

## Отзыв

официального оппонента 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

Диссертационная работа Герасина А. А. посвящена решению актуальной научной проблемы в области создания перспективных электромеханических преобразователей энергии (ЭМПЭ) на гибридных магнитных подшипниках для современных и перспективных летательных аппаратов (ЛА), а также созданию методологических основ их сертификации в условиях дефицита выделяемых материальных и людских ресурсов, когда разработка бортового оборудования на основе принципиально новых технологий интегрированной модульной авионики (ИМА) затруднена.

Создание новых, перспективных летательных аппаратов, обладающих высокими тактико-техническими характеристиками, направленными на повышение их электрификации, обеспечивает их маневренность, экологичность и экономическую рентабельность эксплуатации. Решение научной проблемы, поставленной в диссертации, обеспечивает теоретическую и практическую возможность создания новых ЛА с повышенным уровнем электрификации, поэтому актуальность темы исследований Герасина А. А. не вызывает сомнений.

Основные задачи, решенные соискателем в работе:

1. Моделирование ЭМПЭ в системах ЛА, включающее разработку методологических основ и критериев их оптимизации.

2. Разработка и создание ЭМПЭ в системах ЛА, включающие системные решения повышения надежности ЭМПЭ, специальные ЭМПЭ с частотным регулированием, перспективные конструкции специальных ЭМПЭ, замкнутые системы автоматического управления распределенными объектами с сосре-

точными входами и выходами, синтез системы управления ЭМПЭ, сравнение вариантов на основе метода оценки полезности.

3. Разработка методов и моделей полунатурных испытаний ЭМПЭ в системах ЛА, включающих: особенности применения гибридных магнитных подшипников в быстроходных машинах; математическую модель системы электромагнитного управления гибридными магнитными подшипниками; математическую модель осевого магнитного подшипника на постоянных магнитах для высокоскоростных роторных узлов; анализ динамических процессов в высокоскоростных роторных узлах на гибридных магнитных подшипниках; экспериментальное исследование влияния технического состояния магнитных подшипников на параметры их внешнего магнитного поля; общую модель обслуживания системы по состоянию.

4. Стандартизация и сертификация ЭМПЭ в системах ЛА, включающие анализ вариантов сертификации бортового оборудования на основе интегрированной модульной авионики (ИМА) в РФ и за рубежом, практическую реализацию процессов сертификации ЭМПЭ.

По предмету исследования и решаемых задач диссертация соответствует специальности 05.09.01 - «Электромеханика и электрические аппараты».

#### **Новизна исследований и полученных результатов**

Научная новизна определяется тем, что в работе:

- предложены новые математические и имитационные модели ЭМПЭ в системах электроснабжения ЛА;

- разработаны методологические основы оптимизации ЭМПЭ, критерии оптимальности, структурные схемы механизмов принятия решений и Имитационная модель ЭМПЭ с учетом процессов, происходящих в подшипниковых опорах;

- произведен синтез систем управления ЭМПЭ, включая математическую модель системы электромагнитного управления гибридными магнитными подшипниками (ГМП) и математическую модель осевого магнитного подшипника на постоянных магнитах (ОМПМ) для высокоскоростных роторных узлов;

- разработана математическая модель для определения силы в рабочем зазоре и жесткости ОМППМ на основе анализа магнитного поля постоянного магнита (ПМ) и метода эквивалентного соленоида;

- разработаны методологические основы сертификации авиационного электрооборудования.

