 2. Результаты испытаний по п. 1

Ток, А	Время выдержки, сек	Напряжение на выходе выпрямителя	Максимальная температура обмоток трансформатора в конечной точке времени, С
50 + 10%	60 сек	27,8 B	25
150 + 10%	60+5 сек	26,78 B	31
330 + 10%	900+20 сек	25,41 B	120

Ход испытания: Далее подается питание на 3 фазы обмотки "ВН" 4. U_{1н}=187В -10 % с частотой *f*=800 ±10 % Гц. К выводам блока выпрямителей выводах выпрямителя должен подключается нагрузка, при этом ток на соответствовать таблице 2. Ток контролируется по амперметрам, напряжение обмоток по температура Контролируется вольтметру. контролируется по встроенным в трансформатор датчикам температуры (термопарам) соединенным с мультиметром.

На рисунке 2 представлены осциллограммы напряжения на источнике. Ток на источнике составлял 37,6 А.



Рисунок 2. Форма напряжений на входе в трансформатор

Таблица 2. Результаты испытаний по п. 2

Ток, А	Время выдержки, сек	Напряжение на выходе выпрямителя	Максимальная температура обмоток трансформатора в конечной точке времени, С
150 + 10%	60+5 сек	25,26 B	31
330 + 10%	900+20 сек	23,81 B	81
450 + 10%	300+10 сек	21,85 B	174

5. Ход испытания: Далее подается питание на 3 фазы обмотки "ВН" U_{1H} =187 В±10 % с частотой f=800 ±10 % Гц. К выводам блока выпрямителей подключается нагрузка, при этом ток на выводах выпрямителя должен соответствовать таблице 3. Ток контролируется по амперметрам, напряжение контролируется по вольтметру. Контролируется температура обмоток по встроенным в трансформатор датчикам температуры (термопарам) соединенным с мультиметром.

На рисунке 3 представлены осциллограммы напряжения на источнике. Ток на источнике составлял 47,6 А.

3

Ток, А	Время выдержки, сек	Напряжение на выходе выпрямителя	Максимальная температура обмоток трансформатора в конечной точке времени, С
150 + 10%	60+5 сек	25,26 B	31
330 + 10%	900+20 сек	23,81 B	120
450 + 10%	300+10 сек	21,85 B	185
600 + 10%	5+2 сек	20,85 B	187

Таблица 3. Результаты испытаний по п. 3

4. Ход испытания: После перерыва не менее 30 мин трансформатор устанавливается в короб охлаждения. Запускается вентилятор, путем подачи напряжения из сети 220 В. Далее подается питание на 3 фазы обмотки "ВН" U_{1H} =187 В±10% с частотой f=800±10% Гц. Выполнить коммутацию нагрузки с величиной тока I_d =1400±20 A в течение 0,3 с в ручном режиме. Измеряется температура обмоток по встроенным в трансформатор датчикам температуры (термопарам) соединённым с мультиметром. Если температура обмоток превышает 210 °С, то испытания необходимо остановить. Время работы в данном режиме перегрузки – 0,3с.

В ходе испытаний была обеспечена нагрузка с током 1460 А при длительности 0,5 сек. Напряжение на выходе выпрямителя при данной нагрузке составило 17,88 В. Температура обмотки изменилась не более чем на 3-5 градусов Цельсия. Ток на входе в трансформатор составлял 84 А

5. Ход испытания: После перерыва не менее 30 минут трансформатор устанавливается в короб охлаждения. Запускается вентилятор, путем подачи напряжения из сети 220 В. Далее подается питание на 3 фазы обмотки "ВН" $U_{1\mu}$ =200 В±10 % с частотой f=800 ±10 % Гц. К выводам блока выпрямителей подключается нагрузка, при этом ток на выводах выпрямителя должен соответствовать таблице 5 Ток контролируется по амперметрам, напряжение контролируется по вольтметру. Контролируется температура обмоток по встроенным в трансформатор датчикам температуры (термопарам) соединенным с мультиметром.

4

Таблица 4. Результаты испытаний

Ток, А	Время выдержки, сек	Напряжение на выходе выпрямителя	Максимальная температура обмоток трансформатора в конечной точке времени. С
50 + 10%	60 сек	27,8 B	25
$50 \pm 10\%$	60+5 сек	26,59 B	31
130 + 10%	900+20 сек	25,06 B	120
$330 \pm 10\%$	300+10 сек	23,38 B	185
$430 \pm 10\%$	5+2 сек	21,09 B	187
	•		



От АО «УАПО»:

Ведущий инженер по испытаниям испытательной станции

В.Р.Ханнанов

I PUNDIKEHUEIL.



