

Отзыв

Официального оппонента Ютта Владимира Евсеевича на диссертацию Зубкова Ю.В. "Методология анализа и синтеза бесщеточных генераторов малой и средней мощности для автономных энергетических установок", представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.09.01 «Электромеханика и электрические аппараты».

Актуальность темы

Диссертационная работа Зубкова Ю.В. посвящена разработке методологических принципов анализа и синтеза бесщеточных электрических генераторов для автономных энергетических установок (АЭУ), используемых в малой и нетрадиционной электроэнергетике.

Применяемые в АЭУ бесщеточные генераторы выгодно отличаются от традиционных генераторов со скользящим контактом высокой надежностью, повышенным ресурсом работы и меньшими эксплуатационными расходами.

Бесщеточные электрические генераторы (БЭГ) с успехом применяются в авиации, космических аппаратах, нетрадиционной энергетике, автомобильной энергетике. Увеличение производства генераторов для автономных энергетических установок является важнейшей задачей, в рамках которой должны неразрывно решаться вопросы создания новых электромеханических преобразователей 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.

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.

Актуальность работы подтверждается тем, что она выполнялась 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. В связи с изложенным, тема диссертации Зубкова Ю.В., посвященная разработке методологии анализа и синтеза активных бесщеточных генераторов малой и средней мощности для АЭУ, безусловно, актуальна и соответствует специальности 05.09.01- «Электромеханика и электрические аппараты».

Новизна исследований и полученных результатов

Научная новизна определяется тем, что в работе расширяются и углубляются теоретические представления о методологии анализа схем и конструкций бесщеточных генераторов и их параметрического синтеза; предлагаются новые алгоритмы совместного использования процедур математического моделирования электромагнитного поля и оптимизационного проектирования БЭГ; на новом качественном уровне в разработанных математических моделях БЭГ учитывается взаимное влияние магнитных полей разной полюсности и дифференциальное рассеяние в воздушном зазоре генераторов с интегрированным возбуждением.

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. Сравнительный анализ показал, что наиболее рациональными для применения в качестве генераторов АЭУ являются БЭГ с магнитоэлектрическим возбуждением от редкоземельных высококоэрцитивных магнитов и БЭГ с интегрированным электромагнитным возбуждением. Данные типы генераторов автор выбрал для дальнейшего углубленного исследования в диссертационной работе.

Во второй главе автором предложена методология анализа и синтеза конструкции ротора БЭГ с интегрированным возбудителем. В ходе исследований проведена оценка влияния укорочения шага электрически совмещенной обмотки ротора 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.

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

В третьей главе поставлена и решена задача создания математической модели БЭГ, функционально ориентированной на расчет параметров на основе численного моделирования магнитного поля. Осуществлено исследование ре-

жимов 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.

Автором получены уточненные зависимости интегральных параметров (индуктивностей, взаимных индуктивностей, постоянных времени) от конструктивных особенностей обмоток и степени насыщения магнитной системы БЭГ с магнитоэлектрическим и электромагнитным возбуждением. Данные зависимости использовались для построения математических моделей БЭГ при их работе в составе автономной энергетической системы.

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 магнитостатическая задача расчета поля БЭГ в трехмерной постановке в программной среде Ansys Maxwell, найдена зависимость коэффициента рассеяния от относительной длины активной части машины.

Получены зависимости коэффициента формы ЭДС и расчетного коэффициента полюсного перекрытия для машин с магнитоэлектрическим возбуждением и радиально намагниченными постоянными магнитами, расположенными на поверхности ротора от относительной длины полюсной дуги магнита. Установлено, что максимальная мощность в заданных габаритах при определенном объеме магнитов достигается за счет минимизации размагничивающего действия реакции якоря на поле постоянных магнитов при значениях относительной длины полюсной дуги $\alpha \approx 0,85 \div 0,95$.

В четвертой главе получены функциональные математические модели БЭГ с интегрированным электромагнитным и магнитоэлектрическим возбуждением, позволяющие проводить анализ установившихся и переходных режимов работы. 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. Математические модели реализованы в среде Matlab-Simulink. Исследованы переходные режимы работы генератора с интегрированным возбуждением в замкнутой системе регулирования напряжения и ветрогенератора с прямым приводом.