### **Теоретическая и практическая значимость работы:**

- предложены системные решения повышения жизненного цикла и надежности ЭМПЭ, специальные электромеханические преобразователи с частотным регулированием;

- разработаны методы и модели полунатурных испытаний электромеханического привода (ЭМП) энергии в системах ЛА, включающие особенности применения ГМП в быстроходных магнитоэлектрических машинах;

- разработаны специальные электромеханические преобразователи с частотным регулированием, перспективные конструкции специальных ЭМПЭ, замкнутые системы автоматического управления распределенными объектами с сосредоточенными входами и выходами, синтез системы управления ЭМПЭ, сравнение вариантов на основе полезности оценок;

- получено экспериментальное подтверждение теоретических результатов диссертационной работы;

- разработаны варианты технических решений по ЭМПЭ, защищенных патентами РФ на изобретения (Патент РФ № 2540215, Патент РФ № 2552846, Патент РФ № 140839, Патент РФ 2498473), а также программные продукты по расчету узлов ЭМПЭ (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015616969, № 2012610873, № 2012616976, № 2012610872, № 2012619366, №2013619894, № 2013660109 и др.);

- разработана методология и предложены схемы стандартизации и сертификации ЭМПЭ как инструмент повышения конкурентоспособности отечественной авиационной техники на зарубежных рынках;

- проведена практическая реализация процесса сертификации комплектующих изделий, включая ЭМПЭ.

**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 электрифицированных самолетов (ЭС). Определены требования к электрическим машинам для реализации данных концепции. На основе обобщенного анализа сформированы требования, которые необходимо предъявлять при создании ЭС, 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 ЭС, сформулированы и обоснованы основные задачи исследования.

**Во второй главе** выполнено моделирование ЭМПЭ в системах электропитания ЛА, исследованы обобщенные методологические основы моделирования и оптимизации ЭМПЭ, критерии оптимальности ЭМПЭ, необходимые для принятия решений по надежности систем ЭМПЭ. Проведен анализ структурных схем и механизмов принятия решений при проектировании ЭМПЭ. Представляет интерес разработанная и исследованная общая модель обслуживания систем ЭМПЭ по фактическому состоянию.

**Третья глава** посвящена методологическим основам аппаратной реализации ЭМПЭ в системах ЛА. Разработаны на основе обобщенных моделей и представлены перспективные конструкции специальных электромеханических преобразователей: высокоскоростных машины, высокомоментных низкоскоростных двигателей, высокомоментных высокоскоростных двигателей. Рассмотрена управляемость систем ЭМПЭ с распределенными параметрами. Представлен обобщенный алгоритм синтеза нелинейных АСУ ЭМПЭ.

**В четвертой главе** представлены частные математические модели для ЭМПЭ, разработаны методы и модели полунатурных испытаний ЭМПЭ в системах ЛА. Представлен математический анализ процессов в электромеханических преобразователях. Представлены новые разработанные и запатентованные технические решения, соискателем приведены их экспериментальные исследования.

**В пятой главе** представлена методология сертификации ЭМПЭ в системах ЛА, включающая анализ вариантов сертификации бортового оборудования на основе ИМА в РФ и за рубежом, практическую реализацию процессов их сертификации. Приведены обобщенные алгоритмы и методология, позволяющая сертификацию ЭМПЭ для выхода на зарубежные рынки, рассмотрены механизмы принятия решений при их сертификации. Данный результат обладает особой научной, практической и экономической ценностью.

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

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

- разработаны и созданы ЭМПЭ в системах ЛА, включающие системные решения повышения надежности ЭМПЭ, специальные ЭМПЭ с частотным регулированием, перспективные конструкции специальных ЭМПЭ, замкнутые системы автоматического управления распределенными объектами с сосредоточенными входами и выходами, синтез системы управления ЭМПЭ, проведено сравнение вариантов на основе метода оценки полезности;

- разработаны методы и модели полунатурных испытаний ЭМПЭ в системах ЛА, включающих: особенности применения гибридных магнитных подшипников в быстроходных машинах; математическую модель системы электромагнитного управления гибридными магнитными подшипниками; математическую модель осевого магнитного подшипника на постоянных магнитах для высокоскоростных роторных узлов; анализ динамических процессов в высокоскоростных роторных узлах на гибридных магнитных подшипниках; экспериментальное исследование влияния технического состояния магнитных подшипников на параметры их внешнего магнитного поля; общую модель обслуживания системы по фактическому состоянию;

- разработана методология стандартизации и сертификации ЭМПЭ в системах ЛА, включающая анализ вариантов сертификации бортового оборудования на основе интегрированной модульной авионики в РФ и за рубежом, а

также рекомендации по практической реализации процессов сертификации ЭМПЭ.

