

*На правах рукописи*



**Пауков Дмитрий Викторович**

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ  
ВОЗДУШНЫХ СУДОВ НА ОСНОВЕ АКСИАЛЬНОГО  
БЕСКОНТАКТНОГО ГЕНЕРАТОРА ПОСТОЯННОГО ТОКА**

**Специальность 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Челябинск - 2022

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» на кафедре «Летательные аппараты».

Научный руководитель –

**Воронин Сергей Григорьевич**, доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

**Вольский Сергей Иосифович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Электроэнергетические, электромеханические и биотехнические системы» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», г. Москва.

**Григораш Олег Владимирович**, доктор технических наук, доктор педагогических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электротехника, теплотехника и возобновляемые источники энергии» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина», г. Краснодар.

**Ведущая организация –**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет гражданской авиации», г. Москва.

Защита состоится 30 июня 2022 г., в 17:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.298.05 при ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» по адресу: г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, ауд. 909.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» и на официальном сайте ЮУрГУ по адресу:

<https://www.susu.ru/ru/dissertation/d-21229805/paukov-dmitriy-viktorovich>

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью учреждения, просим направлять по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, д. 76, гл. корпус, Учёный совет ЮУрГУ, тел./факс: +7 (351)-267-91-23, e-mail: [grigorevma@susu.ru](mailto:grigorevma@susu.ru).

Учёный секретарь  
диссертационного совета Д 212.298.05  
д-р техн. наук. профессор



М.А. Григорьев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Применение электрической энергии на борту воздушного судна (ВС) обусловлено рядом ее известных преимуществ по сравнению с другими видами энергии. К источникам электроэнергии ВС предъявляются высокие требования по надежности и качеству электроэнергии.

Одним из методов повышения надежности электроснабжения ВС является резервирование основных источников питания. Для приемников, без которых невозможно обеспечить безопасность полетов ВС, предусматривается двух- и даже трехкратное резервирование питания от основных источников, а также питание от специальных аварийных (резервных) источников питания.

И, тем не менее, отказ основного источника электроэнергии ВС в полете делает невозможным продолжение выполнения полетного задания. Поэтому единственной в такой ситуации задачей, становится обеспечение условий успешной посадки ВС на ближайший аэродром в короткий временной интервал (10-15 мин), используя аварийный источник питания (АИП). Это представляет определенные трудности и сопряжено с риском для членов экипажа.

Важное значение в вопросах электроснабжения ВС имеет качество энергии генерируемой бортовым источником электроэнергии (БИЭ), характеризуемое стабильностью амплитуды и частоты вырабатываемого переменного напряжения и числом пульсаций постоянного (выпрямленного) напряжения. Последнее определяет надежность, точность и ресурс работы потребителей электроэнергии: радиотехнического, специального и электрооборудования ВС.

Современные авиационные генераторы радиальной конструкции имеют ряд недостатков: сложную технологию изготовления магнитопроводов, высокий коэффициент пульсации генерируемого (выпрямленного) напряжения, неудовлетворительные условия охлаждения. Достижения в области электротехники позволяют создавать источники электроэнергии с использованием магнитов с мощным магнитным потоком, а регулировка выходного напряжения осуществляется с помощью современных электронных средств. В этих источниках нет необходимости в применении подвозбудителей и возбудителей. Но и источники с магнитами высоких удельных энергий имеют свои недостатки: при коротком замыкании из-за наличия мощного магнитного потока магнитов возможно возникновения возгорания на борту воздушного судна. Это практически невозможно при использовании обычных магнитов. Такая проблема особенно актуальна, поскольку в современном воздушном бою широко используются средства радиоэлектронной борьбы и мощный электромагнитный импульс противника может вывести из строя электронную систему регулирования выходного напряжения.

Так как электроэнергия на сегодняшний день является неотъемлемой и важной составляющей частью функционирования различных систем и устройств как на земле, так и в воздухе, то ведущими научными институтами ведутся разработки, направленные на совершенствование источников электроэнергии, создание новых электротехнических комплексов, позволяющих улучшить массогабаритные и энергетические показатели источников, а также упростить их обслуживание и эксплуатацию.

В этих условиях повышение надежности БИЭ ВС, улучшение его эксплуатационно-технических характеристик (ЭТХ), является актуальной и важной задачей в обеспечении безопасности полетов, усилении боевых качеств ВС.

Поэтому для устранения указанных недостатков источников электроэнергии необходимо проведение исследований, направленных на совершенствование электротехнического комплекса на основе стабилизированного аксиального бесконтактного генератора постоянного тока (АБГПТ, далее - генератор).

**Цель работы** – повышение эффективности систем электроснабжения воздушных судов за счет разработки новых электротехнических комплексов постоянного тока с использованием генератора аксиальной конструкции с улучшенными эксплуатационно-техническими характеристиками.

**Задачи исследования:**

- проведение анализа современного состояния систем электроснабжения ВС и их основных эксплуатационно-технических характеристик;
- разработка новой перспективной конструкции электротехнического комплекса для ВС;
- построение математической модели для расчета и исследования, на её основе, электромагнитных и электромеханических процессов в электротехническом комплексе;
- экспериментальное исследование статических и динамических характеристик разработанного электротехнического комплекса.

**Объект исследования** – электротехнический комплекс постоянного тока на основе стабилизированного аксиального бесконтактного генератора постоянного тока.

**Предмет исследования** – особенности конструкции и эксплуатационно-технические характеристики электротехнического комплекса постоянного тока.

**Методы исследования.** Для решения поставленных задач в работе использованы основы теории электрических цепей и методики расчетов электрических машин, теория обобщенного электромеханического преобразователя энергии, методы решения систем нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений и дифференциальных уравнений в частных производных, методы математического моделирования электромагнитных и электромеханических процессов в сочетании с методом планирования

эксперимента, метод математического и графического моделирования на ПК с использованием пакетов Matlab Simulink.

