

Ученому секретарю  
диссертационного совета  
Д 212.125.07 при ФГБОУ ВО  
МАИ (НИУ)  
Дежину Д.С.

Волоколамское шоссе, д. 4,  
Москва, 125080

### **ОТЗЫВ**

официального оппонента доктора технических наук, доцента Захаренко Андрея Борисовича на диссертационную работу Калия Валерия Алексеевича «Система разработки высокооборотных авиационных синхронных генераторов с электромагнитным возбуждением», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальностям 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты

#### **Актуальность работы**

В настоящее время в Российской Федерации идет активное обновление авиапарка государственной авиации, импортозамещение бортового оборудования и ребрендинг воздушных судов гражданской авиации. В силу данного направления задача по созданию энергоэффективных систем электроснабжения, обладающих качеством функционировать на воздушных судах, созданных на принципе «более электрического самолета» является актуальным направлением в развитии авиационной отрасли России.

Эксплуатация воздушных судов нового поколения имеет существенное отличие, заключающееся в высокой степени электрификации воздушных судов, что обусловлено наличием на борту воздушного судна автоматического и автоматизированного оборудования с широкомасштабным использованием цифровых вычислительных технологий, скоростных электроприводов. Сказанное приводит к необходимости создания мощных энергоэффективных систем генерирования электроэнергии различающихся по роду тока и величинам напряжения и частоты и соответствующей методологии.

Решение научной проблемы по разработке и созданию системы проектирования авиационных генераторов для электроснабжения летательных

аппаратов в сфере решения государственной задачи создания высокоэффективных источников для систем электроснабжения перспективных летательных аппаратов. осуществляется на основе методологий моделирования, расчета, поверки расчетов, анализа и синтеза электромеханических преобразователей, баз данных и баз знаний в виде алгоритмов и программ, аппаратных средств хранения и обработки информации, свода модифицированных производственных иерархических правил и рекомендаций, реализуемых на практике проектной организацией.

### **Степень обоснованности научных положений**

Исследование, проведенное в данной диссертационной работе, проводилось с использованием системного подхода, что позволило создать систему разработки высокооборотных авиационных синхронных генераторов с электромагнитным возбуждением, включающую процессы эскизного, технического и рабочего проектирования авиационных синхронных генераторов с электромагнитным возбуждением, совокупность методологий моделирования, расчета, поверки расчетов, анализа и синтеза электромеханических преобразователей, баз данных и баз знаний в виде алгоритмов и программ, аппаратных средств хранения и обработки информации, свода модифицированных производственных иерархических правил и рекомендаций.

В результате теоретических и экспериментальных исследований изучена информация необходимая для разработки конструкций высокооборотных авиационных синхронных генераторов и стартер-генераторов с электромагнитным возбуждением для современных воздушных судов типа МС-21, SSJ-95В, Ил-112В.

Экспериментальные исследования осуществлялись в лабораторных условиях испытательных организаций, на стендах конструкторских организаций и предприятий промышленности, летных испытаниях: АО «Уфимское агрегатное производственное объединение», АО «Технодинамика», ПАО «Ил», АО «Воронежское акционерное самолетостроительное общество», ПАО «Туполев».

Главная цель диссертации заключается в исследовании и разработке методологических теоретических положений и научно обоснованных технических решений для проектирования источников электрической энергии для современных и перспективных авиационных систем электроснабжения с высокооборотными бесконтактными генераторами и стартер-генераторами с электромагнитным возбуждением без привода постоянной частоты вращения.

По целям исследования и решаемым проблемам исследование проведено по пунктам 2, 5 специальности 05.09.01.

