

Отзыв

официального оппонента доктора технических наук Казакова Юрия Борисовича
на диссертационную работу **Котова Антона Андреевича**
**«Проектирование и анализ асинхронизированного синхронного генератора для
ветроэнергетических установок большой мощности»**,
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.09.01- Электромеханика и электрические аппараты

Структура диссертационной работы общепринятая, имеет четкое логическое построение, состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка (157 наименований), приложений. Диссертация изложена на 138 страницах основного текста, содержит 77 иллюстраций, 104 аналитических выражения, 5 таблиц. По диссертационной работе сделаны выводы, представляющие результаты работы, рекомендации их практического применения и перспективы развития темы. Диссертационная работа изложена логичным, аргументированным и ясным языком, технически корректно оформлена.

Актуальность темы. Россия обладает одним из самых больших ветровых потенциалов в мире, поэтому развитие ветроэнергетики для РФ является актуальным, особенно в условиях повышенного внимания к использованию возобновляемых источников энергии. В 70-80 гг. XX века отечественная ветроэнергетика находилась на высоком уровне, но далее началось отставание по перспективным разработкам и применению современных ветроэнергетических установок. Развитие ветроэнергетики идет в направлении совершенствования конструкции ветрогенераторов, повышения мощности генераторов, мощность единичных ветрогенераторов уже достигает 10 МВт. Начинают применяться современные системы возбуждения генераторов, учитывающие переменную энергию ветра. В связи с этим диссертация Котова А.А., посвященная разработке асинхронизированных синхронных генераторов (АСГ) для ветроэнергетических установок большой мощности, безусловно, актуальна.

В первой главе рассматривается основная проблема ветроэнергетики, связанная с выработкой ветроэнергетическими установками электроэнергии стандартных параметров при изменении направления и интенсивности ветрового потока. В главе сделан обзор возможных вариантов исполнений ветрогенераторов, выбран базовый вариант на основе машины двойного питания, рассмотрены вопросы обеспечения бесконтактности токоподвода в ротор. Для тихоходных ветрогенераторов предложено новое решение по размещению накопителя электроэнергии в виде аккумуляторных батарей на роторе, которое дополнительно будет выполнять функцию бесконтактного токоподвода. Для быстроходных вариантов рассмотрено применение вращающихся трансформаторов и подвозбудителей.

Вторая глава посвящена описанию аналитической модели АСГ, разработке математических моделей для использования в оптимизации конструкции и параметров генераторов. В развитых моделях учтено ограничение габаритов ротора из-за наличия резонансных частот при разгоне ветрогенератора до номинальных скоростей и его работе в значительном диапазоне изменения скоростей вращения при изменении ветро-

вого потока. В основу математической модели, используемой при оптимизации конструкции ветрогенератора, положены относительные обобщенные переменные, которые определяются по размерам поперечного сечения генератора. Относительные обобщенные переменные для машин двойного питания выведены впервые и их использование в оптимизации конструкции АСГ является новым.

В третьей главе разработана подсистема синтеза конструкции АСГ на основе оптимизации обобщенных переменных. Особенностью оптимизации является разбиение ее на уровни, что позволяет разрабатывать различные варианты конструкции генераторов для разных проектных ситуаций. Такое представление оптимизационной задачи позволило придать гибкость проектной системе.

Четвертая глава рассматривает подсистему уточненного анализа спроектированной по результатам оптимизации конструкции генератора. Целесообразность разработки этой части проектной системы обусловлена использованием при оптимизации упрощенной аналитической модели АСГ с допущениями. Производство крупных генераторов сопровождается большими капитальными затратами и для уменьшения рисков неоправданных затрат перед разработкой рабочей конструкторской документации необходимо провести уточненный анализ полученных вариантов с применением развитых методов, на основе которых построены современные САЕ системы. Исследовательская часть проектной системы содержит уточненные анализы электромагнитного состояния на основе метода конечных элементов и теплового состояния на основе детализированных эквивалентных тепловых схем замещения. В результате создана гибкая проектная система, которая позволяет проводить оптимизацию конструкции АСГ и уточненный анализ полученных параметров и характеристик.

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

Научная новизна:

- Разработана математическая **модель**, связывающая конструкцию АСГ с параметрами генераторов, для использования в оптимизации АСГ, **отличающаяся** применением разработанных обобщенных переменных в относительных единицах для машин двойного питания.

