

На правах рукописи



Зубков Юрий Валентинович

**МЕТОДОЛОГИЯ АНАЛИЗА И СИНТЕЗА БЕСЩЕТОЧНЫХ
ГЕНЕРАТОРОВ МАЛОЙ И СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ ДЛЯ
АВТОНОМНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК**

Специальность 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Самара 2018

Работа выполнена на кафедре «Электромеханика и автомобильное электрооборудование» ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет».

Научный консультант: **Макаричев Юрий Александрович**
доктор технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», заведующий кафедрой «Электромеханика и автомобильное электрооборудование»

Официальные оппоненты: **Беспалов Виктор Яковлевич**
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», профессор кафедры «Электромеханики, электрических и электронных аппаратов»

Ютт Владимир Евсеевич
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)», заведующий кафедрой «Электротехники и электрооборудования»

Ганджа Сергей Анатольевич
доктор технических наук, доцент, ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (ЮУрГУ)», заведующий кафедрой «Теоретических основ электротехники»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Уральский Федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина», г.Екатеринбург

Защита диссертации состоится 25 декабря 2018 г. в 10ч. на заседании диссертационного совета Д 212.217.04 по адресу: 443100, Самара, ул. Первомайская, 18, Самарский государственный технический университет, корпус 1, ауд. 4а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Самарского государственного технического университета (ул. Первомайская, 18) и на сайте ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» <https://samgtu.ru>.

Отзывы по данной работе в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: Россия, 443100, Самара, ул. Молодогвардейская 244, Главный корпус, Самарский государственный технический университет, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.217.04; факс: (846) 278-44-00, e-mail: a-ezhova@yandex.ru

Автореферат разослан « » _____ 20 г.

Учёный секретарь диссертационного совета Д 212.217.04
кандидат технических наук



Е.В. Стрижакова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Современными мировыми тенденциями развития электротехники являются: повышение надежности энергоснабжения потребителей, снижение затрат на производство электроэнергии и следовательно, уменьшение ее стоимости, использование экологически чистых первичных источников. Дефицит энергоресурсов сегодня является одним из основных сдерживающих факторов развития экономики.

В отличие от большой энергетики, которая требует для наращивания своих мощностей привлечения значительных инвестиций, малая энергетика способна за короткое время обеспечить электроэнергией непосредственных потребителей, решая проблему относительно небольшими капитальными затратами.

Важное место в стратегии развития малой электроэнергетики занимают автономные энергетические установки (АЭУ). АЭУ – это системы генерации электрической энергии, как правило, не связанные с системами централизованного электроснабжения. К стационарным АЭУ можно отнести автономные электростанции малой и средней мощности, в том числе, использующие возобновляемую энергию ветра, микроГЭС, генераторы с микротурбинами и двигателями внутреннего сгорания.

Отдельный класс АЭУ – электрические генераторы транспортных средств (ТС). Энергонасыщенность современных ТС возрастает в геометрической прогрессии. Особенно эта тенденция прослеживается в специальной технике. Бронетанковые ТС нуждаются в мощных, компактных и сверхнадежных источниках электроэнергии. Похожие требования предъявляются и к генераторным установкам спецавтомобилей МЧС и других экстренных служб. В отдельную группу АЭУ следует выделить генераторы и стартер-генераторы летательных аппаратов (ЛА), в том числе, их беспилотных вариантов (БПЛА).

Для систем электрозапуска наземных газотурбинных двигателей требуются экономичные, энергоэффективные электромеханические преобразователи, которые по своей структуре, принципу действия и ряду не до конца решенных научно-технических проблем близки к автономным генераторным установкам.

Главным элементом любой АЭУ является электромеханический преобразователь (ЭМП), работающий в генераторном режиме. Генераторы АЭУ должны удовлетворять широкому спектру требований, в числе которых высокие надежность, энергетическая эффективность, низкие массогабаритные показатели и эксплуатационные издержки. Одним из наиболее перспективных направлений решения этой важной научно-технической задачи является

совершенствование бесконтактных электромеханических преобразователей на базе синхронных машин малой и средней мощности.

Разработке и исследованию бесконтактных электромашинных источников питания сначала в СССР, а затем и в России уделяется большое внимание. Это объясняется широким спектром областей, в которых нашли применение электрические генераторы без щеточного контакта. В 60-е годы 20-го столетия в нашей стране начались работы по созданию бесконтактных источников питания для нужд авиации с целью исключения из системы электропитания летательных аппаратов такого критичного к условиям больших высот и высокой агрессивности среды узла, как коллекторно-щеточный контакт. Большой научный и практический вклад в дело разработки и исследования бесконтактных автономных электромашинных источников для авиации и космонавтики внесли такие ученые, как А. И. Бертинов, А. Г. Иосифьян, Д. А. Бут, В. А. Балагуров, Б. С. Зечихин, Ф. Р. Исмагилов и др. В работах перечисленных авторов дана классификация бесщеточных электрических генераторов, развита теория электромагнитных и электромеханических процессов, разработаны методы проектирования с учетом особенностей эксплуатации.

Безусловно, перспективной областью применения бесщеточных электрических генераторов (БЭГ) является нетрадиционная энергетика, т.е. использование альтернативных источников энергии. Ветрогенераторы и генераторы микро ГЭС эксплуатируются в тяжелых условиях. К ним предъявляются требования повышенной надежности и отсутствия частого сервиса. Большой вклад в развитие теории и разработку конструкций таких БЭГ внесли М. Л. Костырев, Л. М. Паластин, П. Ю. Грачев.

Инновации в автомобилестроении – замещение традиционных силовых агрегатов на основе двигателей внутреннего сгорания электрическими двигателями на полностью электрифицированных и гибридных автомобилях потребовали существенного повышения энерговооруженности и, как следствие, разработки новых бортовых источников электропитания с лучшими габаритными и энергетическими характеристиками. Решению данной задачи посвящены работы В. В. Апсита, А. И. Скороспешкина, В. Е. Ютта, А. М. Анисимова.

В числе ученых, работавших над развитием теории и способствовавших практическому продвижению бесщеточных генераторов в системах АЭУ следует назвать зарубежных исследователей S. Nonaka, K. Yamazaki, Z. Q. Zhu, H. Fang, J. Weimer, I. Boldea и др.

Очевидно, что увеличение производства генераторов для автономных энергетических установок является важнейшей задачей, в рамках которой должны неразрывно решаться вопросы создания новых ЭМП с улучшенными энергетическими и эксплуатационными характеристиками. В то же время отсутствие общего подхода и методологических принципов к исследованию, разработке и внедрению бесщеточных генераторов АЭУ приводит с одной

стороны к необоснованному расширению их номенклатуры, а с другой - тормозит промышленное внедрение новых видов БЭГ. Развитие теории расчета, проектирования и оптимизации, совершенствование методов улучшения удельных массогабаритных показателей, энергетической эффективности – основные пути повышения качества бесщеточных электрических генераторов. Вследствие изложенного, разработка научно-методических основ моделирования и оптимизационного проектирования бесщеточных генераторов малой и средней мощности, обеспечивающих улучшение массогабаритных и энергетических показателей, повышение технологичности, а также решение комплекса вопросов по их практической реализации и внедрению, является актуальной научной проблемой, имеющей важное народнохозяйственное значение.

Работа выполнялась на кафедре «Электромеханика и автомобильное электрооборудование» Самарского Государственного технического университета в соответствии с Федеральной целевой программой «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014—2020 годы», утвержденной Постановлением Правительства Российской Федерации № 426 от 21 мая 2013 года, пунктом б) переход к экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике, повышение эффективности добычи и глубокой переработки углеводородного сырья, формирование новых источников энергии; создания новых способов транспортировки и хранения энергии. В период 2014-2018 гг. осуществлены научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по созданию автономных источников электрической энергии и систем электрозапуска на базе синхронных машин малой и средней мощности.

Целью работы является разработка научно-методических основ моделирования и оптимизационного проектирования бесщеточных генераторов малой и средней мощности с электромагнитным и магнитоэлектрическим возбуждением, обеспечивающих улучшение массогабаритных и энергетических показателей, повышение технологичности, а также решение комплекса вопросов по их практической реализации и внедрению.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе поставлены и решены следующие **основные задачи**:

1. Разработана концепция анализа схемных и конструктивных решений бесконтактных синхронных генераторов автономных энергетических установок для объективной оценки современного состояния проблемы и определения тенденций развития их теории.

2. Создана методология определения оптимальной конфигурации БЭГ с интегрированным возбуждением, отличающаяся от известных уточненным учетом влияния параметров и дифференциального рассеяния совмещенных обмоток на эффективность преобразования энергии в возбудителе и основном генераторе.

3. Разработаны принципы математического моделирования БЭГ, построенные на основе теории обобщенного электромеханического преобразователя и математические модели для исследования электромагнитных процессов в статике и динамике, отличающиеся учетом взаимного влияния разнородных магнитных полей.

4. Предложены методология синтеза бесщеточных синхронных генераторов с интегрированным электромагнитным и магнитоэлектрическим возбуждением и их математические модели, адаптированные к решению задач оптимизационного проектирования, отличающиеся уточненным методом расчета параметров посредством численного анализа магнитного поля.

5. Созданы программные комплексы с элементами оптимизации бесщеточных электрических генераторов малой и средней мощности, обеспечивающие достижение требуемых статических и динамических критериев качества.

6. Разработаны и внедрены в производство бесконтактные электрические генераторы автономных систем электроснабжения для транспортных машин специального назначения, автомобильного и железнодорожного транспорта, систем энергообеспечения беспилотных летательных аппаратов, ветроэнергетики, а так же стартерных и стартер-генераторных систем с возбуждением от постоянных магнитов, отличающиеся улучшенными, по сравнению с аналогами, массогабаритными и энергетическими характеристиками.

Объект исследования – бесщеточные электрические генераторы с интегрированным электромагнитным и магнитоэлектрическим возбуждением мощностью от единиц до десятков киловатт для автономных энергетических установок.

Методы исследования

Исследования проводились с использованием методов координатных преобразований к колеблющимся осям, электрических цепей с переменными параметрами, векторно-матричных преобразований, поверочных расчетов статического синтеза, систематического просмотра многомерных областей с привлечением аппарата ЛП- τ последовательностей и многокритериальной оптимизации, теории поля и численного моделирования, идентификации и сопоставительного анализа.

Научная новизна

Научная новизна заключается в том, что в работе развиваются и углубляются теоретические представления о методологии анализа бесщеточных электрических генераторов и их параметрического синтеза; предложены новые алгоритмы совместного использования процедур математического моделирования электромагнитного поля и оптимизационного проектирования БЭГ; на новом качественном уровне в разработанных математических моделях БЭГ учитываются эффекты при перемагничивании ферромагнетиков полями разной частоты, реальная конфигурация магнитопроводов.

В работе получены следующие научные результаты:

1. Методология определения оптимальной конфигурации БЭГ с интегрированным возбуждением, отличающаяся от известных учетом влияния параметров и дифференциального рассеяния совмещенных обмоток на эффективность преобразования энергии в возбудителе и генераторе.

2. Принципы математического моделирования БЭГ, базирующиеся на теории обобщенного электромеханического преобразователя, имитационные модели для исследования электромагнитных процессов в статике и динамике, отличающиеся учетом взаимного влияния разнополюсных магнитных полей.

3. Методология синтеза бесщеточных генераторов с интегрированным электромагнитным и магнитоэлектрическим возбуждением и их математические модели, адаптированные к решению задач оптимального проектирования, отличающиеся уточненным расчетом параметров посредством численного анализа магнитного поля.

4. Программные комплексы с элементами оптимизации бесщеточных электрических генераторов малой и средней мощности, обеспечивающие достижение требуемых статических и динамических критериев качества и улучшенных массогабаритных и энергетических показателей.

5. Концепция синтеза БЭГ с магнитоэлектрическим возбуждением, основанная на предварительной оценке оптимального объема постоянных магнитов (ПМ) в индукторах различного конструктивного исполнения с последующей оптимизацией по максимуму выходной мощности.

6. Процедуры и алгоритм проектирования БЭГ, включающие проверочные и оптимизационные расчеты с использованием системного просмотра многомерных областей посредством процедуры ЛП- τ поиска. Предложены пути достижения оптимума по отдельным критериям или их совокупности.