**Достоверность и новизна исследований, полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

Достоверность результатов исследований определяется следующим:

- **идея базируется** на методе системного анализа качества авиационной системы электроснабжения и его составляющих, эффективности, надежности и эксплуатационной технологичности, концептуальной и математической формализации алгоритма управления системами генерирования электроэнергии по роду тока;

- **теория построена** на положениях системного анализа, применено математическое и имитационное моделирование, теоретико-множественное моделирование, теория оптимизации. Методология исследований включала труды по теории, методам, методикам проектирования авиационных электрических машин, на основании которых созданы авиационные электрические машины для отечественных и зарубежных воздушных судов, теорий линейных и нелинейных электрических цепей, методов теории потенциала, явный численный метод решения уравнений теплопроводности, метод сеток, неградиентного поиска, которые согласуются с опубликованными материалами по теме диссертации;

- **практические** результаты получены при оценке эксплуатационных свойств системы генерирования СГ-112-115 воздушного судна Ил-112В; лабораторно-стендовых испытаний генераторов ГСР-90/120 для воздушного судна МС-21 и ГСР-СТ-9В для проекта «Минога»;

- **использованы** данные по рассматриваемой тематике, полученные другими авторами в аналогичных исследованиях, для оценки авторских данных. Сравнение показало непротиворечивость результатов исследования;

- **установлено** качественное и количественное совпадение результатов с результатами применения системы электроснабжения СГ-112-115 воздушного судна Ил-112В, находящегося на государственных испытаниях;

- **использованы** современные методики организации эскизного, технического и рабочего проектирования, методы проверочных и поверочных расчетов, метрологической аттестации методик расчетов, проведения испытаний на стойкость к внешним воздействующим факторам.

**Новизна** исследований заключается в разработке методологии проектирования энергоэффективных систем генерирования электроэнергии воздушных судов нового поколения, включающей:

- методику определения главных геометрических размеров высокооборотного синхронного генератора, основанная на применении метода неградиентного случайного поиска с обучением по способу Д.И. Гладкова;
- расчет допустимой области главных размеров высокооборотного синхронного генератора с электромагнитным возбуждением с номинальной мощностью 250 кВА и выше;
- методику имитационного моделирования режимов работы синхронного генератора, основанная на совместном решении двух типов динамического моделирования;
- методику оптимального проектирования высокооборотного синхронного генератора с электромагнитным возбуждением, основанная на локальном применении параметрических методов поиска однозначно определенного критерия оптимальности на разных этапах проектирования;
- методологию оптимального проектирования высокооборотных синхронных генераторов как совокупность упорядоченных методов разработки конструкции на этапе технического проектирования;
- теоретические и экспериментальные данные, подтверждающие основные положения разработанной автором методологии оптимального проектирования высокооборотных генераторов с электромагнитным возбуждением.

### **Значимость для науки и практики полученных автором результатов**

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в формировании концептуальной основы системного решения проблемы создания электромеханических преобразователей энергии воздушных судов нового поколения за счет использования информационных технологий и изученных закономерностей свойств высокооборотных синхронных генераторов, интеллектуальных систем и методологий проверочных и поверочных расчетов авиационных систем электроснабжения.

На основе системного подхода сформирована многоплановая задача согласования лётно-технических, эксплуатационно-технических свойств систем электроснабжения и методологически обоснованы направления создания мощных электромеханических преобразователей энергии воздушных судов, что является развитием электротехнической науки.

Система разработки высокооборотных авиационных синхронных генераторов с электромагнитным возбуждением, представляющая собой методологию проектирования синхронных электрических машин для систем электроснабжения воздушных судов, позволила создать ряд генераторов электрической энергии, отвечающих современным требованиям, и развить теорию по созданию авиационных электрических машин большой мощности.

Система разработки авиационных генераторов электроэнергии представляет собой совокупность методологий моделирования, расчета, проверки расчетов, анализа и синтеза электромеханических преобразователей, баз данных и баз знаний в виде алгоритмов и программ, аппаратных средств хранения и обработки информации, свода модифицированных производственных иерархических правил и рекомендаций принятия решений с использованием методологий Simulink, Matlab, сервисов сопровождения программного обеспечения Software Maintenance Service, пакета масштабируемых программных решений для поддержки жизненного цикла изделий Teamcentre, что является новым научным результатом.

**Практическая ценность результатов исследования** определяется внедрением технических решений по системам генерирования на новых воздушных судах ПАО «Ил» - Ил-112В, Ил-476, ПАО «НПК «Иркут» - МС-21, ПАО «Сухой» (АО «Гражданские самолеты Сухого») - SSJ-95В, и использованием в процессе создания регламентирующих и руководящих документов, таких как государственные и отраслевые стандарты ГОСТ, ОСТ, технические условия ТУ, общие тактико-технические требования ОТТ, руководящие документы РД.

