

## ОТЗЫВ

официального оппонента Курбатова Павла Александровича, доктора технических наук, профессора, на диссертацию Дежиной Ирины Николаевны по теме «Криогенная электрическая машина без ферромагнитопровода с обмотками на основе высокотемпературных сверхпроводниковых материалов», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.01 – «Электромеханика и электрические аппараты»

### Актуальность темы исследования

В настоящее время в ведущих научных центрах мира ведутся разработки электрических машин с высокими удельными показателями мощности. Такие машины должны найти своё применение в качестве электроприводов и генераторов на борту полностью электрических самолетов, судовой техники и других транспортных объектов. Одним из решений, позволяющих увеличить удельную мощность электрических машин, является применение в их составе обмоток на основе сверхпроводниковых материалов и отказ от стального ферромагнитопровода с целью уменьшения общей массы. Однако, проектирование таких машин требует создания новых теоретических основ и подходов к расчетам из-за специфических свойств сверхпроводниковых материалов, изменения активной зоны электрической машины и необходимости экранирования магнитных полей от внешней среды.

Диссертационная работа посвящена созданию методики проектирования криогенных электрических машин без ферромагнитопровода, обмотки которых изготовлены из высокотемпературных сверхпроводниковых материалов, что, несомненно, является актуальной научно-технической задачей и вносит вклад в развитие современной электромеханики.

### Научная новизна работы и результатов

Новизна результатов, полученных в диссертационной работе, заключается в том, что: создана аналитическая методика расчета магнитных полей и параметров сверхпроводниковых электрических машин без ферромагнитопровода, которые способны обеспечить высокие удельные показатели выходной мощности; разработан и предложен алгоритм численного расчета в трехмерной постановке, который позволяет производить оценку влияния лобовых частей сверхпроводниковых обмоток электрической машины без ферромагнитопровода на её основные параметры и характеристики; предложен инженерный способ автоматизированного расчета критического тока в катушках из высокотемпературных сверхпроводниковых лент в зависимости от величины внешнего магнитного поля и криогенной температуры.

Центр документационного  
обеспечения МАИ

02 09 2022

## **Общая оценка содержания и оформления работы**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка работ, опубликованных по теме диссертации, трех приложений и списка цитируемых источников, включающего 78 наименований. Общий объем диссертации составляет 174 страницы, включая 76 рисунков и 23 таблицы.

**Во введении** обоснована актуальность темы исследования, новизна и практическая значимость диссертационной работы, сформулирована цель и поставлены задачи исследования, представлены основные положения, выносимые на защиту, представлена апробация и структура работы.

**В первой главе** приведена классификация и описание основных свойств современных сверхпроводниковых материалов, которые используются для изготовления перспективных электрических машин; представлен обзор существующих мировых разработок в области сверхпроводниковых электрических машин с высокими удельными показателями и их применение; рассмотрены вопросы применения криогенного топлива в авиации и некоторые концепции электрических самолетов. Также в данной главе приведен обзор достоинств и недостатков разработанных ранее технических решений в области создания сверхпроводниковых электрических машин.

**Во второй главе** изложена аналитическая методика расчета сверхпроводниковой электрической машины без ферромагнитопровода с различными типами внешних экранов и обмотками на основе ВТСП лент 2-го поколения. Представлены и описаны результаты этих аналитических расчетов.

**В третьей главе** изложены численные подходы к проведению поверочного расчета магнитных полей и параметров сверхпроводниковой электрической машины без ферромагнитопровода. Представлено описание алгоритмы численного решения методом конечных элементов (МКЭ), процедура и особенности численного расчета сверхпроводниковой электрической машины без ферромагнитопровода в двух- и трехмерной постановке.

**В четвертой главе** диссертации описана методика расчета критического тока в зависимости от величины магнитного поля и температуры охлаждения в катушках из ВТСП лент 2-го поколения. Приведены результаты сравнения численного расчета с натурным экспериментом.

**В Заключении** приведены основные результаты исследований и рекомендации по их дальнейшему использованию.

**В приложениях** представлены: программный код на языке MATLAB, с помощью которого был проведен аналитический расчет параметров сверхпроводниковой электрической машины, а также акт о внедрении результатов диссертации и полученные автором патенты.



Текст диссертации и автореферата изложен технически грамотным языком, стиль изложения — научный и корректный.

Содержание диссертации достаточно полно отражено в автореферате в пределах нормируемого объема.

Основные результаты работы опубликованы в 14 научных работах, включая 2 статьи в журналах и изданиях, рекомендуемых ВАК РФ и 6 статей в изданиях, индексируемых международными базами Scopus и WoS. Получен 1 патент на изобретение и 1 патент на полезную модель. Число публикаций соответствует требованиям п. 13 «Положения о присуждении ученых степеней».

Выступление автора на различных Международных научно-технических конференциях свидетельствует о достаточной апробации результатов работы.