ИСПЫТАНИЯ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА

ГМГ-30/60НЖУ 1205-651119.0000

1. ОБЪЕКТ ИСПЫТАНИЯ

ГМГ-30/60НЖУ 1205-651119.0000 номинальной мощностью 30 кВт при номинальной частоте вращения 57 000 об/мин.

2. ЦЕЛЬ ИСПЫТАНИЙ

Определение рабочих характеристик, сравнение с расчетными характеристиками.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

Испытания проводились на пониженной частоте с последующем пересчетом на номинальную частоту. В таблице 1 приведены результаты испытаний.

Таблица 1. Результаты испытаний.

Параметр	Результаты испытаний	Расчетные параметры	Результаты испытаний	Расчетные параметры	Результаты испытаний	Расчетные параметры
Частота вращения ротора, об/мин	28	880	2		2205	
Сопро- тивление нагрузки,	∞, холо	остой ход		0,5	0,195	
Ток нагрузки,	0	0	10	10,36	18,9	19,2
Напря- жение нагрузки, В	8,77	7,97	5,4	5,18	1,61	1,55

Из таблице 1 следует, что расхождение результатов испытаний с расчетными значениями составляет не более 4 %, что говорит о высокой сходимости.

В таблице 2 приведены значения рабочих параметров ГМЭТ после пересчета на номинальную частоту вращения 57 000 об/мин.

Таблица 2. Параметры ГМГ-30/60НЖУ 1205-651119.0000 при номинальной частоте вращения (после пересчета)

Параметр		Верифицированные резу.	льтаты			
Частота вращения ротора, об/мин	57 000					
Сопротивление нагрузки, Ом	∞, холостой ход	Номинальный режим	Режим короткого замыкания			
Ток нагрузки (после выпрямителя), А	0	110,12	-			
Напряжение нагрузки (после выпрямителя), В	-	270	0			
Ток фазы А	0	50,51	225,53			
Напряжение фазы, В	159,16	144,13	0			

Из таблицы 2 следует, что полученные результаты соответствуют

техническому заданию.

Зав. каф. ЭМ., д.т.н., профессор

Доцент, к.т.н., внс

M.H.C.

M.H.C.

Исмагилов Ф.Р.

Вавилов В.Е.

Бекузин В.И.

Минияров А.Х.

Ilpurometue 13

УТВЕРЖДАЮ: Технический директор АО «СЭГЗ» _______В.Ю. Суров

протокол

проверки генератора МЭГ150С (ГМЭТСЧ)

а) с включенными обмотками управления

Подключение обмоток:

- Вывод «+» источника питания подключен к клемме П1 «+» генератора;

- Вывод «-» источника питания подключен к клемме П2 «-» генератора;

- клеммы генератора II1 «-» и II2 «+» объединены перемычкой;

№ п/п	Время, час	Частота вращения вала, мин ¹	Ток возбуждения. А	Выходное напряжение генератора, В
	14.95		0	27.8
1.	14:20		10	27.8
2.	13:04		1,0	27.4
3	13.05	6.000	and of low	<i>21.</i> ⁴
	10.00	6 000	3.2	27,2
4.	13:00	1	10	27.0
5.	5. 13:08		4,0	2/ 0
6	13:20		5,0	20,8

б) в различных режимах

010	1			(m	Designation	Termpy	Темп рж.	
No	Время,	Частота	Нагрузка	Ток	Выходное	TCMIL.P.M.	na putente	
n/n	час:мин	вращения	(активная),	нагрузки	напряжение	Thurs 20	TPLIX °C	
		вала,	Р _{амл} ,	(фаза).	генератора,	$1 \text{ BDIA}, \infty$	I DDIAL V	
		мин	κBA	A	D	·		
	13:00		0		36		4 - 1 4 (1999) 444	
1			12	35	33,3	and a the second s	944 (AC) (00	
2	13:04	12 000	20	53	54,5	24	*	
3	13:05	12 000	30	81	53,6		The state of the s	
4	13:06		40	116	52,1			
5	13:08		50	147	50,8			
6	13:10	Остановка						
7	13:20	12 000	50	147	50,6		And a second	
8	13:22		60	190	48.8		amor 4 (115)	
9	13:24		70	212	47,5			
		12 000	0	State.	55,4	24		
10	13:25	15 000	0		69.2	and the second se		
		18 000	0	-94587	83,3			
11	13:27	21 000	0	· ····	96,7			
12	12 13:28 24 000		0		110,0			
13	13:29	Остановка					1	
			0	1094401	109,9			
14	13:32		20	61	107,7	A constant of the second s		
15	13:35		40	120	102,1			
16	13:36		60	182	95,4	- 26	are to de	
17	13:37	A1 000	80	242	85,9	104° %*		
18	13:38	24 000	90	255	83,8			
19	13:40		100	300	75.5		u:	
20	13:41	-	110	317	72,5			
21	13:43		0	10000 10000 10000 10000 10000	105.3	33	41 (по пирометру)	

АО «СЭГЗ», г. Сарапул 31.08.2018г.