Научный и практический интерес представляют разработанные автором для использования в оптимизационных расчетах упрощенные математические модели, решение для которых получено в аналитическом виде.

В пятой главе разработана 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 постоянных магнитов (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 тип конструктивного исполнения индуктора, коэффициент полюсного перекрытия и связанные с ним размеры ПМ.

Разработанный метод синтеза БЭГ применен при проектировании много полюсных генераторов с магнитоэлектрическим возбуждением для систем генерирования электроэнергии в ветроэнергетике, малой гидроэнергетике в слу-

чаях, 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 стялей, учитывающий наличие в общем магнитопроводе полей разной частоты и изменение магнитных свойств в зависимости от рабочей частоты и температуры, адаптированный к процессу автоматизированного проектирования.

На основании методики теплового расчета разработана подпрограмма теплового расчета. Проверка адекватности приближенного способа оценки состояния наиболее нагретых элементов БЭГ проведена численным моделированием температурного поля методом конечных элементов.

С использованием положений теории направленных графов предложены способы расчета главных размеров БЭГ. В результате минимизации веса графов выбран вариант, позволяющий методологически более верно реализовать процесс проектирования, сократить число итерационных циклов и затраты времени при оптимизационном поиске.

Разработан расчетно-оптимизационный комплекс, позволяющий проводить поиск оптимального варианта генератора с интегрированным возбуждением в пространстве варьируемых факторов в интерактивном режиме.

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

Задача оптимизации с учетом нелинейности уравнений, описывающих состояние БЭГ, относится к классу многомерных многокритериальных задач нелинейного численного программирования. Основой сравнения двух произвольных точек из области допустимых решений являются бинарные отношения, причем в алгоритме поиска оптимального варианта БЭГ реализовано бинарное отношение Парето. 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%.

В восьмой главе приведены примеры технической реализации теоретических результатов исследования в виде опытных и промышленных образцов БЭГ различного назначения. Сравнение экспериментальных и расчетных статических и динамических характеристик БЭГ подтверждает корректность разработанных теоретических моделей.

Одной из основных трудностей при разработке генераторов была проблема обеспечения допустимого теплового режима. Поэтому, вопросу теплового состояния машины былоделено особое внимание. Температурное поле генератора было промоделировано МКЭ и исследовано на опытном образце экспериментально. Полученные в результате испытаний данные по установившемуся перегреву обмотки якоря относительно температуры окружающей среды хорошо согласуются с данными, полученными в ходе численного моделирования.

Полученные в ходе работы над диссертацией результаты, акты внедрения подтверждают научную и практическую значимость работы.

Новизна полученных технических решений защищена авторскими свидетельствами на изобретения.

Таким образом, все цели, поставленные в работе, (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), автором достигнуты.

К наиболее существенным и принципиально новым научным результатам, полученным в работе, следует отнести:

1. Методологию определения оптимальной конфигурации БЭГ с интегрированным возбуждением, отличающуюся 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. Методологию 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. Концепцию синтеза БЭГ с магнитоэлектрическим возбуждением, основанную на предварительной оценке оптимального объема постоянных магнитов (ПМ) в индукторах различного конструктивного исполнения с последующей оптимизацией по максимуму выходной мощности.
5. Процедуры и алгоритм проектирования БЭГ, включающие поверочные и оптимизационные расчеты с использованием системного просмотра многомерных областей посредством процедуры ЛП-τ поиска. Предложены пути достижения оптимума по отдельным критериям или их совокупности.

**Степень обоснованности и достоверности научных положений,
выводов и заключений.**

Достоверность полученных результатов обеспечивается применением строгих математических методов исследования, экспериментальной проверкой, сравнением с теоретическими и экспериментальными результатами других авторов. Результаты теоретических исследований в виде статических и динамических характеристик проверены на экспериментальных промышленных БЭГ.

Значимость для науки и практики выводов и рекомендаций.

Результаты работы представляют весомый вклад в развитие теории и практики бесщеточных электрических генераторов для автономной энергетики. Разработанные методики проектирования, математические и компьютерные модели используются в организациях, ведущих разработку, производство и обслуживание бесщеточных генераторов, а также в учебных программах профессиональных учебных учреждений, ведущих подготовку специалистов-электромехаников, что подтверждено соответствующими актами использования результатов работы.

