ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию Вавилова Вячеслава Евгеньевича

«Методология создания систем генерирования электроэнергии летательных аппаратов с магнитоэлектрическими преобразователями энергии», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

На отзыв представлены:

- Диссертация «Методология создания систем генерирования электроэнергии летательных аппаратов с магнитоэлектрическими преобразователями энергии», содержащая введение, семь глав, заключение, список использованной литературы из 339 наименований и 20 приложений, общим объемом 392 страниц.

- Автореферат диссертации.

Актуальность темы. Развитие концепции более электрического самолета (БЭС) является одним из основных направлений повышения экологичности, топливной эффективности и снижения эксплуатационных расходов при создании новых перспективных летательных аппаратов (ЛА). В основе данной концепции лежит минимальное использование гидравлической и пневматической энергии на борту ЛА при максимальном использовании электрической энергии.

Основным препятствием, без преодоления которого невозможно создания БЭС в частности и перспективных ЛА в целом, является необходимость создания высокомощных систем генерирования электроэнергии (СГЭ) с электромеханическими преобразователями энергии (ЭМПЭ) нового поколения. Поэтому Вавиловым В. Е. была выявлена и решена следующая научная проблема: развитие теории СГЭ ЛА на основе ЭМПЭ с ВПМ, создание методологии комплексного анализа и разработки систем генерирования электроэнергии летательных аппаратов с магнитоэлектрическими преобразователями энергии. Целью диссертационной работы Вавилова В. Е. является разработка и создание мощных, энергоэффективных и отказоустойчивых СГЭ на основе ЭМПЭ с высококоэрцитивными постоянными магнитами (ВПМ) современных и перспективных ЛА при минимальных затратах времени и средств.

Для достижения данной цели соискателем были поставлены и решены следующие задачи:

1. Разработка обобщенной структурной модели СГЭ ЛА на основе ЭМПЭ с ВПМ с учетом тенденций развития современных ЛА, учитывающей возможности интеграции

УГАТУ
Вх. № 154-13
от 10.02.2020

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, трансформаторно-выпрямительных устройств нового поколения на основе магнитопроводов из аморфного железа, разработка нового метода изготовления магнитопровода статора ЭМПЭ из аморфного железа.

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

Данные задачи и исследования, выполненные в диссертационной работе соответствует специальности 05.09.03- «Электротехнические комплексы и системы». В частности:

Задачи 1, 2, 5 соответствуют п. 1. «Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, изучение системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем».

Задачи 3, 4 соответствует п. 3. «Разработка, структурный и параметрический синтез электротехнических комплексов и систем, их оптимизация, а также разработка алгоритмов эффективного управления».

Задачи 6, 7 соответствует п. 4. «Исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов и систем в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях».

Новизна исследований и полученных результатов

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 9 актами внедрения результатов в промышленность и учебный процесс.

1. На основе полученных в работе научно-технических результатов созданы, испытаны и внедрены СГЭ ЛА на основе ЭМПЭ с ВПМ, технические задания на СГЭ ЛА испытательная база для проведения испытаний СГЭ ЛА.

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

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

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

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

6. С использованием разработанной математической модели разработаны новые способы управления положением ротора в бесконтактных подшипниковых опорах и диагностики технического состояния, защищенные патентами РФ на способы.

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

Диссертационная работа Вавилова В. Е. вносит значительный вклад вклад в развитие теории электротехнических комплексов, в частности в создание СГЭ ЛА нового поколения. Практическая значимость заключается в разработке новых СГЭ для летательных аппаратов.

Таким образом, Вавиловым В. Е. В диссертации 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, что позволяет говорить о том, что цель работы достигнута, а поставленная научная проблема решена.

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием строгих математических методов, компьютерным моделированием, подтверждаемых результатами

экспериментальных исследований. Достоверность подтверждена использованием созданной методологии и реализованной на ее основе как СГЭ ЛА, так и отдельных агрегатов на предприятиях РФ.