22	13:43	Остановка					
			Hać	бор нагрузки (c cos φ=0,8		
23	14:34	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	30		101,4	-	800
24	14:36		60		92,1		
25	14:41	24 000	90	259	74,5	-	
26	14:46		110	310	57.8	-	-
27	14:50		115	327	55,5	-	-

-- 440

Пименов С.А.

Начальник цеха испытаний №6

Ведущий инженер по испытаниям

Хованов В.В.



АКТ

внедрения результатов диссертационной работы Вавилова В. Е. на тему «Методология создания систем генерирования электроэнергии летательных аппаратов с магнитоэлектрическими преобразователями энергии» в учебный процесс

Мы, нижеподписавшиеся, составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Вавилова В. Е. на тему «Методология создания систем генерирования электроэнергии летательных аппаратов с магнитоэлектрическими преобразователями энергии» используются в лекционных курсах, а также при дипломном и курсовом проектировании, а именно:

– Обобщенная структурная модель 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 используются в лекционных курсах «Конструкция, эксплуатация и основы проектирования специальных изделий» по направлению подготовки 13.05.02 «Специальные электромеханические системы».

– Обобщенная математическая модель, описывающая процессы в ЭМПЭ с ВПМ в установившихся и переходных режимах в декартовых и цилиндрических координатах, учитывающей взаимовлияние тепловых, механических и электромагнитных процессов, а также процессов в подшипниковых узлах и влияние эксцентриситета ротора на параметры

«Конструкция, используются в лекционных курсах BΠM ЭМПЭ с изделий» по специальных проектирования основы эксплуатация И электромеханические 13.05.02 «Специальные подготовки направлению системы».

Зав. кафедрой электромеханики, доктор технических наук, профессор

lealer

Ф. Р. Исмагилов

Начальник учебного управления канд. экон. наук, доцент

и инфокоммуникаций

канд. техн. наук, доцент

Н.Г. Косьяненко

Декан ф-та авионики, энергетики

Ю.О. Уразбахтина

УТВЕРЖДАЮ Гехнический директор АО «УАПО», г. Уфа Зарембо И.В. 2019 г.

АКТ

внедрения результатов диссертационной работы Вавилова В. Е.

Мы, нижеподписавшиеся, составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Вавилова В. Е. внедрены и используются в АО «Уфимское агрегатное производственное объединение», а именно:

– новая методика проектирования электромеханических преобразователей энергии (ЭМПЭ) с высококоэрцитивными постоянными магнитами (ВПМ) на основе конструкционной и численной оптимизации с помощью генетических алгоритмов, а также на основе синтеза теплового, механического и электромагнитного расчета ЭМПЭ.

По результатам диссертационной работы Вавилова В. Е. были произведены расчеты системы генерирования электроэнергии перспективных летательных аппаратов магнитоэлектрического генератора МЭГ–100Ч и блока УФЦМ–150 и выпущены опытные образцы данного электротехнического комплекса.

Результаты испытаний разработанной системы генерирования электроэнергии летательных аппаратов показали высокую эффективность предложенных Вавиловым В. Е. методик расчета, технических решений и обобщенной математической модели.

Начальник отд. ЭМ

MH

А. А. Жеребцов

УТВЕРЖДАЮ Технический директор АО «УАПО», г. Уфа Зарембо И.В. 2019 г. >>

АКТ

внедрения результатов диссертационной работы Вавилова В. Е.

Мы, нижеподписавшиеся, составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Вавилова В. Е. внедрены и используются в АО «Уфимское агрегатное производственное объединение», а именно:

электромеханических модель математическая обобщенная преобразователей энергии (ЭМПЭ) с высококоэрцитивными постоянными магнитами (ВПМ) в установившихся и переходных режимах в декартовых и учитывает модель Математическая координатах. цилиндрических взаимовлияние тепловых, механических и электромагнитных процессов, а также процессов в подшипниковых узлах и влияние эксцентриситета ротора на параметры ЭМПЭ с ВПМ.

По результатам диссертационной работы Вавилова В. Е. были произведены расчеты вентильного электродвигателя для насоса ЭТН-91В и выпущены опытные образцы данного электродвигателя.