Полученные в работе математические модели и структурные схемы обладают достаточной общностью и могут быть использованы для исследования и проектирования различных типов бесщеточных синхронных машин малой и средней мощности, а также синтеза автономных энергетических установок и систем электростарта. Новизна технических решений защищена авторскими свидетельствами на изобретения.

Практическая ценность работы определяется тем, что полученные результаты позволяют

1. Выбирать оптимальную с точки зрения эффективности использования активного объема конструкцию ротора и схему электрически совмещенной обмотки БЭГ с интегрированным возбуждением.

2. Улучшить массогабаритные и эксплуатационные показатели БЭГ с интегрированным возбуждением за счет разработки новых схемных и конструктивных решений.

3. Использовать рекомендации по улучшению эксплуатационных характеристик и показателей бесщеточных синхронных машин на основе разработанных методов и алгоритмов их расчета.

4. Создавать, испытывать и внедрять в эксплуатацию электромеханические преобразователи с электромагнитным и магнитоэлектрическим возбуждением для ветроэнергетики, железнодорожного и автомобильного транспорта, систем транспорта газа, беспилотных летательных аппаратов, имеющие по сравнению с аналогами улучшенные массо-габаритные и энергетические показатели.

Достоверность полученных результатов обеспечивается применением строгих математических методов исследования, экспериментальной проверкой, сравнением с теоретическими и экспериментальными результатами других авторов.

Реализация результатов работы

В соответствии с Федеральной целевой программой «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014—2020 годы», утвержденной Постановлением Правительства Российской Федерации № 426 от 21 мая 2013 года, пунктом б) переход к экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике, повышение эффективности добычи и глубокой переработки углеводородного сырья, формирование новых источников энергии; создания новых способов транспортировки и хранения энергии, в период 2014-2016 гг. кафедрой «Электромеханика и автомобильное электрооборудование» Самарского государственного технического университета совместно с НПО «Шторм» были осуществлены научно-исследовательские и опытно-конструкторские разработки по созданию автономных источников электрической энергии и систем электрозапуска на базе синхронных машин малой и средней мощности.

Математические модели, алгоритмы и программные комплексы, методики расчета эксплуатационных характеристик и параметров использованы при разработке вентильных бесщеточных генераторов для электрооборудования автономных объектов и специальных транспортных средств, систем электрозапуска газотурбинных двигателей и электропитания собственных нужд: ПАО «ОДК Кузнецов», АО «Барнаултрансмаш», АО «Тольяттинский Трансформатор», ООО «НПО Шторм», АО КМПО, ОКБ им. М.П. Симонова.

В результате совместной работы с ООО «НПО Шторм» изготовлены, испытаны и поставлены заказчиком:

- серия ветрогенераторов с магнитоэлектрическим возбуждением и прямым приводом мощностью 1; 2; 5 кВт для энергоснабжения автономных объектов;

- БЭГ с интегрированным возбуждением для электропитания бортовой сети специальных транспортных средств на гусеничном ходу (АО «Барнаул-трансмаш» г. Барнаул);

- бортовой автономный источник питания на базе БЭГ с электромагнитным возбуждением (КБ «Электроприбор» завода агрегатного электромашиностроения г. Саратов);

- электромеханические преобразователи с магнитоэлектрическим возбуждением мощностью 80; 250 кВт для запуска газотурбинных двигателей НК-36,38СТ; НК-12,14 и их модификаций в составе газотурбинных установок для газоперекачивающих агрегатов (ПАО «ОДК Кузнецов» г. Самара), (АО «Казанское моторостроительное производственное объединение» г. Казань).

- опытный образец стартер-генератора малоразмерных газотурбинных двигателей (АО Научно-производственное объединение "Опытно-конструкторское бюро имени М.П. Симонова" г. Казань).

Апробация работы. Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на 9-й Всероссийской научно - практической конференции «Компьютерные технологии в науке, практике и образовании» (Самара, 2010), Международной научно-технической конференции «Проблемы электротехники, электроэнергетики и электротехнологии» (Тольятти, 2012), Международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (Иваново, 2013, 2015), 6 и 7-й международных научно-практических конференциях «Актуальные проблемы энергетики АПК» (Саратов, 2015,2016), Всероссийской научно-практической конференции «Электротехнические комплексы и системы» (Уфа, 2015), Международной научно-практической конференции «Ашировские чтения» (Самара, 2017).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 35 печатных работ, в том числе 15 статей из Перечня ведущих периодических изданий, рекомендованного ВАК РФ, монография и 3 авторских свидетельства на изобретения.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Концепция выбора оптимальной конструкции ротора БЭГ с интегрированным возбудителем с учетом реального распределения магнитного поля в активном объеме машины.

2. Математические модели БСМ, адаптированные к расчету параметров и электромагнитных сил на основе численного моделирования магнитного поля, учитывающие нелинейность свойств материалов, реальную геометрию сердечников, наличие вращающегося и неподвижного магнитных полей в общем магнитопроводе.

3. Принципы математического моделирования бесщеточных генераторов, построенные на основе теории обобщенного электромеханического пре-

образователя и имитационные модели исследования электромагнитных процессов в статике и динамике.

4. Частные линеаризованные модели БЭГ для оценки показателей качества переходных процессов, ориентированные на использование в задачах оптимального синтеза.

5. Методология синтеза синхронных машин малой мощности с магнитоэлектрическим возбуждением, основанная на предварительной оценке оптимального объема ПМ в индукторах различного конструктивного исполнения.

6. Математические модели бесщеточных электрических генераторов и алгоритм многокритериальной параметрической оптимизации на основе ЛП поиска.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, восьми глав, заключения, библиографического списка и приложений. Основная часть работы изложена на 364 страницах, иллюстрирована 169 рисунками и 34 таблицами. Библиографический список содержит 175 наименования на 16 страницах.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, определены основные области применения БЭГ, проведен краткий анализ научных публикаций по теме работы, определены цели, задачи, методы исследований и основные научные результаты, выносимые на защиту, изложена научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе приведена концепция анализа бесщеточных электрических генераторов, выполненных на основе электрических машин переменного тока. Рассмотрены схемные и конструктивные решения электрических генераторов, используемых в автономных энергетических установках, определены их достоинства и недостатки, пути дальнейшего совершенствования с целью улучшения массогабаритных, энергетических и эксплуатационных показателей. Проведен обзор, и определены особенности использования вентильных БЭГ в различных сферах промышленности и на транспорте. Осуществлен анализ и определены тенденции развития теории вентильных БЭГ.

Бесконтактное преобразование энергии может быть осуществлено посредством каскадных схем соединения двух и более асинхронных (АГ) и синхронных (СГ) генераторов, расположенных на одном валу. Такие решения имеют ряд недостатков - большая относительная длина, повышенный расход реактивной мощности, требующейся на возбуждение магнитного поля асинхронного каскада.

Генераторы с радиально-осевым магнитным потоком, несмотря на такое преимущество, как простота конструкции, имеют ограничения на относительную активную длину по причине повышенного рассеяния потока в маг-

нитепроводящих элементах ротора и корпуса. Также для них характерно наличие дополнительного нерабочего зазора и тяжелого подшипникового шита, выполняющего роль магнитопровода.

БЭГ с вращающимися выпрямителями характеризуются хорошими массогабаритными показателями, малой мощностью возбуждения, позволяют легко и просто стабилизировать выходное напряжение. Их недостатки - наличие вращающихся обмоток и полупроводниковых вентиляей, повышенная инерционность регулирования. Раздельная последовательная компоновка возбудителя и основного генератора приводит к трудностям размещения машины в условиях ограниченного пространства, повышенному расходу конструкционных материалов. Поэтому для машин диапазона мощностей (1...30) кВт с целью снижения массы и габаритов, а также повышения энергоэффективности, применяют совмещение возбудителя и генератора в общем магнитопроводе с заменой двух раздельных обмоток на роторе одной электрически совмещенной. Это ведет к повышению надежности за счет сокращения числа обмоток БЭГ, уменьшению расхода изоляционных и проводниковых материалов, упрощению технологии изготовления и появлению возможности более жесткой фиксации вращающейся обмотки при высоких окружных скоростях ротора, за счет применения так называемых зубцовых обмоток. В зарубежной практике эти машины принято называть генераторами с интегрированным возбуждением. Теория таких БЭГ в настоящее время находится в стадии разработки. В диссертационной работе решаются вопросы их математического описания, оптимизационного проектирования и практической реализации.

С ростом объемов производства высококоэрцитивных редкоземельных магнитов (РЗМ), расширением их номенклатуры и уменьшением стоимости становится экономически оправданным применение БЭГ с магнитоэлектрическим возбуждением. Эти машины имеют, как правило, простую конструкцию и допускают работу при больших частотах вращения ротора. Главным препятствием для более широкого применения наиболее энергоемких неодимовых РЗМ в качестве источника магнитного поля в высокоиспользуемых БЭГ является их температурная нестабильность. Трудности стабилизации напряжения генераторов с возбуждением от постоянных магнитов, которые были существенными еще 20 лет назад, в настоящее время успешно преодолены благодаря применению управляемых выпрямителей с микропроцессорными системами управления.

Сравнительный анализ показывает, что наиболее рациональными для применения в качестве генераторов АЭУ являются БЭГ с магнитоэлектрическим возбуждением от редкоземельных высококоэрцитивных магнитов и БЭГ с интегрированным электромагнитным возбуждением. Эти два типа генераторов и были выбраны в качестве объектов исследования в диссертационной работе.

Основные задачи в области совершенствования бесщеточных генераторов электромеханических систем малой мощности не могут быть решены без применения комплексного подхода к процессу их разработки, одной из составляющих которого является создание адекватной математической модели, другой - автоматизированного проектирования БЭГ с его последующей оптимизацией.

При разработке математической модели БЭГ для исследования динамики системы «генератор – вентильный преобразователь» в «большом» был использован вариационный принцип. Этот подход базируется на общих законах электромеханики, поэтому является корректным и логически последовательным при разработке математических моделей вентильных БЭГ с электромагнитным и магнитоэлектрическим возбуждением.

Определение параметров БЭГ при современном состоянии развития численных методов расчета физических полей целесообразно проводить с использованием программных комплексов конечно-элементного моделирования. Причем, сведение задачи расчета магнитного поля БЭГ к двумерной постановке не всегда является оправданным. Для ЭМП с относительно короткой активной зоной, к которым относятся низкооборотные БЭМ с безредукторным приводом и БЭГ с магнитоэлектрическим возбуждением, где существенными являются эффекты торцового рассеяния, требуется решение задачи расчета магнитного поля в трехмерной постановке.

Вторая глава посвящена разработке методологии анализа и синтеза конструкции ротора БЭГ с интегрированным возбудителем. Оценено влияние укорочения шага электрически совмещенной обмотки на эффективность передачи энергии от возбудителя к основному генератору, проведен анализ ряда схем электрически совмещенных обмоток на предмет их использования в магнитных полях возбудителя и основного генератора, исследовано дифференциальное рассеяние короткозамкнутых совмещенных обмоток и выявлено его количественное влияние на величину потока рассеяния, даны практические рекомендации по выбору схемы, шага обмотки и конструкции ротора.

Для наиболее эффективного использования внутреннего объема БЭГ проведена структурная оптимизация геометрии активной зоны ротора. В качестве главного параметра оптимизации выбрана величина магнитной индукции поля возбуждения генератора в зазоре B_δ . Поскольку конфигурация активной зоны ротора во многом определяет не только количественные, но и качественные характеристики магнитного поля БЭГ в число вспомогательных критериев включены коэффициенты дифференциального рассеяния σ_0 возбудителя, формы поля возбуждения k_f и полюсного перекрытия α_δ генератора. Ограничивающие факторы - допустимые уровни индукции в зубцах ротора от полей возбудителя и генератора и мощность возбуждения возбудителя, определяющая установленную мощность управления по цепи возбужде-

ния БЭГ. Задача решалась путем анализа конструктивных вариантов ротора БЭГ посредством численного моделирования поля методом конечных элементов.

Рассматривались три варианта конструкции ротора: *неявнополюсная* (вариант 1), «*промежуточная*» (вариант 2) и *явнополюсная* (вариант 3). На рис.1 показаны картина результирующего магнитного поля, созданного эффективным током ротора и распределение магнитной индукции этого поля на средней линии зазора (вариант 1).