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

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на международных конференциях, определяющих общемировые тенденции развития электротехнических комплексов.

Оценка содержания и оформления диссертации. Диссертация написана ясно с использованием общепринятой терминология, грамотным научным языком, имеет логическую структуру.

Во введении раскрыта актуальность работы, научная новизна, практическая ценность, сформулирована научная проблема и цель исследования, поставлены задачи работы, описаны методы исследований. **В первой главе** по результатам анализа литературы по СГЭ ЛА автором выявлены не решенные вопросы известной теории СГЭ ЛА на основе ЭМПЭ с ВПМ. Анализ данных вопросов позволил автору сформировать задачи, необходимые для достижения цели собственных исследований. **Во второй главе** с использование матричных преобразований разработаны структурные модели для СГЭ ЛА. На основе базовых уравнений Максвелла и Фурье разработана обобщенная математическая модель ЭМПЭ с ВПМ, описывающая процессы в ЭМПЭ с ВПМ как основного элемента СГЭ ЛА в установившихся и переходных режимах, учитывающая взаимовлияние тепловых, механических и электромагнитных процессов. Необходимо отметить, что подобный комплексный анализ позволяет значительно минимизировать временные затраты на проектирование. При этом соискатель использует не только аналитический подход при решении поставленных задач, но и показывает возможности метода конечных элементов при комплексном анализе агрегатов СГЭ ЛА. Во второй главе Вавилов В. Е. уделяет внимание вопросам надежности и безотказности СГЭ ЛА, описывает метод многодисциплинарного проектирования СГЭ ЛА, который верифицируется им при создании СГЭ ЛА мощностью 16–20 кВт. Созданный СГЭ ЛА сравнивается с серийным аналогом и 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. При проектировании данного СГЭ ЛА во второй главе проводиться многодисциплинарная оптимизация СГЭ ЛА с использованием генетических алгоритмов и метода Парето. **Третья глава посвящена** исследованиям разработанной математической модели ЭМПЭ с ВПМ, анализу влияния тепловых процессов на ЭМПЭ с ВПМ, а также анализу влияния эксцентриситета ротора на характеристики ЭМПЭ с ВПМ в процессе эксплуатации. По результатам исследований в третье главе показана эффективность предложенной методологии при создании СГЭ ЛА для минимизации временных затрат. **В четвертой главе** проведены исследования электротехнического комплекса ЭМПЭ с ВПМ –регулятор напряжения. Приведена классификация методов стабилизации напряжения ЭМПЭ с ВПМ в составе СГЭ ЛА. Выполнены исследования влияния неуправляемого выпрямителя на процессы в ЭМПЭ с ВПМ в составе СГЭ ЛА, показана возможность использования магнитного поля реакции якоря для решения задач стабилизации напряжения в ЭМПЭ с ВПМ, приведены имитационные модели, позволяющие исследования данного способа. Также соискателем в данной главе предложен новый способ стабилизации напряжения ЭМПЭ с ВПМ, на который был получен патент РФ на способ. Верификация данного способа проводилась путем экспериментальных исследований на разработанном соискателем магнитоэлектрическом генераторе МЭГ-100Ч для СГЭ ЛА. **Пятая глава** посвящена исследованиям процессов при коротких замыканиях в ЭМПЭ с ВПМ. В рамках данной главы расширены как известные методы защиты от различных типов коротких замыканий, так и предложены новые способы, защиты ЭМПЭ с ВПМ в том числе от витковых коротких замыканий. Создана методика компьютерного моделирования коротких замыканий в ЭМПЭ с ВПМ и выполнена оценка влияния превышений температуры в ЭМПЭ с ВПМ при коротких замыканиях на процессы в ЭМПЭ с ВПМ в частности и на СГЭ ЛА в целом. **Шестая глава** посвящена решению задач повышения энергоэффективности СГЭ ЛА. Для этого соискателем выполнены исследования потерь в агрегатах СГЭ ЛА, в том числе магнитопровод которых реализован с использованием аморфного железа. Представлены исследования, позволяющие оценить влияние технологии изготовления магнитопровода агрегатов СГЭ ЛА на потери в агрегатах и разработаны рекомендации по минимизации данных потерь.

