Отзыв

Официального оппонента Зубкова Юрия Валентиновича на диссертацию Вавилова В.Е. "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».

Актуальность темы

Диссертационная работа Вавилова В.Е. посвящена созданию методологических принципов анализа и синтеза энергоэффективных, отказоустойчивых систем генерирования электрической энергии (СГЭ) для разрабатываемых в настоящее время и перспективных летательных аппаратов (ЛА), позволяющих осуществлять их проектирование и актуализацию в кратчайшие сроки с минимумом затрат.

СГЭ ЛА в общем случае включает силовой электромеханический преобразователь, преобразователи рода и частоты электрической энергии, системы управления, защиты, аккумулирования. Каждое из перечисленных звеньев бортовой СГЭ и вся система в целом должны соответствовать ряду требований по массо-габаритным, энергетическим и надежностным показателям.

Помимо минимальной полетной массы и максимальной удельной мощности к ЭМП, работающему в режимах стартера и генератора предъявляются требования интеграции в силовую энергетическую установку ЛА без редуктора, что предполагает в зависимости от ее типа (вал авиационного двигателя, турбина вспомогательной силовой установки) достаточно высокие частоты вращения ЭМП. Наиболее перспективными для соответствия указанным требованиям являются ЭМП с возбуждением от высококоэрцитивных постоянных магнитов. Такие машины обладают рядом существенных достоинств, среди которых применительно к ЛА следует отметить: высокие удельную мощность, коэффициент полезного действия, надежность ввиду отсутствия обмоток и полупроводниковых вентилей на вращающейся части.

Создание высокоэффективных ЭМП с ПМ и СГЭ на их основе при минимальных временных и материальных затратах невозможно осуществить без разработки методологии проектирования и решения задач синтеза и многокритериальной параметрической оптимизации ЭМП с ПМ, в том числе и высоко-

УГАТУ
Вх. № 266-13
от 03.03.2020

оборотных, а также структурного синтеза систем СГЭ, создания новых, научно обоснованных конструктивных схем ЭМП с ПМ и других элементов СГЭ, концепций построения СГЭ ЛА на их основе. Также весьма важной задачей является разработка методов учета взаимного влияния процессов как в самой СГЭ, так и в ее элементах, в числе которых магнитные, тепловые и механические процессы, протекающие в ЭМП с ПМ.

Вследствие изложенного, разработка научно-методических основ проектирования, в том числе и оптимизационного, СГЭ ЛА с магнитоэлектрическими преобразователями, создание мощных, энергоэффективных и отказоустойчивых СГЭ на основе ЭМП с ПМ современных и перспективных ЛА при минимальных затратах времени и средств, а также решение комплекса вопросов по их практической реализации и внедрению, является актуальной научной проблемой, имеющей важное народнохозяйственное значение.

Актуальность работы подтверждается тем, что она выполнялась в соответствии с тематикой государственного заказа федеральных органов исполнительной власти: Минобороны России (проекты 8.1277.2017/4.6 «Исследования, разработка и внедрение перспективных электромеханических преобразователей для автономных объектов с гибридной силовой установкой», 8.287.2014/К «Исследования и разработка высокоэффективного энергетического комплекса для повышения энерговооруженности и энергоэффективности космических аппаратов»); Российского научного фонда (проекты 17-79-20027 «Обобщенная теория основополагающих физических процессов в высокотемпературных электромеханических преобразователях энергии, интегрированных в авиационный газотурбинный двигатель») и рядом других государственных и хоздоговорных контрактов.

Тема диссертации Вавилова В.Е., посвященной разработке методологии создания систем генерирования электроэнергии летательных аппаратов с магнитоэлектрическими преобразователями, безусловно, актуальна и соответствует специальности 05.09.03- «Электротехнические комплексы и системы».

