

Отзыв  
официального оппонента Беспалова В.Я.  
на диссертационную работу 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»

Диссертация состоит из введения, восьми глав, заключения, списка литературы, приложений: включает 364 страницы основного текста, 169 рисунков, 34 таблицы, 175 наименований списка литературы. Содержание диссертации соответствует сформулированным целям и задачам исследования.

### **1. Актуальность темы**

В связи с необходимостью разработки нового подхода к процессам анализа и проектирования автономных электромашинных источников возник интерес к исследованию бесщеточных электрических генераторов (БЭГ), являющихся наиболее перспективными в различных применениях ввиду их высокой надежности, хороших регулировочных свойств, удельных массогабаритных и энергетических показателей. Это обусловлено весьма большим разнообразием существующих в настоящее время и перспективных конструкций, электрических схем таких генераторов. Алгоритмы синтеза и анализа могут существенно отличаться при создании машин, принадлежащих разным по конструкции и схемному решению бесщеточным генераторам. Более всего это разнообразие выражено у автономных генераторов энергетических установок малой и средней мощности, что объясняется широким спектром их использования: космос, авиация, автомобильный, железнодорожный, судовой транспорт, малая гидроэнергетика, ветроэлектростанции и многое другое. Каждое из перечисленных применений накладывает свои специфические требования и ограничения к анализу и синтезу овых образцов бесщеточных генераторов.

В связи с изложенным, разработка научных основ моделирования и оптимизационного проектирования бесщеточных генераторов малой и средней мощности, обеспечивающих улучшение массогабаритных и энергетических показателей, повышение технологичности, является принципиальной научной проблемой, имеющей важное народнохозяйственное значение, а тему диссертации, посвященной разработке новой методологии анализа и синтеза бесщеточных генераторов, следует признать актуальной.

## 2. Основные результаты и научная новизна

1. Один из элементов новизны предложенной методологии связан с разработкой концепции анализа бесщеточных генераторов автономных энергетических установок, включающей классификацию вентильных БЭГ, выполненных на основе электрических машин переменного тока. В ходе анализа рассмотрены схемные и конструктивные решения асинхронных и синхронных генераторов, используемых в автономных системах электроснабжения, определены их достоинства и недостатки, выявлены пути совершенствования с целью улучшения массогабаритных, энергетических и эксплуатационных показателей.

Другой составляющей предложенной концепции является анализ вариантов использования БЭГ в авиации, автомобильном, железнодорожном и водном транспорте, экологически чистом производстве электрической энергии из возобновляемых источников, сельском хозяйстве, разведке нефтяных и газовых запасов, оборонной промышленности с учетом особенностей схемного и конструктивного построения БЭГ.

Диссидентом сделан обзор современного состояния теории бесщеточных электрических генераторов, в ходе которого обозначены проблемы, имеющие первостепенное значение для развития научно-методических основ их анализа и синтеза: расчет параметров с учетом реальной геометрии магнитопроводов, насыщения магнитной системы,ложения магнитных полей в общем сердечнике; математическое описание вентильных БЭГ с учетом процессов коммутации в установленных и переходных режимах работы; оптимальное проектирование с уч-

том множества внешних факторов, определяемых областью применения и ограничениями на величины электрических и магнитных нагрузок.

В результате проведенных исследований сделано заключение о том, что наиболее рациональными с точки зрения массогабаритных показателей, технологичности и надежности, 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. Для разработки математической модели БЭГ перспективным является применение вариационного принципа, который используется для исследования динамики системы «генератор-вентильный преобразователь». Определение параметров БЭГ при современном состоянии развития численных методов расчета физических полей целесообразно проводить с использованием программных комплексов конечно-элементного моделирования.

2. Новые интересные результаты получены при реализации структурного и параметрического синтеза роторов БЭГ с интегрированным возбуждением на основе численного расчета магнитного поля с использованием графоаналитических методов. В качестве критерия была выбрана величина индукции в зазоре основного генератора. Рассчитаны индуктивности рассеяния возбудителя, мощность управления (возбуждения), МДС возбуждения основного генератора, определен гармонический состав магнитных полей возбудителя и генератора. Показано, что явнополюсная конструкция ротора имеет преимущества перед неявнополюсной за счет большей МДС генератора при неизменной величине тока обмотки ротора и качественного улучшения гармонического состава поля реакции якоря возбудителя.

