

Отзыв

официального оппонента доктора технических наук, профессора
Казакова Юрия Борисовича
на диссертационную работу Герасина Александра Анатольевича
«Разработка перспективных электромеханических преобразователей энергии
летательных аппаратов на гибридных магнитных подшипниках
и создание методологических основ их сертификации»,
представленную на соискание ученой степени доктора технических наук
по специальности 05.09.01 «Электромеханика и электрические аппараты»

Актуальность темы

Авиакосмическая отрасль является высокотехнологичной сферой, развитие которой способствует развитию других отраслей промышленности и определяет технологический уровень развития государства. С появлением мощных эффективных электромеханических преобразователей энергии (ЭМПЭ) с высоким быстродействием и с учетом недостатков гидравлических приводов тенденцией развития авиастроения становится создание более электрического или даже полностью электрического самолёта. Применение в летательных аппаратах (ЛА) только электрических приводов позволяет улучшить эксплуатационные показатели и снизить массу систем ЛА на 5-10 %, снизить аэродинамическое сопротивление, повысить топливную эффективность. Суммарная мощность ЭМПЭ полностью электрического самолёта, по сравнению с обычным самолётом, возрастает в 2-4 раза. Повышение мощности ЭМПЭ без увеличения массогабаритных показателей, что важно для ЛА, возможно при повышении частоты вращения ЭМПЭ, но это вызывает значительное увеличение механических потерь. При расчете высокоскоростных ЭМПЭ необходимо учитывать изменение процесса трения в подшипниковых опорах. Применение гибридных магнитных подшипников (ГМП) в ЭМПЭ позволяет обеспечить контроль положения ротора ЭМПЭ, резко снизить потери в подшипниках.

Эффективное решение задач управления ЛА на различных фазах полета обуславливается возможностью использования в заданный момент времени оптимального количества (т.е. в смешанном составе) исполнительных электромеханических устройств (двигатели, генераторы и пр.), что вызывает необходимость поддержания заданных режимов энергопотребления не только отдельных исполнительных устройств, но и систем/подсистем ЛА в целом. Возникает задача создания распределенной системы ЭМПЭ нового поколения в составе совокупности исполнительных устройств, обеспечивающих управление в реальном времени техническими характеристиками ЭМПЭ и энергопотреблением/функционированием систем ЛА. Необходима разработка и промышленное внедрение перспективных ЭМПЭ ЛА, которые будут обеспечивать эффективную выработку и преобразование механической энергии в электрическую энергию на борту ЛА (стартер-генератор, генератор) и ее потребление с преобразованием в механическую энергию для управления системами ЛА (электродвигатели). При этом помимо формирования концепции создания подобных ЭМПЭ, необходимо разработать научно-методологическое обеспечение их внедрения на борт ЛА. В работах отечественных и зарубежных авторов эта проблема решается несистемно, что приводит к разрыву между

теоретическими исследованиями и внедрением. В отличие от известных работ, в диссертации Герасина А.А. ЭМПЭ ЛА представляются в виде обобщенной системы электромеханического преобразования энергии, при этом рассматривается комплекс мероприятий для создания и внедрения перспективных ЭМПЭ с ГМП. Поэтому актуальность диссертационной работы Герасина А.А., посвященной разработке перспективных ЭМПЭ с использованием ГМП для современных ЛА с повышенным уровнем электрификации, не вызывает сомнений.

Целью работы является решение научной проблемы создания системы перспективных авиационных ЭМПЭ, разработка базовых схмотехнических решений, методов и средств построения ЭМПЭ на ГМП с повышенным ресурсом и систем их управления, в которых учитываются параметры управляющих электромагнитов и силовые характеристики магнитных подшипников на постоянных магнитах.

По объекту исследования - обобщенная система электромеханического преобразования энергии (генераторы, электродвигатели с системами гибридного магнитного подвеса) летательных аппаратов, предмету исследования - характеристики процессов в электромеханических преобразователях энергии, обуславливающих режимы исполнительных устройств в системах летательных аппаратов, цели работы, решаемым задачам и полученным результатам диссертация соответствует формуле специальности и области исследований п.1, п.2, п.3 и п.5 паспорта научной специальности 05.09.01- «Электромеханика и электрические аппараты».