### **Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций.**

**Достоверность полученных результатов** обеспечивается применением строгих математических методов исследования, экспериментальной проверкой, сравнением с теоретическими и экспериментальными результатами других авторов. Результаты теоретических исследований в виде статических и динамических характеристик проверены на экспериментальных данных.

### **Значимость для науки и практики выводов и рекомендаций.**

Результаты работы вносят существенный вклад в развитие теории и практики авиакосмической электромеханики, в частности в создание ЭМПЭ для полностью электрифицированных самолетов.

Диссертация имеет внутреннее единство, написана с использованием правильных технических терминов.

Основные результаты диссертации опубликованы в 39 работах, в том числе: 3 монографии; 14 научных статей в ведущих российских журналах из Перечня рецензированных научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора технических наук; 6 работ, включенных в международные базы цитирования Scopus и WebofScience; 5 патентов РФ на изобретения; 9 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ; 3 доклада на международных и российских конференциях

### **Общие замечания по диссертационной работе:**

1. В работе введены понятия «более» и «полностью» электрифицированные ЛА. Было бы целесообразно ввести классификацию (количественную оценку степени) электрификации ЛА;

2. При рассмотрении накопителей энергии приводятся устаревшие кислотные (см.рис. 1.8) и отсутствуют перспективные литиевые, они упоминаются в сравнении с топливными элементами;

3. Ротор на магнитных подшипниках в ЭМПЭ ЛА будет испытывать существенные перегрузки при взлете, посадке и турбулентности ЛА. Однако в работе не оценено влияние данных перегрузок на работоспособность ЭМПЭ ЛА, а также требуемое обеспечение надежности при отказе магнитных подшипников;

4. Математические модели для оценки вероятности безотказной работы системы ЭМПЭ (глава 2) не подтверждаются численными расчётами, что затрудняет оценку их эффективности;

5. Приведенные исследования дисковых ЭМПЭ (глава 3) не подтверждаются анализом эффективности их использования в системах ЛА;

6. Проведены исследования сил в аксиальных магнитных подшипниках методом эквивалентного соленоида (глава 4), но при этом не указаны погрешности, вносимые данным методом с учетом нелинейности их характеристик при переходе к реальным постоянным магнитам;

7. В работе имеют место мелкие стилистические погрешности.

Указанные замечания не снижают ценности выполненной работы.

Содержание автореферата соответствует основным положениям диссертации.

### **Заключение**

В целом диссертация представляет законченную научно-квалификационную работу, выполненную автором самостоятельно на высоком научном уровне. В диссертации приведены научные результаты, позволяющие квалифицировать их как совокупность обоснованных технических и технологических решение в области модернизации систем электрификации перспективных ЛА, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие самолетостроения страны. На основании выполненных автором исследований содержится решение научной проблемы, имеющей важное значение для электромеханики, и соответствует требованиям п.9, 11, 14. Положения о присуждении ученых степеней, предъявляемым к докторской диссертации в области технических наук, а ее автор Герасин Александр

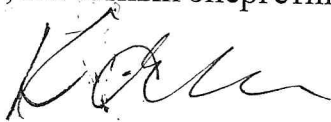
Анатольевич заслуживает присуждения ему ученой степени доктора технических наук по специальности 05.09.01 «Электромеханика и электрические аппараты».

Официальный оппонент, профессор кафедры «Системы электроснабжения РК», ФГБОУ ВО ВА РВСН имени Петра Великого

Заслуженный деятель науки РФ, Почетный энергетик РФ

д.т.н., профессор

«12» сентября 2019 г.



Капелько К. В.

Подпись официального оппонента Капелько К. В. заверяю

Начальник отдела кадров

ПОДПОЛКОВНИК



Иванов Е.В.