

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора технических наук, профессора Костикова Владимира Григорьевича на диссертационную работу Каля 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

1. Общая характеристика диссертационной работы

Современный этап развития авиации характеризуется ростом энерговооруженности летательных аппаратов и роли приемников первой категории в выполнении штатных задач. При этом повышаются требования к качеству электроэнергии со стороны большинства приёмников и продолжительности автономного функционирования.

Многообразные бортовые системы, которые выполняют свои функции на основе различных физических принципов, предъявляют противоречивые требования к качеству электроснабжения. Существенная модернизация летательных аппаратов сопровождается случаями, когда характеристики отдельных типов модернизированных аппаратов ухудшались по сравнению с базовым типом вследствие резкого ухудшения качества электроснабжения из-за электротехнической несовместимости модернизированных комплексов и централизованной системы электроснабжения (СЭС) объекта. В этих условиях безопасная и эффективная эксплуатация ЛА возможна при использовании усовершенствованных СЭС на базе высокооборотных синхронных генераторов. Поэтому диссертация Каля В.А., направленная на решение проблемы создания и совершенствования СЭС авиационной техники для обеспечения эффективной работы электрифицированных систем летательного аппарата, прежде всего автоматического управления, навигации, радиолокационной системы и управления высокоточным оружием, является, безусловно, актуальной.

Решение поставленной в работе научной проблемы осуществляется за счет разработки реализуемых на практике методик и технических решений по конструированию систем электроснабжения на основе высокооборотных авиационных синхронных генераторов с электромагнитным возбуждением. В работе приведены научно обоснованные технические решения по созданию каналов генерирования систем электроснабжения с многоуровневыми режимами функционирования, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие авиации и повышение безопасности полетов.

На основании теоретических и экспериментальных исследований получена необходимая и достаточная информация для разработки современных конструктивных решений высокооборотных авиационных синхронных генераторов и стартёр-генераторов с электромагнитным возбуждением.

Экспериментальные исследования проводились в лабораторных условиях испытательных организаций, на стендах самолётов типа МС-21, SSJ-95В, Ил-112В, в конструкторских бюро и на промышленных предприятиях, а также в процессе лётных испытаний, проводимых ПАО «Ил», АО «Воронежское акционерное самолетостроительное общество», ПАО «Туполев», АО «Технодинамика», АО «Уфимское агрегатное производственное объединение».

Целью работы является разработка научно обоснованных технических решений на основе созданных методик, алгоритмов и программ, обеспечивающих проектирование источников электрической энергии для современных и перспективных авиационных систем электроснабжения с высокооборотными бесконтактными генераторами и стартёр-генераторами с электромагнитным возбуждением при работе с приводом переменной частоты вращения.

По целям и решаемым проблемам исследование проведено по специальностям 05.09.01 (пункты 2 и 5 согласно паспорту).

Научная новизна, имеющая важное значение для науки и практики, заключается в разработке научно обоснованных технических решений для обеспечения проектирования энергоэффективных систем генерирования электроэнергии летательных аппаратов нового поколения, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие авиакосмической отрасли России и повышение её обороноспособности. Научной новизной отличаются:

- методика определения главных геометрических размеров высокооборотного синхронного авиационного генератора методом неградиентного случайного поиска с обучением;

- методика имитационного моделирования режимов работы системы электроснабжения с каналом генерирования на базе синхронного генератора методом совместного решения двух типов динамического моделирования и программирования;

- методика оптимального проектирования высокооборотного синхронного генератора с электромагнитным возбуждением на основе применения параметрических методов поиска локального экстремума;

- методология оптимального проектирования высокооборотных синхронных генераторов как совокупность упорядоченных методов разработки конструкции, поверочных и проверочных расчетов на этапе технического проектирования;

– расчётная допустимая область главных размеров перспективного высокооборотного синхронного генератора с электромагнитным возбуждением с выходной мощностью 250 кВА и выше.

Новизна результатов работы подтверждена также шестью патентами.

Теоретическая и практическая значимость работы

Наиболее значимыми результатами являются:

- разработанная концептуальная основа системного решения проблемы создания электромеханических преобразователей энергии летательных аппаратов нового поколения путём применения информационных технологий и раскрытия механизмов внутренних потенциальных свойств высокооборотных синхронных генераторов, интеллектуальных систем поверочных расчётов авиационных систем электроснабжения.

