

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 совершенствования энергетических и эксплуатационных характеристик генераторов малой мощности для ветроэнергетических установок (ВЭУ).

ВЭУ малой мощности, по цене производимой электроэнергии с учетом капитальных затрат, эксплуатационных и амортизационных расходов, существенно уступают традиционным энергосистемам, если речь идет о районах с развитой структурой энергосетей. В то же время существует немало объектов электропотребления небольшой мощности, для которых нерентабельно строить линии электропередач и поэтому автономные ВЭУ с генераторами на постоянных магнитах становятся разумной альтернативой централизованным системам электроснабжения.

Спецификой работы синхронного генератора (СГ) с постоянными магнитами, который чаще всего применяется для таких систем ВЭУ, является то, что он должен обеспечивать требуемое количество и качество электроэнергии в широком диапазоне изменения ветровой нагрузки. Большую часть своей работы генератор эксплуатируется при частоте и мощности, отличающихся от номинальных. Задача повышения энергоэффективности генератора в «неноминальных» режимах остается актуальной.

Так же до настоящего времени не разработано достаточно полных и точных математических моделей и методов проектирования СГ с постоянными магнитами, учитывающих особенности их функционирования в комплексах ВЭУ. Поэтому, научный анализ и обоснованный выбор конструктивной схемы

специализированного СГ, основанный на структурной оптимизации, является актуальной научной и практической задачей.

В связи с изложенным, тема диссертации Ануфриева А.С., посвященная повышению эффективности магнитоэлектрических генераторов малой мощности для ветроэнергетических установок, безусловно, актуальна и соответствует специальности 05.09.01- «Электромеханика и электрические аппараты».

Новизна исследований и полученных результатов

Научная новизна определяется тем, что в работе для электрических генераторов 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; разработаны имитационные модели системы СГ с постоянными магнитами – нагрузка с учетом уточненной математической модели при работе в комплексе ВЭУ; определены рациональные соотношения постоянных и переменных потерь в генераторах, отличающихся высокими значениями энергоэффективности в номинальном режиме и в режимах изменяющихся частоты вращения и отдаваемой мощности.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, определены объект и предмет исследования. Сформулирована цель исследования, приведены основные положения, выносимые на защиту, их научная новизна, приведены основные результаты работы, их теоретическая и практическая значимость.

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.

Методом многокритериальной структурной оптимизации проведен анализ типов и конструкций генераторов и на его основе по численному обобщенному критерию определен тип генератора, имеющий в формулировке Парето лучший исход- многополюсный синхронный генератор прямого привода с возбуждением от постоянных магнитов.

На основе анализа конструкции и режимов работы выявлены специфичные особенности такого типа генераторов, проблемы синтеза оптимальных конструкций, определения характеристик в неноминальных режимах работы, сформулированы основные задачи исследования, которые необходимо решить для достижения поставленной цели работы, а именно-повышение энергетической эффективности синхронных генераторов малой мощности с возбуждением от постоянных магнитов за счет совершенствования алгоритмов расчетов, методов анализа и оптимизационного проектирования.

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

Для этого типа генератора была разработана математическая модель для численного расчета магнитного поля машины. Предложенная математическая модель СГ с постоянными магнитами сочетает в себе расчет магнитного поля численными методами совместно с анализом векторных диаграмм и служит основой для оптимизационного проектирования и уточненных поверочных расчетов генератора.

На основании проведенного моделирования определены основные параметры генератора, рассчитаны уточненные значения геометрических размеров и обмоточных данных, спроектирован и изготовлен опытный образец, результаты испытаний которого приведены в гл.5.

В третья глава посвящена моделированию генераторной установки с различными видами нагрузки в программной среде *Ansys Maxwell*. Внешняя электрическая цепь набиралась из пассивных (резисторы, конденсаторы, индуктивности) элементов, значения которых варьировались. В ходе исследования были получены статические (внешние, угловые и токоскоростные) характеристики. Отличительной особенностью угловых характеристик исследуемого генератора от традиционных явнополюсных синхронных машин является то, что реактивный момент M_p имеет обратную полярность из-за того, что $x_q > x_d$.

Следствием этого является смещение точки максимального момента M_m в зону угла $\theta > 90^\circ$.

Для построения системы автоматического управления ВЭУ необходимо в качестве исходных параметров иметь достоверные динамические характеристики генератора. С этой целью автором были исследованы динамические процессы, происходящие в системе при сбросе и набросе нагрузки, а также в режимах однофазных и трехфазных коротких замыканий.

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. Приведены результаты исследования мощности и частоты вращения трех типов ветроколеса от скорости ветра. На основании статистических данных распределения периодов средних значений скорости ветра произведен расчет прогнозируемого количества выработки электроэнергии для каждой из этих ВЭУ.

Анализ показал, 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%. Поэтому для получения прироста выработки электроэнергии целесообразно изменить соотношение постоянных и переменных потерь в генераторе таким образом, чтобы на высоких скоростях ветра КПД генератора оставался на максимальном уровне. Для того чтобы максимум КПД находился в зоне больших нагрузок и больших частот вращения необходимо, чтобы отношение доли переменных потерь к постоянным было меньше единицы. Показано, 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%.