**Соответствие содержания диссертации заявленной специальности.**

Работа выполнена в соответствии с пунктами паспорта специальности ВАК 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы» (далее – Паспорта): п. 1. – «Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, изучение системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем»; п.3. – «Разработка, структурный и параметрический синтез электротехнических комплексов и систем, их оптимизация, а также разработка алгоритмов эффективного управления»;

**Научные положения и результаты, выносимые на защиту:**

1. Конструкция стабилизированного аксиального бесконтактного электротехнического комплекса постоянного тока, *отличающаяся* от известных конструкций способом изготовления магнитопроводов аксиальных электрических машин, *что даёт возможность* упростить технологию изготовления, снизить расход магнитных материалов, улучшить массогабаритные и энергетические показатели комплекса (п. 3 Паспорта).

2. Математическая модель на основе обобщенного электромеханического преобразователя энергии, *отличающаяся* учётом функциональной зависимости параметров электрической машины от тока и скорости вращения ротора, *что даёт возможность* исследовать взаимосвязанные электромагнитные, электромеханические и динамические процессы в электротехническом комплексе (п.1 Паспорта).

3. Методика расчёта расчета электромагнитных и электромеханических переходных процессов в генераторе, *отличающаяся* тем, что позволяет решать вопросы синтеза электротехнических комплексов с заданными статическими и динамическими свойствами, *что даёт возможность* проводить исследование динамических характеристик переходных процессов с нелинейными коэффициентами, описывающие поведение системы электроснабжения, при различных значениях момента инерции ротора, его активного сопротивления и скорости вращения (п.3 Паспорта).

**Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций** подтверждается аргументированностью исходных посылок, вытекающих из основ электротехники, а также удовлетворительным совпадением результатов теоретических исследований с экспериментальными данными.

**Значение работы.** Научное значение работы заключается в том, что

- установлены функциональные зависимости рабочих и ударных токов ротора и статора предложенного генератора от скорости вращения, активных и индуктивных сопротивлений обмоток, позволяющие уже на начальном этапе проектирования определить допустимый диапазон их изменения;

- проведено исследование переходных процессов в системе, включающей три электромеханических преобразователя с нелинейными коэффициентами, позволяющее оценить провалы выходного напряжения в переходных режимах;

- построена математическая модель для расчета установившихся режимов, а также электромагнитных и электромеханических переходных процессов в генераторе на основе обобщенного электромеханического преобразователя энергии, позволяющая решать вопросы синтеза электротехнических комплексов с заданными статическими и динамическими свойствами.

**Практическое значение работы** заключается в следующем:

- предложена, для применения при проектировании электротехнических комплексов, методика расчёта параметров системы электроснабжения воздушного судна в статическом и динамическом режимах работы;

- разработана и обоснована новая конструкция генератора, как основы электротехнического комплекса;

- экспериментально доказана работоспособность новой конструкции электроснабжения, её более высокая эффективность по сравнению с существующими;

- разработаны и зарегистрированы, в порядке государственной регистрации, программы автоматизированных расчётов параметров аксиального бесконтактного генератора постоянного тока и его характеристик.

**Реализация выводов и рекомендаций работы.**

Научные положения, выводы и рекомендации использованы в отчете о НИР № 31205 «САЭ-АКС-ДЭМ» «Повышение эффективности систем автономного электроснабжения» (Филиал ВУНЦ ВВС «ВВА» (г. Краснодар)); используются в разработке и модернизации систем электроснабжения в продукции военного назначения в АО «НПО «Электромашина»»; в учебном процессе в ВУНЦ ВВС «ВВА им. проф. Жуковского и Ю.А. Гагарина» и ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет».

**Апробация работы.** Основные материалы и результаты диссертационной работы были доложены, рассмотрены и одобрены: на международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы энергетики АПК» (Саратов, 2010 г.), на XXX-й Российской школе по проблемам науки и технологиям, посвященная 65-летию Победы, (МИАСС, 2010 г.), на школе-семинаре «Проблемы и направления информационного и летно-технического обеспечения выживаемости и живучести авиационных комплексов и систем управления ими» (Сочи, 2010 г.), на I-й Международной научной конференции «Технические и технологические системы» (Краснодар, 2009 г.), на II-й международной научной конференции «Технические и технологические системы» (Краснодар, 2010 г.), на III-й, IV-й, V-й, VI-й, IX-й,

X-й международной научной конференции «Технические и технологические системы» (Краснодар, 2011-2019 гг.).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 24 печатных работы, 2 из них в журналах, рекомендованных ВАК. Получено 4 патента РФ на изобретения и 2 свидетельства о государственной регистрации программных продуктов.

**Структура и объём работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка используемой литературы из 114 наименований (отечественных и зарубежных авторов) и 3 приложений. Общий объём диссертации составляет 141 страницу, в том числе 115 страниц основного текста, включающего в себя 42 рисунка, 11 таблиц, и 22 страницы приложений.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы, определена решаемая научно-техническая задача, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна, практическая значимость работы и основные положения, выносимые на защиту, описана структура работы.

**В первой главе** дан анализ современных источников электроэнергии для ВС и намечены пути обоснованного, технически возможного и целесообразного способа совершенствования этих источников.

Радиальным электрическим машинам присущ ряд недостатков, которые в прошлом веке имели не решающего значения. Таковыми являются сложность конструкции и сложная технология изготовления, высокие массогабаритные показатели и стоимость, большое количество отходов при штамповке листов магнитопровода и т.д.