- разработанная система создания высокооборотных авиационных синхронных генераторов с электромагнитным возбуждением, представляющая собой методологию проектирования синхронных авиационных генераторов для систем электроснабжения авиационной техники и позволяющая создать ряд генераторов и стартер-генераторов, сформировать систему их проектирования, отвечающую современным требованиям, и развить теоретическую базу создания авиационных электрических машин с выходной мощностью до 250 кВА.

- разработанная система создания авиационных синхронных электрических машин с электромагнитным возбуждением для этапов эскизного, технического и рабочего проектирования. Система разработки генераторов для электроснабжения летательных аппаратов представляет собой совокупность методологий моделирования, расчёта, проверки расчётов, 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 на основе использования методологий пакетов Simulink и Matlab, сервисов сопровождения программного обеспечения Software Maintenance Service, пакета Teamcentre масштабируемых программных решений для поддержки жизненного цикла изделий.

Практическая ценность и реализация результатов исследований определяется тем, что большинство технических решений по системам генерирования внедрены 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, технические условия, общие тактико-технические требования, руководящие документы.

Оценка достоверности результатов:

- **практические** результаты подтверждены при оценке качества и надёжности функционирования системы генерирования СГ-112-115 для Ил-112В; в процессе лабораторно-стендовых испытаний генераторов ГСР-90/120 для МС-21 и ГСР-СТ-9В для проекта «Минога»;

- **теория построена** на известных положениях системного анализа, применено эмпирическое и эвристическое моделирование, теоретико-множественное моделирование. Теоретические исследования проводились с

использованием фундаментальных трудов по теории, методам и методикам проектирования электрических машин, реализованных в проектах авиационных электрических машин для отечественных и зарубежных летательных аппаратов, теорий математического анализа, линейных и нелинейных электрических цепей для переходных процессов, методов теории потенциала, явного численного метода решения уравнений теплопроводности, метода сеток, неградиентного поиска, которые согласуются с опубликованными материалами по теме диссертации;

- **идея базируется** на методе системного анализа качества, эффективности и надёжности сложных систем, математической формализации алгоритма управления систем электропитания автономными объектами и численного имитационного моделирования процесса их функционирования;

- **использованы** данные, полученные другими авторами по рассматриваемой тематике, для сравнения с данными автора диссертации; сравнение показало непротиворечивость данных;

- **установлено** качественное и количественное совпадение полученных автором диссертации результатов с результатами функционирования системы электроснабжения СГ-112-115 в составе Ил-112В, полученными в процессе государственных испытаний;

- **использованы** современные методики проведения эскизного, технического и рабочего проектирования, методы поверочных и проверочных расчётов, проведения эксперимента и испытаний на стойкость к внешним влияющим величинам.

Личный вклад автора. В работе представлены результаты научных исследований, выполненных самим автором диссертации или под его непосредственным руководством. Личный вклад состоит в идентификации проблемы 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, обобщении полученных результатов и формулировке выводов, создании опытных образцов, подготовке основных публикаций по результатам выполненных исследований.

Апробация результатов исследований прошла на международных, всероссийских, отраслевых, межвузовских конференциях, научно-технических семинарах отделения РАН, ФГБОУ ВО МАИ(ГТУ), ФГБОУ ВО УГНТУ, ФГУП ГосНИИ ГА, ЦНИИ ВВС Минобороны России и других организаций, на международных симпозиумах во время работы выставок по авиационной тематике в Париже (Франция), Гамбурге (Германия), Жуковском (Россия) и др.

Основные материалы диссертации опубликованы в 30 научных работах, из них 7 выполнены единолично. В число печатных работ входит одна монография; 11 публикаций в изданиях, рекомендованных ВАК; 6 патентов.

Структура и объём диссертации

Объём диссертации составляет 280 страниц машинописного текста и содержит введение, четыре главы с выводами, 97 рисунками и 43 таблицами, заключение, список литературы из 135 наименований.

