

Отзыв

**официального оппонента на диссертационную работу
Ануфриева Андрея Сергеевича
«Повышение эффективности магнитоэлектрических генераторов малой мощности для ветроэнергетических установок», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности
05.09.01 «Электромеханика и электрические аппараты».**

Актуальность темы. Диссертационная работа Ануфриева А.С. посвящена проблеме повышения энергоэффективности магнитоэлектрических генераторов (МЭГ) малой мощности для ветроэнергетических установок (ВЭУ).

Развитие малой, децентрализованной энергетики является одной из приоритетных задач Российской Федерации. Существует множество труднодоступных объектов небольшой мощности для которых нерентабельно строить линии электропередач и автономные ВЭУ с МЭГ являются наиболее эффективным решением для обеспечения их энергоснабжения. Особенностью работы МЭГ в данном случае, является то, что он должен обеспечивать требуемое количество и качество электроэнергии при широком диапазоне изменения ветровой и электрической нагрузки. Большую часть своей работы генератор эксплуатируется при частоте и мощности существенно отличающихся от номинальных. Поэтому задача повышения энергоэффективности генератора в «неноминальных» режимах является актуальной и важной.

По предмету исследования и решаемым задачам диссертация соответствует специальности 05.09.01- «Электромеханика и электрические аппараты» в части:

- разработки научных основ создания и совершенствования электрических, электромеханических преобразователей и электрических аппаратов;
- разработки подходов, методов, алгоритмов и программ, обеспечивающих проектирование, надежность, контроль и диагностику функционирования электрических, электромеханических преобразователей и электрических аппаратов в процессе эксплуатации, в составе рабочих комплексов.

Новизна исследований и полученных результатов:

– для МЭГ ВЭУ малой мощности расширяются и углубляются представления о принципах сравнительного анализа типов и конструкций генераторов, позволяющие выделить наиболее эффективное направление развития этих установок, основанное на применении методов многокритериальной оптимизации с использованием принципа Парето;

– разработанные имитационные модели системы синхронный генератор – нагрузка в комплексе ВЭУ с учетом геометрических, конструктивных особенностей генератора и диаграмм распределения скорости ветра. Данные имитационные модели позволяют анализ как стационарных, так и переходных процессов, протекающих в МЭГ;

– аналитическим методом и численной параметрической оптимизацией определено рациональное соотношение постоянных и переменных потерь в генераторе, обеспечивающее прирост выработки электроэнергии за счет более эффективного использования ВЭУ в «неноминальных» по частоте вращения и нагрузке режимах работы.

В первой главе на основе цитируемой литературы и собственных исследований автора, проведен анализ современного состояния теории и практики разработки генераторов, используемых в малой энергетике. Определены специфические требования к электрическим машинам маломощных генераторных установок. Выявлены нерешенные проблемы и перспективные задачи при создании генераторов, сформулированы основные задачи исследования, которые необходимо решить для достижения поставленной цели работы.

Во второй главе проведен анализ конструктивных схем роторов многополюсных синхронных машин с постоянными магнитами. Установлено, что одной из перспективных схем ротора является радиальная схема с магнитами, расположенными в пазах ротора.

Особенностью конструкции являются дополнительные потоки рассеяния, замыкаемые по мостикам насыщения ротора. Основной проблемой при расчете такой магнитной системы является выбор размеров насыщающихся мостиков и их геометрии. Если не решить эту задачу корректно, то магнитная система будет

вообще неработоспособной из-за короткого замыкания магнитов – потоки рассеивания будут больше полезного потока в зазоре. Решение этой задачи невозможно без применения численного моделирования магнитного поля.

Задача численного моделирования была поставлена и решена для плоскопараллельного поля, созданного постоянными магнитами (холостой ход), продольной и поперечной реакцией якоря (работа под нагрузкой). Для расчета поля в номинальном нагрузочном режиме была использована диаграмма Blondеля явнополюсной машины.

Предложенная математическая модель МЭГ в себе расчет магнитного поля численными методами совместно с анализом векторных диаграмм, что служит основой для оптимизационного проектирования и уточненных поверочных расчетов генератора.

В третьей главе проведено моделирование МЭГ с различными видами нагрузки в программной среде *Ansys Maxwell*. В ходе исследования были получены статические (внешние, угловые и токоскоростные) характеристики, сравнение которых с рассчитанными по теоретической модели и экспериментом показали расхождение не превышающее 8%.

Также в данной главе рассмотрены задачи анализа переходных процессов в МЭГ. Моделирование переходных процессов проводилось с целью определения исходных параметров для построения системы управления ВЭУ, а также системы защит.

В четвертой главе проанализированы закономерности изменения параметров генератора в зависимости от мощности и частоты вращения. В частности, определены функциональные зависимости потерь и КПД генератора при варьировании значений частоты вращения. На основании статистических данных распределения периодов средних значений скорости ветра произведен расчет прогнозируемого количества выработки электроэнергии для различных ВЭУ.

Установлено, что, несмотря на то, что средняя скорость ветра, превышающая 8 м/с составляет по времени не более 37%, годовая выработка электроэнергии ВЭУ при этом, превышает 84,1%. Следовательно, для получения прироста

выработки электроэнергии необходимо изменить соотношение постоянных и переменных потерь в генераторе таким образом, чтобы на высоких скоростях КПД генератора оставался на максимальном уровне.