Достойной заменой радиальных электрических машин являются электрические машины аксиальной конструкции. Преимущества аксиальных конструкций в сравнении с традиционными (радиальными) электрическими машинами известны. Это существенное упрощение обмоточных работ благодаря открытой зубцовой зоне, практически безотходное использование магнитных материалов (экономия 20-25% электротехнической стали, благоприятные условия теплоотдачи, охлаждения и вентиляции, сравнительная простота эксплуатации и ремонта.

Таким образом, лучшие массогабаритные и энергетические показатели, большая жесткость конструкции, благоприятные условия теплоотдачи, охлаждения и вентиляции, существенное упрощение обмоточных работ благодаря открытой зубцовой зоне, практически безотходное использование магнитных материалов, удобство сочленения с механизмом и приводом, сравнительная простота эксплуатации и ремонта аксиальных электрических машин говорит о том, что их использование, следовательно, разработка и исследование является весьма актуальным и оправданной.

**Во второй главе** рассматривается аксиальная конструкция генератора как основы электротехнического комплекса постоянного тока, дано устройство и принцип действия разработанного на уровне изобретения

аксиального бесконтактного генератора постоянного тока, проанализированы методы исследования переходных процессов и разработана математическая модель электромеханических и электромагнитных процессов, происходящих в разработанном электротехническом комплексе постоянного тока.

На рис. 1 представлен общий вид разработанного генератора в разрезе, на рис. 2 – электрическая схема управления системой электроснабжения.

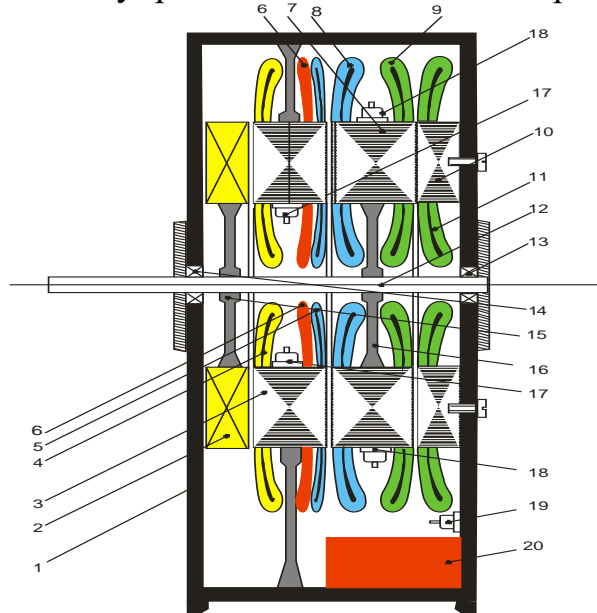


Рис. 1. Общий вид генератора в разрезе

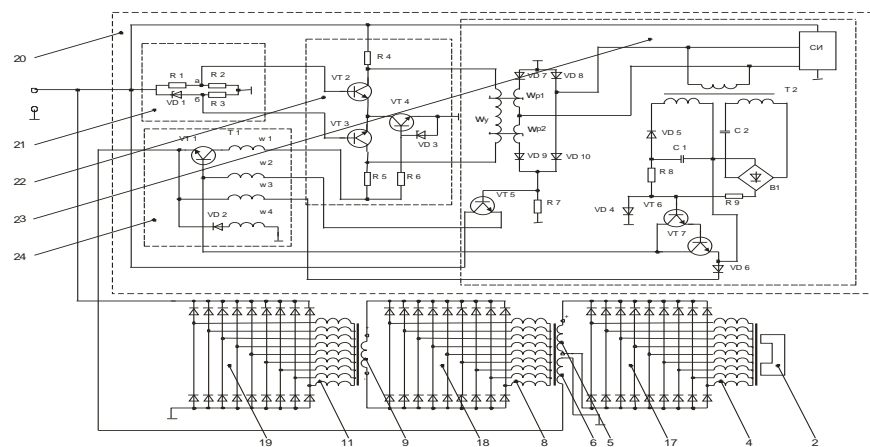


Рис. 2. Электрическая схема управления системой электроснабжения

Как следует из этих рисунков генератор содержит все элементы, присущие системе электроснабжения, как электротехническому комплексу: корпус 1, постоянный многополюсный магнит 2 индуктора подвозбудителя, боковой аксиальный магнитопровод 3 с многофазной обмоткой 4 якоря подвозбудителя, однофазной обмоткой 5 возбуждения возбудителя и дополнительной обмоткой 6 возбуждения возбудителя; внутренний аксиальный магнитопровод 7 с многофазной обмоткой 8 якоря возбудителя и однофазной обмоткой возбуждения 9 основного генератора, боковой аксиальный магнитопровод 10 с многофазной (на рис. 2 – девятифазной) обмоткой 11 якоря основного генератора, вал 12, закрепленный в подшипниковых узлах 13 и 14 и жестко связанный с постоянным



многополюсным магнитом 2 индуктора подвозбудителя посредством диска 15 и с внутренним аксиальным магнитопроводом 7 посредством диска 16.

Однофазная обмотка возбуждения 5 возбудителя подключается к многофазной обмотке 4 якоря подвозбудителя через многофазный двухполупериодный (на рис. 2 – девятифазный) выпрямитель 17. Однофазная обмотка возбуждения 9 основного генератора подключается к многофазной обмотке 8 якоря возбудителя через многофазный (на рис. 2 – девятифазный) двухполупериодный выпрямитель 18. Многофазная обмотка 11 якоря основного генератора подключается к многофазному (на рис. 2 – девятифазному) двухполупериодному выпрямителю 19.