Научная новизна исследований и полученных результатов:

1. Предложена концепция разработки совокупности электромеханических преобразователей энергии перспективных летательных аппаратов, с использованием гибридных магнитных подшипников в быстроходных электрических машинах и обеспечивающая возрастание уровня согласования характеристик электрических машин с характеристиками других компонентов электротехнической системы в широком диапазоне изменения частоты вращения и нагрузки.

2. Разработаны математические и имитационные модели электромеханических преобразователей энергии, отличающиеся возможностью исследований стационарных и переходных процессов в электромеханических преобразователях энергии летательных аппаратов с учетом нелинейности характеристик и эксплуатационных особенностей.

3. Разработаны математическая и имитационная модели электромеханических преобразователей энергии, учитывающие процессы трения в подшипниковых опорах и отличающиеся возможностью учета физических параметров (шероховатость поверхностей, твердость и модуль упругости материалов, температура, частота вращения, вязкость смазки) подшипников на выходные характеристики быстроходных электромеханических преобразователей энергии.

4. Разработаны уточненные математические модели осевого и гибридного магнитных подшипников на постоянных магнитах для высокоскоростных роторных узлов электромеханических преобразователей энергии летательных аппаратов.

5. Предложена математическая модель расчета силы в рабочем зазоре и жесткости осевого магнитного подшипника на постоянных магнитах, основанная на методе эквивалентного соленоида и отличающаяся учетом результатов анализа трехмерного магнитного поля.

6. Разработана методика проектирования и расчета электромеханических характеристик гибридных магнитных подшипников, отличающаяся учетом осевых и радиальных электромагнитных сил внешних и внутренних наборов постоянных магнитов.

7. Разработана методика проектирования и расчета внешних и угловых характеристик высокоскоростных магнитоэлектрических генераторов летательных аппаратов с учетом аэродинамических потерь и механических потерь при повышенных частотах вращения.

8. На основе разработанных математической моделей реализована система электромагнитного управления электромеханическими преобразователями энергии летательных аппаратов, отличающаяся учетом параметров электромагнитов и силовых характеристик магнитных подшипников на постоянных магнитах.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Предложены системные решения повышения жизненного цикла и надежности электромеханических преобразователей энергии летательных аппаратов.

2. Разработаны методы и модели полунатурных испытаний электромеханических преобразователей энергии летательных аппаратов, учитывающие особенности применения гибридных магнитных подшипников в быстроходных магнитоэлектрических машинах.

3. Разработаны перспективные специальные электрические машины для летательных аппаратов, в том числе высокоскоростные магнитоэлектрические генераторы, гибридные магнитные подшипники, системы управления ими, методы сравнения вариантов на основе полезности оценок.

4. Созданы экспериментальные стенды с сертифицированным оборудованием, получено экспериментальное подтверждение теоретических результатов диссертационной работы.

5. Значимы полученные результаты теоретического и экспериментального исследований, анализа статических и динамических процессов в высокоскоростных роторных узлах перспективных электромеханических преобразователей энергии летательных аппаратов на гибридных магнитных подшипниках.

6. Разработаны программные продукты по расчету узлов электромеханических преобразователей энергии (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015616969, №2012610873, №2012616976, №2012610872, №2012619366, №2013619894, №2013660109 и др.) и варианты технических решений, защищенных патентами РФ на изобретения (Патент РФ №2540215, Патент РФ №2552846, Патент РФ №140839, Патент РФ 2498473).

7. Разработана методология и предложены схемы стандартизации и сертификации электромеханических преобразователей энергии как инструмента повышения конкурентоспособности отечественной авиационной техники. Проведена практическая реализация процесса сертификации комплектующих изделий.

8. Практическая значимость работы подтверждается выполнением ряда плановых исследований по теме диссертации по федеральным программам и хозяйственным договорам.