Результатом исследований шестой главы являлось обобщение созданных методик, способов, методов, математических моделей и алгоритмов в единую методологию создания систем генерирования электроэнергии летательных аппаратов с магнитоэлектрическими преобразователями энергии. **Седьмая глава** посвящена исследованиям созданных СГЭ ЛА и агрегатов СГЭ ЛА (ЭМПЭ с ВПМ и их систем управления, электродвигателей, трансформаторов). Данные экспериментальные исследования полностью подтверждают теоретические выводы соискателя и показывают эффективность созданной методологии.

По результатам семи глав Вавиловым В. Е. решена поставленная научная проблема и достигнута цель работы.

Соответствие автореферата содержанию диссертации. Автореферат соответствует содержанию диссертации.

Замечания по диссертации.

1. При разработке обобщённой структурной модели СГЭ ЛА следовало бы более чётко сформулировать принятые допущения, изложив их в отдельном абзаце.

2. Расчётные схемы рис. 2.4., рис. 3.4 и рис. 3.6 выглядят несколько абстрактными и трудно увязываются с объектом в целом.

3. Тезис об эффективности регулирования напряжения ЭГ с постоянными магнитами путём подмагничивания участков его магнитной цепи представляется дискуссионным, поскольку этот способ сопряжён с дополнительными электрическими и магнитными потерями. С таким решением по энергетике и по технологии серийного изготовления вполне может конкурировать использование на общем валу с ЭМПЭ с ВПМ вспомогательной индукторной машины небольшой мощности с электромагнитным возбуждением.

4. Многоступенчатый анализ, выполненный при моделировании магнитного поля реакции якоря (раздел 4.2) выглядит весьма громоздким и основанным на предположении о "непогрешимости" AnsoftMaxwell при получении конечного результата.

5. Прочие замечания:

- вместо фразы "при непосредственном участии автора", много раз присутствующей в тексте диссертации, достаточно приводить ссылки на опубликованные труды;

- имеются опечатки, грамматические ошибки и непонятные словосочетания, в частности, третий абзац на с.281 электронной версии (конец раздела 7.1.1);

- рисунки со структурными схемами (рис. 2.1, рис. 2.3), и блок-схемы рис. 4.7 в бумажной версии очень плохо читаются.

Заключение.

Указанные замечания не снижают научной значимости представленной диссертации в целом.

Диссертационная работа Вавилова Вячеслава Евгеньевича является законченной научно-квалификационной работой, которая по содержанию, объекту и направлению исследований, полученным новым научно обоснованным результатам соответствует паспорту научной специальности 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы.

Работа выполнена лично, на актуальную тему, имеет научную новизну, теоретическую и практическую значимость, содержит решение крупной научной проблемы и удовлетворяет требованиям ВАК РФ, п.9 («Положение о присуждении ученых степеней») к докторским диссертациям, а ее автор Вавилов Вячеслав Евгеньевич заслуживает присуждения уче-

ной степени доктора технических наук по специальности 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы.

Официальный оппонент,
доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры ««Теоретическая и общая электротехника»
федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования
«Нижегородский государственный технический университет (НГТУ) им. Р.Е. Алексеева».
(Докторская диссертация защищена по специальности 05.09.01 – "Электромеханика")
Адрес: 603950, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24
телефон +7 (831) 436-43-38, адрес электронной почты a_yu_smirnov@mail.ru)

Смирнов Александр Юрьевич

06.02.2020г.

Подпись А.Ю. Смирнова заверяю:

Ученый секретарь
Ученого совета НГ

И.Н. Мерзликов