Для того чтобы максимум КПД был в зоне максимальных нагрузок и частот вращения, необходимо обеспечить снижение доли переменных потерь в номинальном режиме в общей сумме потерь, за счет увеличения объема меди в пазу (снижения плотности тока), что, естественно, приведет к увеличению доли магнитных потерь.

Расчеты, проведенные автором, показывают, что только за счет перераспределения постоянных и переменных потерь при их неизменной сумме для номинального режима, годовая выработка электроэнергии ВЭУ возрастает не менее, чем на 3,5%.

Пятая глава работы посвящена результатам практической реализации и экспериментальным исследованиям разработанных генераторов. По результатам исследований характеристик спроектированных и изготовленных генераторов можно констатировать, что они по основным выходным параметрам соответствуют, а по некоторым превосходят, аналоги отечественных и зарубежных производителей.

Энергоэффективность разработанных генераторов обеспечивается не только значением максимального КПД, но и расширением зоны высоких значений КПД при изменении их частоты вращения.

Результаты экспериментов подтвердили правильность основных теоретических положений, адекватность разработанной математической модели генератора.

Таким образом, цель, поставленная в работе, автором достигнута.

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

1. Методом многокритериальной структурной оптимизации, основанном на принципе доминирования Парето, определены объективные количественные

параметры сравнения для различных типов генераторов, применяемых в энергоустановках с нестабильной частотой вращения и отдаваемой мощностью.

2. Разработана имитационная компьютерная модель, предназначенная для оптимизационного расчета, отличающаяся от известных, совмещением численного расчета магнитного поля с анализом векторных диаграмм рабочего режима.

3. Аналитическим методом и численной параметрической оптимизацией определено рациональное соотношение постоянных и переменных потерь в генераторе, обеспечивающее прирост выработки электроэнергии за счет более эффективного использования ВЭУ в «неноминальных» по частоте вращения и нагрузке режимах работы.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций.

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 экспериментальном образце.

Значимость для науки и практики выводов и рекомендаций.

Результаты работы вносят вклад в развитие теории и практики электромеханики, в частности в совершенствование генераторов для ветроэнергетических установок малой мощности и развитие теории электрогенераторов с постоянными магнитами.

Основные положения, выводы и рекомендации нашли применение в виде компьютерных моделей, методик расчета и рекомендаций при проектировании и изготовлении синхронных генераторов ВЭУ с постоянными магнитами, что подтверждено соответствующим Актом использования результатов работы.

Диссертация имеет внутреннее единство, написана с использованием правильных технических терминов.

Основные результаты диссертации опубликованы в 10 печатных работах, включая 4 статьи в изданиях по списку ВАК, одной статьи, индексируемой в базе *Scopus*. 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 кандидатских диссертаций. Содержание автореферата соответствует диссертации.

По работе имеются следующие замечания:

1. При численном моделировании магнитного поля генератора задача ставится и решается в двумерной постановке. Современные комплексы позволяют решать подобные задачи в трехмерной постановке. Это позволило бы повысить точность расчетов.

2. Неясно, для чего моделировалось однофазное короткое замыкание для случая, когда напряжение в момент замыкания проходит через максимум (рис.3.11)? Из теории известно, что ударные токи максимальны при прохождении напряжения через ноль, что и подтверждено на диаграмме рис.3.12.

3. Стр. 85. Аэродинамические потери обычно пропорциональны кубу частоты, а в диссертации они зависят от квадрата частоты.

4. По таблице 5.3. Насколько правильным является сравнение удельной массы машины с приводом и без привода?

5. В работе были выполнены расчеты магнитного поля реакция якоря, при этом анализ потерь на вихревые токи в постоянных магнитах от пространственных (зубцовых) и временных (от инвертора) гармоник не представлен.


6. В исследуемой магнитной системе параметры машины в значительной степени зависят от насыщаемых участков ротора. Имело смысл дать кривые зависимости характеристик машины от толщины насыщаемых участков. Тем более в диссертации указано, что подобные исследования соискателем были проведены.

7. В диссертации присутствует ряд незначительных оформительских ошибок и опечаток, в том числе в оформлении таблиц.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Указанные замечания не снижают ценности выполненной работы. В целом диссертация Ануфриева А.С. представляет законченную научно-квалификационную работу, в которой на основании выполненных автором исследований содержится решение научной задачи, имеющей важное значение для электромеханики, и соответствует требованиям п.9 Положения о присуждении ученых степеней, предъявляемым к кандидатской диссертации в области технических наук, а Ануфриев Андрей Сергеевич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.01 «Электромеханика и электрические аппараты».

Официальный оппонент, доцент, ведущий научный сотрудник кафедры «Электромеханика» ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет», к.т.н.



Вавилов Вячеслав Евгеньевич

Ф.И.О., представившего отзыв: Вавилов Вячеслав Евгеньевич

Почтовый адрес организации: 450008, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. К. Маркса, д. 12.

Адрес электронной почты: vavilovv@ugatu.su

Наименование организации: ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет», кафедра «Электромеханика»

Тел. 8(347)273-77-87

Дата составления отзыва: 01.11.2018 г.