Результаты работы вносят существенный вклад в развитие теории электромеханики летательных аппаратов, в частности в создание электромеханических преобразователей

энергии для более или полностью электрических самолетов. Практическая значимость работы заключается в разработке технологий создания и применения универсальных схемотехнических решений перспективных ЭМПЭ с ГМП, экспериментальной проверке результатов теоретических исследований в реальных комплексах.

Таким образом, цель, поставленная автором в работе, достигнута.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций

Достоверность полученных результатов обеспечивается корректным применением положений теоретической электротехники, электромеханики, теорий трения, надежности, автоматического управления, методов системного анализа и структурного синтеза, использованием современных программ математического моделирования (Maple, Mathcad, Matlab Simulink, Ansys), сравнением с теоретическими и экспериментальными результатами других авторов, а также хорошим совпадением с экспериментальными результатами статических и динамических характеристик, полученных на специально созданном и сертифицированном оборудовании. **Обоснованность результатов** диссертационного исследования удостоверена практикой использования при расчете и конструировании, создании и выполнении специальных испытаний, внедрении разработанных электромеханических преобразователей энергии на ряде электротехнических и авиационных предприятий.

Оценка содержания и оформления диссертации. Структура диссертации общепринятая, имеет внутреннее единство и логическое построение. По каждой главе и диссертации в целом сделаны выводы, которые, скорее всего, представляют результаты работы. Имеется дополнительная справочная информация. Диссертация в целом написана грамотно, с использованием современных технических терминов, аккуратно оформлена.

Диссертация представлена текстом на 307 страницах, состоит из введения, заключения, пяти глав и приложений. Список литературы включает 390 источников.

Во **введении** показана актуальность работы, научная новизна, практическая ценность, сформулирована цель исследования. **В первой главе** на основе цитируемой литературы и собственных исследований автора, проведен анализ современного состояния теории и практики в области перспективных летательных аппаратов, реализуемых в рамках концепции более электрического самолета и полностью электрического самолета. Определены специфические требования к электрическим машинам для реализации данных концепции. На основе обобщенного анализа сформированы требования, которые необходимо предъявлять электрическим машинам ЛА, исследованы тенденции внедрения сверхпроводниковых ЭМПЭ. Произведена оценка и определено место задач сертификации ЭМПЭ при создании новых ЛА. Выявлены нерешенные проблемы в области создания ЭМПЭ для ЛА, обоснованы и сформулированы основные задачи исследования. **Во второй главе** выполнено моделирование ЭМПЭ в системах ЛА, исследованы обобщенные методологические основы моделирования, критерии надежности систем ЭМПЭ. В главе проведен анализ структурных схем и механизмов принятия решений при проектировании ЭМПЭ. Проанализирована общая модель обслуживания систем электромеханических преобразователей энергии по состоянию. **Третья глава** посвящена методологическим основам аппаратной реализации ЭМПЭ в системах ЛА. На основе обобщенных моделей разработаны перспективные конструкции специальных электромеханических преобразователей: высокоскоростных машины, высокомоментных низко-

скоростных двигателей, высокомоментных высокоскоростных двигателей. Рассмотрена управляемость систем ЭМПЭ с распределенными параметрами. Представлен обобщенный алгоритм синтеза нелинейных систем управления ЭМПЭ. **В четвертой главе** представлены частные математические модели для ЭМПЭ, разработаны методы и модели полунатурных испытаний ЭМПЭ в системах ЛА. Представлен математический анализ статических и динамических процессов в электромеханических преобразователях, представлены новые технические решения, разработанные и запатентованные соискателем. Приведены их экспериментальные исследования. **В пятой главе** представлена методология сертификации ЭМПЭ в системах ЛА, включающая анализ вариантов сертификации бортового оборудования в РФ и за рубежом. Описана практическая реализация процессов сертификации ЭМПЭ, приведены обобщенные алгоритмы и методология, позволяющая сертификацию ЭМПЭ, рассмотрены механизмы принятия решений при сертификации ЭМПЭ.

Соответствие автореферата основным положениям диссертации. Автореферат в компактном сжатом виде отражает содержание и основные положения диссертации.