#### **Оценка содержания диссертации, ее завершенность**

Рассматриваемая диссертационная работа Калия В.А. является законченной научно-квалификационной работой, в которой автор четко обозначил направленность, актуальность, сформулировал проблему, сформировал цель и задачи исследования. Структура работы последовательная и состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, написана хорошим научным языком и правильно оформлена.

**Во введении** обосновывается актуальность исследования, дается анализ состояния проблемы, излагаются основные научные положения, результаты внедрения.

**В главе 1** проводится проблемно-целевой анализ путей построения системы разработки высокооборотных авиационных синхронных генераторов с

электромагнитным возбуждением, идентифицирована и формализована решаемая проблема, обоснована методология решения проблемы создания высокооборотных авиационных синхронных генераторов с электромагнитным возбуждением, и создания на их основе систем генерирования электроэнергии.

**Глава 2** посвящена разработке методологических основ проектировочных, поверочных электромагнитных, тепловых, гидравлических и механических расчетов электрических машин и синтезу системы проектирования авиационных синхронных электрических машин, которая включает в себя электромагнитные, тепловые, механические, вентиляционные расчеты, разработку 3D-модели электрической машины и ее составных частей, конструкции, удовлетворяющей технологическим требованиям ее изготовления при минимальных затратах и хорошей эксплуатационной технологичности и надежности.

Система включает полевой электромагнитный расчет магнитной системы машины на основе систем уравнений Максвелла для синхронных генераторов методом конечных элементов с помощью методологии ANSYS Mechanical APDL и авторской методики расчета статических нагрузочных режимов и переходных процессов в связанной системе «основной генератор – возбуждатель» путем одновременного численного моделирования непосредственно в нагрузочном режиме. Указанный аспект является развитием теории электротехники.

**Глава 3** посвящена разработке методологической базы оптимального проектирования авиационных высокооборотных синхронных генераторов с электромагнитным возбуждением методами выделения ведущего критерия оптимальности. Необходимые и достаточные другие критерии образуют множество ограничений в виде штрафных и барьерных функций.

Новизну исследования в главе представляет методология оптимального проектирования высокооборотных синхронных генераторов с электромагнитным возбуждением основанную на трех принципах: полная конструкция электрической машины создается на этапе технического проектирования по традиционной технологии с выпуском рабочей конструкторской документации, или по технологии электронной документации; оптимальное проектирование осуществляется путем поиска наилучшего локального экстремума с помощью достижения локальных оптимумов на каждом из этапов проектирования; единство этапов проектирования, включенных в единый алгоритм.

**В главе 4** представлены практические результаты проектирования высокооборотных синхронных генераторов с электромагнитным возбуждением различной мощности в рамках ОКР, НИР и НИОКР для современных и перспективных отечественных воздушных судов.

Даны характеристики опытного образца высокооборотного синхронного генератора с электромагнитным возбуждением ГСР-40НЧ системы электроснабжения СГ-112-115 легкого транспортного воздушного судна нового поколения типа Ил-112В в условиях серийного производства АО «УАПО», обладающего высокими массо-энергетическими удельными характеристиками; экспериментальный образец высокооборотного синхронного генератора ГСР-90/120 с номинальной мощностью 120 кВА для воздушного судна МС-21, который по основным характеристикам не уступает синхронным генераторам американской корпорации Hamilton Sunstrand, предварительно устанавливаемого на это воздушное судно; полные 3D-модели синхронных генераторов различной мощности во исполнение заказа Министерства промышленности и торговли РФ в течение 2015–2016 гг., включая системы электроснабжения самолетов разработки общества АО «Гражданские самолеты Сухого» типа SSJ; технический проект синхронного генератора с электромагнитным возбуждением с номинальной мощностью 250 кВА и максимальной мощностью 500 кВА, который работает в диапазоне частот вращения 10800...24000 об/мин. Данная электрическая машина действующих аналогов в России не имеет.

**В заключении** даются обобщенные выводы и рекомендации по работе в целом, которые обоснованы и логично вытекают из материалов диссертации.