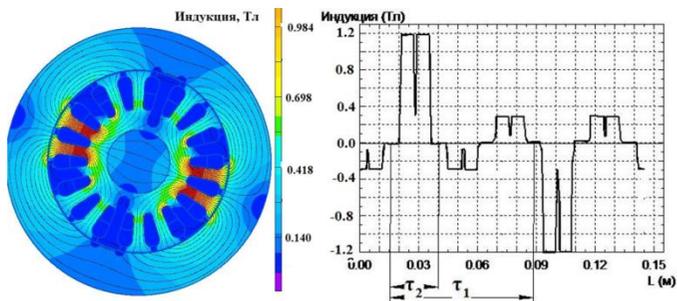


Рис. 1. Картина магнитного поля в неявнополюсном роторе

Для этого варианта использование внутреннего объема ротора не является рациональным, так как при такой конструкции часть пазов остается не занятой обмоткой. При классической *явнополюсной* конструкции с сосредоточенной обмоткой ротора (вариант 3) средняя плотность эффективного пазового тока в 1,7 и в 1,22 раза ниже, чем в первом и втором вариантах соответственно. Следовательно, явнополюсная конструкция ротора оставляет резерв для увеличения полного пазового тока (МДС) возбуждения генератора по сравнению с неявнополюсной, что дает возможность повысить магнитную индукцию в зазоре генератора не изменяя главных размеров.

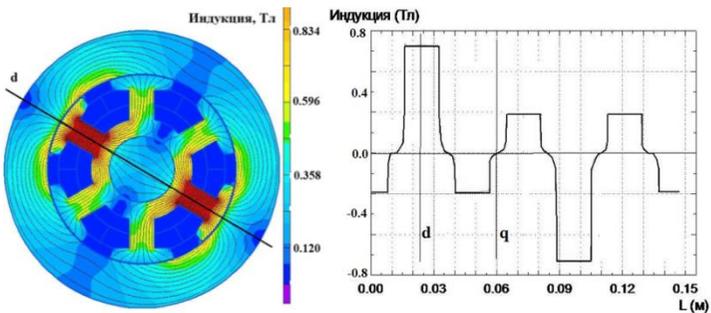


Рис. 2. Картина магнитного поля при явнополюсном исполнении ротора

На следующем этапе решена задача определения качественных (гармонический состав) и количественных (коэффициент дифференциального рассеяния σ_0 , запасенная магнитная энергия W_m , индуктивности, коэффициенты формы поля возбуждения генератора k_f , потока возбуждения k_Φ , полюсно-го перекрытия α_δ) характеристик магнитных полей, создаваемых совмещенной обмоткой ротора. В результате моделирования установлено, что использование явнополюсной конструкции ротора БЭГ позволяет по сравнению с неявнополюсной: в 1,5 раза снизить мощность возбуждения возбудителя; улучшить гармонический состав полей реакции якоря возбудителя и возбуждения генератора; повысить МДС возбуждения генератора на 70% за счет увеличения полного тока и качественного улучшения формы кривой поля возбуждения.

Электрические схемы совмещенных обмоток, интегральные кривые намагничивающих сил по постоянному и переменному токам и диаграммы Гергерса показаны на рис. 3, 4. В качестве электрически совмещенной обмотки ротора БЭГ предпочтительна обмотка, схема которой показана на рис.3. При использовании этой обмотки, при равных прочих условиях, потребляемая мощность возбуждения ниже в 1,89 раза. Расход обмоточного провода в роторе сокращается в 1,7 раза по сравнению с обмоткой на рис.4.

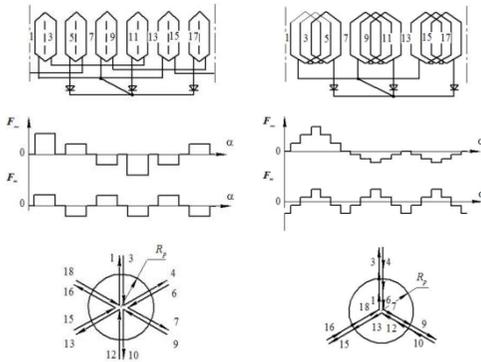


Рис. 3. Обмотка с шагом $y_1 = \frac{2}{9} \tau_1$

Рис. 4. Обмотка с шагом $y_1 = \frac{1}{3} \tau_1$

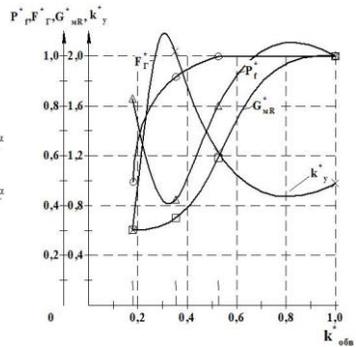


Рис. 5. Вариация параметров электрически совмещенных обмоток при изменении шага

На рис.5. показаны зависимости мощности возбуждения возбудителя, МДС возбуждения генератора, массы обмотки и коэффициента усиления первого каскада БЭГ по мощности от шага обмотки (обмоточного коэффициента в поле возбудителя). Кривые мощности возбуждения и коэффициента усиления

ния имеют экстремумы при выполнении обмотки по типу рис.3. В генераторе с такой обмоткой значительно уменьшаются добавочные потери в стали, шум, вибрации. Малая мощность возбуждения возбудителя позволяет снизить вес и стоимость регулятора напряжения.

Экспериментальная проверка подтвердила теоретические положения. Лобовые части обмотки (рис.3) не перекрещиваются и располагаются в одной плоскости, что определяет их малый вылет. Это обстоятельство позволяет использовать обмотку в условиях ограниченного осевого пространства и обеспечить ее надежное крепление на вращающемся роторе.

Относительное содержание высших гармонических в кривой индукции характеризуется коэффициентом дифференциального рассеяния

$$\sigma_0 = \frac{\sum \left(\frac{k_{ovv}}{v} \right)^2}{\left(\frac{k_{oel}}{p_1} \right)^2} - 1, \quad (1)$$

где k_{ovv} - обмоточный коэффициент v -й гармонической; p_1 – число пар полюсов возбудителя.

В генераторах с интегрированным возбуждением, если не принять специальных мер для снижения величины дифференциального рассеяния, нельзя добиться приемлемых энергетических характеристик.

Выражение (1) справедливо для симметричных обмоток. Однако оно не учитывает реальной конфигурации зубцово-пазовой структуры, величины зазора и насыщения ферромагнитных участков магнитопровода машины. Решение полевой задачи, описывающей конфигурацию сердечников с учетом нелинейных свойств ферромагнетиков, позволяет найти уточненное значение коэффициента дифференциального рассеяния по энергии магнитного поля

$$\sigma_0 = \frac{W}{W_1} - 1, \quad (2)$$

где W - полная магнитная энергия поля по результатам численного моделирования; W_1 - магнитная энергия поля первой гармонической.

Нахождение σ_0 по формуле (2) является более универсальным по сравнению с расчетом по выражению (1) и может быть рекомендовано при оптимизационном проектировании БЭГ. Однако с точки зрения качественного анализа гармонического состава кривой индукции нахождение σ_0 аналитическим методом является более предпочтительным, так как позволяет определить воздействие различных факторов на конкретные гармоники поля дифференциального рассеяния.

Из полученных при моделировании результатов следует, что насыщение магнитопроводов оказывает существенное влияние на величину коэффициента дифференциального рассеяния по коронкам зубцов в области $\mu_{cm}=1000$ и менее. Поясовое рассеяние практически не зависит от насыщения сердечников.

Влияние отрицательного воздействия дифференциального рассеяния электрически совмещенных обмоток на работу БЭГ может быть уменьшено выбором шага и соответствующей электрической схемы.

В третьей главе поставлена и решена задача создания математической модели БЭГ, функционально ориентированной на расчет параметров на основе численного моделирования магнитного поля. Осуществлено исследование режимов холостого хода, реакции якоря возбудителя и основного генератора БЭГ с интегрированным возбуждением. Сформулирована и решена в 3D постановке задача расчета поля БЭГ с магнитоэлектрическим возбуждением.

Уравнения электромагнитного поля решались численно посредством конечно-элементного моделирования. Для нахождения параметров генератора с интегрированным возбудителем потребовалось решить ряд задач стационарного электромагнитного поля. В их число входили расчеты поля: на холостом ходу возбудителя (первого каскада) БЭГ, на холостом ходу генератора (второго каскада), реакции якоря возбудителя, реакции якоря генератора (продольной, поперечной), в нагруженном режиме. В ходе решения поставленных задач определены значения индукции, напряженности магнитного поля и интегральные параметры с учетом существования двух магнитных полей в общем магнитопроводе, необходимые для решения в дальнейшем задач имитационного моделирования и оптимизационного проектирования.

Принятые допущения: источники поля (токи обмоток БЭГ) постоянны и задаются в виде сосредоточенных контуров; магнитная проницаемость электротехнической стали задана зависимостью $\mu = f(\bar{H})$, сталь изотропна; сердечник ротора симметричен относительно полей возбудителя и генератора; сердечник статора симметричен относительно магнитного поля возбудителя и ассиметричен относительно поля основной машины; задача формулируется как плоско-параллельная.

Двумерная постановка задачи расчета параметров БЭГ с интегрированным возбудителем обоснована, так как относительная длина зазора таких машин $\lambda = 0,8 \div 1,2$. Влияние поля лобовых частей на параметры машины учитывалось классическими методами. На рис.6 показаны зависимости коэффициентов формы поля k_f , ЭДС k_B и полюсного перекрытия α_δ от величины

обмотанной части индуктора возбудителя $\rho = \frac{z_o}{z_1}$, где z_1 и z_o - полное число

пазов статора и число пазов, занятых обмоткой возбуждения на полюсном делении.

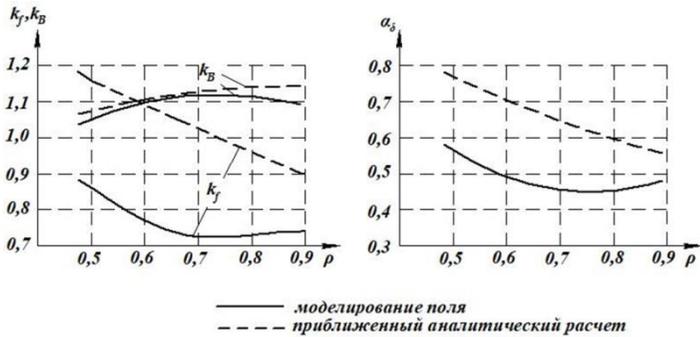


Рис. 6. Зависимости коэффициентов поля возбудителя БЭГ

Анализ результатов показал, что зависимости, определенные посредством расчета поля на реальной модели существенно отличаются от аналитических, рассчитанных с вышеуказанными допущениями. Особенно заметно это отличие для коэффициента формы поля k_f и расчетного коэффициента полюсного перекрытия α_δ .

В БЭГ обмотка якоря возбудителя создает в воздушном зазоре поле, содержащее спектр гармонических высшего порядка с большой амплитудой, ротор имеет явнополюсную конструкцию. Это обуславливает необходимость исследования реакции якоря по осям d и q и определение собственных индуктивностей L_{ad} , L_{aq} и коэффициентов формы поля реакции якоря по продольной и поперечной осям k_{ad} , k_{aq} .

На рис.7 показаны зависимости коэффициентов формы поля и индуктивностей якорной обмотки возбудителя от насыщения магнитной цепи. Их анализ показывает, что

- величина коэффициентов формы поля продольной k_{ad} , и в еще большей степени поперечной k_{aq} реакции якоря отличается от той, которая характерна для явнополюсных синхронных машин классической конструкции, что необходимо учитывать в проектировочных расчетах;
- для возбудителя БЭГ $k_{aq} > k_{ad}$ и $x_{aq} > x_{ad}$. Относительная разница между указанными параметрами весьма мала и в зависимости от насыщения составляет (4...5)%;

- собственная индуктивность обмотки якоря возбuditеля практически не зависит от ориентации поля якоря относительно индуктора, $L_{ad} \approx L_{aq}$, следовательно, электромагнитные процессы в возбuditеле БЭГ можно анализировать по аналогии с неявнополюсной СМ.