Новизна исследований и полученных результатов

Научная новизна определяется тем, что в работе расширяются и углубляются теоретические представления о методологии синтеза систем генерирова-

ния электроэнергии авиационных ЛА с учетом взаимозависимости электромагнитных и тепловых процессов входящих в нее агрегатов; разработаны обобщенные структурные модели СГЭ ЛА на основе ЭМП с ПМ; предложены новый метод обеспечения защиты ЭМП с ПМ от витковых коротких замыканий и способ гибридной стабилизации напряжения ЭМП с ПМ; разработан метод компьютерного моделирования коротких замыканий ЭМП с ПМ, отличающийся от известных учетом механических процессов, взаимного влияния геометрических размеров ЭМП с ПМ и параметров обмотки и позволяющий проводить исследования, как отдельных типов коротких замыканий, так и их различных комбинаций.

В первой главе выполнены обзор и анализ работ по созданию СГЭ ЛА и ЭМП нового поколения, на основе которого сформулированы требования к системам электроснабжения ЛА, разработана классификация высокооборотных электромеханических преобразователей энергии и рассмотрены области их применения, выявлены конструктивные схемы, которые наиболее полно отвечают задачам создания перспективных СГЭ ЛА.

Для развития теории СГЭ ЛА с учетом требований к современным и перспективным ЛА требуется создание обобщенной структурной модели СГЭ на основе ЭМП с ПМ, интегрированного в силовую установку, учитывающей многовариантность построения СГЭ ЛА. Показано, что необходимо решить ряд теоретических задач в области ЭМП с ПМ, таких как: создание обобщенной математической модели, описывающей процессы в ЭМП с ПМ в установившихся и переходных режимах, учитывающей взаимное влияние тепловых, механических и электромагнитных процессов, а также процессов в подшипниковых узлах и влияние эксцентриситета ротора на параметры ЭМП с ВПМ.

Во второй главе автором разработана обобщенная структурная модель СГЭ ЛА на основе ЭМП с ПМ с учетом тенденций развития современных ЛА, которая позволяет выполнять исследования СГЭ при условии многовариантности их построения и обеспечивает минимизацию временных и материальных затрат при создании перспективных СГЭ ЛА. Предложена обобщенная многодисциплинарная математическая модель ЭМП с ПМ, отличающаяся от известных учетом взаимного влияния тепловых, механических и электромагнитных

процессов, а также процессов в подшипниковых узлах и влияния эксцентриситета ротора на параметры. Представлена методология создания СГЭ ЛА, позволяющая выполнять процесс многодисциплинарного проектирования СГЭ ЛА на основе ЭМП с ПМ. Данная методология включает одновременное многодисциплинарное проектирование всех компонентов, входящих в СГЭ и позволяет осуществить их совместную оптимизацию.

В третьей главе разработано описание первичного магнитного поля в воздушном зазоре ЭМП с ВПМ в цилиндрических (двухмерная задача) и декартовых координатах (трехмерная задача), на основе исследований которого установлены: рациональные величины относительной длины ротора $\lambda = \frac{l}{D}$ ЭМП с ПМ, при котором рассеивание магнитного потока минимально. Показано, что для ПМ марки *NdFeB* с ростом температуры с 70 до 140 ^{o}C радиальная составляющая магнитного потока снижается на 25–35%, поэтому такие ПМ нецелесообразно использовать при высоких температурах среды. В этом случае предпочтение должно отдаваться ПМ *SmCo*, как более температурно стабильным.

Создан математический аппарат, позволяющий проводить исследование эксцентриситета ротора. При возникновении эксцентриситета ротора в случае динамических нагрузок происходит искажение магнитного поля ЭМП с ПМ, что требует разработки дополнительных мер и увеличении диапазона регулирования поля для поддержания стабильного напряжения.

Разработаны новые способы управления ротором на магнитных подшипниках, диагностики состояния ЭМП с ПМ. Показано, что методология комплексного анализа магнитных и тепловых полей, с учетом требований механической прочности позволяет примерно в два раза снизить время, необходимое для проектирования ЭМП с ПМ, как агрегата СГЭ ЛА.

В четвертой главе проведены исследования режимов работы ЭМП с ПМ совместно с регулятором напряжения в составе СГЭ. Предложен новый метод гибридной стабилизации напряжения, который отличается от известных тем, что магнитопровод статора ЭМП выполняется насыщенным в режиме холостого хода и в процессе эксплуатации из-за температурной нестабильности постоянных магнитов и размагничивающего действия магнитного поля реакции яко-

ря происходит уменьшение степени его насыщения, что позволяет стабилизировать напряжение ЭМП с ПМ благодаря совокупности теоретических и технических решений в части магнитной системы ротора и магнитопровода статора без ухудшения массогабаритных показателей машины в отличие от известных параметрических способов стабилизации напряжения.

