

## **Отзыв официального оппонента**

на диссертационную работу

**Дубенского Александра Андреевича**

**«Сверхпроводниковый синхронный генератор с  
когтеобразными полюсами и постоянными магнитами для  
транспортных систем»,**

представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук  
по специальности 05.09.01 - «Электромеханика и электрические аппараты»

### **Актуальность работы**

Устройства на основе высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) обладают преимуществами по сравнению с традиционным оборудованием, а именно: низкими потерями, высокой токонесущей способностью, меньшими габаритными размерами, экологической безопасностью.

С ростом энергопотребления и необходимостью сокращения потерь мощности весьма актуальным является внедрение новых материалов и энергоэффективных технологий при проектировании и производстве электрооборудования (генераторов, трансформаторов и т. д.), в том числе с обмотками из ВТСП. Во всём мире ведутся разработки, связанные с применением сверхпроводящих материалов в электрических машинах, используемых как на стационарных объектах, так и на подвижных автономных.

Существующие электромеханические генераторы мощностью порядка 1 МВА, используемые для получения электроэнергии переменного тока, как правило, содержат вращающиеся обмотки возбуждения. При использовании в качестве обмоточного материала индуктора ВТСП-ленты вместо медных или алюминиевых проводов удаётся исключить потери в этих обмотках. Но под действием вибраций и центробежных сил критический ток ВТСП-обмотки подвержен деградации, связанной с явлениями расслаивания и растрескивания тонкого слоя сверхпроводника (~ 1 мкм) из-за больших сдвиговых и сжимающих механических напряжений. Это накладывает

ограничения на частоту вращения вала и снижает надёжность генератора. Поэтому разработка генераторов с неподвижными ВТСП-обмотками является актуальной научной и инженерной задачей, направленной на создание электрооборудования для корабельных систем электродвижения на основе ВТСП, что определяет актуальность и практическую ценность представленной диссертационной работы.

### **Структура и объём диссертации**

Диссертационная работа Дубенского А. А. состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы из 53 наименований.

**Во введении** обоснована актуальность темы и степень её разработанности в литературе, сформулированы цели и задачи работы, показана её научная новизна и практическая ценность, представлены основные положения, выносимые на защиту, и личный вклад автора.

**В первой главе** приведен обзор работ по теме диссертации. Проведен анализ ВТСП-материалов, используемых в электромеханике. Рассмотрены существующие сверхпроводниковые электрические машины (СПЭМ) для систем морского электродвижения. Упомянуто о способах криообеспечения СПЭМ. Приведён анализ существующих конструктивных схем синхронных генераторов и предложена разработанная конструктивная схема сверхпроводникового синхронного генератора с комбинированным возбуждением.

**Во второй главе** рассмотрены магнитные потоки сверхпроводникового синхронного генератора с комбинированным возбуждением. Составлены схема замещения и предложена методика итерационного расчёта параметров магнитного поля.

**В третьей главе** рассмотрена конструкция маломасштабного образца генератора, представлены результаты его испытаний.

**В четвёртой главе** представлена методика и полученные результаты расчёта генератора мегаваттного уровня мощности. Представлены

результаты моделирования магнитных полей генератора, механических напряжений и деформаций в роторе при его вращении.

**В пятой главе** описан процесс изготовления и представлены результаты испытаний ВТСП-катушек обмотки возбуждения генератора.

**В шестой главе** дано описание испытательного стенда, представлены и проанализированы результаты испытаний генератора мегаваттного уровня мощности.

**В заключении** изложены основные выводы и результаты работы.

### **Научная новизна**

1. Впервые разработана конструктивная схема бесконтактного синхронного генератора с когтеобразным ротором, возбуждение которого осуществляется совместно от неподвижной ВТСП-обмотки возбуждения и размещённых в роторе постоянных магнитов.

2. Для разработанной конструктивной схемы проведён анализ магнитных потоков и создана методика их расчёта на основе теории магнитных цепей, применён алгоритм итерационного расчёта, позволяющий учитывать насыщение участков магнитопровода.

### **Практическая значимость**

1. На основе разработанной конструктивной схемы созданы и испытаны образцы генератора, имеющие мощности 12,8 кВА и 0,99 МВА.

