

Отзыв

официального оппонента на диссертацию Зубкова Юрия Валентиновича «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. ставит задачей разработку 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. 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.

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.

Замещение традиционных силовых агрегатов на основе двигателей внутреннего сгорания электрическими двигателями в автомобилестроении потребовало существенного повышения энергоооруженности 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.

Очевидно, что увеличение производства генераторов для автономных энергетических установок (АЭУ) 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 мас-

согабаритных показателей, энергетической эффективности – основные пути повышения качества бесщеточных электрических генераторов.

В настоящее время наметилась тенденция во внедрении компьютерных и цифровых технологий во все сферы индустриального производства. В связи с этим очень важно развивать научно-технические направления, связанные с возрождением и дальнейшим совершенствованием систем автоматизированного проектирования (САПР) исполнительных элементов энергетической системы, в частности, устройств генерации электрической энергии. Не смотря на мощное развитие CAD систем для анализа, проблемы синтеза электромеханических систем на основе оптимизации геометрии требуют научного исследования.

В связи с изложенным, тему диссертации Ю.В. Зубкова, посвященной разработке научно-методических основ моделирования и оптимизационного проектирования бесщеточных генераторов малой и средней мощности, без сомнения, следует считать актуальной.

Диссертация, изложенная на 364 стр., состоит из введения, 8 глав, заключения, списка литературы из 175 наименований и приложений.

В первой главе диссертации дается обзор работ по избранному направлению исследований. Приведена классификация бесщеточных вентильных генераторов для автономных энергетических установок. Освещены особенности применения БЭГ в различных технических приложениях. Проведен научный анализ и определены тенденции развития теории вентильных БЭГ.

Во второй главе приводятся результаты структурно-параметрического синтеза роторов БЭГ с интегрированным возбуждением. На основе численного моделирования электромагнитного поля разработана методология анализа и выбора конструкции ротора генератора с учетом особенностей исполнения обмоток и конфигурации активной зоны машины. В качестве главного критерия оптимизации выбрана величина магнитной индукции поля возбуждения генератора в зазоре. Показано, что явнополюсная конструкция ротора является более эффективной по сравнению с неявнополюсной.

Исследовано влияние величины шага и числа фаз электрически совмещенной обмотки ротора на эффективность передачи энергии от возбудителя основному генератору. Анализ проводился как графо-аналитическим методом, так и применением конечно-элементного моделирования.

Проведена оценка поля дифференциального рассеяния в зазоре возбудителя, которое при большом вынужденном укорочении шага обмотки может привести к потере работоспособности БЭГ с интегрированным возбуждением. Выявлено, что насыщение сердечников статора и ротора оказывает существенное влияние на величину коэффициента дифференциального рассеяния по коронкам зубцов в области $\mu_{cm}=1000$ и менее. Поясное рассеяние практически не зависит от насыщения.

В третьей главе исследовались магнитное поле и параметры БЭГ с электромагнитным и магнитоэлектрическим возбуждением. Для нахождения пара-

метров генератора с интегрированным возбудителем решен 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 нагружочном 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.

Установлено, что в отличие от синхронных машин неявнополюсной конструкции оптимальное, с точки зрения приближения распределения магнитного поля к синусоиде, отношение обмотанной части статора к полной ρ составляет $4/9$. Однако, по условию совмещения разнополюсных магнитных полей в общей магнитной системе для БЭГ с интегрированным возбудителем практически реализуемой является величина ρ , при которой отсутствует индуктивная связь с магнитным полем основной машины.

Решение 3D задачи распределения магнитного поля в активной зоне «коротких» БЭГ с магнитоэлектрическим возбуждением (с относительной длиной $\lambda \leq 0,4$) позволило установить, что значения потоков бокового и торцового рассеяния постоянных магнитов составляет величину, превышающую в некоторых случаях 70% от полезного потока. Полученные значения коэффициента рассеяния от относительной длины машины в обязательном порядке должны учитываться при оптимизационном проектировании.

Установлено, что для машин с магнитоэлектрическим возбуждением и расположенными на поверхности ротора постоянными магнитами максимальная мощность в заданных габаритах при неизменном 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 вентильных БЭГ с электромагнитным и магнитоэлектрическим возбуждением на основе аналогии между вентильной синхронной машиной и коллекторной машиной постоянного тока, щетки которой смешаются с нейтрали в зависимости от нагрузки. На основе дифференциальных уравнений, описывающих работу БЭГ, исследованы установившийся и динамические режимы работы. Сравнение теоретических расчетов с результатами эксперимента показало адекватность разработанных моделей.