Результаты испытаний разработанных изделий показали высокую эффективность предложенных Вавиловым В. Е. методик расчета, технических решений и обобщенной математической модели.

Начальник отд. ЭМ

UN Ath

А. А. Жеребцов

Гл. специалист по сборке, к.т.н.

Е. А. Полихач

/

ПРОТОКОЛ №

2019r.

	BUDBernine 19-55	enus. I but the	TMI T29 3/B 6927									
lava 1	спытаний:	2.09.20	2.09.2019									
gase n	There	Ранна	РАЛИА ЛЬНО-УПОРНЫЕ ШАРИКОВЫЕ ПОДШИЛНИКИ SKF									
MII OI	IOP I MI mornment):			······································								
tthree.	alati viter e seconda					2000						
5	worn arminelle	Экспь	ЭКСВЕРНМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ									
(C.I.h.)	action actions.	HREI	ня на часто	ге бращения 600	000об/мин							
		and the second se										
	and the second	(PEROTA	ния к электи	ИЧЕСКИМ ПАРАМІ	LIPAM	too appropriate to						
		£ 6 4 - 4 - 4 - 4 - 4 - 4 - 4 - 4 - 4 - 4										
Cocn	ание.	Co	пълтивление	изоляции	Коэффициен	т абсорбции						
	a service and the service of the ser	норма	MOM	факт, МОм	порма	факт						
	A1 BLC1	He Mes	nee 100	321 FOM	ne menee 1,3	1.01						
		VILLETATION PAGOT	ы изделия Ц	А ЧАСТОТЕ ВРАЩ	ЕНИЯ 60000 ОБ/МИІ	1						
			Ток	Виброус	корсния							
N	Пернод	Частота	ф азы	Верт.	Гор.	Температур коопуса						
n/n	работы	Blighter	<u>CO3</u>	set of	м/с ²							
	чч:мм	Гц	A	305 G	3	28						
-	15:30	167(10000об/мин	16 (11	32						
2	15:31	333(20000об/мин) 33		9.5	39						
3	15:32	500(3000006/мин) 37	9,5								
4	15:33		CTOII, npose	рка температуры ко	opinyca reneparojsa	35						
1			A 19		1.4	46						
5	15:43	250(15000об/мин	1		5 SO #	5						
5	15:43 15:44	250(15000об/мин 333(20000об/мин	0 24	10,5	10,5	47						
5	15:43 15:44 15:45	250(15000o6/мин 333(20000o5/мин 667(40000o6/мин	$\begin{array}{c cccc} 0 & 12 \\ 0 & 24 \\ 1 & 42 \end{array}$	10,5	10,5	47						
5 6 7	15:43 15:44 15:45 15:46	250(15000o6/мин 333(20000o6/мин 667(40000o6/мин 750(45000o6/мин	$\begin{array}{c cccc} 0 & 12 \\ \hline 0 & 24 \\ \hline 1 & 42 \\ \hline 0 & 46 \end{array}$	10,5 11 22,5	10,5 11 8	47						
5 6 7 8	15:43 15:44 15:45 15:46	250(15000c6/мин 333(20000c6/мин 667(40000c6/мин 750(45000c6/мин	$\begin{array}{c cccc} 0 & 24 \\ 0 & 42 \\ 0 & 46 \\ \hline \end{array}$	10,5 11 22,5 ЛОП, послоронни	10,5 11 8 й звук	47						
5 6 7 8 9	15:43 15:44 15:45 15:46 15:46	250(15000e6/мин 333(20000e6/мин 667(40000e6/мин 750(45000e6/мин 250(15000e6/мин	(1) (24) (1) (24) (1) (42) (1) (46) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1	10,5 11 22,5 ЛОП, посторонни 6	10,5 11 8 й звук 3,6	47 48 45						
