

На правах рукописи



Князев Алексей Сергеевич

**АВИАЦИОННЫЙ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС
С УЛУЧШЕННЫМИ МАССОГАБАРИТНЫМИ ПОКАЗАТЕЛЯМИ
ДЛЯ АВАРИЙНОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ВОЗДУШНОГО СУДНА**

Специальность 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

г. Краснодар, г. Москва – 2018

Работа выполнена в федеральном государственном казенном военном образовательном учреждении высшего образования «Краснодарское высшее военное авиационное училище лётчиков имени Героя Советского Союза А.К. Серова» Министерства обороны Российской Федерации и в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)».

Научные руководители: **Кашин Яков Михайлович**, кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры «Авиационное и радиоэлектронное оборудование» федерального государственного казенного военного образовательного учреждения высшего образования «Краснодарское высшее военное авиационное училище лётчиков имени Героя Советского Союза А.К. Серова» Министерства обороны Российской Федерации

Ковалёв Константин Львович, доктор технических наук, старший научный сотрудник, заведующий кафедрой «Электроэнергетические, электромеханические и биотехнические системы» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Официальные оппоненты: **Гарганеев Александр Георгиевич**, доктор технических наук, профессор, профессор Инженерной школы энергетики федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Капелько Константин Васильевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры электроснабжения ракетных комплексов федерального государственного казенного военного образовательного учреждения высшего образования «Военная академия Ракетных войск стратегического назначения имени Петра Великого» Министерства обороны Российской Федерации, заслуженный деятель науки РФ, почётный энергетик

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет гражданской авиации» (МГТУ ГА).

Защита состоится «11» сентября 2018 г. в 14 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.125.07, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московского авиационного института (национального исследовательского университета)», по адресу: 125993, Москва, Волоколамское шоссе, 4, Главный административный корпус, аудитория 308.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д.4 и на сайте: <http://mai.ru>.

Автореферат разослан «__» _____ 2018 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписями, заверенными печатью, просьба направлять по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д.4.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.125.07,
кандидат технических наук



В.С. Степанов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность и степень разработанности избранной темы.

В случае возникновения нештатных ситуаций на борту воздушного судна (ВС) при отказе одного или нескольких двигателей жизнь экипажа и пассажиров зависит от работы аварийных систем. В силу того, что в настоящее время увеличивается степень электрификации бортового оборудования, повышение надёжности работы системы электроснабжения, как основной, так и аварийной, имеет важное значение. Однако, при повышении надёжности нельзя допустить увеличения массогабаритных показателей, так как они являются одними из важнейших показателей для любого авиационного агрегата.

На ВС устанавливаются основные и аварийные источники электроэнергии. Аварийный источник используется в полете при отказавших или/и отключенных основных источниках для питания ограниченного состава приёмников электроэнергии (первой категории), необходимых для совершения безаварийной посадки. Примерами аварийных источников служат аккумуляторная батарея, преобразователь постоянного тока в переменный, питаемый от аккумуляторной батареи, и генератор авиационного ветроэнергетического комплекса (АВЭК). Перечисленные аварийные источники электроэнергии могут использоваться на ВС одновременно.

Аккумуляторные батареи и питаемый от них преобразователь являются источниками энергии с ограниченным временем работы, зависящим от емкости аккумуляторных батарей, их технического состояния, мощности преобразователя, а также от величины нагрузки. На большинстве ВС аккумуляторные батареи обеспечивают бесперебойную работу приёмников первой категории не более 30 минут. Поэтому использование аккумуляторных батарей без аварийных генераторов не гарантирует безаварийного завершения полёта при отказе основных генераторов, что недопустимо.

В настоящее время проблема ограниченного времени работы системы электроснабжения ВС, как правило, решается путем использования вспомогательной силовой установки и /или АВЭК. Вспомогательная силовая установка используется в качестве резервного источника при отказе одного или нескольких основных генераторов. Однако, при отказе ВСУ или в случае утечки авиационного топлива её использование становится невозможным. При этом продолжительная работа аварийной системы электроснабжения ВС может быть обеспечена только с помощью АВЭК.

АВЭК просты по конструкции, неприхотливы в обслуживании (в случае применения бесконтактного генератора). Они являются первичными источниками электроэнергии, не зависящими от источников энергии с ограниченным временем работы.

При применении бесконтактного генератора, а также с учётом крайне редкого использования, можно считать, что АВЭК имеет высокую надёжность и вероятность его отказа в полёте очень мала. Кроме того, АВЭК не потребляет авиационное топливо и продолжает работать вплоть до совершения посадки.

Массогабаритные показатели всего АВЭК в значительной степени зависят от его генератора. Существенный вклад в развитие ветроэнергетических комплексов и генераторов для них внесли А.И. Яковлев, Б.С. Зечихин, А.В. Левин, Ф.Р. Исмагилов, М.Ю. Румянцев, В.Е. Вавилов, А.М. Сугробов, А.М. Русаков, А.М. Олейников, В.П. Харитонов, Р.А. Янсон, С.А. Ганджа, А.С. Мартьянов. Однако, некоторые параметры, необходимые для расчёта, в методиках данных авторов не вычисляются, а приводятся в виде конкретных значений (диапазонов возможных значений). Это не позволяет проектировать электрогенераторы для АВЭК, параметры или условия работы которых отличаются от указанных в известных методиках.

Преимущества АВЭК по сравнению с другими аварийными источниками электроэнергии на воздушных судах очевидны, однако, они не получили широкого распространения

из-за не вполне удовлетворительных массогабаритных показателей. Решение этой проблемы позволит расширить область их применения и, тем самым, повысить безопасность полётов.

Таким образом, диссертационное исследование, связанное с проектированием АВЭК с улучшенными массогабаритными показателями, является актуальным. Актуальность диссертационного исследования подтверждается также соответствием его одному из приоритетных направлений развития науки, технологий и техники РФ: транспортные и космические системы (согласно Указа Президента РФ от 07.07.2011 г. № 899) и приказа Министерства промышленности и торговли РФ №663 от 31 марта 2015 года «Об утверждении плана мероприятий по импортозамещению в отрасли гражданского авиастроения Российской Федерации», а именно: «Система генерирования постоянного и переменного тока на самолёте Sukhoi SuperJet 100».

Тема диссертации связана с планом научной работы Краснодарского высшего военного авиационного училища лётчиков имени Героя Советского Союза А.К. Серова Министерства обороны Российской Федерации и НИР «Повышение эффективности систем автономного электроснабжения» (шифр «АКС-САЭ-ДЭМ»).

Объект исследования. Авиационный ветроэнергетический комплекс аварийной системы электроснабжения воздушного судна.

Предмет исследования. Массогабаритные показатели авиационного ветроэнергетического комплекса, методика проектирования авиационного ветроэнергетического комплекса.

Цель диссертационной работы заключается в улучшении массогабаритных показателей авиационного ветроэнергетического комплекса аварийной системы электроснабжения воздушного судна.

Научная задача исследования заключается в разработке конструкции авиационного ветроэнергетического комплекса с улучшенными массогабаритными показателями, разработке методики проектирования авиационного ветроэнергетического комплекса.

Для достижения поставленной цели в работе определены и решены следующие задачи:

1. Разработка конструкции АВЭК;
2. Разработка методики проектирования АВЭК;
3. Разработка методики массогабаритной оптимизации АВЭК.

Степень достоверности. Достоверность полученных результатов обеспечивается корректностью поставленных задач, обоснованностью принятых допущений, сходимостью результатов теоретических исследований и экспериментов имитационного моделирования.

Научная новизна.

1. Разработана конструкция перспективного авиационного ветроэнергетического комплекса, отличающаяся тем, что магнитная система электрогенератора имеет коническую форму;

2. Разработана методика проектирования АВЭК, отличающаяся методикой проектирования генератора с постоянными магнитами, которая содержит выведенные формулы эквивалентного преобразования электрических машин (ЭМ), формулу определения оптимального значения конструктивного коэффициента для ЭМ с заданным углом наклона воздушного зазора к оси вращения ротора, формулу определения диаметра эталонной окружности для эквивалентной ЭМ с выбранным углом наклона воздушного зазора к оси вращения ротора, формулу определения критического угла наклона воздушного зазора к оси вращения ротора;

3. Разработана методика массогабаритной оптимизации АВЭК, отличающаяся тем, что она содержит способы улучшения каждого из массогабаритных показателей АВЭК, а также разработанную методику массогабаритной оптимизации генератора с постоянными магнитами.

Методы исследования. При выполнении диссертационной работы использовались методы обобщенного электромеханического преобразования энергии, имитационного моделирования, инструменты программного продукта «Ansys Maxwell 16».

Теоретическая и практическая значимость работы.

1. Разработанная конструкция перспективного авиационного ветроэнергетического комплекса позволяет создавать АВЭК с улучшенными массогабаритными показателями по сравнению с существующими аналогами при тех же энергетических показателях;

2. Разработанная методика проектирования АВЭК позволяет определять и сравнивать параметры АВЭК с генератором (с постоянными магнитами) радиальной, аксиальной и конической формы;

3. Разработанная методика оптимизации АВЭК позволяет оптимизировать массогабаритные показатели АВЭК по выбранному критерию.

Положения, выносимые на защиту.

1. Конструкция перспективного АВЭК;

2. Методика проектирования АВЭК;

3. Методика массогабаритной оптимизации АВЭК.

Апробация результатов работы.