В нижней части корпуса устанавливается регулятор напряжения 20 (рис. 1, рис. 2), состоящий из измерителя отклонений напряжения 21 (рис. 2), предварительного усилителя 22, блока усиления мощности 23 и силовой части 24, при этом измеритель отклонений напряжения 21 включается на выходное напряжение  $U$  генератора (рис. 2), а дополнительная обмотка возбуждения 6 возбудителя подключается к силовой части 24 регулятора напряжения.

Для математического описания свойств генератора, как частного случая синхронного двигателя с многофункциональным ротором, в динамических режимах целесообразно воспользоваться моделью обобщенного электромеханического преобразователя энергии (ОЭМПЭ).

На рис. 2 на «нижней» части схемы представлена электромагнитная и электромеханическая система. Как видно из схемы, имеет место три электромеханических преобразования энергии (магнит 2-система обмоток 4; обмотки 5, 6 - обмотка 8; обмотка 9 - обмотка 11) и шесть электрических преобразований (обмотка 4 – выпрямитель 17, выпрямитель 17 – обмотка 5, обмотка 8 – выпрямитель 18, выпрямитель 18 – обмотка 9, обмотка 11 – выпрямитель 19, выпрямитель 19 – выходные зажимы электромеханического преобразователя энергии).

Система дифференциальных уравнений ОЭМПЭ представляет собой многообмоточную структуру с группами статорных и роторных обмоток, находящихся в относительном движении.

Симметричную многофазную электрическую машину с синусоидальным напряжением на ее обмотках удобно анализировать, приведя ее к двухфазной.

Математическую модель системы электроснабжения построена при следующих допущениях:

- геометрическая симметрия, то есть обмотки расположены равномерно;
- электрическая симметрия, то есть активные сопротивления и индуктивности обмоток по осям одинаковы;
- все обмотки – синусные;
- коэффициент взаимной индуктивности между обмотками на статоре и роторе для всех обмоток одинаков и равен  $M$ ;
- в листах стали магнитопровода нет разъемов и стыков.

Для наглядности, условно, генератор разобьем на отдельные условные составляющие, которые затем объединим в единое целое с учетом потокосцеплений. Такими частями в электромагнитном отношении являются (рис. 2): подвозбудитель, состоящий из постоянного многополюсного магнита 2 и многофазной обмотки якоря 4, выпрямитель 17, возбудитель, состоящий из однофазной обмотки 5 возбуждения, дополнительной обмотки 6 возбуждения и многофазной обмотки 8 якоря, выпрямитель 18; основной генератор, состоящий из однофазной обмотки 9 возбуждения и многофазной обмотки 11 якоря, выпрямитель 19. Обмотки уложены в пазах соответствующих магнитопроводов.

При составлении системы дифференциальных уравнений подвозбудитель представлен одной обмоткой с индексом «В»; многофазная обмотка якоря 4, многофазная обмотка 8, многофазная обмотка 11 якоря представлены уравнениями по двум осям  $\alpha$ - $\beta$  с последующим преобразованием в 9-ти фазную систему, с индексацией «4», «8», «11», соответственно.

$$\left. \begin{aligned} U_2 &= R_2 i_2 + \frac{d\Psi_2}{dt} \\ -U_{4\alpha} &= R_4 i_{4\alpha} + \frac{d\Psi_{4\alpha}}{dt} + \omega_p \Psi_{4\alpha} \\ -U_{4\beta} &= R_4 i_{4\beta} + \frac{d\Psi_{4\beta}}{dt} + \omega_p \Psi_{4\beta} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Потокосцепления в (1) получим из выражений:

$$\left. \begin{aligned} \Psi_2 &= L_2 i_2 + M_1 i_{4\alpha} \\ \Psi_{4\alpha} &= L_4 i_{4\alpha} + M_1 i_2 \\ \Psi_{4\beta} &= L_4 i_{4\beta} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Выпрямленное напряжение на обмотке 5 возбуждения возбудителя:

$$\left. \begin{aligned} U_{51} &= \frac{1}{T} \int_0^T u_{4\alpha} dt \\ U_5 &= K_B U_{51} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Уравнения напряжений на обмотках возбудителя 5, 6 и 8:

$$\left. \begin{aligned} U_5 &= R_5 i_5 \\ U_6 &= R_6 i_{6\alpha} \\ -U_{8\alpha} &= R_8 i_{8\alpha} + \frac{d\Psi_{8\alpha}}{dt} + \omega_p \Psi_{8\alpha} \\ -U_{8\beta} &= R_8 i_{8\beta} + \frac{d\Psi_{8\beta}}{dt} - \omega_p \Psi_{8\beta} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Потокосцепления в (4) получим из выражений:

$$\left. \begin{aligned} \Psi_{8\alpha} &= L_8 i_{8\alpha} + M_7 i_5 + M_7 i_6 \\ \Psi_{8\beta} &= L_8 i_{8\beta} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Выпрямленное напряжение на обмотке 9:

$$\left. \begin{aligned} U_{91} &= \frac{1}{T} \int_0^T u_{8\alpha} dt \\ U_9 &= K_B U_{91} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Уравнения напряжений на обмотках 11:

$$\left. \begin{aligned} U_9 &= R_9 i_{9\alpha} \\ -U_{11\alpha} &= R_{11} i_{11\alpha} + \frac{d\Psi_{11\alpha}}{dt} + \omega_p \Psi_{11\alpha} \\ -U_{11\beta} &= R_{11} i_{11\beta} + \frac{d\Psi_{11\beta}}{dt} - \omega_p \Psi_{11\beta} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Потокосцепления в (7) получим из выражений:

$$\left. \begin{aligned} \Psi_{11\alpha} &= L_{11} i_{11\alpha} + M_{10} i_9 \\ \Psi_{11\beta} &= L_{11} i_{11\beta} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Выпрямленное напряжение после обмоток 11:

$$\left. \begin{aligned} U_{12.1} &= \frac{1}{T} \int_0^T u_{11\alpha} dt \\ U_{12} &= U_{12.1\text{НОМ}} C_1 + A_1 (U_{12.1\text{НОМ}} - U_{12.1}) + \frac{d(U_{12.1\text{НОМ}} - U_{12.1})}{dt} B_1 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Токи  $i_j^{iN}$  в фазах девятифазных обмоток 4,8,11, где  $j$  – номер фазы,  $i$  – принадлежность обмотки к статорной (S) и роторной (r) системам,  $N$  – номер обмотки на схеме, определяются по формулам системы уравнений (10).