5 6 7 8 9 10	15:43 15:44 15:45 15:46 15:46 15:46	250(15000c6/мин 333(20000c6/мин 667(40000c6/мин 750(45000c6/мин 250(15000c6/мин 833(5000c6/мин	() 24 () 24 () 42 () 46 () 18 () 18 () 46	10,5 11 22,5 ЛОП, посторонни 6 10,5	10,5 11 8 й звук 3,6 10,5	47 47 48 45 46						
5 6 7 8 9 10 11	15:43 15:44 15:45 15:46 15:46 16:08 16:11	250(1500006/мин 333(2000006/мин 667(4000006/мин 750(4500006/мин 250(1500006/мин 833(5000006/мин	() 24 () 24 () 42 () 46 (() () 18 (() () 18 () 18 () 54	10,5 11 22,5 СТОП, посторонни 6 10,5 78	10,5 11 8 й звук 3,6 10,5 78	47 47 48 45 46 48						
5 6 7 8 9 10 11 12	15:43 15:44 15:45 15:46 15:46 16:08 16:11 16:12:18	250(15000c6/мин 333(20000c6/мин 667(40000c6/мин 750(45000c6/мин 250(15000c6/мин 833(50000c6/мин 1000(60000c6/мин	() 24 () 24 () 42 () 46 (() 18 (() 18) (()	10,5 11 22,5 СТОП, посторонни 6 10,5 78 СТОП	10,5 11 8 й звук 3,6 10,5 78	43 47 48 45 46 48						
5 6 7 8 9 10 11 12 13	15:43 15:44 15:45 15:46 15:46 16:08 16:11 16:12:18 16:12:32	250(15000c6/мин 333(20000c6/мин 667(40000c6/мин 750(45000c6/мин 250(15000c6/мин 833(50000c6/мин 1000(60000c6/мин	() 24 () 24 () 42 () 46 (() 18 (() 18 (() 18 (() 18 (() 18 (() 18 (() 18 (() 18 (() 18) (() 18) (10,5 11 22,5 СТОП, посторонни 6 10,5 78 СТОП	10,5 11 8 й звук 3,6 10,5 78 , Заказчика:	47 47 48 45 46 48 46						
5 6 7 8 9 10 11 11 12 13 Her	15:43 15:44 15:45 15:46 15:46 16:08 16:11 16:12:18 16:12:32 полнитель: 1	250(15000e6/мин 333(20000e6/мин 667(40000e6/мин 750(45000e6/мин 250(15000e6/мин 833(50000e6/мин 1000(60000e6/мин 2.C. Козичев	(i) 24 (i) 42 (i) 46 (ii) 18 (ii) 18 (iii) 46 (iii) 54	10,5 11 22,5 СТОП, посторонни 6 10,5 78 СТОП СТОП	10,5 11 8 11 8 10,5 10,5 10,5 78 5 Заказчика:	47 48 45 46 48						
5 6 7 8 9 10 11 12 13 Hei	15:43 15:44 15:45 15:46 15:46 16:08 16:11 16:12:18 16:12:32 полнитель: 0 етер ОК: H.	250(15000065/мня 333(20000065/мня 667(40000065/мня 750(45000065/мня 250(15000065/мня 1000(60000065/мня 1000(60000065/мня 2.С. Козничев	(i) 24 (i) 24 (i) 42 (i) 46 (ii) 46 (iii) 46 (iii) 54	10,5 11 22,5 ЛОП, посторонни 6 10,5 78 СТОП Представители ФГУП ГоеНИ	10,5 11 8 й звук 3,6 10,5 78 5 Заказчика: ИАС: А.Ю. Чекин	47 48 45 46 48						
5 6 7 8 9 10 11 12 13 Hep Ma Ta	15:43 15:44 15:45 15:46 15:46 16:08 16:11 16:12:18 16:12:32 полнитель: 0 стер ОК: Н. конструкто	250(1500006/мнн 333(2000006/мнн 667(4000006/мнн 750(4500006/мнн 250(1500006/мнн 833(5000006/мнн 1000(6000006/мнн 1000(6000006/мнн 2.C. Козничев В. Азарова Ф	$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	10,5 11 22,5 СТОП, посторонни 6 10,5 78 СТОП ФГУП ГоеНИ Ведуший науч	10,5 11 8 й звук 3,6 10,5 78 5 Заказчика: ИАС: А.Ю. Чекин аный сотрудник	43 47 48 45 46 48						