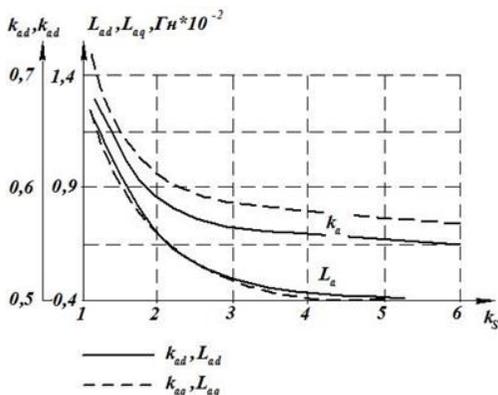


Рис. 7. Зависимости коэффициентов формы поля реакции якоря и индуктивностей от насыщения

Исследование режима холостого хода основного генератора имеет практическое значение. В ходе решения этой задачи определяются параметры генератора при подмагничивании сердечников полем возбuditеля: собственная индуктивность обмотки возбуждения L_{f2} , взаимная индуктивность между обмотками возбуждения и якоря M_{fa2} , величина коэффициента рассеяния магнитной системы генератора $k_{\sigma 2}$, коэффициенты полюсного перекрытия $\alpha_{\delta 2}$ и формы ЭДС k_{B2} , входящие в выражение постоянной Арнольда и определяющие совместно с электромагнитными нагрузками размеры активной зоны генератора.

Найденные в ходе решения полевой задачи значения коэффициентов формы поля поперечной реакции якоря k_{aq} хорошо согласуются с данными для явнополюсных СМ с равномерным зазором (рис.8), поэтому численный расчет поля поперечной реакции якоря может быть исключен из оптимизационного алгоритма.

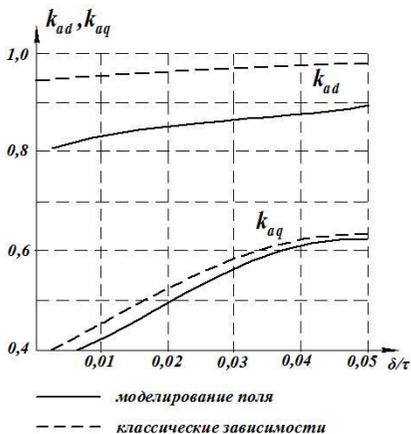


Рис.8. Зависимости коэффициентов формы поля реакции якоря от относительной величины зазора

Моделирование поля продольной реакции якоря необходимо включить в

оптимизационный процесс в обязательном порядке.

При проектировании машин с магнитоэлектрическим возбуждением актуален вопрос учета полей рассеяния индуктора. Особенно значимым это является для «коротких» машин, у которых относительно велико торцовое рассеяние. С целью определения полезного потока и потоков рассеяния была решена магнитоэлектрическая задача расчета поля БЭГ в трехмерной постановке в программной среде Ansys Maxwell.

На рис. 9 в качестве примера показан фрагмент модели с расчетными сечениями для вычисления магнитных потоков, включающий 2 полюсных деления. В качестве источника поля использовались высококоэрцитивные магниты N33SH.

По результатам решения определены коэффициенты бокового $k_{\sigma_{\text{б}}} = 1,33$, торцового $k_{\sigma_{\text{Т}}} = 1,38$ рассеяния и полный коэффициент рассеяния индуктора $k_{\sigma} = 1,71$. Результаты моделирования показали, что потоки торцового рассеяния в «коротких» машинах с магнитоэлектрическим возбуждением могут составлять до 40% от полного потока магнитов, а полное рассеяние достигает 70%.

С целью выявления влияния относительной длины воздушного зазора λ на торцовое рассеяние решен ряд задач в 3D постановке при варьировании относительной длины зазора БЭГ. Результаты решения представлены на рис.10 в виде зависимости коэффициента торцового рассеяния $k_{\sigma_{\text{Т}}}$ от λ .

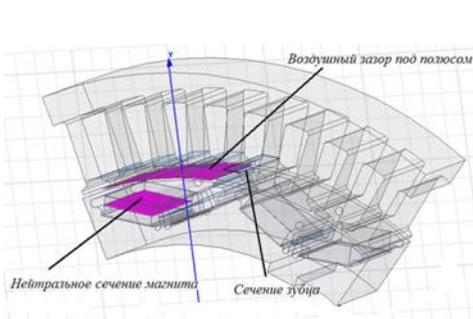


Рис. 9. Расчетные сечения модели БЭГ

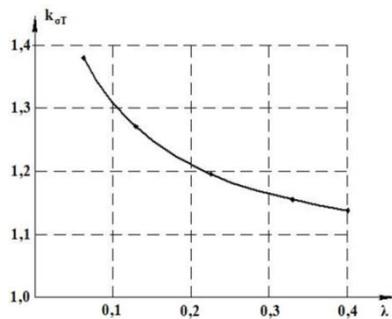


Рис. 10. Зависимость коэффициента торцового рассеяния от относительной длины машины

Четвертая глава посвящена моделированию электромагнитных процессов БЭГ как машинно-вентильной системы. Получены функциональные математические модели БЭГ с интегрированным электромагнитным и магнитоэлектрическим возбуждением, позволяющие вести анализ установившихся и переходных режимов. С целью изучения поведения БЭГ в составе системы

автономного электроснабжения разработаны имитационные модели и осуществлен анализ откликов БЭГ на различные типы воздействий. Получены аналитические математические модели, адаптированные к оптимизационному алгоритму и позволяющие оценивать показатели качества переходных процессов на стадии проектирования.

Математическая модель БЭГ получена на основе аналогии между машиной переменного тока, работающей на выпрямительную нагрузку и коллекторной машиной постоянного тока, щетки которой смещаются с нейтрали при изменении нагрузки. Схема системы «возбудитель – выпрямитель – генератор - выпрямитель», эквивалентная двум генераторам постоянного тока с подвижными щетками, приведена на рис. 11.

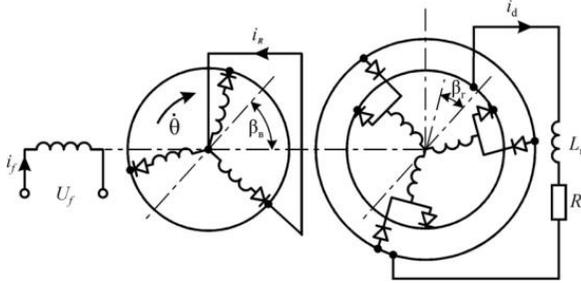


Рис. 11. Эквивалентная электрическая схема системы «возбудитель – выпрямитель – генератор - выпрямитель»

Полная система уравнений БЭГ с интегрированным возбудителем, полученных на основе указанной аналогии и общих положений принципа Д’Аламбера – Лагранжа

$$\begin{aligned}
 U_f &= R_f i_f + L_f \frac{di_f}{dt} + M_{fB,0} (\cos \beta_B \frac{di_R}{dt} - \frac{d\beta_B}{dt} \sin \beta_B i_R); \\
 0 &= R_R i_R + L_R \frac{di_R}{dt} + M_{fB,0} (\cos \beta_B \frac{di_f}{dt} - \omega \sin \beta_B i_f) + M_{f\Gamma,0} (\cos \beta_\Gamma \frac{di_d}{dt} - \\
 &\quad - \frac{d\beta_\Gamma}{dt} \sin \beta_\Gamma i_d); \\
 0 &= M_{fB,0} (\sin \beta_B \frac{di_f}{dt} + \omega \cos \beta_B i_f) + (\omega - \dot{\beta}_B) L_R i_R; \\
 0 &= M_{f\Gamma,0} (\sin \beta_\Gamma \frac{di_R}{dt} + (p_2/p_1) \omega \cdot \cos \beta_\Gamma i_R) + ((p_2/p_1) \omega - \dot{\beta}_\Gamma) L_S i_d; \\
 0 &= (R_S + R_H) i_d + (L_S + L_H) \frac{di_d}{dt} + M_{f\Gamma,0} (\cos \beta_\Gamma \frac{di_R}{dt} - (p_2/p_1) \omega \sin \beta_\Gamma i_R).
 \end{aligned} \tag{3}$$

В выражениях (3) U_f, i_f, i_R, i_d - напряжение и токи контуров БЭГ; $R_f, R_R, R_S, R_H, L_f, L_R, L_S, L_H$ - параметры обмоток БЭГ и нагрузки; $M_{f\delta,0}, M_{fz,0}$ - взаимные индуктивности между обмотками якоря и индуктора возбuditеля и основного генератора при совпадении осей поля возбуждения и якоря; β_B, β_Γ - углы положения проводящих фаз якорных обмоток; p_1, p_2 - числа пар полюсов возбuditеля и генератора.

В качестве примера на рис.12 приведены расчетные (пунктирные линии) и экспериментальные характеристики (сплошные линии) установившихся и переходных процессов генератора мощностью 0,5 кВт. Динамические свойства БЭГ исследовались при ступенчатом изменении напряжения возбуждения и постоянной нагрузке. Этот тип переходного процесса весьма важен при исследовании БЭГ в качестве элемента системы автоматического регулирования.

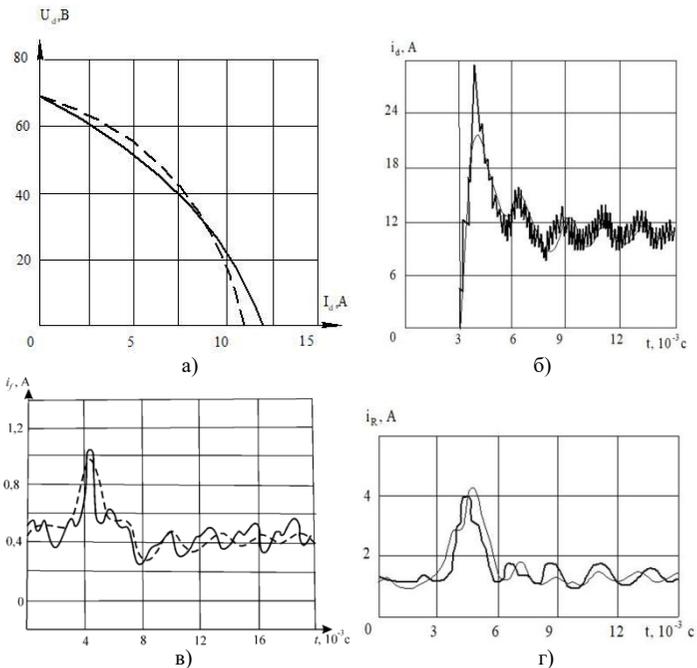


Рис. 12. Внешние (а) и переходные токовые (б), (в), (г) характеристики при внезапном коротком замыкании

В ходе исследований также определены расчетные и экспериментальные переходные характеристики токов возбуждения, ротора и якоря при включении номинального напряжения возбуждения в режиме короткого замыкания на выходе БЭГ (рис.13).

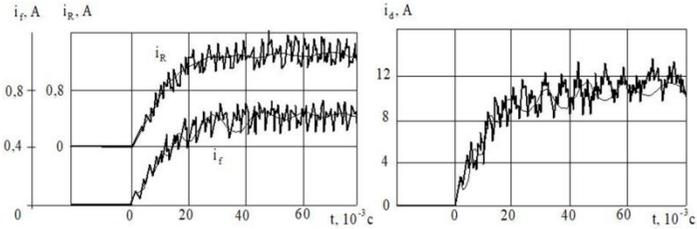


Рис. 13. Осциллограммы токов БЭГ при включении возбуждения в режиме короткого замыкания

Приведенные зависимости показывают, что БЭГ с интегрированным возбудителем устойчиво работает в переходных режимах, а линейная модель электрической цепи с коммутацией адекватно отражает характер переходных электромагнитных процессов.

Типовая автономная система электроснабжения постоянного тока включает первичный двигатель, бесщеточный генератор, фильтр, регулятор напряжения и аккумуляторную батарею (рис.14).

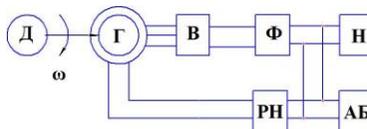


Рис. 14. Функциональная схема бортовой системы электроснабжения: Д - первичный двигатель, Г - генератор, В - выпрямитель, Ф - фильтр, Н - бортовая нагрузка, РН - регулятор напряжения, АБ - аккумуляторная батарея.

БЭГ, как объект автоматического управления представляет собой сложную динамическую структуру, описываемую системой нелинейных дифференциальных уравнений высокого порядка, наиболее эффективным способом получения решения которой, является компьютерное моделирование.