В уравнениях 1–10 принята индексация: верхний индекс: s – принадлежность параметра к обмотке, расположенной на статоре, r – на роторе, ПМ – постоянный магнит,  $i$  – принадлежность параметра к обмотке, номер которой соответствует рис. 1 и рис. 2.

Принятые обозначения:  $U_\alpha^{si}$ ,  $U_\beta^{si}$ ,  $i_\alpha^{si}$ ,  $i_\beta^{si}$ ,  $R_\alpha^{si}$ ,  $R_\beta^{si}$ ,  $L_\beta^{si}$ ,  $L_\beta^{si}$  – напряжения, токи, активные сопротивления и индуктивности девятифазных рабочих обмоток подвозбудителя ( $i = 4$ ), рабочей обмотки возбудителя ( $i = 8$ ) и рабочей обмотки основного генератора ( $i = 11$ ), соответственно, по осям заторможенной системы координат  $\alpha$  и  $\beta$ ;  $\omega_p$  – угловая скорость вращения ротора (постоянного многополюсного магнита 2 и магнитопровода 7) (рис. 1, рис. 2);  $M_3$  – взаимная индуктивность обмотки возбуждения постоянного магнита и девятифазной обмотки 4 якоря подвозбудителя;  $M_7$  – взаимная индуктивность обмоток 5 (обмотка возбуждения возбудителя), 6 (дополнительная обмотка возбуждения возбудителя) и девятифазной обмотки 8 возбудителя;  $M_{10}$  – взаимная индуктивность обмотки 9 возбуждения и девятифазной обмотки 11 основного генератора;  $\varphi = 2\pi/m_2$  – угол сдвига фаз,  $m_2 = 9$  – число фаз обмоток 4, 8 и 11.  $U_d^{si}$ ,  $U_d^{ri}$  – выпрямленное напряжение на обмотках 5, 6 и 9 соответственно (I – номер обмотки по рис. 1);  $R^{si}$  – сопротивления обмоток 5, 6 и 9, соответственно,  $J$  – номер фазы (для системы уравнений 10).

$$\left. \begin{aligned}
i_1^{iN} &= i_\alpha^i; \\
i_2^{iN} &= \frac{i_\alpha^N}{\cos \varphi_1} = \frac{i_\beta^N}{\cos 1,25\varphi_1}; \\
i_3^{iN} &= \frac{i_\alpha^N}{\cos 2\varphi_1} = \frac{i_\beta^N}{\cos 0,25\varphi_1}; \\
i_4^{iN} &= -\frac{i_\alpha^N}{\cos 1,5\varphi_1} = \frac{i_\beta^N}{\cos 0,75\varphi_1}; \\
i_5^{iN} &= -\frac{i_\alpha^N}{\cos 0,5\varphi_1} = \frac{i_\beta^N}{\cos 1,75\varphi_1}; \\
i_6^{iN} &= -\frac{i_\alpha^N}{\cos 0,5\varphi_1} = -\frac{i_\beta^N}{\cos 1,75\varphi_1}; \\
i_7^{iN} &= -\frac{i_\alpha^N}{\cos 1,5\varphi_1} = -\frac{i_\beta^N}{\cos 0,75\varphi_1}; \\
i_8^{iN} &= \frac{i_\alpha^N}{\cos 2\varphi_1} = -\frac{i_\beta^N}{\cos 0,25\varphi_1}; \\
i_9^{iN} &= \frac{i_\alpha^N}{\cos \varphi_1} = -\frac{i_\beta^N}{\cos 1,25\varphi_1}.
\end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Собственные индуктивности зависят от степени намагничивания соответствующих магнитопроводов (при проведении численного эксперимента –  $L(i)$ ).  $K_B$  – коэффициент выпрямления (принят равным 2,51), коэффициенты  $A_1$ ,  $B_1$ ,  $C_1$  учитывают схему регулятора напряжения и параметры его элементов.

Уравнения динамики механической части исследуемой системы имеют вид уравнений равновесия моментов:

$$\left. \begin{aligned}
M_\varepsilon - M_b - j \frac{d\omega_p}{dt} \\
M_\varepsilon &= [M_3(i_2 i_{4\alpha}) - M_7(i_5 i_{8\beta} + i_6 i_{8\beta}) + M_{10}(i_9 i_{11\beta})] \cdot P \\
M_b &= A_2 \omega_p^2
\end{aligned} \right\} \quad (11)$$

где  $M_\varepsilon$  – электромагнитный момент,  $J$  – момент инерции вращающихся масс,  $M_B$  – вращающий момент,  $A_2$  – коэффициенты, учитывающие зависимость вращающего момента  $M_b$  от угловой скорости вращения ротора  $\omega_p$ ;  $p$  – число пар полюсов системы электроснабжения.

**Третья глава** посвящена реализации разработанной математической модели.

Для исследования переходных электромагнитных и электромеханических переходных процессов, получения зависимостей между различными показателями, характеризующими процессы, происходящие в машине, уравнения электромагнитных и электромеханических переходных процессов в генераторе с учетом насыщения и характера питающего напряжения решались на ЭВМ.

Для учета насыщения в роторе и сердечнике статора при исследовании электрических машин необходимо иметь аналитические выражения кривых намагничивания материалов ротора и статора машины.