Основные положения работы докладывались и обсуждались на международных и всероссийских конференциях: IV Международная научная конференция «Технические и технологические системы», филиал ВУНЦ ВВС «ВВА», 10-12 октября 2012 г., г. Краснодар; XIV Южно-Российская научно-практическая конференция «Инновационные технологии в образовательном процессе», филиал ВУНЦ ВВС «ВВА», 18 октября 2012 г., г. Краснодар; VI Международная научная конференция «Технические и технологические системы», филиал ВУНЦ ВВС «ВВА», 08-10 октября 2014 г., г. Краснодар; II Всероссийская научно-практическая конференция «АВИАТОР», ВУНЦ ВВС «ВВА», 11-13 февраля 2015 г., г. Воронеж; VII Международная научная конференция «Технические и технологические системы», КВВАУЛ им. А.К. Серова, 07-09 октября 2015 г., г. Краснодар; III Всероссийская научно-практическая конференция «Академические Жуковские чтения» ВУНЦ ВВС «ВВА», 25-26 ноября 2015 г., г. Воронеж; III Всероссийская научно-практическая конференция «АВИАТОР», ВУНЦ ВВС «ВВА», 11-12 февраля 2016 г., г. Воронеж; IV Всероссийская научно-практическая конференция «Академические Жуковские чтения», ВУНЦ ВВС «ВВА», 23-24 ноября 2016 г., г. Воронеж; IV Всероссийская научно-практическая конференция «АВИАТОР», ВУНЦ ВВС «ВВА», 16-17 февраля 2017 г., г. Воронеж.

Публикации.

Основное содержание работы опубликовано в 35 научных работах, в том числе 8 в изданиях, рекомендованных ВАК, 8 патентах на изобретение, 5 свидетельствах государственной регистрации программ для ЭВМ, 14 тезисах докладов Всероссийских и Международных научных конференций.

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 162 наименований и 5 Приложений. Общий объем работы составляет 238 страниц машинописного текста, включая 122 рисунка, 14 таблиц и 68 страниц Приложений.

Содержание работы.

Во введении обоснована актуальность работы, определены объект исследования, предмет исследования, цель работы, задачи исследования, степень достоверности, методы исследования, представлена научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведен обзор состояния развития аварийных систем электроснабжения воздушных судов с АВЭК как в России, так и за рубежом. В силу роста степени электрификации бортового оборудования аварийные системы электроснабжения являются наиболее важными системами, обеспечивающими работоспособность приёмников первой

категории в случае отказа основных источников электроэнергии. АВЭК имеют перед другими аварийными источниками электроэнергии ряд преимуществ: они просты по конструкции, неприхотливы в обслуживании, не потребляют авиационное топливо и, как правило, их массогабаритные показатели лучше. Использование АВЭК значительно увеличивает вероятность безаварийного завершения полёта ВС в случае отказа основных источников электроэнергии, поэтому развитие АВЭК и электрогенераторов для них является перспективным и востребованным. Существующие отечественные образцы АВЭК имеют ряд недостатков, связанных с использованием устаревших материалов и низкими массогабаритными показателями.

Современные АВЭК производятся за рубежом, в связи с чем, на современном отечественном самолёте Sukhoi SuperJet-100 установлен импортный АВЭК, производимый компанией Hamilton Sundstrand, США. На сегодняшний день создание отечественного образца АВЭК является актуальным, что подтверждается приказом Министерства промышленности и торговли РФ №663 от 31 марта 2015 года «Об утверждении плана мероприятий по импортозамещению в отрасли гражданского авиационного строительства Российской Федерации», а именно: «Система генерирования постоянного и переменного тока на самолёте Sukhoi SuperJet 100». Зарубежные образцы АВЭК, хоть и являются самыми современными, обладают недостаточно хорошими массогабаритными показателями из-за применения трехмашинного генератора с электромагнитным возбуждением. Предлагается улучшить эти показатели за счёт использования генератора с возбуждением от постоянных магнитов (ПМ), а также изменения формы и конструкции АВЭК (рис. 1).

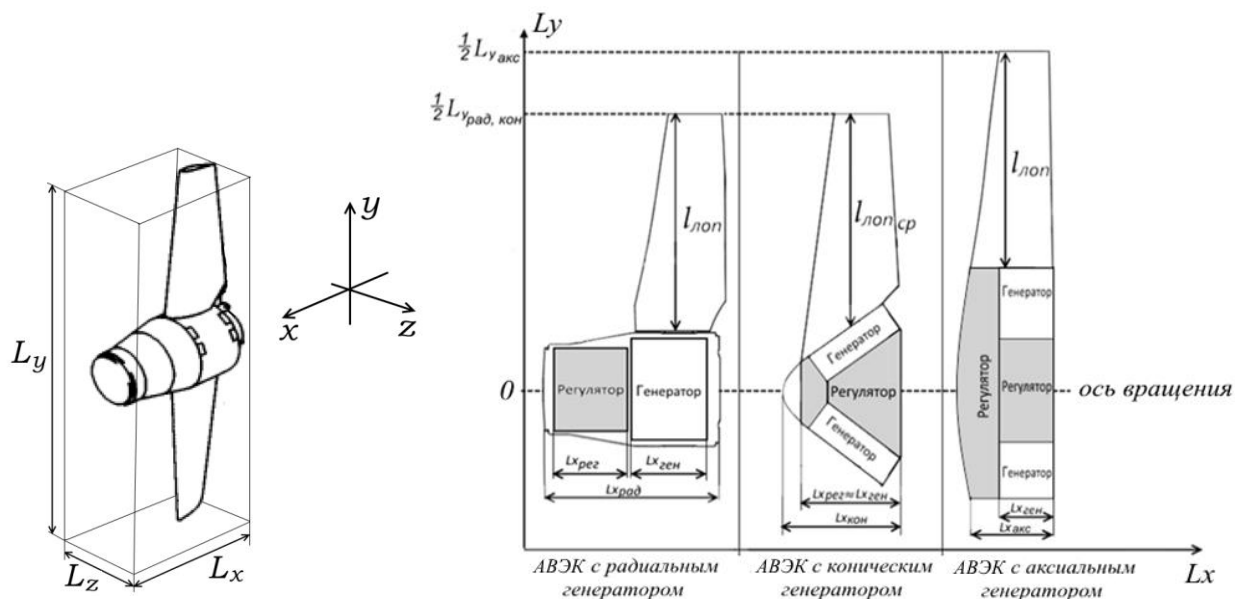


Рисунок 1 - Габаритные размеры АВЭК с радиальным, коническим и аксиальным генератором

$$Lx_{акс} \approx Lx_{кон} < Lx_{рад} \quad (1)$$

$$Ly_{рад} \approx Ly_{кон} < Ly_{акс} \quad (2)$$

$$Lz_{рад} < Lz_{кон} < Lz_{акс} \quad (3)$$

где Lx , Ly , Lz – габаритные размеры АВЭК по осям x , y , z соответственно; индексы «акс», «кон» и «рад» относятся к АВЭК с аксиальным, коническим и радиальным генератором соответственно.

Предварительные расчёты показывают, что АВЭК с генератором различной формы будут обладать различными массогабаритными показателями, поэтому для их сравнения необходимо исследовать все представленные на рис. 1 конструкции.

Во второй главе представлен анализ работы и конструктивных особенностей АВЭК с учётом специфики его работы на ВС. Разработана структурная схема аварийной системы электроснабжения ВС с учётом параметров отечественных агрегатов, которые могут быть использованы при импортозамещении (рис. 2).

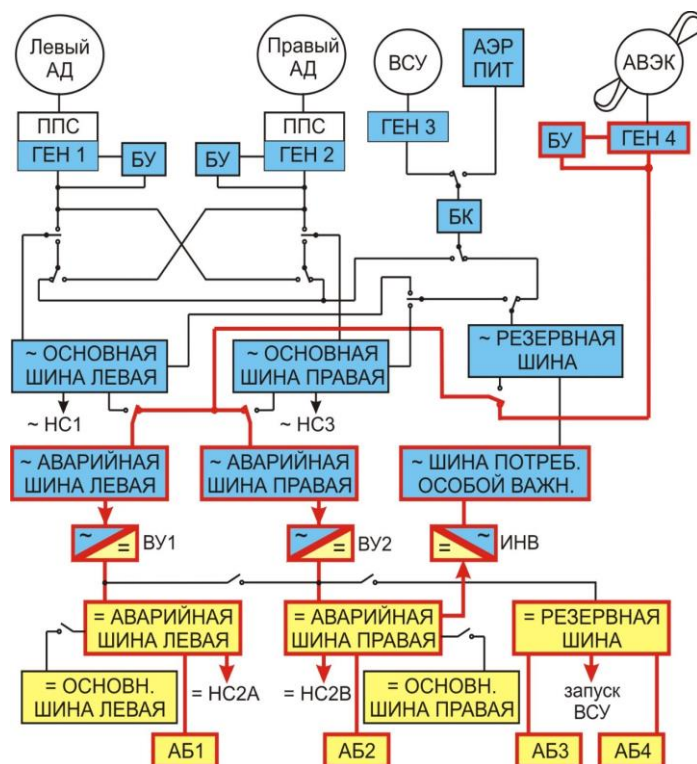


Рисунок 2 – Разработанная схема системы электроснабжения ВС

Автором предложена и описана конструкция перспективного АВЭК с коническим генератором и его электрическая схема (рис. 3). За счёт использования конического генератора с возбуждением от постоянных магнитов, а также размещения регулятора угла установки лопастей во внутреннем пространстве конического генератора достигается улучшение массогабаритных показателей АВЭК по сравнению с существующими аналогами и улучшаются условия воздушного охлаждения генератора при продуве набегающим потоком и самовентиляции в коническом воздушном зазоре за счёт центробежных сил.