Разработанные математические модели БЭГ в собственных фазных осях координат и осях d, q позволяют исследовать электромагнитные процессы системы электроснабжения, в состав которой входит БЭГ как источник электрической энергии, например, в бортовой системе электроснабжения транспортного средства или генератора в составе ветроэлектростанции. С помощью преобразования Лапласа получены структурные схемы БЭГ с различными типами

возбуждения как объекта регулирования, которые использовались при синтезе систем автоматического регулирования выходного напряжения.

С целью получения аналитического решения уравнений БЭГ для последующего использования при решении задачи оптимального синтеза разработаны линеаризованные математические модели, которые, с достаточной для практических расчетов точностью, применяются для решения задач оптимального проектирования БЭГ.

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.

Проведено сравнение результатов проектирования для четырех типов индукторов БЭГ, в результате которого установлено, что максимум выходной мощности генератора достигается при выполнении индуктора с расположением ПМ на поверхности ротора и обеспечивается оптимизацией формы магнитов и величины коэффициента полюсного перекрытия. Осуществлено моделирование в программной среде Ansys Maxwell вариантов генератора с разным исполнением индукторов при различных значениях полюсного перекрытия. С использованием разработанного алгоритма выбран БЭГ с наибольшей выходной мощностью при заданном объеме постоянных магнитов. Предложенный метод оптимизации позволил получить снижение массы магнитов по сравнению с неоптимизированным вариантом на 9.6% при обеспечении заданной мощности БЭГ.

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. Аппроксимация кривых намагничивания производилась в два этапа. На первом – методом квадратичной интерполяции определяются коэффициенты аппроксимации для каждой из экспериментальных кривых намагничивания функцией гиперболического синуса $H = \alpha \cdot \text{sh}(\beta \cdot B)$. На втором этапе осуществляется интерполяция коэффициентов α и β , являющихся функциями частоты перемагничивания и температуры. Для обеспечения достаточной точности интерполяция производилась с помощью кубических сплайнов, обеспе-

чивающих точное значение функции в узловых точках. Используя полученные значения наклонов сплайнов, можно определить величину коэффициентов аппроксимации α и β при любых значениях частоты перемагничивания и температуры, входящих в интерполяционный интервал.

В седьмой главе описан предложенный автором алгоритм поисковых процессов оптимизации вентильных БЭГ, позволяющий осуществлять синтез генератора в пространстве дискретно изменяющихся параметров с последующим анализом установившихся и переходных электромагнитных процессов. Задача оптимального синтеза БЭГ относится к классу многомерных (целевая функция зависит от многих параметров) многокритериальных задач и требует соответствующих методов решения.

Разработан и программно реализован алгоритм поиска оптимального варианта бесщеточного генератора с интегрированным возбуждением методом зондирования пространства параметров точками равномерно распределенной $L\pi_\tau$ последовательности. Область применения предложенного метода, после соответствующей доработки, может быть расширена на стартер-генераторные и стартерные системы на базе бесщеточных синхронных машин малой мощности.

В восьмой главе диссертации рассматривается комплекс решенных задач по практической реализации и внедрению БЭГ. Приведены результаты экспериментальных исследований генераторов с интегрированным электромагнитным и магнитоэлектрическим возбуждением в установившихся и переходных режимах работы. Осуществлено моделирование тепловых процессов в программных комплексах *Elcut*, *Ansis* и сравнение теоретических результатов с опытом.

В заключении диссертации приведены основные результаты и выводы, отражающие содержание работы.

Научная новизна

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 поверочные и оптимизационные расчеты с использованием системного просмотра многомерных областей посредством процедуры ЛП-т 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 электрозвапуска. Новизна технических решений защищена авторскими свидетельствами на изобретения.

Теоретическая и практическая значимость результатов работы

Теоретическая значимость состоит, прежде всего, в получении новых моделей бесщеточных генераторов малой и средней мощности, более адекватно описывающих реальные физические процессы, создании методологических принципов подхода к синтезу и анализу таких электромеханических преобразователей.

Несомненным достоинством научного исследования является постановка и решения многокритериальной задачи оптимального проектирования БЭГ. Автор предлагает метод достижения оптимума по нескольким противоречивым критериям, который можно применить для проектирования электромеханических устройств других типов.

Полученные в работе 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.

Прикладное значение рассматриваемой работы подтверждено актами внедрения разработок автора, представленными в Приложении диссертации.

Рекомендации по использованию результатов работы

Полученные в диссертации результаты могут быть использованы в проектных организациях, конструкторских бюро и на промышленных предприятиях, занимающихся разработкой, проектированием и изготовлением бесщеточных электрических машин, работающих в области высоких температур, давлений, скоростей, а также в учебном процессе вузов технических специальностей.