При выборе аппроксимирующих функций кривой намагничивания необходимо выполнение следующих требований:

- а) обеспечение достаточной точности и простоты;
- б) недопустимость наличия разрывов в производной.

Кривую намагничивания стали  $B(H)$  при расчете режимов заменили функцией  $\mu(i)$ .

Аппроксимация функции  $\mu(i)$ , осуществлялась методом сплайн-аппроксимации по специальной подпрограмме. Исследования показали, что аппроксимация кривых намагничивания с помощью сплайн-функции на 10-12 % повышает точность аппроксимации.

В ходе реализации математической модели решены системы уравнений, описывающие электромагнитные и электромеханические переходные процессы в системе электроснабжения с учетом насыщения, изменения формы задающего вращательного движения, особенностей многократного преобразования энергии.

В результате численного эксперимента на расчётной модели:

- получены картины электромагнитных и электромеханических переходных процессов в разработанной системе с учетом изменяющейся формы задающего вращательного движения;
- оценены формы кривой выходного напряжения моментов инерции и сопротивления, вторичных параметров, технологических характеристик на показатели, характеризующие переходные процессы в системе;
- найдены функциональные зависимости между различными показателями режимов работы электротехнического комплекса, характеризующими динамические свойства машины.

Решение поставленной задачи реализации разработанной модели связано с определёнными проблемами:

- токи в проводниках описываются системой обыкновенных дифференциальных уравнений во времени, но в некоторых уравнениях присутствуют нелинейные коэффициенты. Уравнения не могут быть разрешены относительно неизвестных токов и даны в неявном виде;
- уравнения движения связаны с электромагнитными уравнениями через неявно выраженные токи, а постоянная времени электромеханических

величин отличается на несколько порядков от постоянной времени электромагнитных величин.

Составленный алгоритм решения системы уравнений позволил найти неизвестные токи, электромагнитный момент, угловую скорость ротора в любой момент времени. Алгоритм реализован на языке ФОРТРАН-4 с использованием среды «Mathcad».

При определении интервала времени, записи выходных функций системы определялись постоянные времени.

В качестве объекта исследования был выбран электромеханический преобразователь энергии, построенный на базе модели авиационного генератора аксиального типа мощностью 1,5 кВт, как частный случай генератора. По данным численного эксперимента построена картина переходного процесса в устройстве мощностью 1,5 кВт.

Для оценки влияния изменения электромагнитных параметров системы электроснабжения на показатели, которые характеризуют электромагнитный и электромеханический переходный процесс в машине ( $I_{y\delta.s}$ ,  $I_{y\delta.r}$ ,  $\eta$ ) и отыскания функциональных зависимостей между ними в диапазоне изменения параметров был применен метод планирования эксперимента.

В качестве переменных факторов приняты:

- активное сопротивление ротора при 13 % изменении его величины (фактор  $X_1$ ), базовое значение 5,1 Ом;
- активное сопротивление статора при 8 % изменении его величины (фактор  $X_2$ ), базовое значение 3,25 Ом;
- напряжение, подаваемое на обмотку подвозбудителя при 6,5 % изменении его величины (фактор  $X_3$ ), базовое значение 46 В;
- момент инерции  $J$  при 46% изменении его величины (фактор  $X_4$ ), базовое значение момента инерции  $3,0 \cdot 10^{-3}$  кг\*м<sup>2</sup>;
- скорость вращения ротора  $\omega_{вр}$ , при 20% изменении его величины (фактор  $X_5$ ), базовое значение скорости вращения ротора – 127,5 рад/с.

За целевые функции приняты:

- ударные значения токов статора по осям  $\alpha$  и  $\beta$ , соответственно,  $i_{y\delta.\alpha}^s$ ,  $i_{y\delta.\beta}^s$ ;
- ударные значения токов ротора по осям  $\alpha$  и  $\beta$ , соответственно,  $i_{y\delta.\alpha}^r$ ,  $i_{y\delta.\beta}^r$ ;
- среднее значение тока подвозбудителя  $I_{cp}$ ;
- действующее значение выходного напряжения  $U_{вых}$ ;
- КПД ( $\eta$ ) машины.

По результатам расчетов проведена оценка влияния параметров на динамические характеристики машины. Наибольшее влияние на величины целевых функций оказывают величины активного сопротивления ( $R_r$ ) ротора.

Исследование динамических характеристик переходных процессов с нелинейными коэффициентами, описывающие поведение генератора в системе электроснабжения показало, что на величину ударных токов статора и ротора наибольшее влияние оказывает активные сопротивления соответствующих частей машины, наименьшее - момент инерции ротора, момент инерции также оказывает наименьшее влияние на величину КПД.

Активное сопротивление ротора и момент сопротивления всей системы влияют на изменение электромагнитных нагрузок, что оказывает влияние на величину ударного тока ротора. Следует также отметить, что изменение величины момента сопротивления приводит к изменению механической нагрузки на валу, оказывающее существенное влияние на обмен энергией между машиной и сетью.

Для решения системы уравнений электромагнитных и электромеханических переходных процессов с нелинейными коэффициентами с учетом насыщения, удобно использовать ЦВМ, выбрав предварительно способ аппроксимации кривой намагничивания. В качестве способа аппроксимации удобно использовать сплайн-аппроксимацию.

Функциональная зависимость тока ротора от момента инерции проявляется в виде функции с экстремумом, а от скорости вращения – в виде монотонной функции.

Анализ зависимости тока возбуждения от скорости вращения при  $Rr=var$ ,  $J=var$  показывает, что в генераторе существует определенное значение скорости вращения, при которой увеличение тока возбуждения замедляется.