2. Оценка диссертации по главам и автореферата

В первой главе диссертации проведён проблемно-целевой анализ направлений построения системы разработки высокооборотных авиационных синхронных генераторов с электромагнитным возбуждением, идентифицирована и математически формализована решаемая проблема, обоснованы теоретические аспекты и математический аппарат решения проблемы создания высокооборотных авиационных синхронных генераторов с электромагнитным возбуждением и создания на их основе авиационных систем электроснабжения.

Однако следует заметить, что результаты проблемно-целевого анализа проектирования высокооборотных авиационных синхронных генераторов с электромагнитным возбуждением не в полной мере нашли свое отражение в работе.

Вторая глава посвящена анализу методов проектировочных, поверочных электромагнитных, тепловых, гидравлических и механических расчётов электрических машин и синтезу системы создания синхронных электрических генераторов. Глава содержит электромагнитные, тепловые, механические, вентиляционные расчеты с одновременной разработкой 3D-модели изделия и его составных частей, конструкции, удовлетворяющей технологическим требованиям её изготовления при минимальных затратах материалов и высокой надёжности.

Методика автоматизированного поверочного расчёта представляет собой расчет магнитной системы машины на основе решения системы уравнений Максвелла применительно к синхронным генераторам. Метод конечных элементов с помощью методологии ANSYS Mechanical APDL и с применением предложенной методики позволяет выполнить расчёт статических нагрузочных режимов и переходных процессов в связанной гальванически системе «основной генератор – возбудитель» путем одновременного численного моделирования непосредственно в режиме реальной нагрузки, что является развитием теории электротехники. Совмещённая численная модель позволяет получать достаточно полные динамические и статические характеристики проектируемой машины для различных режимов работы системы электроснабжения. Отсутствие подвозбудителя в расчётной модели переходных процессов в машине представляется обоснованным для инженерной практики. Можно согласиться с учётом только инерционного вклада обмоток, держателей обмоток и диодов в поверочном расчёте подшипниковых узлов.

В тексте главы встречаются пояснения лекционного характера (магнитная характеристика машины, поле реакции якоря) и сленг (активное железо, активная медь).

Третья глава посвящена исследованиям в области разработки методологической базы оптимального проектирования авиационных высокооборотных синхронных генераторов с электромагнитным возбуждением методами выделения ведущего критерия оптимальности и перевод остальных критериев в ограничения с помощью метода штрафных и барьерных функций, что позволяет выбрать один наиболее важный критерий и одновременно учесть требования к остальным показателям качества и конструктивным параметрам. При проектировании авиационных синхронных генераторов, которые работают в диапазоне частот вращения 10800...24000 об/мин, должны быть решены две противоречивые задачи, определяющие их конструктивную реализацию: разработка генератора с высокой частотой вращения, где основной задачей является обеспечение прочности вращающихся узлов, минимизацию размеров, размещение выпрямительных диодов, проектирование вала, обеспечивающего недостижение критических частот вращения, интенсификацию охлаждения, установку новых подшипников с повышенной грузоподъемностью на частотах вращения до 25000...30000 об/мин, и обеспечение прочности на частоте вращения 24000 об/мин, что приводит к максимально возможному уменьшению диаметральных размеров машины, но при этом на низких частотах вращения необходимо создавать магнитный поток, обеспечивающий двукратную номинальную нагрузку, что требует увеличения активного объема прежде всего диаметра ротора.

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

Четвертая глава посвящена практическому проектированию высокооборотных синхронных генераторов с электромагнитным возбуждением различной мощности, разработанных и разрабатываемых в рамках ОКР, НИР и НИОКР для современных и перспективных отечественных воздушных судов.

Представлены характеристики опытного образца высокооборотного синхронного генератора с электромагнитным возбуждением ГСР-40НЧ системы электроснабжения СГ-112-115 летательного аппарата нового поколения Ил-112В в условиях серийного производства АО «УАПО», обладающего высокими удельными характеристиками энергетическими и по массе; экспериментального образца высокооборотного синхронного генератора ГСР-90/120 с номинальной выходной мощностью 120 кВА для самолёта МС-21, который по основным характеристикам не уступает синхронным генераторам американской корпорации Hamilton Sunstrand, устанавливаемым ранее на этот самолёт. Представлены также полные 3D-модели синхронных генераторов различной мощности для 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 выходной мощностью 250 кВА и максимальной выходной мощностью 500 кВА, который работает в диапазоне частот вращения 10800...24000 об/мин. Данная электрическая машина действующих аналогов в России не имеет.