- Разработана **методика** определения предельной длины ротора АСГ на начальном этапе проектирования генератора, **отличающаяся** исключением вариантов конструкции с наличием резонансных частот в расширенном диапазоне пусковых и рабочих скоростей вращения АСГ при изменении ветрового потока.

- Разработана **проектная система** асинхронизированного синхронного генератора, **отличающаяся** использованием решений связанной задачи синтеза оптимальной конструкции и уточненного анализа электромагнитного состояния АСГ на основе метода конечных элементов и анализа тепло-вентиляционного состояния на основе детализированных эквивалентных тепловых схем замещения.

Теоретическая значимость результатов диссертации заключается в дальнейшем развитии теории асинхронизированных синхронных ветрогенераторов на базе машин двойного питания, в выводе относительных обобщенных переменных для использования в оптимизации машин этого класса, в разработанных математических моделях и методиках расчета АСГ, в развитии методики проектирования АСГ.

Практическая ценность результатов заключается: в разработанной гибкой системе проектирования и уточненного анализа асинхронизированных синхронных генераторов большой мощности на базе машин двойного питания, позволяющей оперативно проводить разработку новых ветрогенераторов; в повышении эффективности оптимизации конструкции АСГ при использовании относительных обобщенных переменных АСГ; в программах расчета АСГ, позволяющих проводить уточненное комплексное моделирование и исследование электромагнитных, электромеханических, тепловых и вентиляционных процессов; в техническом решении встроить аккумуляторную батарею в индуктор ветроэнергетической установки, обеспечив бесконтактность токоподвода и накопление электроэнергии в период слабых воздушных потоков.

Рекомендации по дальнейшему использованию результатов работы

Полученные в диссертации результаты целесообразны к дальнейшему использованию в научно-исследовательских организациях при разработке новых перспективных асинхронизированных синхронных ветрогенераторов на основе машин двойного питания, а также в учебном процессе при подготовке инженеров электромехаников.

Достоверность результатов и выводов работы обоснована корректным использованием теории электромеханического преобразования энергии, математических методов моделирования электромагнитных и электромеханических процессов, численных методов расчетов физических полей на основе метода конечных элементов, детализированных эквивалентных схем замещения, методов нелинейного программирования с применением известных компьютерных систем моделирования. Проведенные теоретические исследования и расчеты на основе разработанных математических моделей, методик и программ подкреплены применением результатов при проектировании новых образцов генераторов для ветроэнергетики в АО «Русские электрические двигатели (Акт внедрения приведен в приложении к диссертации).

Полнота опубликования и апробации основных результатов диссертации.

Основные положения диссертации достаточно полно изложены в 8 работах, в том числе в 6 статьях в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК и Аттестационным советом УрФУ, из них 3 статьи в журналах, индексируемых в базе данных **Scopus**. Результаты исследований докладывались на Международных и Всероссийских конференциях. Результаты диссертации опубликованы с достаточной полнотой.

Соответствие паспорту специальности. Диссертация соответствует специальности 05.09.01 - Электромеханика и электрические аппараты и может быть рассмотрена в диссертационном совете УрФУ 05.01.02.

Автореферат отражает основное содержание диссертации, содержит выводы и полученные результаты проведенного исследования.

Вопросы и замечания по работе:

1. Особенности мощных асинхронизированных синхронных генераторов не вычленины в диссертации. Как полученные результаты для АСГ большой мощности применимы для АСГ малой и средней мощностей?

2. Научная новизна результатов диссертации автором сформулирована некорректно. (Техническое решение встроить аккумуляторную батарею в индуктор ветроэнергетической установки - это не научная новизна результатов, оно подчеркивает практическую значимость результатов. Тем более, что не приведены сведения о регистрации патентов.).

Формулировки научной новизны результатов содержатся в разделе диссертации «Положения, выносимые на защиту».

3. Математическая модель и методика расчета критических частот базируются на представлении ротора АСГ упрощенно в виде детали вращения, состоящей из трех цилиндрических участков. Для АСГ большой мощности их может быть больше.

4. Утверждение, что «АСГ позволяет без дополнительных ступеней преобразования непосредственно генерировать стандартную энергию при изменении частоты вращения ротора в широком диапазоне от 0 до сверхсинхронной скорости, что обеспечивает высокий КПД преобразования» (стр. 43) некорректно, так как при низких скоростях КПД АСГ снижается. Расчеты КПД не приведены, но известно, что при широком диапазоне изменения частоты вращения ротора ($\pm 30\%$, стр. 28) потери в роторе при большом скольжении возрастают пропорционально скольжению.