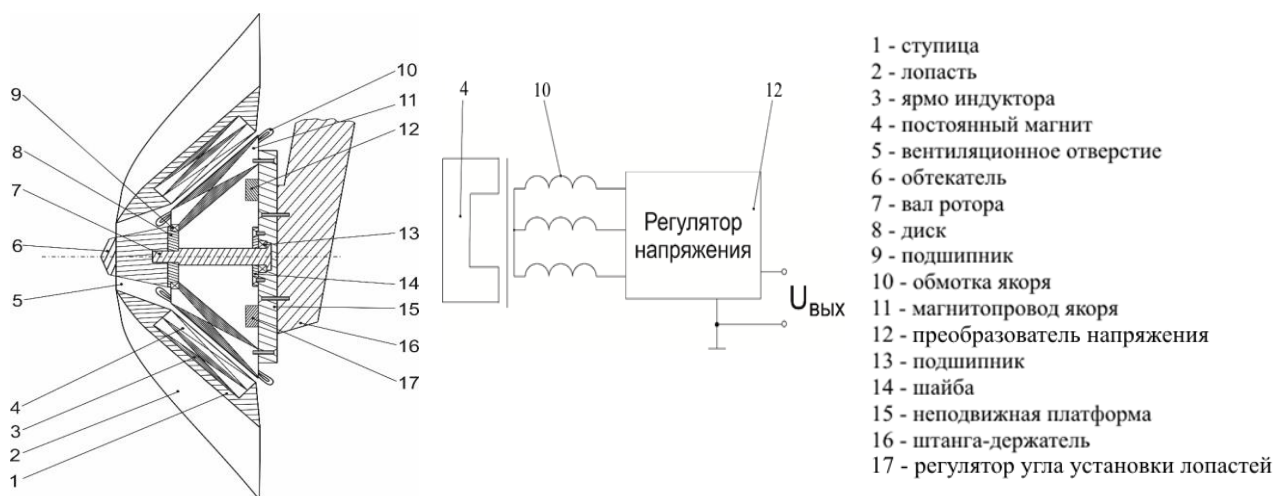


Рисунок 3 - Общий вид перспективного АВЭК и его электрическая схема

Выполнен анализ особенностей конструктивного исполнения ЭМ с ПМ различного конструктивного исполнения – радиального, конического и аксиального. Описано влияние выбора формы ЭМ на насыщение, механическую прочность зубцов магнитопровода якоря,

а также на способ крепления ПМ на ярме индуктора. Описаны технологические особенности производства магнитопроводов для электрических машин с магнитной системой радиальной, конической и аксиальной формы. В частности, для конических ЭМ применимы способы производства из листовой стали методами штамповки и лазерной резки, а также из порошковой электротехнической стали (например, Somaloy-1000) путем прессования, что обеспечивает безотходную технологию, существенное снижение трудоемкости и стоимости производства ЭМ, автоматизацию и повышение культуры производства.

В третьей главе решена проблема создания математического аппарата для расчёта наиболее важной части АВЭК - генератора с ПМ различной формы – радиальной, конической и аксиальной. На основе теории подобия сформулировано определение эквивалентных ЭМ с ПМ, у которых результаты электромеханического преобразования энергии одинаковы. Выдвинуто предположение о возможности создания эквивалентных ЭМ с ПМ различного конструктивного исполнения, обладающих одинаковыми энергетическими показателями (рис. 5).

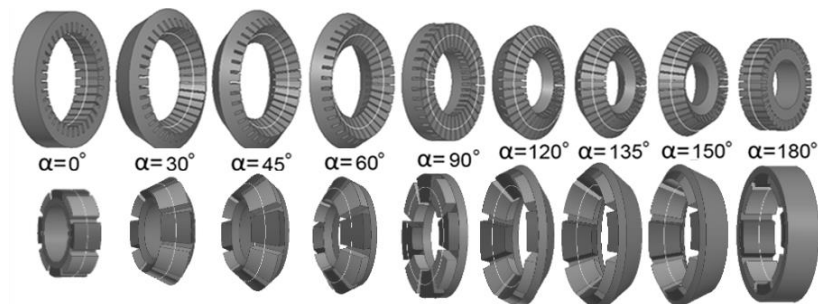
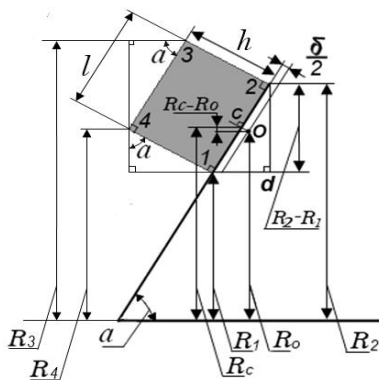


Рисунок 5 - Эквивалентные ЭМ с разным углом наклона воздушного зазора к оси вращения ротора α

Представлены выведенные формулы эквивалентного преобразования ЭМ (рис. 6), которые позволяют определять размеры эквивалентных ЭМ с разным углом наклона воздушного зазора к оси вращения ротора α .



$$R_1 = R_0 + 0,5 \cdot \delta \cdot \cos(\alpha) - 0,5 \cdot l \cdot \sin(\alpha) \quad (4)$$

$$R_2 = R_0 + 0,5 \cdot \delta \cdot \cos(\alpha) + 0,5 \cdot l \cdot \sin(\alpha) \quad (5)$$

$$R_3 = R_0 + (h + 0,5 \cdot \delta) \cdot \cos(\alpha) + 0,5 \cdot l \cdot \sin(\alpha) \quad (6)$$

$$R_4 = R_0 + (h + 0,5 \cdot \delta) \cdot \cos(\alpha) - 0,5 \cdot l \cdot \sin(\alpha) \quad (7)$$

Рисунок 6 - К пояснению формул эквивалентного преобразования

Для доказательства выдвинутого предположения о возможности создания эквивалентных ЭМ разной формы в программе «Ansys Maxwell 16» построены трёхмерные компьютерные модели синхронных ЭМ с ПМ радиального и аксиального конструктивного исполнения (рис. 7).



Рисунок 7 - Модели эквивалентных аксиальной (слева) и радиальной (справа) ЭМ с ПМ

Представлены результаты исследования построенных моделей, подтверждающие справедливость выдвинутого предположения об их эквивалентности (рис. 8-9).

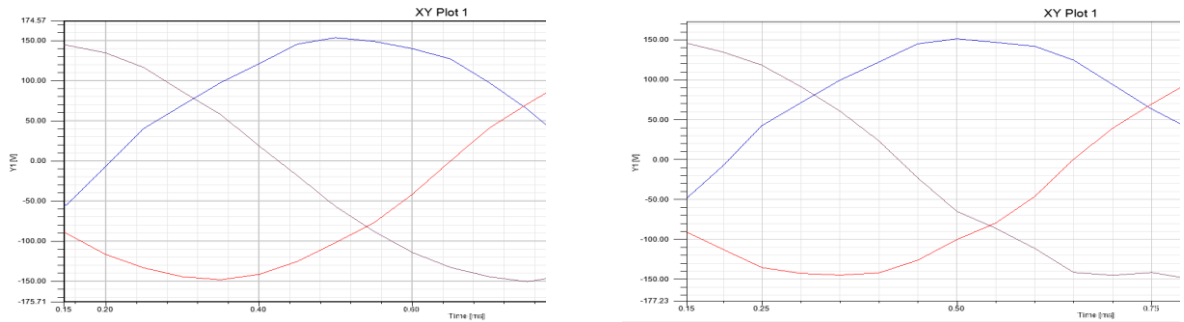


Рисунок 8 - Осциллограммы фазных напряжений моделей эквивалентных аксиальной (слева) и радиальной (справа) ЭМ с ПМ в программе «Ansys Maxwell16»

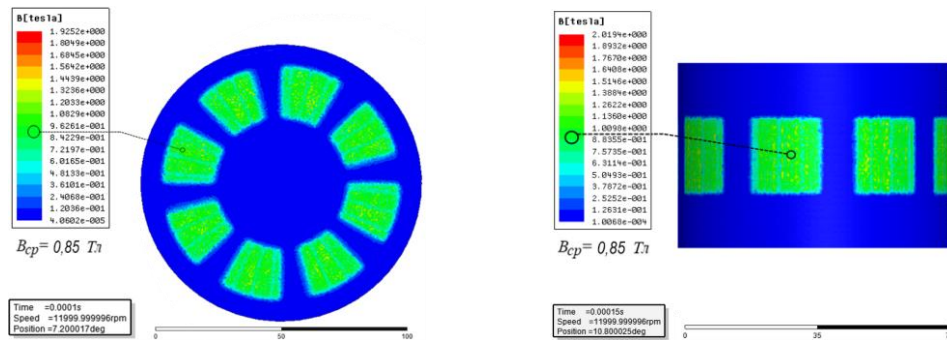


Рисунок 9 - Картина распределения магнитной индукции в воздушном зазоре исследованных моделей аксиальной (слева) и радиальной (справа) ЭМ с ПМ