Уравнения возбудителя в осях $d-q$, неподвижных относительно статора:

$$0 = r_r i_{d1} + \frac{d\psi_{d1}}{dt} + p_1 \omega \psi_{q1} ;$$

$$0 = r_f i_{q1} + \frac{d\psi_{q1}}{dt} - p_1 \omega \psi_{d1};$$

$$u_{f1} = r_{f1} i_{f1} + \frac{d\psi_{f1}}{dt}. \quad (4)$$

Уравнения генератора в осях d - q , вращающихся синхронно с ротором:

$$u_{d2} = r_s i_{d2} + \frac{d\psi_{d2}}{dt} - p_2 \omega \psi_{q2};$$

$$u_{q2} = r_s i_{q2} + \frac{d\psi_{q2}}{dt} + p_2 \omega \psi_{d2};$$

$$0 = r_{f2} i_{f2} + \frac{d\psi_{f2}}{dt}. \quad (5)$$

В уравнениях (4), (5) индексы «1» относятся к напряжениям, токам, потокоцеплениям, параметрам возбудителя, «2» – генератора. Нули в левых частях выражений указывают на режим работы первого каскада – «короткое замыкание». Параметры БЭГ определены в результате решения серии задач магнитостатики. Найдены зависимости собственных и взаимных индуктивностей обмоток от совместного действия магнитных полей возбудителя и генератора различной интенсивности в общем сердечнике, которые использовались при последующем моделировании.

На рис.15 приведена имитационная модель БЭГ с интегрированным возбудителем, содержащая два энергетических блока (возбудитель и основной генератор), блок нагрузки, аккумуляторную батарею. Для сглаживания пульсаций выпрямленного напряжения в модель введен R - C фильтр. Стабилизация выходного напряжения БЭГ осуществляется с помощью релейного регулятора напряжения.

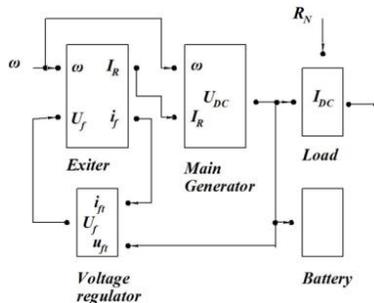


Рис. 15. Имитационная модель БЭГ с интегрированным возбудителем

На рис.16 показаны осциллограммы переходного процесса включения генератора на номинальное напряжение возбуждения на холостом ходу. В мо-

мент времени $t=0,005\text{с}$ происходит наброс номинальной нагрузки. При включении возбуждения время нарастания напряжения до номинального значения не превышает 4 мс, что указывает на хорошее быстродействие по управляющему воздействию.

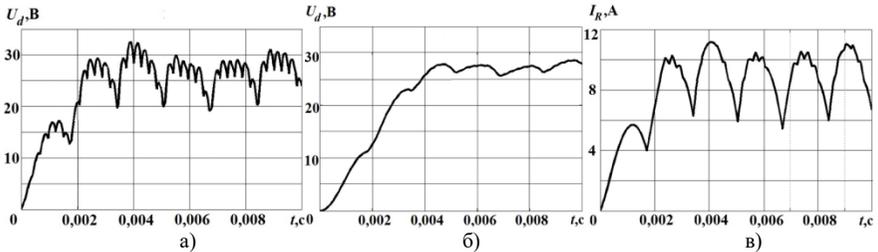


Рис. 16. Изменение выходного напряжения до фильтра (а), после фильтра (б), тока ротора (в).

При набросе нагрузки наблюдается незначительный провал выходного напряжения, который обрабатывается регулятором по цепи возбуждения возбудителя за 3 мс.

На современном этапе развития автономных ВЭУ достаточно полно исследованы статические режимы работы генераторов с электромагнитным и магнитоэлектрическим возбуждением. Однако, нестационарные динамические режимы ВЭУ малой мощности, характеризующиеся переменной скоростью ветра и необходимостью изменения нагрузки в условиях стабильного напряжения, исследованы в недостаточной степени.

Математическое моделирование генератора с постоянными магнитами проводилось в ортогональных осях d, q , жестко связанных с ротором.

Уравнения электрического равновесия БЭГ по продольной и поперечной осям имеют вид

$$u_d = r i_d + \frac{d\psi_d}{dt} - p\omega\psi_q; \quad u_q = r i_q + \frac{d\psi_q}{dt} + p\omega\psi_d, \quad (6)$$

где u_d, u_q, i_d, i_q - составляющие фазных напряжений и токов обмотки якоря БЭГ по продольной и поперечной осям; r - активное сопротивление фазы обмотки якоря; ψ_d, ψ_q - потокосцепления между индуктором и якорем.

Математическая модель реализована в среде Matlab-Simulink. Исследованы переходные режимы работы ветрогенератора с прямым приводом. Изменение сопротивления нагрузки происходит в момент времени $t=0,03\text{с}$. На первой осциллограмме (рис.17) показана форма напряжения холостого хода генератора u_{d1} , на второй и третьей – напряжение после фильтра u_{d2} и ток нагрузки i_d в результате ступенчатого изменения нагрузки. Из осциллограмм видно, что время переходного процесса по возмущающему воздействию не

превышает 5мс, что указывает на хорошее быстродействие системы даже при низких частотах вращения вала генератора (100...150 об/мин).

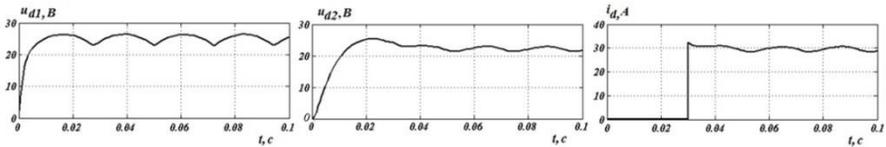


Рис.17. Переходный процесс при набросе нагрузки

Для использования математических моделей в оптимизационных расчетах осуществлена их линеаризация в области малых отклонений и получено аналитическое решение. Выражение передаточной функции БЭГ с интегрированным возбуждением по управляющему (изменение напряжения возбуждения) воздействию, как объекта регулирования

$$W_y(p) = \frac{\Delta U_d(p)}{\Delta U_f(p)} = \frac{-R_n \Delta i_d(p)}{\Delta U_f(p)} = \frac{-R_n(b_4 p^4 + b_3 p^3 + b_2 p^2 + b_1 p + b_0)}{a_5 p^5 + a_4 p^4 + a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0}; \quad (7)$$

Полученная передаточная функция БЭГ использована при синтезе системы автоматического регулирования напряжения и анализе динамических свойств генератора. При сравнении переходных характеристик по управляющему и возмущающему воздействиям, рассчитанных по полной и линеаризованной моделям установлено что, максимальная относительная погрешность результатов расчета по упрощенной модели не превышает 10% по управляющему воздействию и 8% по возмущению. Поверочный расчет переходных характеристик проводился по полной модели.

В пятой главе предложена методология синтеза БЭГ с магнитоэлектрическим возбуждением с учетом результатов анализа магнитного поля. Выявлены геометрические соотношения различных типов индукторов машин с магнитоэлектрическим возбуждением, на основе которых разработан алгоритм оптимизации БЭГ по критерию максимума выходной мощности. Осуществлено моделирование в программной среде Ansoft Maxwell вариантов генератора с разным исполнением индукторов и выбран БЭГ с наибольшей выходной мощностью при заданных объемах ПМ.

В отличие от традиционного метода автоматизированного проектирования, в предлагаемом алгоритме объем ПМ фиксируется. В качестве других ограничений используются: конфигурация магнитопровода статора и его обмоточные данные; величина воздушного зазора; плотность тока в обмотке статора.

Варьируемыми факторами выступают: во-первых – тип конструктивного исполнения индуктора; во-вторых – коэффициент полюсного перекрытия и связанные с ним размеры ПМ.

За критерий оптимальности принят максимум выходной мощности генератора при заданных выше ограничениях. При фиксированной подведенной мощности выходная мощность однозначно определяется значением КПД. В результате серии расчетов по предлагаемому алгоритму получен ряд вариантов БЭГПМ с различной конструкцией ротора и варьируемыми значениями коэффициента полюсного перекрытия (формы магнитов) при неизменном общем объеме ПМ. Все варианты исследовались методом конечных элементов на соответствие требованиям задания и сравнивались по критерию оптимизации.

В качестве иллюстрации предлагаемого алгоритма был проведен расчет многополюсного БЭГ ветроэнергетической установки номинальной мощностью 1,8 кВт и частотой вращения 140 об/мин с различным исполнением ротора при разных значениях коэффициента полюсной дуги. В результате определены выходные параметры четырех типов БЭГ с ПМ.

В таблице 2 представлены результаты расчета посредством конечно-элементного моделирования выходного тока I_d , ЭДС холостого хода, изменения напряжения ΔU , выходной мощности P_2 , коэффициента полезного действия η , электромагнитного момента $M_э$, четырех типов БЭГ с ПМ.

Таблица 2. Показатели БЭГ при $\alpha = 0,8$

Тип	1	2	3	4
Показатель	Встроенные	Тангенциальные	Поверхностные	Явнополюсные
I_d, A	39,13	35,29	39,63	38,25
E_{d0}, B	49,09	52,54	50,04	49,90
$\Delta U, \%$	2,29	9,46	4,24	3,95
$P_2, Вт$	1878	1694	1902	1836
$\eta, \%$	78,50	78,53	78,57	78,56
$M_э, н \cdot м$	128,11	115,56	129,74	125,24

На следующем этапе рассчитывались варианты БЭГ с различным расположением ПМ при варьировании коэффициента полюсного перекрытия. На рис. 18 приведены зависимости выходной мощности БЭГ от величины коэффициента полюсного перекрытия. Данные, промаркированные точками, соответствуют максимуму выходной мощности для различных конфигураций роторов с ПМ.

По сравнению с результатами, полученными традиционным методом проектирования, который не предполагает варьирование коэффициентов полюсного перекрытия, увеличение выходной мощности составило 1,5%, 3,6%, 4,5%, 6% соответственно для машин 1,2,3,4 типов.

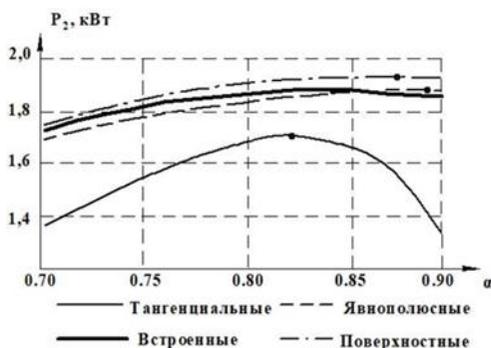


Рис. 18.— Изменение выходной мощности четырех типов БЭГ в зависимости от величины коэффициента полюсного перекрытия

Для машин большой мощности такой рост является весьма существенным. При решении задачи минимизации объема постоянных магнитов для получения заданной выходной мощности с использованием конечно-элементного моделирования, было установлено, что объем ПМ может быть уменьшен по сравнению с неоптимизированным вариантом коэффициента полюсного перекрытия на 3,4%, 2,6%, 7,4% и 9,6% для БЭГ 1, 2, 3, 4 типов соответственно.

Разработанный метод синтеза БЭГПМ применен при проектировании многополюсных генераторов с магнитоэлектрическим возбуждением для систем генерирования электроэнергии в ветроэнергетике, малой гидроэнергетике в случаях, когда требовалось увеличить выходную мощность генератора при заданном объеме магнитов.

В шестой главе разработана математическая модель БЭГ с интегрированным возбудителем, учитывающая такие особенности, как работа обоих каскадов на выпрямительную нагрузку, совмещение разнополюсных магнитных полей в общей магнитной системе. Определены дискретные, непрерывные варьируемые факторы и выходные критерии оптимизации БЭГ. Предложен способ и разработан алгоритм аппроксимации кривых намагничивания электротехнических сталей, учитывающий наличие в общем магнитопроводе полей разной частоты и изменение магнитных свойств в зависимости от рабочей частоты и температуры, адаптированный к процессу автоматизированного проектирования.

С целью создания наиболее эффективного, в смысле затрат машинного времени и объема памяти ЭВМ, алгоритма проектирования был осуществлен анализ вариантов определения главных размеров с применением теории направленных графов.