Рис. 1 Спектр виброускорений на частоте 167Гц



Рис. 2 Спектр виброускорений на частоте 333Гц(15:31)



Рис. 3 Спектр виброускорений на частоте 500Гц







Рис. 5 Спектр виброускорений на частоте 333Гц(15:44)



Рис. 6 Спектр виброускорений на частоте 667Гц



Рис. 8 Спектр виброускорений на частоте 250Гц(16:08)



Рис. 10 Спектр виброускорений на частоте 1000Гц

Приложение 18. Результаты экспериментальных исследований высокооборотного электрогенератора

Результаты экспериментальных исследований

9.14	n,	об/мин	0	11010	19710	30300	39660	48780							
0.60	U, B		0	71,8	134,3	205,4	263,8	317,9							
6.2014	n,	об/мин	0	5190											
19.06	U, B		0	38,4											
3.14	n,	об/мин	0	5520	10320	15090	19920	24930	30000	32100	33660	35070	37350	39900	
20.0	U, B		0	39,8	73,8	107,5	141,0	175,6	209,5	218	228	237	252	269	
2.14	n,	об/мин	0	2799	5100	8040	0666	12390	14880	174490	20130	22410	24900	27450	30120
11.0	U, B		0	20	34,8	55,2	69,6	87	105,4	122,9	141,4	157,5	174,8	191,1	209,4
01.14	'n,	об/мин	0	20130	30000	40920	48480							-	
27.(U, B		0	73,6	109	143	171								
1.13	'n,	об/мин	0	8280	12810	15030	20490	26040	30510						
21.1	U, B		0	76,1	121,3	143,7	193,0	241,1	278,4						
1.13	n,	об/мин	0	11160	15630	19830	25140	30000	34440	37200					
14.1	U, B		0	49,4	74	94,2	119,5	141,8	160,8	172,0					
0.13	n,	ним/90	0	4560	7800	10200	12630	13320	15000	19830	25830	30000	35100		
29.1	U, B		0	22,1	36,4	48,5	60,4	63,9	71,2	93	117,9	135,4	151,1		
0.13	n,	ним/90	0	5640	10830	15180	19860	25050	26670	29970	32520				
23.1	U, B		0	23,8	49,1	70,6	93,1	117,5	124,7	139,0	148,7				



Результаты экспериментальных исследований

Приложение 19. Методика расчета надежности создаваемых ЭМПЭ

При расчетах надежности и безотказности работы исследуемых ЭМПЭ использовалась методика, приведённая ниже. Результаты расчета безотказности представлены в таблице 2.7 и 7.4

Исходные данные для расчета:

1	Количество типовых режимов работы генератора N _p
2	Частота вращения ротора генератора n, об/мин
3	Длительность типового режима t _n , ч
4	Расчетное время работы до ремонта Т _{р1} , ч
5	Коэффициент полюсного перекрытия ОГ
6	Длина воздушного зазора 1, мм
7	Коэффициент воздушного зазора ОГ К
8	Диаметр ротора D _{p1} , мм
9	Диаметра вала d _в , мм
10	Индукция в воздушном зазоре В, Тл
11	Активная длина ротора L _{pot1} , мм
12	Масса ротора G _{OF} , кг
13	Координата точки приложения ОГ В _г , мм
.14	Число зубцов обмотки статора ОГ zo
	Коэффициент полюсного перекрытия возбудителя
	Тип подшипников 60204 (Л.Я. Перель Подшипники
	качения справочник)
	Длина воздушного зазора возбудителя, м
	Диаметр внутреннего кольца подшипника d _п , мм
	Коэффициент воздушного зазора ОГ К
	Диаметр внешнего кольца подшипника D _п , мм
	Диаметр ротора возбудителя D _{p2} , м
	Угол контакта подшипника п, град
	Число рядов в подшипнике
	Диаметр шарика подшипника d _ш , мм
	Число шариков в подшипнике
	Радиальный зазор в подшипнике r_min, r_max, мм
	Допуски между посадочным диаметром корпуса и
	посадочным диаметром щита 1н(нижний),
	1в(верхний), мм
	Допуски между посадочным диаметром гнезда и
	наружным диаметром подшипника н(нижний),
	в(верхний), мм
	Допуски на вал между внутренним диаметром
	подшипника и диаметром шейки вала н(нижний),
	в(верхний), мм
	Допуски на подшипник между внутренним
	диаметром подшипника и диаметром шейки вала
	н(нижний), в(верхний), мм
	Допуски на зазор подшипника н(нижний),
	в(верхний), мм класс точности – 0
	ьиение посадочного диаметра щита относительно
	поверхности гнезда подшипника Б _{1н} , мм

	Биение поверхности диаметра расточки статора
	относительно поверхности корпуса Б _{1н} , мм
	Биение поверхности диаметра ротора относительно
	поверхности диаметра вала Б _{1в} , мм
	Расстояние между опорами Lo, мм
	Показатель долговечности подшипника для
	шарикоподшипников – 3, для роликов – 10/3
-	Число электромашинных агрегатов генератора тј
	Коэффициент линейного температурного
	расширения стали ст
	Консистентная смазка – ЦИАТИМ-221
	Температура окруж. среды Т _с , град С
	Температура подшипников Т _ш , град С
	Перепад температур между кольцами подшипника
	t _{min} , t _{max} , град C
	Предельно допустимая температура изоляции при
	заданном сроке службы Т _п , град С
	Перегрев обмотки якоря Тяо, град С
	Интенсивности отказов одного витка обмотки
	статора, 1/ч
	Интенсивность отказов одного паянного контакта
	обмотки статора опяОГ, 1/ч
	••••
	Температурный коэффициент и, 1/град С
	Коэффициент вибраций Км
	Коэффициент давлений негерметичности Кд
	Коэффициент влажности Квл
-	Поправочный коэффициент а при Кн=0,55
1	