Установлено, что наименьшей массой при максимальных функциональных возможностях (стартерный пуск, отказоустойчивость, стабилизация напряжения ЭМП с ПМ, обеспечение качества электроэнергии на выходе СГЭ) обладают СГЭ с последовательным инвертором и высокооборотным ЭМП с ПМ. Исследованы особенности создания регуляторов напряжения ЭМП с ПМ с подмагничиванием магнитопровода статора.

В пятой главе разработаны и исследованы способы защиты ЭМП с ПМ от витковых коротких замыканий, учитывающие гальваническую, термическую и электромагнитную связи между катушками силовой обмотки. Доказана возможность обеспечения защиты ЭМП с ПМ (без дополнительных обмоток на роторе) от витковых коротких замыканий в различных режимах работы. Предложена и разработана методика компьютерного моделирования коротких замыканий ЭМП с ПМ с учетом механических процессов ротора, позволяющая проводить исследования не только отдельных типов КЗ, но и их различных комбинаций. Разработаны способы и устройства защиты от фазных КЗ с помощью полупроводниковых размыкателей.

Проведены экспериментальные исследования КЗ в ЭМП с ПМ в «холодном» и «горячем» состоянии и установлено, что при увеличении температуры обмотки существенно снижается ток внезапного трехфазного КЗ ЭМП. Исследованы отказоустойчивые ЭМП с ПМ и доказано, что эффективным вариантом с точки зрения обеспечения надежности, увеличения КПД и снижения пульсаций момента является использование многофазных ЭМП с ПМ.

В шестой главе предложен алгоритм проектирования ЭМП с ПМ с магнитопроводом статора из аморфного железа, учитывающий его нелинейные магнитные и температурные свойства, особенности изготовления и коэффициента заполнения сердечников статора. Проведены исследования потерь в магнитопроводах агрегатов СГЭ ЛА на гистерезис и вихревые токи в результате кото-

рых установлено, что использование известных выражений для их расчета при частотах перемагничивания сердечников более 400 Гц приводит к значительной погрешности. Исследованы удельные потери в стали магнитопроводов статора, изготовленных с помощью различных технологий и установлены предпочтительные способы изготовления листов сердечника статора для минимизации потерь в них в зависимости от частоты перемагничивания.

Сформирована методология создания систем генерирования электроэнергии летательных аппаратов с магнитоэлектрическими преобразователями энергии, которая представляет собой набор методик, обобщённых матриц и обобщённых математических моделей, разработанных в главах диссертации. Предложена методология приведена в виде структурной схемы, учитывающей все взаимосвязи процесса проектирования СГЭ ЛА, что позволяет минимизировать временные и материальные затраты при их создании.

В седьмой главе представлены результаты экспериментальных исследований серийных и экспериментальных ЭМП с ПМ и агрегатов СГЭ ЛА (электродвигателей для топливных насосов, трансформаторов трансформаторно-выпрямительных устройств и т.д.). Приведены исследования полной модели СГЭ, содержащей ЭМП с ПМ, трансформаторно-выпрямительное устройство и нагрузочные модули. Дано сравнение созданных высокооборотных ЭМП с ПМ и СГЭ на их основе для короткоресурсных объектов с выпускаемыми серийно высокооборотными ЭМПЭ и показаны преимущества первых, подтверждающие научные положения диссертационной работы.

На основе изложенной в диссертации теории, методик и новых технических решений разработаны ЭМПЭ с ПМ и их системы управления для различных СГЭ ЛА. Все приведенные высокооборотные ЭМП и реализованные на их основе СГЭ прошли стендовые испытания на профильных предприятиях, что подтверждено актами внедрения и протоколами испытаний, приведенными в приложениях к диссертации.

Важно отметить, что экспериментальные исследования созданных образцов ЭМПЭ и элементов СГЭ показали высокую сходимость с теоретическими моделями, приведенными в диссертации, и позволили создать образцы техники,

которые превосходят по своим массогабаритным характеристикам и энергетическим показателям зарубежные аналоги.