2. Испытания образцов генератора подтвердили преимущества разработанной конструкции:

- ВТСП-обмотка возбуждения не подвергается действию центробежных сил при вращении ротора, и величина её критического тока соответствует значению критического тока короткого образца ВТСП-ленты при соответствующем уровне индукции магнитного поля;

- применение постоянных магнитов в роторе приводит к увеличению величины ЭДС обмотки якоря.

### **Обоснованность и достоверность**

Обоснованность и достоверность полученных результатов, научных положений и выводов подтверждается соответствием теоретических расчетов результатам моделирования и экспериментальным данным.

### **Апробация результатов работы**

По теме диссертации опубликовано 17 работ, в том числе 3 - в изданиях, рекомендуемых ВАК РФ, и 2 - в журналах, входящих в международную базу цитирования Scopus. Получен патент РФ на полезную модель. Результаты работы в период 2012-2016 гг. докладывались и обсуждались на четырех международных, двух национальных и трёх московских конференциях.

### **Замечания по диссертационной работе**

1. В главе 1 при обсуждении работоспособности ВТСП-обмоток возбуждения, расположенных на роторе, отмечено, что ВТСП-проводники этих обмоток как первого, так и второго поколений не сохраняют сверхпроводящее состояние при высоких частотах вращения под действием центробежных сил. После этого замечания должны последовать качественное объяснение этого физического эффекта и оценки предельной частоты вращения или предельного центробежного механического напряжения в обмотке, однако, они отсутствуют.

2. В главе 4 на рис. 4.14 представлена расчётная схема сил, действующих на эквивалентное кольцо-шину, моделирующую ВТСП-обмотку из 330 витков. Корректность такого моделирования должна быть

обоснована, поскольку при толстой межвитковой изоляции из полиимида, составляющей 30% от толщины металла проводника, виток в обмотке в механическом смысле можно рассматривать как свободный из-за значительной разницы модулей Юнга металла проводника и изоляции. Таким образом, соседние витки не перераспределяют между собой механические напряжения от своих сил Ампера, и рассмотрение композиционной обмотки как единого твёрдого кольца требует пояснений.

3. В работе используются две характеристики расчёта: поверочный и проектировочный, в чём их отличие?

### **Заключение**

Несмотря на замечания, диссертация Дубенского Александра Андреевича «Сверхпроводниковый синхронный генератор с когтеобразными полюсами и постоянными магнитами для транспортных систем» представляет собой завершённую научно-квалификационную работу, выполненную автором на высоком научном уровне. Решена научная задача, значимая для транспортных систем электродвижения на основе ВТСП, изложены новые научно обоснованные технологические решения и разработки. Полученные автором результаты являются актуальными, новыми, обоснованными и достоверными.

Автореферат изложен чётким научным языком и соответствует по содержанию тексту диссертации. Диссертационная работа полностью отвечает требованиям пп. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней» (Постановление Правительства РФ №842 от 24.09.2013 г. в редакции от 28.08.2017 г.).

Диссертационная работа соответствует паспорту специальности в области исследований по пункту 2 - «Разработка научных основ создания и совершенствования электрических, электромеханических преобразователей и электрических аппаратов», а её автор, Дубенский Александр Андреевич,

заслуживает присуждения искомой научной степени кандидата технических наук по специальности 05.09.01 - «Электромеханика и электрические аппараты».

Круглов Сергей Леонидович

«6» сентября 2018 г

д.т.н. по специальности 01.04.07 – « Физика конденсированного состояния»

Ведущий научный сотрудник Курчатовского комплекса НБИКС-технологий

НИЦ «Курчатовский институт», e-mail: [ru](mailto:ru)

Тел. +8(499)196-65-74 (71-71)

Подпись сотрудника НИЦ «Курчатовский институт» Круглова С. Л. заверяю

Директор-координатор  
Научно-Технического Совета  
НИЦ «Курчатовский институт»



Э. Ф. Лобанович

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт»)

123182, Россия, г. Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1

Телефон: +7(499) 196-95-39

e-mail: [nrcki@nrcki.ru](mailto:nrcki@nrcki.ru)