В результате анализа требований, предъявляемым к электромашинным источникам автономных объектов, установлены следующие основные статиче-

ские критерии качества БЭГ: Φ_1 -масса генератора, Φ_2 -мощность возбуждения, Φ_3 -КПД, Φ_4 -коэффициент пульсаций выпрямленного напряжения, Φ_5 -коэффициент использования. Критерии, по которым оценивались динамические свойства генератора – интегральные оценки по управляющему и возмущающему воздействиям Φ_6 , Φ_7 , характеризующие качество БЭГ при изменении напряжения возбуждения и нагрузки.

В процессе поиска изменялись семь независимых непрерывных переменных: A_S - линейная нагрузка обмотки якоря генератора; $B_{\delta 2}$ - магнитная индукция в воздушном зазоре генератора; j_R, j_S - плотности токов в обмотках ротора и статора; b_{mR}, b_{mS} - ширина щлицев пазов ротора и статора; δ - величина воздушного зазора. Кроме того варьировались три дискретных переменных: Z_S - число пазов статора; m_S - число фаз обмотки якоря генератора; $u_{нс}$ - число эффективных проводников обмотки якоря в пазу.

В высокоскоростных генераторах, предназначенных для использования в ТС, частота вращения ротора может изменяться в широких пределах (от 6000 до 12000 об/мин). Это соответствует частоте перемагничивания стали в роторе от 100 до 200 Гц, а в статоре от 600 до 1200 Гц. Кроме того, БЭГ ТС работают в широком диапазоне температур. Все это оказывает влияние на магнитные характеристики электротехнической стали, которое необходимо учитывать в математической модели.

Амплитуды первых гармоник напряженностей зубцов и спинок генератора и возбудителя автором предлагается аппроксимировать выражениями (8)

$$H_{Z2} = \alpha \cdot I_0 \cdot (\beta \cdot B_{Z2}) \cdot I_1 \cdot (\beta \cdot B_{Z1}); \quad H_{Z1} = \alpha \cdot I_0 \cdot (\beta \cdot B_{Z1}) \cdot I_1 \cdot (\beta \cdot B_{Z2}); \quad (8)$$

$$H_{a2} = \alpha \cdot I_0 \cdot (\beta \cdot B_{a2}) \cdot I_1 \cdot (\beta \cdot B_{a1}); \quad H_{a1} = \alpha \cdot I_0 \cdot (\beta \cdot B_{a1}) \cdot I_1 \cdot (\beta \cdot B_{a2}),$$

где I_0, I_1 - функции Бесселя нулевого и первого порядков мнимого аргумента; α, β - коэффициенты аппроксимации.

Аппроксимация кривых намагничивания производилась в два этапа. На первом – методом квадратичной интерполяции определяются коэффициенты аппроксимации для каждой из кривых. На втором этапе осуществляется интерполяция коэффициентов α и β , являющихся функциями частоты перемагничивания и температуры. Для обеспечения достаточной точности интерполяции производилась с помощью кубических сплайнов, обеспечивающих точное значение функции в узловых точках.

Так как функции α и β зависят в каждой ячейке сетки от двух переменных (частоты и температуры), то они интерполировались бикубическими многочленами вида

$$\alpha = F(f, T) = \sum_{i,j=0}^{3,5} a_{i,j}^{k,l} (T_k - T)^i \cdot (f_l - f)^j; \quad (9)$$

$$\beta = F(f, T) = \sum_{i,j=0}^{3,5} b_{i,j}^{k,l} (T_k - T)^i \cdot (f_l - f)^j. \quad (10)$$

При сравнении полученных с помощью расчета зависимостей с экспериментальными кривыми намагничивания можно сделать вывод об удовлетворительной точности аппроксимации предложенным способом. Максимальная относительная погрешность наблюдается на начальных участках кривых и не превышает 6%.

Разработанная математическая модель БЭГ с интегрированным возбудителем, учитывающая работу обоих каскадов на выпрямительную нагрузку и совмещение разнополюсных магнитных полей в общей магнитной системе может быть использована при оптимизационном проектировании.

В седьмой главе разработан и программно реализован алгоритм поиска оптимального варианта бесщеточного генератора с интегрированным возбуждением методом зондирования пространства параметров точками равномерно распределенной $ЛП\tau$ - последовательности, позволяющий осуществлять синтез генератора в пространстве дискретно изменяющихся параметров с последующим анализом установившихся и переходных электромагнитных процессов.

Задача оптимального синтеза БЭГ формулируется следующим образом: требуется найти вектор X_0 , минимизирующий векторный критерий качества

$$X_0 = \arg\{\min F(Y_1, Y_2, \dots, Y_s)\}; Y_s = \Phi_s(X); X \in D_x \quad (11)$$

где $D_x = \{X; a_i \leq x_i \leq b_i; A_j \leq f_j \leq B_j; i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, V\}$ - область допустимых решений.

В такой постановке задача оптимизации с учетом нелинейности уравнений, описывающих состояние электрической машины, относится к классу многомерных многокритериальных задач нелинейного численного программирования и требует соответствующих методов решения.

Поиск оптимального варианта включает несколько этапов. Во-первых, назначаются независимые параметры оптимизации x_i , варьируемые дискретно и непрерывно и задается область их изменения. На втором этапе для выбранной комбинации n' дискретных параметров генерируются N пробных точек, равномерно распределенных в пространстве непрерывных параметров $\pi^{n-n'}$. Далее, в каждой точке в соответствии с математической моделью рассчитывается БЭГ и проверяются функциональные ограничения. Эта процедура повторяется N раз. Результаты расчета представляются в виде таблиц испытаний, в которых значения критериев $\Phi_s(X)$ расположены в порядке возрастания с указанием номеров соответствующих пробных точек. Третий этап - назначение критериальных ограничений. Он выполняется проектировщиком с учетом требований ТЗ и априорной информации, которая имеется в области проектирования аналогичных объектов. На четвертом этапе осуществляется

проверка непустоты множества допустимых решений D_x . Фиксируется какой-либо из критериев, например Φ_1 , и просматривается соответствующая ему таблица испытаний, в которой количество точек, удовлетворяющих назначенному критериальному ограничению $\bar{\Phi}_1$ равно l

$$\Phi_1(X_1) \leq \Phi_1(X_2) \leq \dots \leq \Phi_1(X_l) \leq \bar{\Phi}_1. \quad (12)$$

Далее, путем просмотра всех критериев в точках X_1, \dots, X_l проверяется, есть ли среди этих точек такие, в которых выполняются одновременно все неравенства

$$\Phi_s(X_i) \leq \bar{\Phi}_s, \dots \quad (13)$$

Если множество допустимых решений непустое, задача имеет решение.

Основой сравнения двух произвольных точек из области допустимых решений являются бинарные отношения, причем в алгоритме поиска оптимального варианта БЭГ реализовано бинарное отношение Парето. В результате качественного ранжирования критериев оптимизации проектировщик выбирает из множества эффективных точек (не улучшаемых одновременно по всем критериям) одну, которую и принимает за оптимальную.

Весь описанный цикл от генерирования пробных точек до формирования множества эффективных точек повторяется столько раз, сколько имеется комбинаций дискретных параметров. Правилами, обозначенными ранее, определяется единственное решение, которое и принимается за оптимум.

В качестве примера предложенного способа рассмотрим оптимизацию БЭГ мощностью 0,5 кВт, с частотой вращения ротора 12000 об/мин.

В таблице 3 приведены исходные данные.

Таблица 3. Исходные данные для оптимизационного проектирования.

№	Наименование величины	Усл. обозн.	Ед. изм.	Величина					
Параметры технического задания									
1	Полезная выпрямленная мощность	P_d	кВт	0,5					
2	Частота вращения	n	об/мин	12000					
3	Выпрямленное напряжение	U_d	В	28,5					
4	Число пазов ротора	Z_R		18					
5	Число полюсов возбудителя	$2p_1$		2					
Дискретно-варьируемые параметры									
6	Число пазов статора	Z_S		18	27	36	30	45	
7	Число фаз статора	m_S		3		5			
8	Число фаз ротора	m_R		3					
9	Число эффективных проводников в пазу статора	$u_{нS}$		4,6	6,8	2,4, 6,8	4,6, 8,10	4,6	
Непрерывно-варьируемые параметры									
10	Индукция в воздушном зазоре генератора	$B_{\delta 2}$	Тл	0,3÷0,45					

11	Линейная нагрузка обмотки статора	A_S	А/м	$5 \cdot 10^3 \div 9 \cdot 10^3$
12	Воздушный зазор	δ	м	$2,0 \cdot 10^{-4} \div 3,0 \cdot 10^{-4}$
12	Плотность тока в обмотках ротора и статора	j_R, j_S	А/м ²	$5 \cdot 10^6 \div 11 \cdot 10^6$
13	Ширина шлица пазов ротора и статора	b_{mR}, b_{mS}	м	$1,5 \cdot 10^{-3} \div 2,5 \cdot 10^{-3}$

В результате проведения оптимизационных процедур получено множество приближенно эффективных точек E_N , в которых невозможно улучшение всех критериев качества одновременно. При этом в множестве E_N оказалось 20 точек. В процессе решения задачи оптимизации было проведено ранжирование критериев качества по важности. Решено, что в порядке уменьшения важности критерии располагаются следующим образом: $\Phi_3, \Phi_2, \Phi_1, \Phi_6, \Phi_7, \Phi_4, \Phi_5$.

На рис. 19 показаны поверхности отклика массы, КПД, мощности возбуждения множества эффективных точек в пространстве параметров A_S (линейная нагрузка якоря генератора) и $B_{\delta 2}$ (магнитная индукция в зазоре генератора).

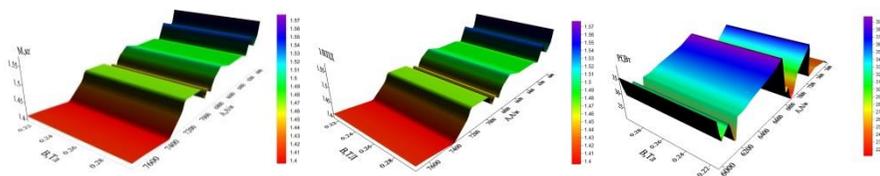


Рис. 19. Зависимости массы, КПД, мощности возбуждения от электромагнитных нагрузок

Согласно предложенному алгоритму проведен поиск в пространстве дискретно-изменяющихся параметров. Оценка вариантов осуществлялась по нескольким критериям одновременно. В результате проведенных исследований установлено, что для приведенного примера оптимальные по КПД варианты БЭГ находятся в области дискретных параметров: $m_S=3; u_{пS}=4; u_{пS}=6$. В этой же области находится и оптимальный по Парето вариант.

По результатам оптимизации предложенным методом бесщеточного генератора с интегрированным возбуждением удалось достичь по сравнению с базовым вариантом снижения мощности возбуждения на 55%, массы на 15% и увеличения КПД на 8%. При этом остальные критерии не были ухудшены.

Разработанный программный комплекс эффективно работает в многомерных многокритериальных задачах с большим количеством ограничений и обеспечивает отыскание глобального экстремума при наличии локальных,

что подтверждено сравнением результатов оптимизации и численного моделирования. Область применения предложенного метода, после соответствующей доработки, может быть расширена на стартер-генераторные и стартерные системы на базе бесщеточных синхронных машин малой и средней мощности.

В восьмой главе приведены результаты практической реализации и экспериментальных исследований бесщеточных синхронных генераторов малой и средней мощности.

В период 2013-2017 гг. кафедрой «Электромеханика и автомобильное электрооборудование» Самарского государственного технического университета совместно с НПО «Шторм» были осуществлены научно-исследовательские и опытно-конструкторские разработки по созданию автономных источников электрической энергии и систем электрозапуска на базе синхронных машин малой и средней мощности, в которых автор являлся руководителем НИОКР.

По заказу АО «Барнаултрансмаш» при разработке электромашинных бортовых источников питания для перспективных образцов техники нового поколения на основании методик расчета, моделирования, пакетов прикладных программ и рекомендаций был изготовлен и испытан бесщеточный генератор с интегрированным возбуждением. В таблице 4 приведены основные технические параметры выпускаемых промышленностью (ВГ-8К1, ВГ-7500) и разработанных с участием автора генераторов Г-408, Г-409.