Анализ зависимости КПД машины от скорости вращения показывает, что увеличение КПД машины при увеличении скорости вращения ротора происходит до определенной скорости, а за тем убывает. Наибольшее влияние на величину КПД оказывает также величина активного сопротивления ротора  $R_r$ .

**В четвертой главе** в целях подтверждения основных теоретических положений были изготовлен экспериментальный образец аксиального бесконтактного генератора постоянного тока мощностью 1,5 кВт и выполнен комплекс экспериментальных исследований. В экспериментальном образце обмотки якоря подвозбудителя, якоря возбудителя и якоря основного генератора выполнены в виде девятифазных обмоток.

В программу экспериментальных исследований входило:

- определение параметров машины;
- построение электромеханических характеристик;
- определение КПД.

Ставилась задача смоделировать работу системы электроснабжения в реальных условиях, оценить влияние входных параметров на выходные.

Программа эксперимента включает в себя:

- разработка рационального экспериментального стенда, позволяющего имитировать работу генератора в условиях, близких к реальным;

- определение параметров экспериментальных образцов;
- снятие зависимости  $U_{вых} = f(U_{фэн})$  при  $n_p = const$ ;
- снятие зависимости  $U_{вых} = f(n_p)$  при  $U_{фэн} = const$ ;
- снятие зависимости  $U_{вых} = f(I_a)$  при  $n_p = const$  и  $U_{фэн} = const$ .

Определение мощности на входах генератора производилось методом определения мощности, потребляемой приводным асинхронным двигателем (АД) с учетом потерь в этом двигателе и электрической мощности, потребляемой якорной цепью питания машины от источника постоянного тока (ИПТ). Определение мощности на выходе проводилось также прямым методом: ваттметром в цепи нагрузки.

Для моделирования работы системы в реальных условиях и обеспечения качественного измерения экспериментальных данных, предусмотренных программой эксперимента, разработан экспериментальный стенд удовлетворяющий следующим требованиям:

- обеспечение независимых друг от друга и резкопеременных колебаний поступления энергии на механический и электрический входы устройства;
- обеспечение плавного и управляемого регулирования одной из входных величин при жестко зафиксированной другой;
- обеспечение проведения эксперимента по управлению (стабилизации) выходного напряжения генератора при входных параметрах мощностей.

Параметры измерены на изготовленном макете.

Из регулировочной характеристики  $U_{вых} = f(U_{унт})$  при  $n_{вращ.} = const$  и  $R_r = var$  видно, что регулировать выходное напряжение можно путём изменения напряжения, подаваемого на обмотку возбуждения постоянного тока от ИПТ.

В работе определен КПД исследуемой системы электроснабжения на основе генератора новой конструкции. Как известно, для определения КПД необходимо знать уровни потребляемой мощности  $P_1$  и отдаваемой мощности  $P_2$ . Потребляемая мощность определяется как сумма полезной мощности и потерь

$$P_1 = P_2 + P_{эл1} + P_{эл2} + P_{эл3} + P_{с1} + P_{с2} + P_{с3} + P_d + P_{мх} \quad (12),$$

$$\text{где, } P_1 = P_{ипт} + P_{вр} \quad (13)$$

Здесь

- $P_{ипт}$  - электрическая мощность, поступающая от блока ИПТ;
- $P_{вр}$  - механическая мощность, поступающая от блока имитации вращательного движения;
- $P_{эл1}$ ,  $P_{эл2}$ ,  $P_{эл3}$  - электрические потери в статоре, роторе и обмотке возбуждения, соответственно;



- $P_{C1}$ ,  $P_{C2}$ ,  $P_{C2}$  - потери в магнитопроводах статора, ротора и якоря, соответственно;
- $P_d$  - добавочные потери;
- $P_{MX}$  - механические потери.

Экспериментально КПД определялся как отношение измеренной электрической мощности на выходе установки к суммарной мощности, поступающей на «вход» машины. Мощность, поступающая от блока ИПТ, рассчитывалась непосредственно по показаниям амперметра и вольтметра включенных в соответствующую цепь.

Мощность, поступающая от блока имитации вращательного движения рассчитывалась путем измерения мощности потребляемой приводным электродвигателем с учетом его КПД.

Эксперимент по опытному построению выходных характеристик машины позволил опытным путем определить КПД установки. КПД получен технологически, не превысил 79 %. В целом полученные экспериментально характеристики близки к расчетным, погрешность в худшем случае не превышает 8%.

Основными практическими результатами экспериментальных исследований можно считать то, что экспериментально доказана работоспособность конструкции, а также возможность управления разработанной системой электроснабжения, и, следовательно, возможность стабилизации её выходных параметров.

Проведенное экспериментальное исследование подтвердило работоспособность конструкции элементов системы электроснабжения, правильность теоретических положений работы, показало более высокую эффективность, поэтому её применение для обеспечения электроэнергией воздушных судов вместо серийных устройств и систем позволяет повысить эксплуатационные показатели этих систем.

Последнее качество разработки представляется весьма ценным для практического применения.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В результате исследований, проведенных в работе, положено начало развития теории источника электрической энергии постоянного тока для воздушных судов, включающего три электромеханических преобразователя и построенного на основе аксиального бесконтактного генератора.

1. Проведенный анализ показал, что необходимо совершенствование существующих конструкций систем электроснабжения воздушных судов, одним из перспективных путей является разработка и исследование аксиальных электрических машин.

2. Обоснована и разработана новая конструкция электротехнического комплекса постоянного тока, состоящего из трёх электромеханических и электромагнитных преобразователей, имеющая по сравнению с известными

устройствами следующие преимущества: легко реализуемая технология изготовления магнитопроводов статора и ротора, практически безотходное использование магнитных материалов, лучшие условия охлаждения, улучшение массогабаритных и энергетических показателей, существенное упрощение обмоточных работ благодаря открытой зубцовой зоне, удобство сочленения с механизмом и приводом, сравнительная простота эксплуатации и ремонта.