Новизна разработанных технических решений защищена патентами.

Таким образом, поставленная в работе цель - разработка и создание мощных, энергоэффективных и отказоустойчивых СГЭ на основе ЭМП с ПМ современных и перспективных ЛА при минимальных затратах времени и средств автором достигнута.

К наиболее существенным и принципиально **новым научным результатам**, полученным в работе, следует отнести:

1. Методологию создания СГЭ ЛА, отличающуюся от известных учетом взаимной зависимости тепловых и электромагнитных полей агрегатов СГЭ ЛА, возможностью совместной комплексной оптимизации характеристик агрегатов СГЭ ЛА и позволяющую выполнять процесс многодисциплинарного проектирования СГЭ ЛА на основе ЭМП с ПМ.

2. Обобщенную структурную модель СГЭ ЛА, полученную с учетом тенденций развития современных ЛА, отличающуюся возможностью параллельной реализации нескольких СГЭ ЛА и прямой интеграции ЭМП с ПМ в силовую установку ЛА, а также многофазностью и дублируемостью элементов в отказоустойчивых ЭМП с ПМ СГЭ ЛА и позволяющую выполнять исследования СГЭ при условии многовариантности их построения.

3. Новый метод обеспечения защиты ЭМПЭ с ВПМ от витковых коротких замыканий, отличающийся тем, что он учитывает гальваническую, термическую и электромагнитную связь катушек ЭМП с ПМ и позволяет сохранять работоспособность ЭМП с ПМ при витковых коротких замыканиях с купированием одной из фаз или катушек ЭМП с ПМ

4. Метод компьютерного моделирования коротких замыканий ЭМП с ПМ, отличающийся от известных учетом механических процессов, взаимного влияния формы и геометрических размеров активных элементов ЭМП с ПМ и параметров обмотки и позволяющий исследовать как отдельные виды коротких замыканий, так и их различные комбинации.

Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и заключений.

Достоверность полученных результатов обеспечивается применением строгих математических методов исследования, экспериментальной проверкой, сравнением с теоретическими и экспериментальными результатами других авторов. Результаты теоретических исследований подтверждены практикой их использования в процессе проектирования, разработки, испытаний и внедрения ЭМП с ПМ.

Значимость для науки и практики выводов и рекомендаций.

Результаты работы представляют весомый вклад в развитие теории и практики систем генерирования летательных аппаратов. Разработанная методология проектирования, математические и компьютерные модели используются в организациях, ведущих разработку, производство и обслуживание ЭМП с ПМ в составе СГЭ, а также в учебных программах профессиональных учебных учреждений, занимающихся подготовкой специалистов-электромехаников, что подтверждено соответствующими актами использования результатов работы.

Диссертация имеет внутреннее единство, написана ясным языком с использованием правильных технических терминов. Основные результаты диссертации опубликованы в 205 печатных работах, включая 5 монографий (в соавторстве), 60 статей в изданиях по списку ВАК, 60 статей, индексируемых в БД Scopus, более 40 патентов на изобретения. Анализ публикаций автора позволяет утверждать, что содержание диссертации отражено в них с требуемой Положением ВАК полнотой. Основные результаты работы отражены в изданиях, соответствующих рекомендуемому ВАК перечню изданий для опубликования результатов докторских диссертаций. Содержание автореферата соответствует диссертации.

Связь диссертации с государственными программами научных исследований

Работа над диссертацией проводилась в рамках государственного заказа федеральных органов исполнительной власти: Минобороны России (проекты 8.1277.2017/4.6 «Исследования, разработка и внедрение перспективных электромеханических преобразователей для автономных объектов с гибридной си-

ловой установкой», 8.287.2014/К «Исследования и разработка высокоэффективного энергетического комплекса для повышения энерговооруженности и энергоэффективности космических аппаратов»); Российского научного фонда (проекты 17-79-20027 «Обобщенная теория основополагающих физических процессов в высокотемпературных электромеханических преобразователях энергии, интегрированных в авиационный газотурбинный двигатель», 16-19-10005«Создание высокооборотных и сверхвысокооборотных электромеханических преобразователей энергии средней и малой мощности на гибридном магнитном подвесе для аэрокосмической отрасли»); Российского фонда фундаментальных исследований (проект 16-38-60001 «Исследования основополагающих физических процессов, протекающих в гибридных системах магнитной левитации энерговырабатывающего оборудования автономных систем электроснабжения»).