Выполнен анализ зависимости соотношения главных размеров генератора АВЭК от его формы, на основе которого выведена формула определения оптимального значения конструктивного коэффициента для ЭМ различного конструктивного исполнения (с разным углом наклона воздушного зазора к оси вращения ротора) (рис. 10):

$$\lambda_{\text{опт}} = \frac{0,8 - 0,3 \cdot \sin(\alpha)}{\sqrt{p}} \quad (8)$$

где $\lambda_{\text{опт}}$ - оптимальное значение конструктивного коэффициента, α - угол наклона воздушного зазора к оси вращения ротора, p - число пар полюсов

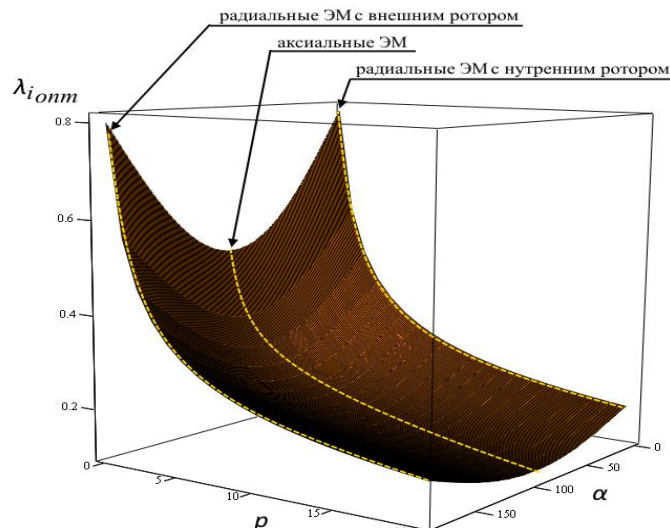


Рисунок 10 - Оптимальное значение конструктивного коэффициента для ЭМ различного конструктивного исполнения

В четвертой главе представлена методика проектирования АВЭК, содержащая методику расчёта ветроколеса и методику расчёта генератора с постоянными магнитами для АВЭК. Приведён типовой расчёт ветроколеса пропеллерного типа по известной методике. Для расчёта генераторов различной формы с ПМ представлены формулы, позволяющие в сочетании с известной методикой расчёта генератора радиальной формы выполнить расчёт параметров генератора конической и аксиальной формы с учётом присущих им особенностей и ограничений.

Разработанная методика проектирования генератора с ПМ отличается от известных тем, что она содержит:

1. Формулы эквивалентного преобразования (4)-(7) для определения габаритных размеров магнитопроводов якоря и индуктора;
2. Формулу (8) для определения рекомендуемого значения конструктивного коэффициента для ЭМ с заданным углом наклона воздушного зазора к оси вращения ротора;
3. Формулу определения диаметра эталонной окружности для эквивалентной ЭМ с выбранным углом наклона воздушного зазора к оси вращения ротора:

$$D_0 = D_{0\text{рад}} \cdot \sqrt[3]{\frac{\lambda_{\text{рад}}}{\lambda}} \quad (9)$$

4. Формулу определения критического угла наклона воздушного зазора к оси вращения ротора:

$$\alpha_{\text{кр}} = \arcsin \left(\frac{\pi D_0 - Z (b_{Z_{\text{MINДОП}}} + b_{\text{П}})}{\pi l} \right) \quad (10)$$

Описана методика массогабаритной оптимизации АВЭК, содержащая способы улучшения каждого из массогабаритных показателей АВЭК, а также методику массогабаритной оптимизации генератора с ПМ для АВЭК. В описанной методике массогабаритной оптимизации генератора с ПМ в качестве варьируемых параметров выбраны угол наклона воздушного зазора (определяющий форму генератора), конструктивный коэффициент, высота постоянного магнита, а в качестве критериев оптимизации выбраны минимальный габаритный размер вдоль оси вращения L_X (с учётом вылета лобовой части обмотки якоря), минимальный диаметральный габаритный размер L_Y (с учётом вылета лобовой части обмотки якоря), минимальная масса электротехнической стали; минимальная масса постоянных магнитов; минимальная масса активных материалов.

В методику массогабаритной оптимизации генератора для АВЭК включены полученные автором выражения (11)-(14):

- для определения влияния формы генератора на его габаритный размер L_X :

$$\begin{cases} L_{X_М} = (h_{\text{ЯК}} + h_{\text{ИНД}} + \delta) \sin(\alpha) + l \cdot \cos(\alpha) \\ L_{X_ОБМ_ЯК} = h_{\text{П}} \cdot \sin(\alpha) + (l + 2 \cdot l_{\text{ЛОБ}}) \cdot \cos(\alpha) \\ L_{X_ЭМ} = \text{MAX}(L_{X_М}; L_{X_ОБМ_ЯК}; L_{X_ИНД_ЯК}) \end{cases} \quad (11)$$

где $L_{X_М}$ – габаритный размер L_X магнитопроводов (якоря и индуктора), $h_{\text{ЯК}}$ – высота магнитопровода якоря, $h_{\text{ИНД}}$ – высота магнитопровода индуктора, δ – воздушный зазор, α – угол наклона воздушного зазора к оси вращения ротора, $l_{\text{ЛОБ}}$ – вылет лобовой части обмотки якоря, l – активная длина, $L_{X_ОБМ_ЯК}$ – габаритный размер L_X обмотки якоря с учётом вылета лобовых частей, $h_{\text{П}}$ – высота паза, $L_{X_ЭМ}$ – габаритный размер L_X всей ЭМ, определяемый как функция выбора наибольшего значения из $L_{X_М}$, $L_{X_ОБМ_ЯК}$ и $L_{X_ИНД_ЯК}$.

- для определения влияния формы генератора на его габаритный размер L_Y :

$$\begin{cases} L_{Y_M_ЯК} = D_0 + (2 \cdot h_{ЯК} + \delta) \cdot \cos(\alpha) + l \cdot \sin(\alpha) \\ L_{Y_M_ИНД} = D_0 + (2 \cdot h_{ИНД} + \delta) \cdot \cos(\alpha + 180^\circ) + l \cdot \sin(\alpha + 180^\circ) \\ L_{Y_ОБ_ЯК} = D_0 + (2 \cdot h_{П} + \delta) \cdot \cos(\alpha) + (l + 2 \cdot l_{ЛОБ}) \cdot \sin(\alpha) \\ L_{Y_ЭМ} = \text{MAX}(L_{Y_M_ЯК}; L_{Y_M_ИНД}; L_{Y_ОБ_ЯК}) \end{cases} \quad (12)$$

где $L_{Y_M_ЯК}$ – габаритный размер L_Y магнитопровода якоря, D_0 – диаметр эталонной окружности, $L_{Y_M_ИНД}$ – габаритный размер L_Y магнитопровода индуктора, $L_{Y_ОБ_ЯК}$ – габаритный размер L_Y обмотки якоря с учётом вылета лобовых частей, $L_{Y_ЭМ}$ – габаритный размер L_Y всей ЭМ, определяемый как функция выбора наибольшего значения из $L_{Y_M_ЯК}$, $L_{Y_M_ИНД}$ и $L_{Y_ОБ_ЯК}$.

- для определения влияния формы генератора на его массу активных материалов (стали, постоянных магнитов и меди):

$$\begin{cases} M_{СТ_ЭМ} = l \rho_{СТ} (h_{ЯК} \pi (D_0 + (h_{ЯК} + \delta) \cdot \cos(\alpha)) - S_{П} \cdot Z) + l h_{ЯР} (D_0 - (2h_{МАГН} + h_{ЯР} + \delta) \cdot \cos(\alpha + 180^\circ)) \\ M_{МАГН} = \pi \rho_{СТ} l_{МАГН} h_{МАГН} a_p (D_0 - (h_{МАГН} + \delta) \cdot \cos(\alpha)) \\ M_{МЕДИ_ЭМ} = \rho_M \cdot s_{ОБМЯК} \cdot w_{ЯК} \left(2l + y_z \cdot (2\pi (D_0 + \delta \cdot \cos(\alpha)) - Z \cdot b_{П}) / Z + 2y_z b_{П} \right) \\ M_{АКТ_МАТ} = M_{СТ_ЭМ} + M_{МЕДИ} + M_{МАГН} \end{cases} \quad (13)$$

где l – активная длина, $\rho_{СТ}$ – плотность стали, $h_{ЯК}$ – высота магнитопровода якоря, D_0 – диаметр эталонной окружности, δ – воздушный зазор, $S_{П}$ – площадь поперечного сечения паза, Z – количество пазов магнитопровода якоря, α – угол наклона воздушного зазора к оси вращения ротора, $h_{ЯР}$ – высота ярма индуктора, $h_{МАГН}$ – высота постоянного магнита индуктора, a_p – коэффициент полюсного перекрытия, $l_{МАГН}$ – длина постоянных магнитов, $w_{ЯК}$ – число витков обмотки, y_z – шаг обмотки, $b_{П}$ – ширина паза магнитопровода якоря.