5. Эффективность применения аккумуляторной батареи на полюсах АСГ требует детальной оценки. Для АСГ больших мощностей аккумуляторные батареи будут громоздкими, не оценены их стоимость, масса, надежность, удобство обслуживания. При питании трехфазной обмотки ротора машины двойного питания постоянным током в синхронном режиме подключение аккумуляторной батареи будет приводить к тому, что одна фаза не будет задействована, что будет приводить к снижению мощности АСГ.

6. Для оценки магнитного состояния используется метод конечных элементов и плоская постановка задачи. Для теплового анализа применен метод детализированных эквивалентных схем замещения и объемная постановка задачи. Это два разных метода анализа, которые сложно связать друг с другом. Почему для обоих видов анализа (электромагнитного и теплового) не используется единая трехмерная модель электрической машины? Современные программные комплексы позволяют это сделать.

7. Некоторые результаты тепловых расчетов вызывают сомнения. Например, одинаковый процесс нагрева обмотки ротора и сердечника ротора АСГ (рис. 4.2.16, 4.2.17). Обычно в переходном режиме, режиме пуска обмотка нагревается быстрее сердечника. Или нагрев обмотки и сердечника ротора от температуры $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ до температуры в установившемся режиме $140\text{ }^{\circ}\text{C}$ за 1.5 сек.

8. Присутствуют недочеты в стилистике, формулировках и оформлении диссертации (на стр. 3 диссертации в последнем абзаце разный регистр; на рис. 1 автореферата и рис. 1.1.4.1 диссертации между двумя управляемыми выпрямителями по постоянному току показаны три линии; погрешности в схемах замещения на рис. 2.6.1, в рис. 2.6.2 и 2.6.3, в соотношениях 2.81, 2.82, 2.89, 2.90-2.93, в таблице 2.6.1; соотношения 2.79 и 2.82, 2.94 и 2.95 одинаковые. Расшифровка в формулах и сами формулы даны с погрешностями. Неверные утверждения: стр. 43. «При этом АСГ не потребляет реактивную энергию из сети и сам может быть источником реактивной мощности». Это справедливо для зоны III и не справедливо для зоны IV (см. рис. 1.3.3 диссертации или рис. 3 автореферата диссертации); стр. 83. «Активная энергия роторной цепи идет на добавление к механической мощности на валу». Механическая мощность на валу СГ задается со стороны ветроколеса, возникающий электромагнитный момент в СГ является тормозным.).

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

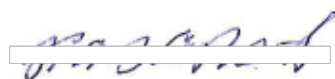
Заключение по диссертации

Диссертация Котова А.А. «Проектирование и анализ асинхронизированного синхронного генератора для ветроэнергетических установок большой мощности» является законченной научно-квалификационной работой, в которой решена актуальная задача разработки и уточненного анализа асинхронизированных генераторов на базе машин двойного питания, удовлетворяющих требованиям, предъявляемым к ветроэнергетическим установкам большой мощности.

Диссертационное исследование соответствует пунктам паспорта специальности 05.09.01 - Электромеханика и электрические аппараты (отрасль наук - технические): п.1 «Анализ и исследование явлений, лежащих в основе функционирования электрических, электромеханических преобразователей энергии и электрических аппаратов», п.3 «Разработка методов анализа и синтеза преобразователей электрической и механической энергии», п.5 «Разработка 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».

Диссертация соответствует требованиям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней УрФУ, а ее автор **Котов Антон Андреевич** заслуживает присуждения ученой степени **кандидата технических наук** по специальности 05.09.01- «Электромеханика и электрические аппараты».

Официальный оппонент, доктор технических наук (диссертация защищена по специальности 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты), профессор, заведующий кафедрой «Электромеханика» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»



Казakov Юрий Борисович

Дата составления отзыва «11» мая 2021 г.

153003, Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, ИГЭУ, корп. А, ауд. 158.

Телефон: +7 (4932) 269-706

E_mail: elmash@em.ispu.ru

Я, Казakov Юрий Борисович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Подпись д.т.н., профессора Казакoвa Ю.Б. заверяю:

Ученый секретарь ученого Совета ИГЭУ

«11» мая 2021 г.



Ширяева Ольга Алексеевна