Исследовано влияние укорочения шага электрически совмещенной обмотки ротора на эффективность преобразования энергии в контуре «возбудитель-основной генератор». В диссертации доказано, что применение трехфазных электрически совмещенных обмоток ротора с шагом, укороченным на 2/3 в поле возбудителя, позволяет увеличить коэффициент усиления по мощности возбудителя и

МДС возбуждения основного генератора, уменьшить мощность возбуждения и расход обмоточного провода за счет сокращения длины и вылета лобовых частей обмотки.

Методом численного моделирования магнитного поля решена задача определения коэффициентов дифференциального рассеяния электрически совмещенных обмоток ротора и их зависимости от степени насыщения магнитной системы. Анализ результатов решения показал, что с ростом насыщения рассеяние по коронкам зубцов ротора увеличивается по экспоненциальному закону, остальные составляющие потока рассеяния практически не зависят от насыщения.

В результате выполненных исследований было сделано заключение о том, что электрически совмещенные обмотки при числе фаз ротора 3 и 5 рекомендуется

выполнять с укорочением на  $\frac{7}{9}$  и  $\frac{4}{5}$  в магнитном поле возбудителя соответственно.

Такие обмотки характеризуются малым вылетом лобовых частей, что обеспечивает их надежное крепление на роторе, позволяют повысить линейную токовую нагрузку, МДС возбуждения и индукцию в зазоре генератора без увеличения средней плотности тока в между полюсном окне ротора. Первая гармоника индукции поля возбуждения основного генератора при одинаковой МДС имеет большее значение у явнополюсной конструкции. В результате МДС возбуждения генератора возрастает до 70% относительно неявнополюсной конструкции за счет увеличения линейной нагрузки ротора и улучшения формы поля возбуждения основного генератора.

3. Поставлена и решена задача создания математических моделей для численного расчета магнитного поля БЭГ с электромагнитным и магнитоэлектрическим возбуждением. Посредством введения функций скалярного и векторного магнитных потенциалов удалось сократить число неизвестных в системе уравнений поля и упростить процесс нахождения решения. Разработанные для этого математические модели отличаются от известных учетом физических свойств магнитопроводов и источников поля в БЭГ с возбуждением от постоянных магнитов (ПМ), реальной геометрии зубцово-пазовой зоны, фактического распределения токов по

фазам и пазам, асимметрии статора относительно поля основной машины, размещения нескольких разнополюсных электрических машин в общем магнитопроводе для генераторов с интегрированным возбуждением.

В результате решения 2D задачи для БЭГ с интегрированным возбудителем определены коэффициенты формы магнитного поля возбуждения и ЭДС, полюсного перекрытия и реакции якоря, параметры возбудителя и основного генератора и их зависимости от степени насыщения магнитной системы. Аналогичные показатели были найдены для БЭГ с магнитоэлектрическим возбуждением. Кроме этого, решение 3D задачи распределения магнитного поля в активной зоне «коротких» БЭГ с магнитоэлектрическим возбуждением (с относительной длиной 0,3) позволило установить значения коэффициентов бокового и торцового рассеяния ПМ и их вариацию при изменении относительной длины машины, что позволяет адекватно оценить величину полезного потока при синтезе таких машин.

В процессе решения поставленных задач были определены потокосцепления, собственные и взаимные индуктивности обмоток БЭГ с учетом существования двух магнитных полей в общем магнитопроводе, необходимые для решения в дальнейшем задач имитационного моделирования и оптимального проектирования. Решение 3D задачи распределения магнитного поля в активной зоне «коротких» БЭГ с магнитоэлектрическим возбуждением (с относительной длиной 0,4) позволило установить, что значения потоков бокового и торцового рассеяния ПМ оставляют величину, превышающую в некоторых случаях 70% от полезного потока. Полученные значения коэффициента рассеяния от относительной длины машины должны учитываться при оптимизационном проектировании.

4. Отметим также полученную автором функциональные математические модели генераторов с интегрированным возбудителем и магнитоэлектрическим возбуждением, основанные на аналогии вентильного генератора с коллекторной машиной постоянного тока при допущениях о мгновенной коммутации вентилей выпрямителей. В этих моделях возбудитель и генератор эквивалентны коллекторным машинам постоянного тока, щетки которых смещаются в зависимости от величины нагрузки. Выведенные уравнения электрического и электромеханического раз-

новесия позволяют анализировать установившиеся и переходные процессы в электромеханической системе.