- для определения влияния высоты постоянных магнитов на величину индукции в воздушном зазоре (рис. 11):

$$B_{НС} = B_r \cdot \left(e^{\frac{-0,25-50 \cdot \delta}{h_{МАГ}}} - 30 \cdot \delta + 0,095 \right) \cdot (1 - 0,08 \cdot |\sin(\alpha)|) \quad (14)$$

где B_r – остаточная индукция материала, из которого сделан магнит, δ – величина воздушного зазора (м), $h_{МАГ}$ – высота постоянного магнита (м)

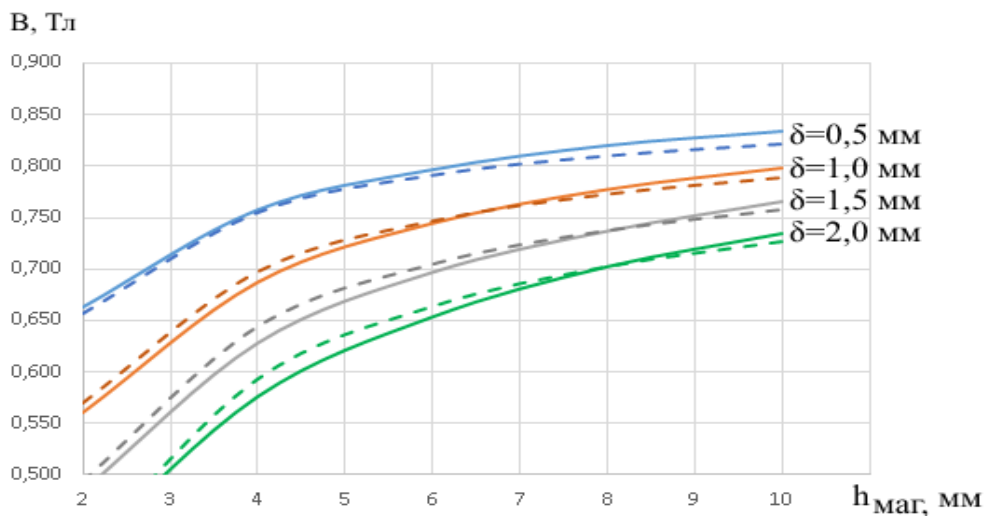


Рисунок 11 - Зависимость магнитной индукции в воздушном зазоре от высоты магнита

Для автоматизации расчёта параметров генератора автором разработана программа расчета и массогабаритной оптимизации генератора с постоянными магнитами, которая

содержит 7 основных модулей расчета, а также модуль оптимизации. Каждый модуль расчёта предназначен для определения некоторых параметров проектируемого генератора с ПМ (рис. 12):

- 1 – расчет основных параметров генератора;
- 2 – расчет обмотки якоря;
- 3 – расчет магнитной цепи на полюс;
- 4 – расчет габаритных размеров;
- 5 – расчет массы;
- 6 – расчет потерь и КПД;
- 7 – тепловой расчёт.

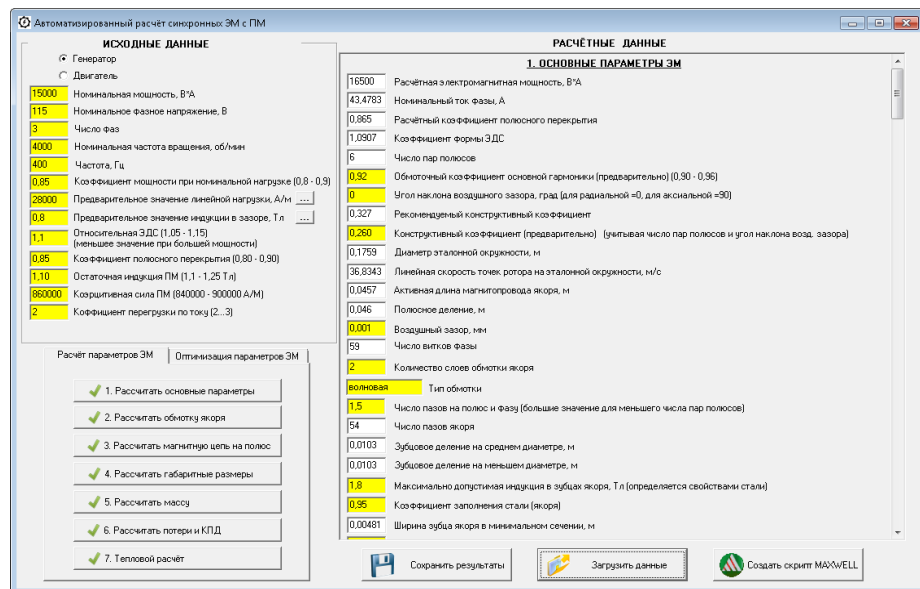


Рисунок 12 - Главное окно программы расчета и массогабаритной оптимизации генератора с постоянными магнитами

Выполнен расчёт параметров генератора с постоянными магнитами для АВЭЖ, имеющего магнитную систему конической формы, с использованием разработанной программы, реализующей разработанную методику. Разработаны новые алгоритмы автоматического построения трёхмерных моделей синхронных ЭМ с ПМ радиальной, аксиальной и конической (рис. 13) формы в программе «Ansys Maxwell 16» на основе полученных расчётных данных.

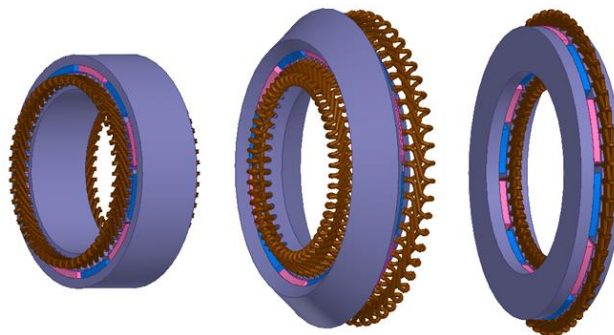


Рисунок 13 - Модели радиального, конического и аксиального генераторов с ПМ

В результате электромагнитного анализа построенных моделей в программе «Ansys Maxwell 16» получены осциллограммы напряжения в трёхфазной обмотке якоря генератора перспективного АВЭЖ как на холостом ходу, так и под нагрузкой (рис. 14), а также картины распределения магнитной индукции в воздушном зазоре конической формы, в магнитопроводах якоря и индуктора (рис. 15). При работе на активно-индуктивную нагрузку фазное напряжение составило 117 В, фазный ток составил 46,2 А.

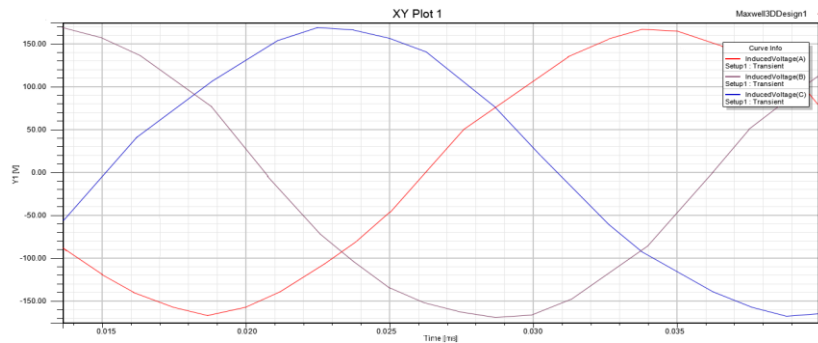


Рисунок 14 - Осциллограммы фазных напряжений в обмотке якоря генератора

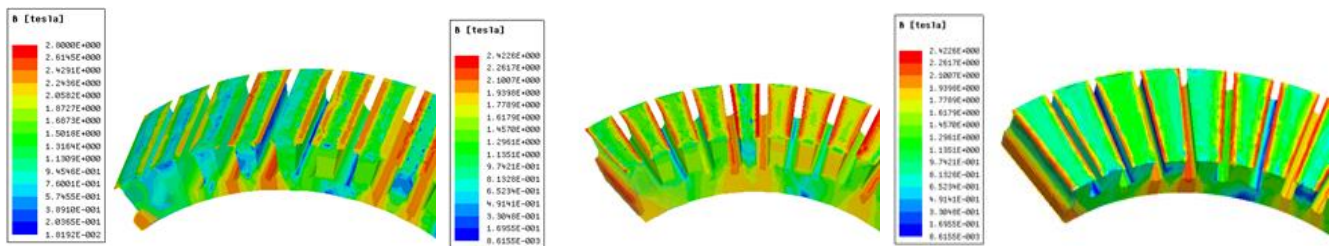


Рисунок 15 - Картины распределения магнитной индукции в магнитопроводе якоря радиального (слева), конического (в центре) и аксиального (справа) генераторов с ПМ

Анализ полученных результатов показал, что средняя погрешность в определении магнитной индукции в магнитопроводах якоря и в воздушном зазоре, а также фазного напряжения, полученных с помощью расчёта по методике и с помощью программы «Ansys Maxwell 16» составила 8%.

Раскрыто понятие сквозного проектирования ЭМ, рассмотрены его этапы. Описано выполнение первых двух этапов сквозного проектирования синхронного генератора с ПМ с использованием разработанной методики расчёта, а также инструментов программы «Ansys Maxwell 16». Выполнение первого этапа заключается в определении параметров ЭМ с ПМ с помощью разработанной программы, а второго этапа - в построении трёхмерной модели ЭМ с ПМ на основе результатов расчёта для дальнейшего анализа. Построение трёхмерной компьютерной модели производится на основе расчётных данных в автоматическом режиме с помощью разработанной программы (рис. 16).