Таблица 4 Технические данные генераторов

Параметр / Тип генератора	ВГ-8К1	ВГ-7500	Г-408	Г-409
Номинальная мощность P_n , кВт	8	9	18	12
Номинальное напряжение U_n , В	28,5	28,5	28,5	28,5
Номинальная частота вращения n_n , об/мин	3000	7200	7200	7340
Рабочий диапазон частот вращения, об/мин	2500 ÷ 6500	4000 ÷ 8000	4000 ÷ 8000	4000 ÷ 8000
Температура окружающей среды $T_{окр}$, °C	-50 ÷ +60	-50 ÷ +70	-50 ÷ +100	-50 ÷ +100
Масса M , кг	60	26	32	20
Удельная масса m , кг/кВт	7,5	2,9	1,78	1,67
Мощность возбуждения, P_{fn} , Вт	250	266	232	178
Коэффициент усиления по мощности k_p , о.е.	32	34	78	67
Номинальный КПД η_n , о.е.	0,75	0,77	0,75	0,8

Генератор с интегрированным возбуждением (Г-409) превосходит по основным критериям (масса, КПД, мощность возбуждения) не только генераторы с клювообразным ротором (ВГ-8К1) и двухкаскадный синхронный (Г-408), но и коллекторный генератор (ВГ-7500). Таких результатов удалось достичь за счет реализации процедуры оптимизационного поиска и применения новых технических решений, предложенных автором.

С целью проверки адекватности теоретической модели опытный образец БЭГ с интегрированным возбудителем подвергался испытаниям на соответствие статическим и динамическим показателям. На рис.20 показаны экспериментальные (сплошная линия) и рассчитанные по математической модели (прерывистая линия) внешние характеристики и осциллограмма выпрямленного тока и напряжения при включении возбуждения.

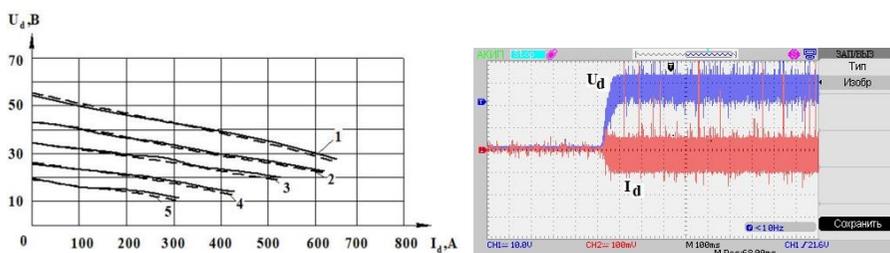


Рис.20. Статические и динамические характеристики БЭГ

Адекватность разработанных теоретических моделей по длительности, характеру переходных процессов и величине интегральных оценок по управляющему и возмущающему воздействиям подтверждена экспериментальными данными.

Разработка и исследование бесщеточных электрических генераторов малой мощности для ветроэнергоустановок проводились в рамках работ по договору «Разработка методики электромагнитного расчета синхронного вентильного генератора для ветроэлектростанции», в ходе которых были спроектированы, изготовлены и исследованы генераторы различной мощности с магнитоэлектрическим возбуждением. Их привод осуществлялся напрямую от ветроколеса с ротором Дарье. Основные технические данные генераторов приведены в таблице 5.

Таблица 5. Технические данные генераторов с магнитоэлектрическим возбуждением

Параметр/Тип ПМ	Встроенные	Поверхностные		
	1	2	3	4
Номинальная мощность	1270	1000	1560	2080

(постоянного тока) P_H , Вт				
Номинальное напряжение U_H , В	48	24	48	48
Номинальная частота вращения n_H , об/мин	140			
Начало токоотдачи n_0 , об/мин	41	57	53	47
Удельный расход ПМ $\frac{V_{ПМ}}{P_H}$, $\frac{м^3}{кВт}$	$3,53 \cdot 10^{-4}$	$3,37 \cdot 10^{-4}$	$3,24 \cdot 10^{-4}$	$3,24 \cdot 10^{-4}$
Номинальный КПД η_H	0,519	0,656	0,689	0,712

БЭГ с поверхностным расположением ПМ на роторе отличается от генератора с встроенными магнитами и таким же объемом активной части: меньшим расходом дорогостоящих высококоэрцитивных магнитов; повышенной энергетической эффективностью (КПД выше в 1,37 раза); технологичностью и меньшей стоимостью конструкции ротора.

На рис.21 приведены характеристики генератора с поверхностным расположением ПМ на роторе (типоразмера 2) при различных частотах вращения ротора и осциллограмма линейного напряжения обмотки якоря.

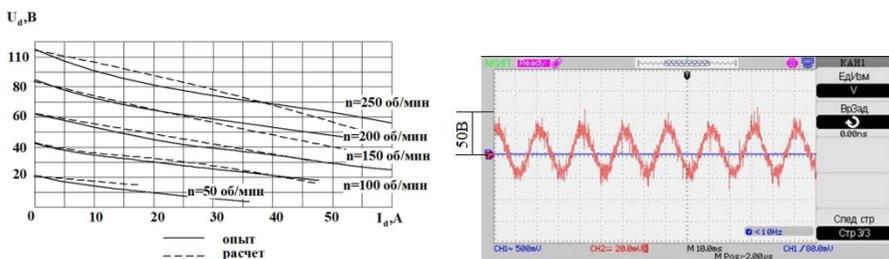
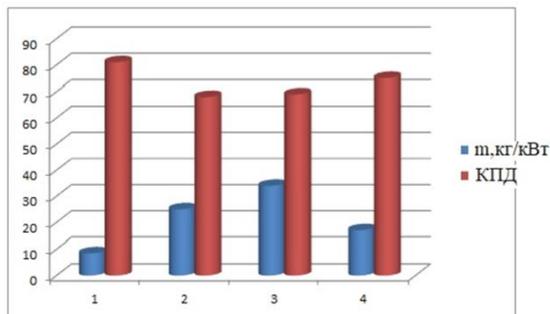


Рис. 21. Внешние характеристики и осциллограмма линейного напряжения генератора

Опытные образцы БЭГ с магнитоэлектрическим возбуждением успешно прошли испытания и освоено их мелкосерийное производство.

Под руководством автора была проведена НИОКР по разработке двухкасадного синхронного генератора в составе дизель-генераторной установки для электроснабжения железнодорожного диагностического испытательного вагона. По итогам исследований был спроектирован, изготовлен и испытан генератор Г-401, который также возможно использовать в составе стационарной автономной установки аварийного электроснабжения.

Рис.22. Удельная масса и КПД бесщеточного генератора и аналогов



1- Г-401; 2- 2ГВ.008.12;
3- ЭГВ.01.6; 4- КГ-12,5

По сравнению с аналогами, в качестве которых определены подвагонные индукторные генераторы 2ГВ.008.12, ЭГВ.01.6 и синхронный вентильный генератор КГ-12,5, разра-

ботанный генератор Г-401 выгодно отличается более высоким КПД и существенно меньшей массой.

Основные результаты работы

В диссертационной работе решена задача разработки научно-методических основ моделирования и оптимизационного проектирования бесщеточных генераторов малой и средней мощности с электромагнитным и магнитоэлектрическим возбуждением для автономных энергетических установок с новыми электрическими и конструктивными схемами, обеспечивающих улучшение массогабаритных и энергетических показателей, технологичности, а также решения комплекса вопросов по их практической реализации и внедрению.

В процессе решения поставленной задачи получены следующие научные и практические результаты:

1. При исследовании конструктивных и электрических схем бесщеточных генераторов для автономных энергетических установок доказано, что наиболее рациональными с точки зрения массогабаритных показателей, технологичности, доступности способов регулирования выходного напряжения, возможности эксплуатации в широком диапазоне частот вращения являются БЭГ с магнитоэлектрическим возбуждением от редкоземельных высококоэрцитивных магнитов и БЭГ с интегрированным электромагнитным возбуждением.

2. По разработанной автором методологии анализа конструкции ротора и схем электрически совмещенных обмоток БЭГ с интегрированным возбуждением установлено, что при явнополюсной конструкции ротора гармонический состав магнитного поля реакции якоря возбудителя предпочтительнее, а коэффициент дифференциального рассеяния в поле возбудителя и, как следствие, индуктивность рассеяния меньше, по сравнению с неявнополюсной

конструкцией. БЭГ с явнополюсным ротором имеет мощность возбуждения возбудителя и добавочные потери, обусловленные высшими гармоническими в зазоре меньше примерно в 1,5 раза относительно неявнополюсной конструкции.

3. В результате проведенных исследований доказано, что первая гармоническая индукции магнитного поля возбуждения основного генератора при одинаковой МДС имеет большее значение у явнополюсной конструкции. Поэтому МДС возбуждения генератора может быть увеличена на 70% относительно неявнополюсной конструкции за счет повышения линейной нагрузки ротора и качественного улучшения формы поля возбуждения основного генератора.

4. Из проведенного автором анализа конструктивных схем генераторов определено, что ротор БЭГ с интегрированным возбудителем следует выполнять явнополюсным с числом выступов, равным числу полюсов основного генератора. Число фаз обмотки ротора для высокоскоростных генераторов должно выбираться минимальным нечетным ($m=3$). Магнитную систему желательно выполнять умеренно насыщенной ($k_S \leq 1,4$) во избежание чрезмерного роста дифференциального рассеяния магнитного поля возбудителя по коронкам зубцов.

5. Разработанная автором математическая модель электромагнитного поля БЭГ отличается от известных учетом взаимного влияния совмещаемых в общей магнитной системе магнитных полей разной полярности, уточненным расчетом потоков рассеяния, в том числе дифференциального. Она исчерпывающе описывает электромагнитные и электромеханические процессы в установившихся и переходных режимах работы, позволяет определять потокосцепления, собственные и взаимные индуктивности обмоток БЭГ, силовые параметры, необходимые для решения в дальнейшем задач имитационного моделирования установившихся, переходных и аварийных режимов работы БЭГ и оптимизационного проектирования.

6. По рассчитанным методом конечных элементов зависимостям коэффициентов формы ЭДС и полюсного перекрытия БЭГ с магнитоэлектрическим возбуждением установлено, что максимальная мощность магнитоэлектрической синхронной машины с радиально намагниченными постоянными магнитами, расположенными на поверхности ротора, в заданных габаритах и определенном объеме магнитов достигается за счет минимизации размагничивающего действия реакции якоря на поле постоянных магнитов. Определены оптимальные значения относительной длины полюсной дуги.

7. Решение 3D задачи распределения магнитного поля в активной зоне «коротких» БЭГ с магнитоэлектрическим возбуждением (с относительной длиной $\lambda \leq 0,3$) позволило с высокой точностью определить значения коэффициентов бокового и торцового рассеяния ПМ и их вариацию при измене-

нии λ , что способствует повышению точности расчета полезного потока при оптимизационном проектировании.

8. Предложенные автором функциональные математические модели, описывающие БЭГ как аналог коллекторной машины постоянного тока, позволяют анализировать установившиеся и переходные режимы работы вентильных генераторов с интегрированным возбудителем и магнитоэлектрическим возбуждением. Анализ динамики показал, что оба типа преобразователей являются практически безынерционными звеньями относительно возмущающего воздействия.

9. На основе впервые разработанных имитационных моделей БЭГ с интегрированным электромагнитным и с магнитоэлектрическим возбуждением в собственных фазных осях координат и ортогональных осях d, q исследованы электромагнитные процессы системы электроснабжения, в состав которой входит БЭГ как источник электрической энергии.

10. Полученные на основе линеаризованной математической модели аналитическое решение уравнений БЭГ и выражения для динамических критериев качества использованы при решении задачи оптимального синтеза. Сравнение результатов анализа электромагнитных процессов при применении обобщенной и частной моделей показало возможность, с достаточной для практических расчетов точностью, использования линеаризованной модели для решения задачи оптимизационного проектирования БЭГ.

11. Предложен новый метод синтеза бесконтактных электрических генераторов с возбуждением от постоянных магнитов, заключающийся в определении структуры индуктора, обеспечивающей при ограниченном объеме ПМ максимум выходной мощности генератора. Данный метод синтеза рекомендуется использовать при проектировании многополюсных генераторов с магнитоэлектрическим возбуждением для систем генерирования электроэнергии в случаях, когда требуется увеличить выходную мощность генератора при заданном объеме магнитов или уменьшить стоимость индуктора за счет сокращения объема ПМ.