Получены уравнения БЭГ электромагнитного и магнитоэлектрического возбуждения в собственных (фазных) осях координат и осях  $d, q$ . С использованием уравнений осуществлено имитационное моделирование электромагнитных процессов БЭГ в составе автономной системы электроснабжения транспортного средства и ветроэнергетической установки. В моделях использовались значения параметров БЭГ, полученные экспериментально, либо в результате численного расчета поля. Проведенный анализ динамики обоих типов генераторов показал, что как БЭГ с интегрированным возбудителем, так и БЭГ с постоянными магнитами являются практически безынерционными звенями по отношению к возмущающему воздействию (скажем нагрузки) и обладают малой электромагнитной постоянной времени. Рассчитанные по моделям характеристики БЭГ с интегрированным возбудителем относительно управляющего воздействия (изменение напряжения возбуждения) показали, что время переходного процесса при этом составляет около 30 мс, что характеризует генератор по отношению к данному виду воздействия как апериодическое звено второго порядка. Разработанные математические модели БЭГ в собственных фазных осях координат и осях  $d, q$  позволяют исследовать электромагнитные процессы системы электроснабжения, в состав которой входит БЭГ.

5. Разработан новый метод синтеза бесконтактных электрических генераторов с возбуждением от ПМ. В ходе проектирования осуществлен сравнительный анализ четырех типов индукторов БЭГ. Сущность метода заключается в определении такой структуры индуктора, которая при ограниченном объеме ПМ обеспечивает максимум выходной мощности генератора при удовлетворении ограничительных требований технического задания. Показано, что максимум мощности БЭГ достигается при оптимизации формы ПМ и изменении коэффициента полюсного перекрытия. Данный метод может быть использован для разработки БЭГ с ПМ с другими магнитными структурами индукторов и при проектировании многополюсных генераторов с магнитоэлектрическим возбуждением для систем генерирования электроэнергии в ветроэнергетике и малой гидроэнергетике в случаях, когда тре-

буется увеличить выходную мощность генератора при ограниченном объеме магнитов или уменьшить стоимость индуктора при заданном значении мощности.

6. Проведена классификация процедур решения многоцелевых оптимизационных задач. Доказано, что для осуществления оптимального поиска БЭГ рационально использовать ЛП- поиск методом зондирования пространства параметров точками равномерно распределенной последовательности. Разработан и программно реализован алгоритм поиска оптимального варианта бесщеточного генератора с интегрированным возбуждением, позволяющий осуществлять синтез генератора в пространстве дискретно изменяющихся параметров. Проведена серия оптимизационных расчетов генератора с интегрированным возбудителем. Программный комплекс эффективно работает в многомерных многоцелевых 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 мощности.

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

### 3. Практическая и теоретическая значимость результатов

В диссертационном исследовании получены важные теоретические и прикладные результаты. С теоретической точки зрения в диссертации представлены результаты разработки новых методов моделирования магнитного поля бесщеточных электрических генераторов. Основное отличие разработанных методов от существующих заключается в учете физических явлений при перемагничивании сердечников БЭГ полями разной частоты в широком спектре варьирования температуры как магнитомягких, так и магнитотвердых ферромагнитных материалов. Известно, что существующие методы расчета магнитной цепи электрических машин

с магнитным совмещением адекватны реальным физическим процессам в электротехнической стали лишь при фиксированных значениях частоты перемагничивания и рабочей температуры. При изменении частоты или температуры, они становятся неадекватными. В диссертации впервые разработаны математические модели БЭГ с электромагнитным и магнитоэлектрическим возбуждением, позволяющие анализировать электромагнитные процессы при изменении частоты и температуры в широком диапазоне.

Важным теоретическим и практическим достижением является констатация того факта, что БЭГ с интегрированным возбуждением и с возбуждением от ПМ являются с точки зрения формы отклика на скачкообразные изменения нагрузки практически безынерционным звеном, а на изменение возбуждения - апериодическим звеном второго порядка. Указаны конкретные значения постоянных времени различных типов БЭГ по управляющему и возмущающему воздействиям.

Важное практическое значение имеет разработанный в диссертации расчетно-оптимизационный комплекс, позволяющий осуществлять поиск оптимального варианта БЭГ в интерактивном режиме и последующий анализ установившихся и переходных электромагнитных процессов оптимального варианта генератора.

Многие результаты диссертационной работы внедрены на предприятиях Российской Федерации. Изготовлены, испытаны и поставлены заказчикам:

- серия ветрогенераторов с магнитоэлектрическим возбуждением и прямым приводом мощностью 1, 2 и 5 кВт для энергоснабжения автономных объектов (ООО «Тольяттинский трансформатор», г. Тольятти);
- бесщеточные электрические генераторы с интегрированным возбуждением для питания бортовой сети специальных транспортных средств на гусеничном ходу (АО «Барнаултрансмаш», г. Барнаул);
- электромеханические преобразователи с магнитоэлектрическим возбуждением мощностью 80 и 250 кВт для запуска газотурбинных двигателей НК-36, 38СТ; НК-12,14 и их модификаций в составе газотурбинных установок для газоперекачивающих агрегатов (ПАО «ОДК Кузнецov», г. Самара), (АО «Казанское моторостроительное производственное объединение», г. Казань).