Подтверждение опубликования основных результатов диссертации

Основные результаты диссертации опубликованы в 39 работах, в том числе: в 3 монографиях; 14 научных статьях в ведущих российских журналах из Перечня рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора технических наук; 6 работах, включенных в международные базы цитирования Scopus и WebofScience; 4 патентах РФ на изобретения и полезные модели; 9 свидетельствах о государственной регистрации программ для ЭВМ; 3 докладах на международных и российских конференциях. Содержание диссертации отражено в публикациях с требуемой Положением ВАК полнотой.

По работе имеются следующие замечания:

1. Нет упоминания Российских ученых, защитивших диссертации по магнитным подшипникам по специальности 05.09.01 и анализа их работ. Например, Сарычев А.П. – защита в 2011 г. в МЭИ докторской диссертации «Исследование и разработка ряда электромагнитных подшипников для серии компрессоров газоперекачивающих агрегатов»; Макаричев Ю.А. – защита в 2013 г. в СамГТУ докторской диссертации «Методы анализа и синтеза активных электромагнитных подшипников»; Курбатова Е.П. – защита в 2017 г. в МЭИ кандидатской диссертации «Разработка методов моделирования и проектирования высокотемпературного сверхпроводящего подшипника для кинетического накопителя энергии».

2. В диссертации на стр. 11, на стр. 83, в автореферате на стр. 4 даются отличающиеся формулировки цели и задач.

3. В диссертации не найдено заявленной научной новизны, касающейся методологических основ оптимизации, критерии оптимальности и обобщенного критерия оценки качества.

4. Часть разделов диссертации, например, 3.2, 3.3, 4.1, 4.5, относятся к другой научной специальности.

5. В диссертации акцентируется внимание на взаимосвязь электрических, магнитных, тепловых и механических процессов. Показано, что температура влияет на механические и, опосредовано, на электрические и магнитные процессы. Но как они в свою очередь влияют

на температуру не показано. Нет исследований тепловых режимов ЭМПЭ. Не учитывается изменение магнитных свойств магнитов NdFeB с изменением температуры работы ЭМПЭ.

6. В главе 2 приведены математические модели для оценки вероятности безотказной работы системы ЭМПЭ, но при этом численные расчёты по данным моделям отсутствуют, что затрудняет оценку их эффективности.

7. При высоких частотах вращения и повышенной частоте питающего напряжения сложным образом изменяются потери в стали ЭМПЭ, электрические потери. Не раскрыта методика их расчета. Так как магниты NdFeB обладают электропроводностью, то в динамических режимах, при резких изменениях нагрузки необходимо учитывать наведение вихревых токов в массиве магнитов и возникающие потери.

8. Несмотря на хорошее оформление диссертации и автореферата встречаются неточности и погрешности (стр. 2, 3, 89, 90, 145, 146, 234; рис. 2.3г, 4.1а, 4.20а, 4.7, 4.9; повтор текста на стр. 35 и 68; одинаковые подписи у рис. 4.4 и 4.6; в соотношениях 4.56-4.60 вместо k_{21} , k_{22} , k_{23} , k_{24} нужно записывать k_{31} , k_{32} , k_{33} , k_{34} и др.).

Заключение

Указанные замечания не снижают ценности выполненной работы. В целом диссертация Герасина А.А. представляет законченную научно-квалификационную работу, в которой на основании выполненных автором исследований содержится решение научной проблемы, имеющей важное значение для электромеханики, и соответствует требованиям п.9 Положения о присуждении ученых степеней, предъявляемым к докторской диссертации в области технических наук, а ее автор Герасин Александр Анатольевич заслуживает присуждения ему ученой степени доктора технических наук по специальности 05.09.01 «Электромеханика и электрические аппараты».

Официальный оппонент заведующий кафедрой «Электромеханика» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор

 / Казаков Юрий Борисович/
(153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34. Тел. 84932269706. E-mail: elmash@em.ispu.ru)

Подпись д.т.н., профессора Ю.Б. Казакова подтверждаю:

Проректор по научной работе ИГЭУ

В.В. Тютиков

Дата составления отзыва: «28» августа 2019 г.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». Адрес: 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34. Тел: +7 (4932) 269-706. E-mail: office@ispu.ru Сайт: <http://ispu.ru>