В целом все главы диссертации отражают глубину проработки рассматриваемых в них вопросов и подтверждают заявленную автором диссертации новизну полученных результатов исследований.

Автореферат диссертации соответствует её основному содержанию.

Публикации материалов диссертационной работы достаточно полно отражают её содержание.

Основные замечания по диссертации.

1 Система не содержит методов и сопутствующей базы знаний по оценке, расчёту и обеспечению электромагнитной совместимости по качеству и возмущениям электропитания

2 Расчет регулятора напряжения не конкретизирован относительно метода регулирования - аналоговое, цифро-аналоговое, цифровое, цифровое с применением программного обеспечения и т.д., что в дальнейшем требует проведения дополнительных испытаний по выбору рабочей области и ограничений по управлению и защите генератора. В работе рассмотрена необходимость такой информации, но не рассмотрена и не исследована её достаточность.

3 Метод верификации программного обеспечения в диссертации основан на применении теории математической статистики. Автор не обосновывает и не приводит исходные предпосылки для применения вычислительных процедур, гипотез, критериев адекватности теории математической статистики для верификации программного обеспечения.

4 Система содержит процедуры поверочных расчетов, но в диссертации не представлены алгоритмы метрологической поверки методологии проектирования синхронного генератора по этапам его создания.

5 Система содержит процедуры теплового расчета при применении нагнетательного жидкостного охлаждения, однако она является частью комбинированной воздушно-испарительной системы охлаждения, которая не рассмотрена.

Указанные недостатки не снижают научной и практической значимости диссертационной работы.

3. Общая оценка диссертационной работы

Диссертация Каля Валерия Алексеевича является завершённой научно-исследовательской квалификационной работой в соответствии с поставленной целью и перспективным исследованием в области обеспечения качества электроснабжения летательных аппаратов.

Работа выполнена самостоятельно и свидетельствует о личном вкладе автора диссертации в науку, об умении ставить и решать сложные технические

задачи, содержит новые научные и практические результаты, способствующие повышению уровня авиационной техники страны.

В диссертации присутствуют признаки научной новизны проведенного исследования, а именно: усовершенствование научно-методического аппарата и получение нового научного результата с помощью усовершенствованного научно-методического аппарата.

Областями применения полученных результатов могут быть эксплуатирующие организации авиационной техники, научно-исследовательские и научно-испытательные организации, конструкторские бюро и высшие учебные заведения (ОАО «Аэроэлектромаш», ФГУП ГосНИИ ГА, ФГУП НИИ АО, ЦНИИ ВВС МО РФ, МГТУ ПАО «Сухой», ПАО «Ил», ПАО «Туполев», АО «Вертолеты России», Концерн «АНТЕЙ», АО «Корпорация ВНИИЭМ», АО «Технодимака», ФГБОУ МГТУ им. Н.Э. Баумана, ФГБОУ ВО МАИ(НИУ), ФГБОУ ВО, МЭИ(НИУ), ФГБОУ ВО КНИТУ-КАИ и др.).

ВЫВОД

По актуальности и полноте решения поставленных проблем, научному уровню и степени научной новизны результатов рецензируемая диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям ВАК, предъявляемым к докторским диссертациям, а её автор Калий Валерий Алексеевич заслуживает присуждения ему учёной степени доктора технических наук по специальности 05.09.01.

Официальный оппонент
начальник отдела ПАО «НПО «Алмаз»
доктор технических наук, профессор,
действительный член Академии
электротехнических наук РФ

В.Г. Костиков
121471, г.Москва, ул. Верейская, 41
+7 (916) 315-87-39 e-mail: kvg303@ya.ru

« 11 » 10 2019 года

Подпись официального оппонента доктора технических наук, профессора
Костикова В.Г. заверяю



« 14 » 10 2019 года

ОТДЕЛ
КАДРОВ

Ведущий специалист
по кадрам: М.С. Сокольская М.В.