Достоверность результатов работы

Достоверность полученных результатов подтверждается корректным использованием уравнений электромагнитного поля при построении моделей, верификацией полученных решений по результатам экспериментальных исследований, выполненных как автором диссертации, так и другими исследователями, а также данными других исследователей.

Апробация диссертации и публикаций

Основные материалы работы и её результаты достаточно полно отражены в публикациях автора, из которых 15 статей в журналах из перечня ВАК, 1 монография. Диссертация прошла апробацию на многих научно-технических конференциях, симпозиумах, совещаниях различного статуса, на которых были представлены доклады автора.

Результаты работы использованы при выполнении НИР и внедрению:

- бесщеточных генераторов для АО «Барнаултрансмаш»;
- ЭМП с магнитоэлектрическим возбуждением для ПАО «ОДК Кузнецов», АО «Казанское моторостроительное производственное объединение»;
- стартер-генератора малоразмерных газотурбинных двигателей (АО Научно-производственное объединение «Опытно-конструкторское бюро имени М.П. Симонова»);
- ветрогенераторов для ООО «Тольяттинский трансформатор».

Автореферат и публикации автора отражают основное содержание диссертации и соответствуют требованиям, предъявляемым ВАК Министерства науки и высшего образования РФ. Результаты диссертации полностью отражены в опубликованных работах. Автореферат и диссертация написаны в строго логической последовательности, математические выводы понятны и физически обоснованы. При использовании в тексте диссертации результатов других авторов сделаны соответствующие ссылки. Работа оформлена в соответствии с существующими требованиями.

Вопросы и замечания по работе

1. Не ясно, почему в качестве критерия при структурной оптимизации ротора генератора с интегрированным возбуждением выбрана индукции в зазоре основного генератора? Более логичным был бы критерий минимального объема ротора при заданном магнитном потоке.

2. Проектная ситуация, когда необходимо спроектировать БЭГ с заданной массой постоянных магнитов, не типична для практики. Обычно возникает задача оптимального проектирования электрической машины под постоянные магниты, имеющие заданную форму, партию которых заказчик уже закупил. Возможна ли адаптация алгоритма многокритериальной оптимизации под эту проектную ситуацию?

3. За счет чего удалось уменьшить плотность тока в обмотке ротора при явнополюсной конструкции по сравнению с неявнополюсной без ухудшения основного критерия?

4. Надписи в поле рис.4.19 на английском языке, что не соответствует основному тексту на русском языке.

5. Из приведенного в диссертации описания и рисунков не понятно, в чем отличие традиционного и нового, предложенного автором, алгоритмов проектирования бесщеточных генераторов с магнитоэлектрическим возбуждением?

Указанные замечания хотя и отражаются на качестве изложения, однако не меняют общего положительного мнения о данной работе.

Заключение по диссертации

Диссертационная работа на тему: «Методология анализа и синтеза бесщеточных генераторов малой и средней мощности для автономных энергетических установок» является законченной научно-квалификационной работой, в которой решена проблема разработки новой методологии создания бесщеточных электрических генераторов для автономной энергетики.

Диссертационное исследование соответствует следующим пунктам паспорта специальности 05.09.01- «Электромеханика и электрические аппараты» (отрасль наук - технические): 1. «Анализ и исследование физических явлений, лежащих в основе функционирования электрических, электромеханических преобразователей энергии и электрических аппаратов»; 2. «Разработка научных основ создания и совершенствования электрических, электромеханических преобразователей и электрических аппаратов»; 3. «Разработка методов анализа и синтеза преобразователей электрической и механической энергии»; 4. «Разработка подходов, методов, алгоритмов и программ, обеспечивающих проектирование электромеханических преобразователей в процессе эксплуатации, в составе рабочих комплексов».

Работа отвечает требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения учёных степеней» ВАК Министерства науки и высшего образования РФ, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. №842 (п. 28), предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени доктора технических.

Зубков Юрий Валентинович заслуживает присвоения учёной степени доктора технических наук по специальности 05.09.01- «Электромеханика и электрические аппараты».

Официальный оппонент, доцент, доктор технических наук (05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты), заведующий кафедрой «Теоретиче-

ские основы электротехники» Энергетического факультета Политехнического института Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)»

42

Ганджа Сергей Анатольевич

Служебный адрес: 454080, г. Челябинск, пр. Ленина 76, ауд.267,
кафедра «Теоретические основы электротехники»,
Телефон: +7 (351) 267-91-51
Факс: +7 (351) 267-99-00
E-mail: gandja_sa@mail.ru

Подпись Ганджи С.А. заверяю:

Верно
Ведущий документовед
О.В. Грицина