Расчет вероятности безотказной работы шарикоподшипникового узла Расчет вероятности невозникновения усталостного разрушения шарикоподшипников Наработка подшипников в течении времени t_n L_p циклов вращения

$$L_p = 60 \cdot n \cdot t_n$$

Наработка подшипников в течении технического ресурса генератора L_{рт} циклов вращения

$$L_{pm} = L_p \cdot \frac{T_{p1}}{t_n}$$

Коэффициент силы Ко1, кг/мм

$$K_{o1} = \frac{\alpha 1 \cdot \pi \cdot D_{p1} \cdot L_{rot1} (\frac{B_{\delta 1} \cdot 10^4}{5000})^2}{100 \cdot K_{\delta 1} \cdot \delta_1}$$

Зазор между посадочным диаметром корпуса и посадочным диаметром щита Л1, мм $\Delta 1 = \Delta 1 e - \Delta 1 H$ Зазор между посадочным диаметром гнезда и наружным диаметром подшипника Л2, мм

$$\Delta 2 = \Delta 2\beta - \Delta 2\mu$$

Зазор между внутренним диаметром подшипника и диаметром шейки вала ЛЗ, мм $\Delta 3 = \Delta 3n \theta - \Delta 3 \theta H$

Радиальный зазор подшипника, мм

$$\Delta 4 = \frac{r_{max} + r_{min}}{2}$$

Максимальный и минимальный зазоры при посадке подшипника, max, min, м

$$\Delta \max = \Delta 3ne - \Delta 3eh$$
$$\Delta \min = \Delta 3ne - \Delta 3eh$$

Максимальный и минимальный натяги при посадке подшипника, max, min, м

$$\delta\Delta \max = \Delta 3nH - \Delta 36B$$

 $\delta\Delta \min = \Delta 3nH - \Delta 36H$

Математическое ожидание эксцентриситета воздушного зазора m_e, м Величина силы генератора, кгс

$$F\delta 1 = m_e \cdot K_{o1}$$

Номинальная долговечность для первого подшипника L_{н1} циклов вращения

$$L_{n1} = 3,0 \cdot \left(\frac{C_n}{Q_{2n}}\right)^{p \partial n} \cdot 10^6$$

Номинальная долговечность для первого подшипника L_{н2} циклов вращения

$$L_{\mu 2} = 3.0 \cdot \left(\frac{C_n}{Q_{1n}}\right)^{p \partial n} \cdot 10^6$$

Вероятность возникновения усталостного разрушения первого подшипника P1L_p

$$P1L_{p} = e^{-0.143 \left[\left(\frac{L_{pm}}{L_{u1}} - 0.25 \right)^{1.11} - \left(\frac{L_{pm} - L_{p}}{L_{u1}} - 0.25 \right)^{1.11} \right]}$$

Вероятность возникновения усталостного разрушения первого подшипника P2L_p

$$P2L_{p} = e^{-0.143 \left[\left(\frac{L_{pm}}{L_{w_{2}}} - 0.25 \right)^{1.11} - \left(\frac{L_{pm} - L_{p}}{L_{w_{2}}} - 0.25 \right)^{1.11} \right]}$$

Вероятность невозникновения усталостного разрушения пары подшипников PL_p $PL_p = P1L_p \cdot P2L_p$

Расчет вероятности невозникновения усталостного разрушения подшипников по причине потери свойств консистентной смазки Р_{ксм}

$$L_g L_{cp} = 3.6 + \frac{2800}{273 + T_{uu}}$$
$$L_{cp} = 10^{L_g L_{cp}}$$

Среднее время до отказа по причине потери свойств консистентной смазки Тср

$$T_{cp} = \frac{L_{cp}}{60 \cdot n}$$

Вероятность безотказной работы подшипников, отказ которых происходит по причине потери свойств консистентной смазки Р_{ксм}

$$P_{\rm KCM} = e^{\frac{-t_n}{T_{cp}}}$$

Расчет вероятности обеспечения начального внутреннего зазора подшипников Математическое ожидание начального внутреннего зазора подшипника mro, мм

$$m_{ro} = \frac{r_\max+r_\min}{2}$$

Условный наружный диаметр внутреннего кольца подшипника d2, м

$$d_2 = D_{on} - \frac{d_u}{2}$$

Коэффициент влияния посадочного натяга

$$\gamma = \frac{d_2}{d_e} \cdot \frac{d_e^2 - d_n^2}{d_2^2 - d_n^2}$$

Среднеквадратичное отклонение зазора или натяга подшипника 1, мм

$$\sigma 1 = \frac{\left|\sigma \max\right| + \left|\Delta \max\right|}{6}$$

Вероятность возникновения натяга при посадке подшипника P_u

$$\delta \max 1 = \left| \delta \max \right|$$
$$P_u = \frac{1}{\sigma 1 \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \int_{0}^{\delta \max 1} e^{\frac{-(x - m_y)^2}{2\sigma 1^2}} dx$$