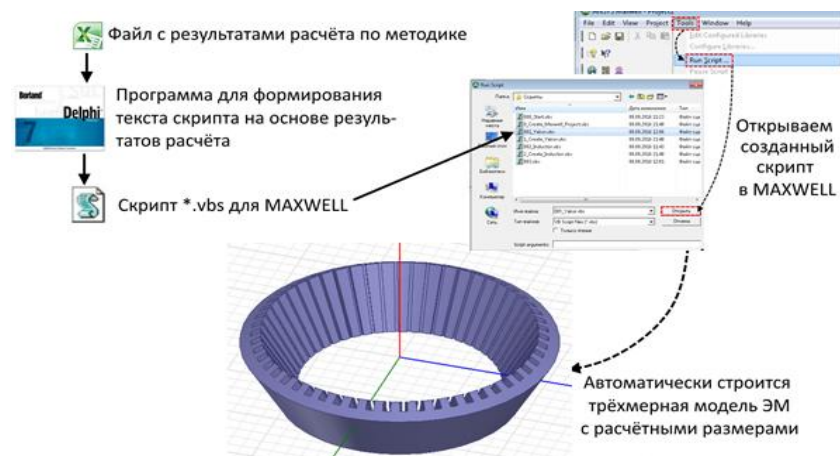


Рисунок 16 - Пример построения конического магнитопровода якоря с углом наклона воздушного зазора к оси вращения ротора 30° в программе «Ansys Maxwell 16»

На примере подвозбудителя известного генератора ГТ30НЖЧ12 (рис. 17) обоснована достоверность результатов расчёта параметров ЭМ с ПМ с использованием разработанной методики, а также результатов исследования трёхмерных моделей ЭМ с ПМ в программе «Ansys Maxwell 16».

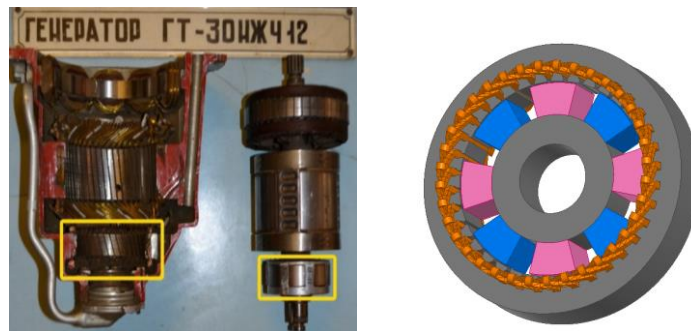


Рисунок 17 - Подвозбудитель генератора ГТ30ИЖ412 на стендовом образце и его трёхмерная компьютерная модель в программе «Ansys Maxwell 16»

Выполнен расчёт, определены массогабаритные показатели и построены модели радиального, конического и аксиального генераторов с ПМ для АВЭК (рис. 18). Расчёт выполнен с учетом технологии производства ЭМ разного конструктивного исполнения и свойств используемых при этом материалов стали магнитопровода.

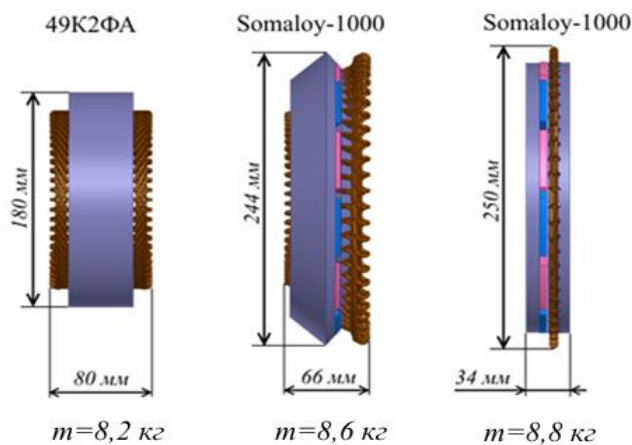


Рисунок 18 - Массогабаритные показатели разработанных моделей генераторов радиального, конического и аксиального исполнения

Изложены преимущества разработанного перспективного АВЭК, состоящие в улучшении его массогабаритных показателей по сравнению с существующими аналогами (рис. 19).

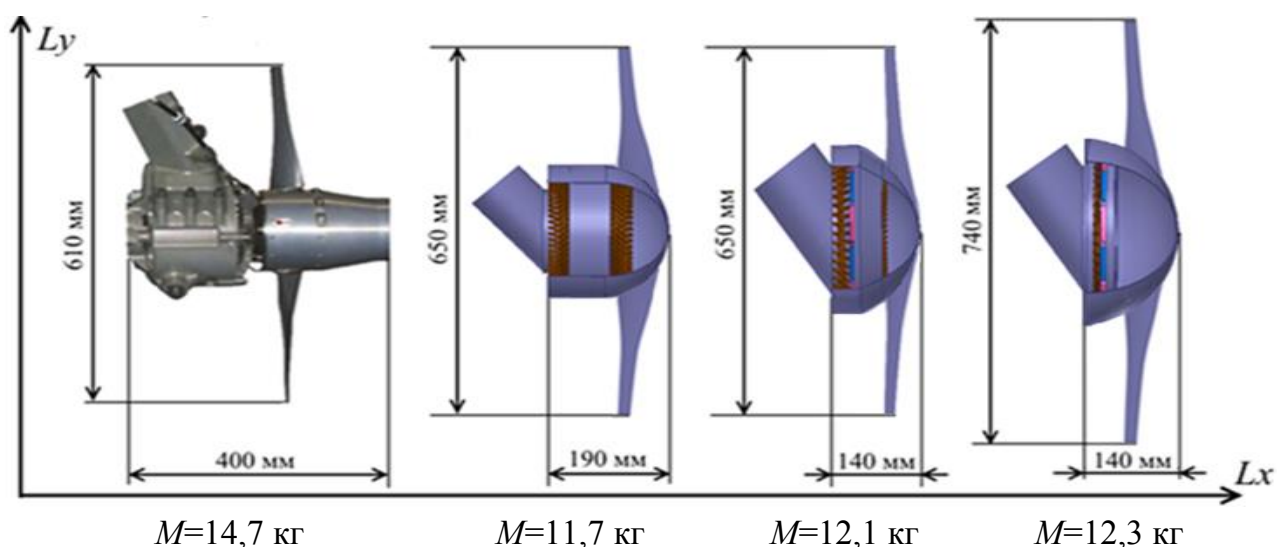


Рисунок 19 – Массогабаритные показатели АВЭК на самолёте Sukhoi SuperJet-100 (с трехмашинным электромагнитным генератором) и перспективных АВЭК с радиальным, коническим и аксиальными генераторами (с постоянными магнитами)

Из полученных данных видно, что масса у разработанных перспективных АВЭК лучше, чем у существующего:

1. Масса активных материалов разработанных перспективных АВЭК лучше, чем у существующего, а именно:

- у АВЭК с радиальным генератором - меньше на 3,0 кг (20,4%);
- у АВЭК с коническим генератором - меньше на 2,6 кг (17,7%);
- у АВЭК с аксиальным генератором - меньше на 2,4 кг (16,3%).

2. Габаритный размер L_Y у разработанных перспективных АВЭК немного хуже, чем у существующего АВЭК, а именно:

- у АВЭК с радиальным генератором - больше на 40 мм (6,5%);
- у АВЭК с коническим генератором - больше на 40 мм (6,5%);
- у АВЭК с аксиальным генератором - больше на 130 мм (21,3%).

3. Габаритный размер L_X у разработанных перспективных АВЭК лучше, чем у существующего АВЭК, а именно:

- у АВЭК с радиальным генератором - меньше на 210 мм (52,5%);
- у АВЭК с коническим генератором - меньше на 260 мм (65%);
- у АВЭК с аксиальным генератором - меньше на 260 мм (65%).

Таким образом, доказано, что по совокупности массогабаритных показателей каждый из разработанных АВЭК превосходит существующий аналог, поэтому можно считать, что цель данной работы достигнута.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе на основе теоретических и экспериментальных исследований решена актуальная научно-техническая задача по разработке АВЭК с улучшенными массогабаритными показателями для аварийной системы электроснабжения воздушного судна. Анализ существующих образцов АВЭК показал, что они обладают недостатками, препятствующими повышению их массогабаритных показателей. Кроме того, использование АВЭК в настоящее время накладывает жёсткие ограничения на пилотирование ВС в аварийной ситуации. Для устранения этих недостатков предложены новые взаимосвязанные технические решения – схема системы электроснабжения ВС и перспективная конструкция АВЭК. Наиболее важной частью АВЭК является генератор, создание которого представляет собой непростую задачу, требующую особого подхода при проектировании и расчёте. Благодаря обобщению теории проектирования ЭМ с ПМ различного конструктивного исполнения, разработана методика проектирования и массогабаритной оптимизации параметров радиального, конического и аксиального генераторов с ПМ, а также программа, реализующая эту методику, которая позволяет максимально упростить и автоматизировать процесс их проектирования и расчёта. В результате выполненных исследований получены следующие результаты и выводы:

1. Разработана конструкция перспективного АВЭК, работающего в составе аварийной системы электроснабжения ВС, отличающаяся от известных конструкций тем, что магнитная система электрогенератора имеет коническую форму, и позволяющая добиться улучшения массогабаритных показателей всего АВЭК;

2. Разработана методика проектирования АВЭК, отличающаяся тем, что в методику проектирования генератора с постоянными магнитами АВЭК включены выведенные формулы эквивалентного преобразования ЭМ, формулы определения рекомендуемого значения конструктивного коэффициента для ЭМ с заданным углом наклона воздушного зазора к оси вращения ротора, формулы определения диаметра эталонной окружности для эквивалентной ЭМ с выбранным углом наклона воздушного зазора к оси вращения ротора, формулы определения критического угла наклона воздушного зазора к оси вращения ротора;

3. Разработана методика массогабаритной оптимизации АВЭК, отличающаяся тем, что она содержит способы улучшения каждого из массогабаритных показателей АВЭК, а

также разработанную методику массогабаритной оптимизации генератора с постоянными магнитами;

4. Разработана программа расчета и оптимизации генератора с постоянными магнитами для АВЭК, отличающаяся тем, что она позволяет выполнить расчёт и массогабаритную оптимизацию параметров ЭМ с ПМ в автоматизированном режиме;

5. Разработана программа создания трёхмерной модели синхронной электрической машины с постоянными магнитами в программе «Ansys Maxwell 16», отличающаяся тем, что она позволяет создавать трёхмерные модели ЭМ с ПМ на основе расчётных данных в автоматическом режиме.