3. Построена математическая модель для расчета электромагнитных и электромеханических переходных процессов в генераторе на основе обобщенного электромеханического преобразователя энергии, позволяющая решать вопросы синтеза электротехнических комплексов с заданными статическими и динамическими свойствами.

4. Исследования, проведенные на математической модели, показали, что наибольшее влияние на величину ударных токов и на величину к.п.д. оказывает величина активного сопротивления ротора  $R_r$ ;

5. Экспериментально получены характеристики разработанной системы электроснабжения, которые подтверждают правильность теоретических положений работы. Они позволили опытным путем определить КПД установки, который не превысил 79%. В целом полученные экспериментально характеристики близки к расчетным, погрешность в худшем случае не превышает 8%.

6. Установлено, что применение разработанного электротехнического комплекса в качестве источников постоянного тока в системе электроснабжения (СЭС) ВС вместо серийных позволяет существенно повысить эксплуатационные показатели СЭС ВС в части уменьшения массогабаритных показателей, улучшения качества вырабатываемой электроэнергии, упрощения технического обслуживания и ремонта, снижения стоимости производства.

7. Проведенные теоретические и экспериментальные исследования подтвердили перспективность и необходимость учета всех факторов (различных значениях момента инерции ротора, его активного сопротивления и скорости вращения), влияющих на параметры машины, которые, в свою очередь, обуславливают характер и количественную оценку протекания электромагнитных и электромеханических переходных процессов.

## **ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ**

**Публикации в периодических научных изданиях,  
включённых в перечень ВАК Минобрнауки РФ (для спец. 05.09.03):**

1. Кашин, Я.М. Обоснование и разработка перспективных конструкций генераторных установок для систем автономного электроснабжения / Я.М. Кашин, А.Я. Кашин, Д.В. Пауков // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2012. – № 1. – С. 46-53. (авторская доля – 4 стр.)

2. Воронин, С.Г. Сравнительная оценка схем соединения обмоток синхронных генераторов в составе источников постоянного тока / С.Г. Воронин, Н.В. Клиначев, А.М. Давлатов, Д.В. Пауков // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – 2020. – Т. 20. – №3. – С. 110-118. (авторская доля – 2 стр.)

#### **Патенты на изобретения :**

3. Пат. РФ № 2470446, 20.12.2012 г. Стабилизированный аксиальный генератор постоянного тока // Гайтов Б.Х., Кашин Я.М., Гайтова Т.Б., Кашин А.Я., Пауков Д.В., патентообладатель ГОУ ВПО «Кубанский государственный технологический университет», заявка 2011121592/07 от 27.05.2011 г.

4. Пат. РФ 2450411, 10.05.2012 г. Аксиальная двухвходовая бесконтактная электрическая машина - генератор // Гайтов Б.Х., Кашин Я.М., Гайтова Т.Б., Кашин А.Я., Пауков Д.В., Голощапов А.В., патентообладатель ГОУ ВПО «Кубанский государственный технологический университет», заявка 2011101117/07 от 12.01.2011 г.

5. Пат. РФ № 2465706, 27.10.2012 г. Стабилизированный аксиальный бесконтактный генератор постоянного тока. // Гайтов Б.Х., Кашин Я.М., Гайтова Т.Б., Кашин А.Я., Пауков Д.В., патентообладатель ГОУ ВПО «Кубанский государственный технологический университет», заявка 2011111479/07 от 25.03.2011 г.

6. Пат. РФ № 2475924, 20.02.2013 г. Способ изготовления магнитопроводов аксиальных электрических машин // Гайтов Б.Х., Кашин Я.М., Автайкин И.Н., Гайтова Т.Б., Кашин А.Я., Пауков Д.В., патентообладатель ГОУ ВПО «Кубанский государственный технологический университет», заявка 2011134971/07 от 19.08.2011 г.

#### *Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ*

7. Программа для расчета формы кривой выходного напряжения аксиального многофазного трансформатора с вращающимся магнитным полем при обрыве и пробое фаз: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011614739 / Гайтов Б.Х., Кашин Я.М., Гайтова Т.Б., Рябухин М.И., Кашин А.Я. Пауков Д.В. (RU); правообладатель ГОУ ВПО «Кубанский государственный технологический университет», заявка №2011612958 от 26.04.2011 г., зарегистрировано 16.06.2011 г., реестр программ для ЭВМ.

8. Программа для расчета аксиального бесконтактного генератора постоянного тока: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011614738 / Гайтов Б.Х., Кашин Я.М., Гайтова Т.Б., Рябухин М.И., Кашин А.Я. Пауков Д.В. (RU); правообладатель ГОУ ВПО «Кубанский государственный технологический университет», заявка №2011612957 от 26.04.2011 г., зарегистрировано 16.06.2011 г., реестр программ для ЭВМ.

#### **Другие научные публикации:**

16 статей в различных сборниках научных конференций.

**ПАУКОВ Дмитрий Викторович**

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ  
ВОЗДУШНЫХ СУДОВ НА ОСНОВЕ АКСИАЛЬНОГО  
БЕСКОНТАКТНОГО ГЕНЕРАТОРА ПОСТОЯННОГО ТОКА**

Специальность 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Издательский центр Южно-Уральского государственного университета

---

Подписано в печать \_\_ \_\_ \_\_ \_\_ .. Формат 60×84 1/16. Печать цифровая.  
Усл. печ. л. 1,0. Тираж 80 экз. Заказ \_\_\_\_.

---

Отпечатано в типографии Издательского центра ЮУрГУ.  
454080, г. Челябинск, пр. им. Ленина, 76.