**Личный вклад автора** состоит в идентификации проблемы, формулировании цели и постановке задач исследования, разработке методологии, технических и технологических решений, непосредственном участии в выполнении основного объема теоретических и экспериментальных исследований опытных и экспериментальных образцов, системном анализе полученных результатов и формулировке выводов, создании опытных и экспериментальных образцов, подготовке основных публикаций по выполненному исследованию.

Вместе с тем, **представленная работа не лишена недостатков**, основными из которых являются:

1 На стр. 107 диссертации говорится, что введение элементов конструкции (обмоток, держателей обмоток, блока диодов и т.д.) в расчетную модель в явном виде приведёт к *неоправданному увеличению расчетной*

*жесткости конструкции.* Автор рекомендует учитывать только их инерционный вклад. Выделенное курсивом утверждение представляется сомнительным и может свидетельствовать о неполной адекватности расчетной модели. Возможно, автор имел в виду, что приближенный учет конструкции обмоток, держателей обмоток, блока диодов и т.д. в виде их масс и моментов инерции приведет к упрощению расчетной модели и более быстрому получению адекватных результатов.

2 На стр. 125 диссертации сказано, что тепловой поток в статоре и роторе может быть рассчитан отдельно, т.к. *воздушный зазор является практически идеальным изолятором в тепловом отношении.* Такое допущение представляется не совсем обоснованным, т.к. не указана величина воздушного зазора.

3 В таблице 3.10 «Этапы разработки электрической машины» в разделе «Изготовление, испытания» сразу после исследовательских испытаний идут предварительные испытания (стр. 193 диссертации). Согласно действующему регламенту, изделие, предъявляемое на предварительные испытания, должно быть принято ОТК и ВП МО РФ, заполнен его паспорт или формуляр. Поэтому предварительным испытаниям всегда предшествуют приемо-сдаточные. Этот вид испытаний в таблице пропущен.

Замечания, однако, не снижают общего положительного впечатления от работы.

### **Заключение**

В диссертационной работе Каля Валерия Алексеевича решена научная проблема, имеющая важное хозяйственное значение, заключающаяся в создании системы разработки высокооборотных авиационных синхронных генераторов с электромагнитным возбуждением. Следует также отметить, что на базе этой системы создан ряд научно обоснованных технических решений устройств генерирования электроэнергии.

Основные материалы и результаты диссертации изложены в 30 опубликованных автором работах, в том числе в 12 статьях в изданиях, включенных ВАК РФ в перечень для опубликования докторских диссертаций и изданиях, входящем в международную систему цитирования «Scopus», одной рецензируемой монографии. Автореферат в целом соответствует основному содержанию диссертации, оформлен в соответствии с имеющими требованиями, стиль изложения и представленные в нем материалы способствуют пониманию существа диссертационной работы.

Тема диссертационной работы и ее содержание соответствуют паспорту специальности 05.09.01 – Электротехника и электрические аппараты.

Качество и объем проведенных актуальных исследований, полученные теоретические результаты и практическая значимость удовлетворяют требованиям ВАК РФ, предъявляемым к докторским диссертациям, работа в целом соответствует п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», а её автор, Калий Валерий Алексеевич, заслуживает присуждения ему ученой степени доктора технических наук.

Начальник отдела общих научно-технических исследований  
Акционерного общества «Научно-производственная корпорация  
«Космические системы мониторинга, информационно-управляющие и  
электромеханические комплексы» имени А.Г. Иосифьяна»  
(АО «Корпорация «ВНИИЭМ»),  
доктор технических наук, доцент  Захаренко Андрей Борисович.

Захаренко А.Б. защитил диссертацию на соискание ученой степени д.т.н. по специальности 05.09.01 «Электромеханика и электрические аппараты».

Адрес: 107078, РФ, г. Москва, Хоромный тупик, дом 4, строение 1,  
тел. (495) 366 26 44, e-mail: otдел18@mcc.vniiem.ru.

1 октября 2019 года

Подпись официального оппонента доктора технических наук, доцента Захаренко А.Б. заверяю. Заместитель генерального директора АО «Корпорация ВНИИЭМ» по научной работе, главный конструктор по динамике и прочности космических аппаратов, доктор технических наук, профессор

1 октября 2019 года



 Геча Владимир Яковлевич