АВЭК являются простыми и эффективными средствами повышения надёжности работы системы электроснабжения и безопасности полётов для ВС как гражданского, так и военного назначения. Их распространение является актуальным и востребованным на сегодняшний день, поэтому работы по разработке и созданию современных отечественных образцов АВЭК необходимо поддерживать как на уровне государственных программ, так и частных инициатив.

Основное содержание диссертации изложено в следующих работах. Научные статьи в журналах, рекомендуемых ВАК при Минобрнауки России:

1. Гайтова, Т.Б. Математическое моделирование перспективных генераторных установок для систем автономного электроснабжения [Текст] / Т.Б. Гайтова, Я.М. Кашин, Л.Е. Копелевич, А.Я. Кашин, **А.С. Князев** // Известия вузов. Электромеханика. – 2013. - №3 - С. 16-23.

2. Кашин, Я.М. Эквивалентные ЭМ. Исследование эквивалентных радиальных и аксиальных синхронных генераторов с постоянными магнитами [Текст] / Я.М. Кашин, А.Я. Кашин, **А.С. Князев** // Вести высших учебных заведений Черноземья. - 2016. - №1. - С. 3-12.

3. Кашин, Я.М. Исследование зависимости мощности синхронных электрических машин от главных размеров и частоты вращения ротора [Текст] / Я.М. Кашин, А.Я. Кашин, **А.С. Князев** // Вестник Адыгейского государственного университета. Серия 4: Естественно-математические науки. – 2016. - Выпуск 3 (186). – С. 99-108.

4. Кашин, Я.М. Сквозное проектирование синхронных электрических машин с постоянными магнитами [Текст] / Я.М. Кашин, А.Я. Кашин, **А.С. Князев** // Вестник Адыгейского государственного университета, серия 4: Естественно-математические науки. – 2016. - Выпуск 3 (186). – С. 114-121.

5. Кашин, Я.М. Массогабаритная оптимизация эквивалентных синхронных электрических машин [Текст] / Я.М. Кашин, А.Я. Кашин, **А.С. Князев**, Л.Е. Копелевич, А.В. Самородов // Вестник Адыгейского государственного университета, серия 4: Естественно-математические науки. – 2017. - Выпуск 1 (196). – С. 128-142.

6. Кашин, Я.М. Методика расчета синхронных электрических машин с возбуждением от постоянных магнитов для ветро-солнечных генераторных установок [Текст] / Я.М. Кашин, А.Я. Кашин, **А.С. Князев**, Л.Е. Копелевич, А.В. Самородов // Вестник Адыгейского государственного университета, серия 4: Естественно-математические науки. – 2017. - Выпуск 1 (196). – С. 94-105.

7. Кашин, Я.М. Современное состояние аварийных авиационных турбин и их классификация [Текст] / Я.М. Кашин, А.Я. Кашин, **А.С. Князев** // Вестник Адыгейского государственного университета, серия 4: Естественно-математические науки. – 2017. - Выпуск 1 (196). – С. 111-121.

8. Кашин, Я.М. Результаты исследования эквивалентных радиальных и аксиальных синхронных генераторов с обмоткой возбуждения [Текст] / Я.М. Кашин, А.Я. Кашин, **А.С. Князев**, М.С. Христофоров // Энергосбережение и водоподготовка. – 2017. – Выпуск 5 (109). – С. 47-51.

Патенты на изобретения:

9. Гайтов, Б.Х. Аксиальный бесконтактный двигатель-генератор / Б.Х. Гайтов, Я.М. Кашин, А.Я. Кашин, **А.С. Князев**, С.А. Пудов // Пат. 2529210 Российская Федерация: МПК Н02К 19/38, Н02К 21/00, Н02К 29/06; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «КубГТУ» - №2013144515/07; заявл. 03.10.2013; опубл. 27.09.2014. Бюл. № 27.

10. Кашин, Я.М. Радиально-аксиальная двухвходовая бесконтактная электрическая машина-генератор / Я.М. Кашин, А.Я. Кашин, **А.С. Князев** // Пат. 2585222 Российская Федерация: МПК Н02К 19/38, Н02К 19/00, Н02К 21/12; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «КубГТУ» - №2015103506/07; заявл. 03.02.2015; опубл. 27.05.2016. Бюл. № 15.

11. Кашин, Я.М. Трёхвходовая аксиальная генераторная установка / Я.М. Кашин, А.Я. Кашин, **А.С. Князев** // Пат. 2589730 Российская Федерация: МПК Н02К 16/02, Н02К 19/38, Н02К 47/06, Н02К 3/22; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «КубГТУ» - № 2015131666/07; заявл. 29.07.2015; опубл. 10.07.2016. Бюл. № 19.

12. Гайтов, Б.Х. Аксиальный управляемый бесконтактный двигатель-генератор / Б.Х. Гайтов, Я.М. Кашин, А.Я. Кашин, **А.С. Князев** // Пат. 2601952 Российская Федерация, МПК Н02К 29/06, Н02К 19/38, Н02К 21/00; Заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «КубГТУ» - №2015116432/07; заявл. 29.04.2015; опубл. 10.11.2016 Бюл. № 31.

13. Гайтов, Б.Х. Аксиально-радиальный бесконтактный генератор переменного тока / Б.Х. Гайтов, Я.М. Кашин, А.Я. Кашин, **А.С. Князев** // Пат. 2626814 Российская Федерация, МПК Н02К 19/10, Н02К 21/12, Н02К 16/04, Н02К 47/00; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «КубГТУ» - № 2016111052; заявл. 24.03.2016; опубл. 02.08.2017 Бюл. № 22.

14. Кашин, Я.М. Вентильный ветрогенератор постоянного тока / Я.М. Кашин, А.Я. Кашин, **А.С. Князев** // Пат. 2633356 Российская Федерация: МПК Н02К 7/18, F03D 9/00; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «КубГТУ» - № 2016141374; заявл. 20.10.2016; опубл. 12.10.2017. Бюл. № 29.

15. Кашин, Я.М. Стабилизированная трёхвходовая аксиальная генераторная установка / Я.М. Кашин, А.Я. Кашин, **А.С. Князев** // Пат. 2633359 Российская Федерация: МПК Н02J 1/10; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «КубГТУ» - № 2016144946; заявл. 11.01.2017; опубл. 12.10.2017. Бюл. № 29.

16. Кашин, Я.М. Бесконтактный многофазный генератор переменного тока / Я.М. Кашин, А.Я. Кашин, **А.С. Князев**, А.В. Войнов // Пат. 2633374 Российская Федерация: МПК Н02К 47/26, Н02К 19/38; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «КубГТУ» - № 2016144946; заявл. 15.11.2016; опубл. 12.10.2017. Бюл. № 29.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ:

17. Кашин, Я.М. Программа расчета математической модели стабилизированного аксиального генератора постоянного тока с регулятором напряжения на магнитных усилителях / Я.М. Кашин, **А.С. Князев**, А.Я. Кашин, В.В. Салий, В.С. Сидоренко // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2015610468 Российская Федерация. - Заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО «КубГТУ» - №2014661170; заявл. 05.11.2014; зарегистр. 12.01.2015.

18. Кашин, Я.М. Программа расчета автоматизированного проектирования синхронных генераторов с обмоткой возбуждения / Я.М. Кашин, **А.С. Князев**, А.Я. Кашин, Г.А. Кириллов // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2017611945 Российская Федерация. - Заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО «КубГТУ» - №2016614182; заявл. 26.04.2016; зарегистр. 13.02.2017.

19. Кашин, Я.М. Программа расчета синхронной электрической машины с постоянными магнитами / Я.М. Кашин, **А.С. Князев**, А.Я. Кашин, А. Караджаев // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2017618762 Российская Федерация. - Заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО «КубГТУ» - №2017616232; заявл. 27.06.2017; зарегистр. 08.08.2017.

20. Кашин, Я.М. Программа расчёта размеров магнитной системы эквивалентных электрических машин / Я.М. Кашин, **А.С. Князев**, А.Я. Кашин, В.А. Ким // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2017619234 Российская Федерация. - Заявитель и правообладатель ФГБОУ ВПО «КубГТУ» - № 2017616217; заявл. 27.06.2017; зарегистр. 17.08.2017.

21. Кашин, Я.М. Программа создания трёхмерной модели синхронной электрической машины с постоянными магнитами в «Ansys Maxwell 16» / Я.М. Кашин, **А.С. Князев**, А.Я. Кашин, В.А. Ким // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2017619235 Российская Федерация. - Заявитель и правообладатель ФГБОУ ВПО «КубГТУ» - № 2017616222; заявл. 27.06.2017; зарегистр. 17.08.2017.