Диссертация имеет внутреннее единство, написана ясным языком с использованием правильных технических терминов. Рисунки выполнены с соблюдением стандартов. Основные результаты диссертации опубликованы в 35 печатных работах, включая монографию (в соавторстве), 15 статей в изданиях по списку ВАК, 3 авторских свидетельств на изобретения. Анализ публикаций автора позволяет утверждать, что содержание диссертации отражено в них с требуемой Положением ВАК полнотой. Основные результаты работы отражены в изданиях, соответствующих рекомендуемому ВАК перечню изданий для опубликования результатов докторских диссертаций. Содержание автореферата соответствует диссертации.

Связь диссертации с государственными программами научных исследований

Работа над диссертацией проводилась в рамках Федеральной целевой программы «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.

Внедрение результатов работы

Результаты диссертационного исследования внедрены в виде рекомендаций, методик расчетов, пакетов прикладных программ, промышленных образцов на предприятиях электротехнической отрасли Российской Федерации: АО «Барнаултрансмаш» г. Барнаул, ПАО «ОДК Кузнецова» г. Самара, АО «Казанское моторостроительное производственное объединение» г. Казань, АО Научно-производственное объединение "Опытно-конструкторское бюро имени М.П. Симонова" г. Казань, НПО «Штурм», г. Самара, ООО «Тольяттинский трансформатор», г. Тольятти и в виде алгоритмов и программ оптимизации и моделирования бесщеточных генераторов в учебном процессе Самарского государственного технического университета, что подтверждается соответствующими актами.

По работе имеются следующие замечания:

1. Почему при анализе генераторов ветроэнергетических установок не рассмотрены генераторы на основе асинхронных машин двойного питания, которые в настоящее время широко применяются для преобразования энергии ветра?
2. Какие принципы анализа и синтеза позволили объединить столь разнообразные по конструкции, своим функциям, параметрам электрические машины?

ны: генераторы ВЭУ, подвагонные генераторы, стартер-генераторы беспилотных летательных аппаратов, системы электростартерного пуска газотурбинных двигателей? Насколько адекватны изложенные методы для столь функционально различных машин?

3. Из табл.2.7 следует, что расхождение в результатах значений коэффициента дифференциального рассеяния, рассчитанного по традиционной методике и уточненной методике, предложенной автором, не превышает 7%. Стоит ли существенно усложнять модель из-за такого расхождения?

4. В третьей главе автор проводит анализ магнитного поля генератора с интегрированным возбудителем, имеющего в общем случае различное число полюсов возбудителя и основного генератора. Не ясно, как эти поля будут влиять друг на друга при насыщении магнитной системы, а также в динамике. Не исследуются «трансформаторные» связи между разнополюсными обмотками.

5. Вызывает сомнение целесообразность исследования переходных процессов происходящих при включении возбуждения в режиме короткого замыкания (рис.4.10). Как такой режим может возникнуть на практике? Логичнее было бы исследовать процессы, происходящие в системе, когда в режиме короткого замыкания возбуждение отключается защитой.

Заключение

В целом диссертация Зубкова Ю.В. на соискание ученой степени доктора технических наук оформлена в соответствии с требованиями, предъявляемыми к диссертационным исследованиям, соответствует по содержанию специальности 05.09.01.- «Электромеханика и электрические аппараты», является научно-квалификационной работой, в которой изложены научно-обоснованные технические решения, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие страны, что соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» ВАК Министерства науки и высшего образования РФ, утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г., № 842 (п.28), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора технических наук.

Зубков Юрий Валентинович заслуживает присуждения ему ученой степени доктора технических наук по специальности 05.09.01 «Электромеханика и электрические аппараты».

Официальный оппонент –

Засл. деятель науки и техники РФ,
доктор технических наук (специальность
05.22.10 «Эксплуатация автомобильного
транспорта»), профессор,
заведующий кафедрой
«Электротехника и электрооборудование»
ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-
дорожный государственный технический
университет» (МАДИ)
125319, г. Москва, Ленинградский про-
спект, д. 64.
Тел.: (903)784-88-76
E-mail:ioutt@mail.ru

Ютт Владимир Евсеевич

Подтверждение подписи оппонента

Ученый секретарь Ученого совета МАДИ

Немчинов М.В.

С отрывом от рукописи 24.11.2018г.
№ 10-б. Зубков /