12. Разработаны расчетная математическая модель БЭГ с интегрированным возбудителем, учитывающая такие особенности, как работа возбудителя и основного генератора на выпрямительную нагрузку, совмещение разнополюсных магнитных полей в общей магнитной системе и расчетно-оптимизационный комплекс, позволяющий проводить поиск оптимального варианта генератора с интегрированным возбуждением в интерактивном режиме.

13. Предложен способ и разработан алгоритм аппроксимации кривых намагничивания электротехнических сталей, учитывающий наличие в общем магнитопроводе полей разной частоты и изменение магнитных свойств в зависимости от рабочей частоты и температуры, адаптированный к процессу автоматизированного проектирования.

14. Разработан и программно реализован алгоритм поиска оптимального варианта бесщеточного генератора с интегрированным возбуждением методом зондирования пространства параметров точками равномерно распределенной $ММТ$ последовательности, позволяющий осуществлять синтез генератора в пространстве дискретно изменяющихся параметров по заданным критериям оптимизации.

15. На основании теоретических положений и практических рекомендаций, предложенных в настоящей работе, разработаны и внедрены гамма бесконтактных синхронных машин малой и средней мощности (бесщеточных генераторов с интегрированным возбуждением, магнитоэлектрических генераторов, синхронных машин для электростартерного пуска ГТД), отличающихся высокими энергетическими, динамическими и массогабаритными показателями.

16. По результатам экспериментального исследования электромагнитных и тепловых процессов проведена идентификация параметров БЭГ с интегрированным электромагнитным и магнитоэлектрическим возбуждением. Сопоставительный анализ результатов численного моделирования и натурных экспериментов показал адекватность разработанных математических моделей.

Новизна технических решений, реализованных автором в диссертационном исследовании, защищена авторскими свидетельствами.

Основные публикации по теме работы

Монография

1. Высоцкий В.Е., Зубков Ю.В., Тулупов П.В. Математическое моделирование и оптимальное проектирование вентильных электрических машин. – М.: Энергоатомиздат, 2007. – 340 с.

Статьи в журналах, входящих в перечень ВАК

2. Скороспешкин, А.И. Расчетно-оптимизационный комплекс бесконтактного генератора совмещенного типа / А.И. Скороспешкин, Ю.В. Зубков, А.П. Фельзинг // Изв. вузов Электромеханика. – 1989. – № 5. – С. 37 – 43.
3. Зубков, Ю.В. Аппроксимация кривых намагничивания электротехнической стали при проектировании совмещенных электромеханических преобразователей / Ю.В. Зубков, В.Е. Верещагин // Изв. вузов Электромеханика. – 2007. - № 6. - С.19-22.
4. Зубков, Ю.В. Моделирование электромагнитных процессов вентильного генератора совмещенного типа / Ю.В. Зубков, П.В. Тулупов // Изв. Вузов Электромеханика. – 2011. - № 3. - С. 52-54.
5. Зубков, Ю.В. Моделирование бесконтактного генератора совмещенного типа в оптимизационных расчетах / Ю.В. Зубков // Вестник СамГТУ. Технические науки. – 2012. - №1(33). - С.127-133.

6. Зубков, Ю.В. Эффективность электрически совмещенной короткозамкнутой обмотки вентильного генератора / Ю.В.Зубков // Вестник СамГТУ. - №1(37) 2013, Технические науки. С. 191-196.
7. Зубков, Ю.В. Магнитное поле высших гармонических в зазоре возбуждителя синхронного генератора совмещенного типа / Ю.В. Зубков // Вестник СамГТУ. Технические науки. – 2013. - №2(38). - С.152-157.
8. Зубков, Ю.В. Выбор рациональной геометрии ротора бесконтактного генератора совмещенного типа / Ю.В. Зубков, В.Н. Овсянников // Вестник транспорта Поволжья. 2013, №6(42). - С.26-30.
9. Зубков, Ю.В. Идентификация параметров синхронного генератора с возбуждением от постоянных магнитов методом численного моделирования магнитного поля / Ю.В. Зубков, Э.Г. Чеботков // Вестник СамГТУ. Технические науки. – 2015. - №3(47). - С. 136-141.
10. Макаричев, Ю.А. Исследование тепловых процессов автономного генератора совмещенного типа методом моделирования температурных полей / Ю.А. Макаричев, Ю.В. Зубков, Ю.Н. Иванников // Вестник СамГТУ. Технические науки. – 2015. - №4(48). - С.93-100.
11. Зубков, Ю.В. Анализ влияния длины полюсной дуги на мощность и реакцию якоря магнитоэлектрического стартера / Ю.В. Зубков, Ю.А. Макаричев // Вестник транспорта Поволжья. 2016, №2(56). С.25-29.
12. Зубков, Ю.В. Имитационное моделирование вентильного генератора совмещенного типа / Ю.В.Зубков // Вестник СамГТУ.Технические науки.– 2016. - №1(49). - С.96-102.
13. Макаричев, Ю.А. Математическая модель синхронного генератора ветроэнергетической установки малой мощности / Ю.А. Макаричев, Ю.В. Зубков, А.С. Ануфриев, В.П. Певчев // Вестник СамГТУ. Технические науки. – 2017. - №3(55). - С.66 -74.
14. Ануфриев, А.С. Энергоэффективность генератора ветроэнергетической установки в условиях изменяющейся частоты вращения / А.С. Ануфриев, Ю.В. Зубков, Ю.А. Макаричев // Вестник СамГТУ. Технические науки. – 2018. - №1(57). - С.77 -82.
15. Зубков, Ю.В. Экспериментальное исследование бесщеточного генератора с интегрированным возбуждителем / Ю.В. Зубков // Вестник СамГТУ. Технические науки. – 2018. - №2(58). - С.110 -117.
16. Зубков, Ю.В. Методология проектирования бесщеточных генераторов с магнитоэлектрическим возбуждением с учетом результатов анализа магнитного поля / Ю.В. Зубков // Вестник транспорта Поволжья. 2018, №2(68).- С.20-27.

в прочих сборниках и материалах:

17. Зубков, Ю.В. Некоторые аспекты проектирования обмоток ротора бесщеточных генераторов / Ю.В. Зубков, А.П. Фельзинг // Разработка

- и исследование специальных электрических машин: Сб. науч. тр. – Куйбышев, - 1987. – С.136-147.
18. Зубков, Ю.В. Автономный источник питания / Ю.В. Зубков, А.П. Фельзинг, М.И. Гроссман // Электрические машины специального назначения: Сб. науч. тр.- Куйбышев.-1985.- с.75-88.
 19. Зубков, Ю.В. Многокритериальная оптимизация бесконтактного генератора совмещенного типа / Ю.В. Зубков, А.П. Фельзинг // Специальные электрические машины: Сб. науч. тр.- Куйбышев.-1989.- С.9-20.
 20. Скороспешкин, А.И. Математическая модель бесконтактного вентильного генератора / А.И. Скороспешкин, Ю.В. Зубков, А.П. Фельзинг // В сб.: Электромеханотроника. Тр. 1 Всесоюзн. конф.- Ленинград.- 1987.- С.21-23.
 21. Скороспешкин, А.И. Многокритериальная задача оптимального синтеза бесконтактного авиационного генератора. / А.И. Скороспешкин, Ю.В. Зубков, А.П. Фельзинг // Труды Всесоюзного научно-технического семинара по электромеханотронике. – Л., 1989. – С. 23–24.
 22. Зубков, Ю.В. Алгоритм расчета вентильного генератора совмещенного типа / Ю.В. Зубков, П.В. Тулупов // В сб.: Компьютерные технологии в науке, практике и образовании: Тр. 9-й Всероссийской научно - практической конференции. Самара: – 2010. - С. 190-193.
 23. Зубков, Ю.В. Анализ изобретательской активности в области технологии изготовления электрических машин с применением компьютерных технологий / Ю.В. Зубков, П.В. Тулупов // В сб.: Компьютерные технологии в науке, практике и образовании: Тр. 9-й Всероссийской научно - практической конференции. Самара: – 2010. - С. 193-196.
 24. Зубков, Ю.В. Расчет магнитного поля вентильного генератора совмещенного типа / Ю.В. Зубков // Проблемы электротехники, электроэнергетики и электротехнологии: Труды 4 Междунар. науч.-техн. конф., часть 1.- Тольятти, 2012. С. 40-46.
 25. Зубков, Ю.В. Параметрическая оптимизация вентильного генератора совмещенного типа / Ю.В. Зубков, В.Н. Овсянников // Труды Всероссийской науч.-техн. конф. «Энергетика: состояние, проблемы, перспективы», Оренбург. - 2012. С. 240-246.
 26. Зубков, Ю.В. Выбор электрически совмещенной обмотки для бесщеточного возбуждения / Ю.В. Зубков // Труды Межд.науч.-техн. конф. «Состояние и перспективы развития электротехнологии», Иваново. - 2013, Т.3. С. 99-102.

27. Зубков, Ю.В. Определение параметров и коэффициента рассеяния магнитной системы синхронного генератора с магнитоэлектрическим возбуждением / Ю.В. Зубков, Ю.Н. Кузнецова // *Материалы межд.науч.-техн.конф. «Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии» (18 Бернадосовские чтения)*, т.3, *Электротехника*, Иваново 2015.-С.128-131.
28. Зубков, Ю.В. Численное моделирование магнитного поля при расчете нагрузочного режима вентильного генератора / Ю.В. Зубков, Ю.Н. Кузнецова // *Материалы 6 межд.науч.-практ.конф. «Актуальные проблемы энергетики АПК»*, Саратов 2015. -С.68-70.
29. Зубков, Ю.В. Расчет температурного поля бесщеточного генератора с жидкостным охлаждением / Ю.В. Зубков, Ю.Н. Иванников // *Материалы Всероссийской научно- практической конференции «Электротехнические комплексы и системы»*, Уфа 2015.-С.100-105.
30. Зубков, Ю.В. Расчет максимальных превышений температуры обмоток вентильного двухкаскадного генератора с электромагнитным возбуждением // Ю.В. Зубков, Ю.Н. Иванников // *Труды 6-ой межд.науч.-техн.конф. «Электроэнергетика глазами молодежи»*, т.1, Иваново 2015.- С.367-370.
31. Зубков, Ю.В. Температурный режим магнитоэлектрического стартера при пуске газотурбинного двигателя / Ю.В. Зубков, Ю.Н. Иванников, Д.О. Буйлова // *Материалы 7 межд. науч.-практ. конф. «Актуальные проблемы энергетики АПК»*, Саратов 2016. - С.74-76.
32. Зубков, Ю.В., Давидков А.И. Бесщеточный генератор с интегрированным гибридным возбуждением / Ю.В. Зубков, А.И.Давидков // *Труды Международной научно-практической конференции «Ашировские чтения»*, Самара 2017. - С. 686-691.

- охранные документы:

33. А.с. СССР №1334288, МКИ H02K 9/04, 19/36. Зубков Ю.В., Фельзинг А.П. Вращающийся выпрямительный узел/ Ю.В. Зубков [и др]. // *Куйбышевский политехнический институт им. В.В. Куйбышева*, Заявл. 07.04.86. – Оpubл. 30.08.87, Бюл. 32.
34. А.с. СССР №1394347, МКИ H02K 29/00. Зубков Ю.В., Фельзинг А.П., Скороспешкин А.И. Бесконтактный электрический генератор постоянного тока / Ю.В. Зубков [и др]. // *Куйбышевский политехнический институт им. В.В. Куйбышева*, Заявл. 07.04.86. – Оpubл. 07.05.88, Бюл. 17.
35. А.с. СССР №1601692, МКИ H02K 1/12, 19/00. Электрическая машина смещенного типа / Ю.В. Зубков [и др]. // *Куйбышевский политехнический институт им. В.В.Куйбышева*, Заявл. 13.07.87. – Оpubл. 22.06.90, Бюл. 28

Диссертанту принадлежат:

В монографии гл. 2,3,5 из 6-ти; в публикациях 2-4,8-11,13,14 – разработка концепции, анализ идеи, постановка и реализация задач, доля автора составляет 70%.

Автореферат отпечатан в соответствии с решением
диссертационного совета Д212.217.04
ФГБОУ ВО Самарский государственный технический университет
протокол № 4 от 11.09.2018г.

Заказ № 544 Тираж 120 экз.

ФГБОУ ВО Самарский государственный технический университет
Отдел типографии и оперативной полиграфии
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244