Математическое ожидание посадочного натяга подшипника т, мм

$$m_{\delta} = \sigma 1 \cdot \left(0.4 \cdot e^{\frac{-m_y^2}{2 \cdot \sigma 1^2}} - 0.00442 \right) + m_y \cdot P_u$$

Математическое ожидание уменьшения величины внутреннего зазора подшипника от посадочного натяга m_{r1}, мм

$$m_{\Delta r1} = \gamma \cdot m_{\delta}$$

Коэффициент влияния углового смещения Ву

$$B_y = 12.5 \frac{(D_{on})^2}{d_{...}}$$

Угловое смещение колец подшипника тах, рад

$$\psi \max = \frac{me \cdot 4}{L_o}$$

Математическое ожидание уменьшения величины внутреннего зазора подшипника от углового смещения колец m₁₂, мм

$$m_{\Lambda r^2} = 0.278 \cdot B_v \cdot \psi \max^2$$

Диаметр беговой дорожки внутреннего кольца подшипника (примерно) d_ж, мм

$$d_{\mathcal{H}} = D_{on} - d_{u}$$

Коэффициент влияния перепада температуры между кольцами подшипника Ст

$$C_m = \alpha cm \cdot d_{\omega}$$

Математическое ожидание перепада температуры между кольцами m_t,

$$m_{\Delta t} = \frac{\Delta t \max + \Delta t \min}{2}$$

 $m_{\Delta r3} = C_m \cdot m_{\Delta t}$

Дисперсия начального натяга подшипника D, мм мм

$$D_{\delta} = m_{\delta} \cdot (m_{\nu} - m_{\delta}) + \sigma 1^2 \cdot P_{\mu} - 0.00442 \cdot \sigma 1 \cdot \delta m_{\mu}$$

Дисперсия уменьшения величины внутреннего зазора подшипника от посадочного натяга D_{rl}, мм·мм

$$D_{r1} = \gamma^2 \cdot D_s$$

Дисперсия уменьшения величины внутреннего зазора подшипника от углового смещения D_{r2} , мм·мм

$$D_{r^2} = 0.028 \cdot B_v^2 \cdot \psi \max^4$$

Дисперсия перепада температуры между кольцами D_t, мм мм

$$D_{\Delta t} = \frac{(\Delta t \max - \Delta t \min)}{36}$$

Расчет вероятности безотказной работы обмоток Интенсивность отказов короткого замыкания обмотки статора кзяОГ, 1/ч

$$\lambda_{\kappa_{3SOF}} = \lambda_{oswo} \cdot 3 \cdot e^{\alpha u \cdot (T_c + \Delta T_{so} - T_c)}$$

Интенсивность обрыва обмотки якоря ОГ об яОГ, 1/ч

$$\lambda_{obsOF} = 0.6 \cdot \lambda_{\kappa 3 s OF}$$

Интенсивность обрыва паяных контактов обмотки якоря ОГ пк яОГ, 1/ч

 $\lambda_{mssOF} = m_s \cdot \lambda_{onsOF}$

УТВЕРЖДАЮ Генеральный директор АО «УНПП «Молния» Б.С.Дорфман 2019 г

AKT

внедрения результатов диссертационной работы Вавилова В. Е.

Мы, нижеподписавшиеся, составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Вавилова В. Е. внедрены и используются в АО «УНПП «Молния», а именно:

 структурная модель системы генерирования электроэнергии летательного аппарата.

С использованием результатов исследований диссертационной работы Вавилова В. Е., в рамках договора АП–ЭМ–10–18–ХК, был разработан испытательный стенд на базе АО «УНПП «Молния», предназначенный для испытаний системы генерирования летательного аппарата на основе генератора ГСА и блока ПЧА. Работа данного стенда при испытаниях системы генерирования на основе генератора ГСА и блока ПЧА. Вавиловым В. Е. технических решений.

Начальник сектора 175

Ja 18.07.19

В. Е. Балахонцев