Статьи и материалы научных конференций:

22. Кашин, Я.М. Анализ основных характеристик возобновляемых источников энергии [Текст] / Я.М. Кашин, А.Я. Кашин, **А.С. Князев** // Инновационные технологии в образовательном процессе: материалы XIV Южно-Российской научно-практической конференции, г. Краснодар, 01-03 января 2012 г. / филиал ВУНЦ ВВС «ВВА». – Краснодар. - С. 133-137.

23. **Князев, А.С.** Общая характеристика возобновляемых источников энергии [Текст] / А.С. Князев, А.Я. Кашин // Инновационные технологии в образовательном процессе: материалы XIV Южно-Российской научно-практической конференции, г. Краснодар, 18 октября 2012 г. / филиал ВУНЦ ВВС «ВВА». – Краснодар. - С.131-133.

24. Кашин, Я.М. Перспективы использования возобновляемых источников энергии в России [Текст] / Я.М. Кашин, А.Я. Кашин, **А.С. Князев** // Технические и технологические системы: материалы IV международной научной конференции, г. Краснодар, 10-12 октября 2012 г. / филиал ВУНЦ ВВС «ВВА». - Краснодар. - С.40-45.

25. **Князев, А.С.** Метод замещения для расчета ЭДС в аксиальных электрических машинах при неравномерном распределении магнитной индукции в радиальном направлении [Текст] / А.С. Князев, А.Я. Кашин // Технические и технологические системы: материалы VI международной научной конференции, г. Краснодар, 10-12 октября 2014 г. / филиал ВУНЦ ВВС «ВВА». - Краснодар. - С. 129-132.

26. **Князев, А.С.** Исследование математической модели стабилизированного аксиального генератора постоянного тока [Текст] / А.С. Князев, А.Я. Кашин, Е.В. Сидорова // Технические и технологические системы: материалы VI международной научной конференции, г. Краснодар, 08-10 октября 2014 г. / филиал ВУНЦ ВВС «ВВА». - Краснодар. – С. 132-144.

27. **Князев, А.С.** Программа и методика экспериментальных исследований аксиального бесконтактного генератора постоянного тока [Текст] / А.С. Князев, А.Я. Кашин, Д.В. Пауков // Технические и технологические системы: материалы VI международной научной конференции, г. Краснодар, 08-10 октября 2014 г. / филиал ВУНЦ ВВС «ВВА». - Краснодар. - С. 156-163.

28. Кашин, Я.М. Способы сложения энергии в двухвходовых электрических машинах [Текст] / Я.М. Кашин, А.Я. Кашин, **А.С. Князев**, А.В. Самородов, Р.С. Кравец // Технические и технологические системы: материалы VII международной научной конференции, г. Краснодар, 07-09 октября 2015 г. / КВВАУЛ им. А.К. Серова. - Краснодар. - С.5-8.

29. Гайтов, Б.Х. О целесообразности использования двухмерных электрических машин в системах автономного электроснабжения [Текст] / Б.Х. Гайтов, Я.М. Кашин, Л.Е. Копелевич, **А.С. Князев**, А.Я. Кашин // Технические и технологические системы: материалы VII международной научной конференции, г. Краснодар, 07-09 октября 2015 г. / филиал ВУНЦ ВВС «ВВА». – Краснодар. – 2015. – С. 8-11.

30. **Князев, А.С.** Радиальные и аксиальные электрические машины как частный случай электрических машин с коническим ротором. Основные определения [Текст] / А.С. Князев, А.Я. Кашин // Технические и технологические системы: материалы VII международной

научной конференции, г. Краснодар, 07-09 октября 2015 г. / филиал ВУНЦ ВВС «ВВА». - Краснодар. - С. 121-127.

31. **Князев, А.С.** Эквивалентное преобразование электрических машин с коническим ротором [Текст] // Технические и технологические системы: материалы VII международной научной конференции, г. Краснодар, 07-09 октября 2015 г. / филиал ВУНЦ ВВС «ВВА». - Краснодар. - С. 127-132.

32. **Кашин, Я.М.** Стабилизированный аксиальный генератор переменного тока для автономной системы электроснабжения воздушных судов [Текст] / Я.М. Кашин, А.Я. Кашин, **А.С. Князев** // Актуальные вопросы исследований в авионике - теория, обслуживание, разработки «АВИАТОР»: сборник научных статей по материалам II Всероссийской научно-практической конференции, ВУНЦ ВВС «ВВА», г. Воронеж, 11-13 февраля 2015 г. – Том 1. – Воронеж. – С. 55-60.

33. **Кашин, Я.М.** Определение основных размеров аксиальных электрических машин [Текст] / Я.М. Кашин, А.Я. Кашин, **А.С. Князев**, Б.Н. Абзалов // Наука. Техника. Технологии. - 2016. – №1. – С. 111-122.

34. **Кашин, Я.М.** Универсальные главные размеры электрических машин [Текст] / Я.М. Кашин, А.Я. Кашин, **А.С. Князев** // Актуальные вопросы исследований в авионике - теория, обслуживание, разработки «АВИАТОР»: сборник научных статей по материалам IV Всероссийской научно-практической конференции, ВУНЦ ВВС «ВВА», г. Воронеж, 16-17 февраля 2017 г. – Воронеж. – С. 34-41.

35. **Кашин, Я.М.** Современное состояние аварийных авиационных электрогенераторов [Текст] / Я.М. Кашин, А.Я. Кашин, **А.С. Князев**, В.А. Бац // Актуальные вопросы исследований в авионике - теория, обслуживание, разработки «АВИАТОР»: сборник научных статей по материалам IV Всероссийской научно-практической конференции, ВУНЦ ВВС «ВВА», г. Воронеж, 16-17 февраля 2017 г. – Воронеж. – С. 41-50.

Все основные положения диссертации разработаны автором. В работах, опубликованных в соавторстве, соискателю принадлежат следующие результаты:

[1] – составлены уравнения математической модели для обмотки замещения постоянного многополюсного магнита и обмотки якоря подвозбудителя;

[2] – созданы трёхмерные модели радиального и аксиального синхронного генераторов и их анализ в программе «Ansys Maxwell 16»;

[3] – разработаны трёхмерные модели ЭМ и проведены их исследования в «Ansys Maxwell 16»;

[4] – разработана и описана реализация первых двух этапов сквозного проектирования синхронных ЭМ с ПМ;

[5] – разработана методика массогабаритной оптимизации эквивалентных синхронных электрических машин;

[6] – разработана методика расчёта синхронных электрических машин с возбуждением от постоянных магнитов;

[7] – разработана и описана классификация аварийных авиационных турбин;

[8] – разработаны трёхмерные модели ЭМ и проведены их исследования в «Ansys Maxwell 16»;

[9] – разработаны конструкции датчиков положения ротора;

[10] – разработаны конструкции полого вала с постоянным магнитом индуктора подвозбудителя и магнитопроводом якоря подвозбудителя;

[11] – разработан блок управления трёхвходовой аксиальной генераторной установкой;

[12] – разработаны регулятор напряжения и регулятор частоты вращения блока управления аксиального управляемого бесконтактного двигателя-генератора;

[13] – разработана схема взаимного расположения магнитопроводов возбуждителя и основного генератора в аксиально-радиальном бесконтактном генераторе переменного тока;

[14] – разработана конструкция вентильного ветрогенератора постоянного тока;

[15] – разработана электрическая схема стабилизированной трёхфазовой аксиальной генераторной установки;

[16] – разработана конструкция бесконтактного многофазного генератора переменного тока;

[17] – разработан интерфейс, написан программный код;

[18] – разработан интерфейс, написан программный код;

[19] – разработан алгоритм расчёта;

[20] – разработан алгоритм программы;

[21] – разработан алгоритм программы;

[22] – выполнен анализ характеристик ветра в качестве источника энергии;

[23] – выполнена общая характеристика ветра как возобновляемого источника энергии;

[24] – выполнена оценка перспектив ветроиспользования;

[25] – описаны возможности создания единого математического аппарата для расчёта радиальных и аксиальных электрических машин;

[26] – написана программа, реализующая математическую модель стабилизированного аксиального генератора постоянного тока;

[27] – разработана часть программы экспериментальных исследований аксиального бесконтактного генератора постоянного тока;

[28] – описаны способы сложения энергии, поступающей одновременно на два входа двухфазовой ЭМ;

[29] – описаны достоинства и недостатки двухмерных электрических машин;

[30] – сформулированы определения терминов, использованных для обобщения теории радиальных и аксиальных электрических машин;

[32] – составлена трёхмерная модель стабилизированного аксиального генератора переменного тока в программе «Ansys Maxwell 16», выполнен анализ построенной модели;

[33] – предложен метод расчёта основных размеров аксиальных ЭМ через параметр «диаметр эталонной окружности»;

[34] – предложено использование универсальных главных размеров для радиальных, аксиальных и конических ЭМ;

[35] – выполнен обзор некоторых образцов аварийных электрогенераторов.

Работа [31] выполнена соискателем самостоятельно.

Князев Алексей Сергеевич

**АВИАЦИОННЫЙ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС
С УЛУЧШЕННЫМИ МАССОГАБАРИТНЫМИ ПОКАЗАТЕЛЯМИ
ДЛЯ АВАРИЙНОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ВОЗДУШНОГО СУДНА**

Автореферат

Подписано в печать 19.06.2018 г.

Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100 экз.