- стартер-генератор малоразмерных газотурбинных двигателей (АО Научно-производственное объединение «Опытно-конструкторское бюро имени М.П. Симонова», г. Казань).

Результаты диссертационной работы, изложенные автором в учебно-методических пособиях, используются в учебном процессе Самарского государственного технического университета.

#### 4. Достоверность результатов работы

Достоверность полученных в диссертации математических моделей, аналитических и численных решений подтверждается их соответствием реальным физическим процессам, протекающим в бесщеточных генераторах, применением математически обоснованных методов к решению поставленных задач, верификацией полученных теоретических результатов экспериментом. Показано, что они качественно и количественно согласуются с результатами экспериментальных исследований, а также с численными и аналитическими решениями других авторов.

#### 5. Апробация результатов и публикации

Все основные положения диссертации были апробированы на 8 Международных и Всероссийских конференциях. Содержание диссертации опубликовано в 35 работах, из которых 15 статей в рецензируемых журналах из Перечня ВАК. Издана 1 монография. Получены 3 авторских свидетельства на изобретения.

Диссертация и автореферат написаны грамотным научным языком. Автореферат и публикации отражают основное содержание диссертации.

#### 6. Связь диссертации с государственными программами научных исследований

Исследования проводились 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. кафедрой «Электромеханика и автомобильное электрооборудование» Самарского Государственного технического университета совместно с НПО «Шторм»

#### 7. Замечания по содержанию и оформлению

Недостатков, ставящих под сомнение какой-либо из результатов работы, не обнаружено. По содержанию и оформлению имеются следующие вопросы и замечания:

1. Насколько обосновано решение магнитостатической задачи при моделировании магнитного поля машины переменного тока?
2. В главе 2 приводятся результаты численного моделирования поля совмещенных генераторов, но ни размеры, ни электромагнитные нагрузки машин не указаны. Насколько обобщенные выводы, сделанные по результатам моделирования этого частного случая, применимы для других генераторов, имеющих отличные мощности, размеры, значения токов и т.д.?
3. Геометрическая модель генератора с интегрированным возбудителем при расчете магнитного поля методом конечных элементов выбрана двумерной (гл.3). В работе не исследованы поля торцевой зоны машины и соответствующие им интегральные параметры (индуктивности, взаимные индуктивности и т.д.).
4. В третьей главе при описании электромагнитного поля, все уравнения в теоретической части (выражения 3.1 – 3.34) записаны в полярных координатах, а при численном моделировании (выражения 3.54 и далее) автор пользуется декартовыми координатами. Не ясно с чем это связано?
5. На некоторых рисунках, например, 3.5, 3.24, 3.29, 8.16, 8.18 и др., плохо читаются надписи.

#### 8. Заключение

Диссертация Зубкова Ю.В. «Методология анализа и синтеза бесщеточных генераторов малой и средней мощности для автономных энергетических установок», представленная на соискание ученой степени доктора технических наук является за-

конченной научной работой, в которой разработаны научно-методические основы моделирования и оптимального проектирования бесщелочных генераторов малой и средней мощности с электромагнитным и магнитоэлектрическим возбуждением для автономных энергетических установок с новыми электрическими и конструктивными схемами. Опубликованные работы и автореферат отражают основное содержание диссертации. Диссертация соответствует паспорту специальности 05.09.01 - Электромеханика и электрические аппараты и 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).

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

Официальный оппонент:

профессор кафедры «Электромеханика, электрические и  
электронные аппараты» ФГБОУ ВО

Научно-исследовательский университет

«Московский энергетический институт»,

доктор технических наук, профессор

В.Я. Беспалов

управления по  
соналом

Н.Г. Савин

Подпись профессора В.Я. Беспалова заверяю

Беспалов Виктор Яков

Служебный адрес: 111250, Россия, Москва, Е-250, Красноказарменная ул. 14,

кафедра «Электромеханика, электрические и электронные аппараты»

Телефон: (095)-362.7189, (095)-362.7269

Факс: (095)-362.7269, E-mail: [em@mpei.ru](mailto:em@mpei.ru)