Внедрение результатов работы

Результаты диссертационного исследования внедрены в виде рекомендаций, методик расчетов, пакетов прикладных программ, промышленных образцов на предприятиях и научных организациях Российской Федерации: АО «УАПО» (Уфа), АО «ОКБ Кристалл» (Москва), АО «УНПП «Молния» (Уфа), ФГУП «ЦИАМ» (Москва), ООО «АльфаГидро» (Санкт-Петербург), ООО «Эрга» (Калуга), АО «УППО» (Уфа) и в виде алгоритмов и программ оптимизации и моделирования магнитоэлектрических электромеханических преобразователей энергии в учебном процессе ФГБОУ ВО «УГАТУ», что подтверждается соответствующими актами.

По работе имеются следующие замечания:

1. В диссертации утверждается, что 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 (стр.86), однако, о воздействии внешних полей на работоспособность СГЭ ЛА в представленном исследовании не упоминается.

2. В выводах к главе 2 указано, что предложен обобщенный критерий оптимизации агрегатов в составе СГЭ ЛА, представляющий собой произведение теплового фактора и массы генератора, ТВУ и статического преобразователя. Не ясен

принцип формирования данного критерия, а в материалах диссертации его содержание не поясняется.

3. Рекомендуется выбирать для ЭМП с ВПМ относительную длину $\lambda \geq 3$ исходя из увеличения составляющей напряженности магнитного поля по оси z, однако не указан диапазон мощностей ЭМП, для которого справедливы эти рекомендации и не оценено влияние увеличения λ на тепло и механику ротора, что необходимо для высокоиспользуемых, высокооборотных ЭМП.

4. В чем новизна методики моделирования магнитного поля реакции якоря (п.4.2.1)?

5. При исследовании влияния характера нагрузки на работу ЭМП с выпрямителем сделан вывод о том, что самым тяжелым вариантом является работа на активно-емкостную нагрузку. Какие устройства в реальных условиях эксплуатации СГЭ на борту ЛА могут создавать нагрузку такого характера?

6. В работе большое внимание уделено изменению удельных потерь в стали в зависимости от различных факторов: частоты, температуры и т.д., однако не исследовано влияние на удельные потери подмагничивания магнитопровода постоянным полем, что в частности весьма актуально при реализации способа стабилизации напряжения ЭМП с ВПМ посредством подмагничивания спинки статора.

Следует отметить невысокое качество некоторых рисунков, затрудняющих восприятие материала диссертационной работы и наличие грамматических и стилистических ошибок.

Заключение

Диссертация Вавилова В.Е. на соискание ученой степени доктора технических наук выполнена в соответствии с требованиями, предъявляемыми к диссертационным исследованиям, соответствует по содержанию специальности 05.09.03.- «Электротехнические комплексы и системы», является научно-квалификационной работой, где изложены научно-обоснованные технические решения, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие страны, что соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» ВАК Министерства науки и высшего образования РФ, утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г., № 842 (п.28), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора технических наук.

Вавилов Вячеслав Евгеньевич заслуживает присуждения ему ученой степени доктора технических наук по специальности 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы».

Официальный оппонент:
Профессор кафедры "Электромеханика и автомобильное электрооборудование"
Федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования
«Самарский государственный технический университет»,
доктор технических наук,
доцент Зубков Юрий Валентинович

Подпись Ю.В. Зубкова заверяю

Ученый секретарь ФГБОУ ВО
«Самарский государственный технический университет»,

д.т.н. Ю.А. Малиновская

Зубков Юрий Валентинович, доктор технических наук, научная специальность 05.09.01 «Электромеханика и электрические аппараты», доцент.

Профессор кафедры «Электромеханика и автомобильное электрооборудование»

ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»

443100, РФ, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д.224, Главный корпус.

28.02.2020г.

Согласен на обработку персональных данных