Автором доказывается, что «медные» машины (машины с большим объемом меди у которых за счет этого преобладают постоянные потери над переменными) для систем с нестабильной частотой вращения и отдаваемой мощностью, предпочтительнее по энергоэффективности «стальных» (машин с преобладанием электрических потерь).

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.

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

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

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

1. Методом многокритериальной структурной оптимизации определены объективные количественные параметры сравнения для различных типов генераторов, применяемых в энергоустановках с нестабильной частотой вращения и отдаваемой мощностью. Доказано, что для тихоходных ВЭУ с ротором Дарье оптимальным является использование многополюсных генераторов прямого привода с возбуждением от постоянных магнитов.
2. Математическая и имитационная модели СГ с возбуждением от постоянных магнитов, отличающиеся от известных, совмещением численного расчета магнитного поля с анализом векторных диаграмм рабочего режима, учитывающая особенности магнитной системы ротора со вставными магнитами и насыщающимися мостиками, а также действие продольной иоперечной реакции якоря при работе под нагрузкой.
3. Доказано, что основную долю в годовой выработке электроэнергии, до 84%, ВЭУ обеспечивает в периоды времени, когда скорость ветра превышает 8 м/с. Поэтому, при проектировании генератора целесообразно обеспечить максимум КПД для частот вращения ротора, соответствующих таким значениям скорости ветра. Для повышения энергоэффективности генератор следует проектировать так, чтобы точка максимума КПД смешалась в зону максимальных нагрузок и частот вращения.

4. Впервые аналитическим методом и численной параметрической оптимизацией определены рациональные соотношения постоянных и переменных потерь в генераторе, обеспечивающие прирост выработки электроэнергии ВЭУ за счет более эффективного ее использования в «неноминальных» режимах по частоте вращения и нагрузки. 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). Только за счет этого годовая выработка электроэнергии ВЭУ возрастает не менее чем на 3,5%.

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 магнитоэлектрических синхронных генераторов локальных систем электроснабжения с использованием ветроэнергетических установок.

Основные положения, выводы и рекомендации нашли применение в виде математических моделей, методик расчета и рекомендаций при проектировании и изготовлении на НПО «Штурм» г. Самара, синхронных генераторов ВЭУ с постоянными магнитами серии БРИД четырех типоразмеров с номинальной мощностью 450, 1000, 2000 и 8000 Вт, что подтверждено соответствующим Актом использования результатов работы.

Диссертация имеет внутреннее единство, написана с использованием правильных технических терминов. Рисунки выполнены с соблюдением стандартов. Основные результаты диссертации опубликованы в 10 печатных работах, включая

4 статьи в изданиях по списку ВАК, одной статьи, индексированной 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, прошли апробацию на конференциях. Содержание автореферата соответствует диссертации.

По работе имеются следующие замечания:

1. Векторные диаграммы, в том числе, синхронных генераторов с постоянными магнитами (гл. 2), справедливы для основных гармонических. В то же время отмечается наличие высших гармонических поля. Спектральный анализа был выполнен, но погрешность векторной диаграммы не оценена.
2. Целью работы принято повышение энергетической эффективности генераторов, в том числе, за счет совершенствования методов оптимизационного проектирования. При выборе конструкции генератора со вставными магнитами отмечается сложность выбора размеров насыщающихся мостиков, существенно влияющих на потоки рассеяния. Однако оптимизационное проектирование этих мостиков на основе анонсированного применения методов численного моделирования магнитного поля (стр. 43, 55) не выполнено.
3. При выполнении анализа динамических режимов генератора с постоянными магнитами NdFeB, обладающими электропроводностью, не учтено наведение вихревых токов в массиве магнитов и возникающих потерь.
4. Генераторы ветроэнергетических установок работают в разных климатических условиях. Однако тепловое состояние генераторов рассмотрено упрощено, не смотря на то, что магниты NdFeB на роторе имеют магнитные свойства, зависящие от температуры.
5. Сопоставление эффективности «медных» и «стальных» конструкций ветро-генераторов нужно проводить не только с учетом дополнительной выработки электроэнергии на 3,5%, но и с учетом стоимостных показателей меди и электротехнической стали, сложности изменения конструкции.
6. Текст диссертации содержит отдельные опечатки и неточности.

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 проблемы, 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, заведующий кафедрой «Электромеханика» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» (ИГЭУ), д.т.н., профессор

[REDACTED] Казаков Юрий Борисович

Подпись Казакова Юрия Борисовича заверяю:
Ученый секретарь Ученого совета ИГЭУ [REDACTED]

[REDACTED] Ниряева Ольга Алексеевна

Ф.И.О., представившего отзыв: Казаков Юрий Борисович

Почтовый адрес организации: 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34.

Адрес электронной почты: E-mail: elmash@em.ispu.ru

Наименование организации: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кафедра "Электромеханика"

Тел. 8(4932)269706

Дата составления отзыва: «25 октября 2018 г.