#### **Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, их достоверность**

Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, обеспечивается значительным объемом проанализированной информации по различным аспектам решаемой задачи, корректным использованием математического аппарата и современного программного обеспечения, достоверность разработанной методики подтверждается сопоставлением результатов с численными расчетами и экспериментальными данными.

#### **Теоретическая значимость работы**

Теоретическая значимость работы связана с расширением области знаний в электромеханике, в частности, в разработке аналитической методики расчета в двухмерной постановке, которая позволяет строить картины распределения магнитных полей и рассчитывать основные параметры криогенных электрических машинах без ферромагнитопровода, обмотки которых изготовлены из высокотемпературных сверхпроводниковых лент 2-го поколения, с различными внешними экранами. По описанной в работе методике можно рассчитывать основные величины и характеристики криогенных ЭМ без ферромагнитопровода в зависимости от таких параметров, как: число пар полюсов, размеры сверхпроводниковых катушек, параметры, толщина и тип внешнего экрана, число фаз якоря, а также параметров, определяющих размеры активной зоны электрической машины.

#### **Практическая значимость работы и полученных результатов**

Практическая значимость работы и полученной в ней результатов заключается в том, что:

– разработан алгоритм численного расчета криогенных ЭМ без ферромагнитопровода в трёхмерной постановке, позволяющий оценить влияние лобовых частей ВТСП обмоток на основные параметры и характеристики ЭМ;

– показано, что на точность получаемых решений по разработанной аналитической методике влияет соотношение активной длины криогенной электрической машины и угла полюсного раскрытия, который зависит от числа пар полюсов;

– предложен способ численного автоматизированного расчета критического тока в ВТСП катушках криогенных электрических машин в зависимости от величины внешнего магнитного поля и криогенной температуры.

### **Замечания по диссертационной работе**

По диссертационной работе имеются следующие вопросы и замечания:

1. В диссертации плохо выделены принимаемые допущения как при аналитическом, так и при численных расчетах, что существенно затрудняет ее прочтение. Например, непонятна запись граничных условий в формулах (2.2).

2. Ток в сверхпроводнике нелинейно зависит от магнитного поля. Токи в обмотках и неоднородно намагниченный экран создают магнитные поля, которые влияют на значения токов. Как было подтверждена (обоснована) возможность использования принципа суперпозиции полей в методике аналитического расчета в условиях возможной нелинейности свойств сверхпроводящего провода?

3. Автор неоднократно использует формулы для расчетов синусоидальных ЭДС, например, (2.41, 3.2 и др.). В работе нет данных, которые подтверждают синусоидальность ЭДС для рассматриваемого генератора.

4. В численных расчетах относительная магнитная проницаемость принималась постоянной также, как и при аналитическом расчете. Использованное программное обеспечение позволяет учитывать реальные нелинейные магнитные свойства стали, что позволило бы провести более значимое сопоставление результатов численных и аналитических расчетов.

5. На стр. 97 указана использованная «проводимость провода  $6 \cdot 10^9$  См·м». Здесь неправильно указаны размерность удельной электрической проводимости, если это она. На каком основании выбрано именно это значение?

6. Текст на стр. 98-99 не дает полного представления, как определялись собственные и взаимные индуктивности фазных обмоток, и почему для этого необходимо было отключать обмотку возбуждения.

7. Как отмечено в диссертации, главной проблемой ВТСП обмоток (особенно якоря) является возникновение потерь на переменном токе, однако в предложенных методиках расчетов эта проблема не рассматривается.

Следует отметить, что указанные замечания не снижают общей высокой оценки диссертационной работы Дежиной И.Н.



## Заключение

Диссертационная работа Дежиной Ирины Николаевны «Криогенная электрическая машина без ферромагнитопровода с обмотками на основе высокотемпературных сверхпроводниковых материалов», представленная на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.09.01 – «Электромеханика и электрические аппараты», является законченной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований решена научная задача по созданию методики проектирования криогенных электрических машин без ферромагнитопровода, обмотки которых изготовлены из высокотемпературных сверхпроводниковых материалов. Предложенное автором решение имеет значение для развития электромеханики.

Область исследований диссертационной работы Дежиной И.Н. соответствует паспорту специальности 05.09.01 – «Электромеханика и электрические аппараты».

Диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям, установленным «Положением о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ №842 от 24.09.2013 г. (ред. от 11.09.2021 г.), а её автор Дежина И.Н., заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.09.01 – «Электромеханика и электрические аппараты».

Официальный оппонент,  
доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры «Электромеханики,  
электрических и электронных аппаратов»  
ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский  
университет «МЭИ» (НИУ «МЭИ»)

Курбатов Павел Александрович

Подпись доктора технических наук Курбатова П.А. удостоверяю:

Подпись  
удостоверяю  
начальник  
работе с персоналом



« 1 » 09 2022 г.

111250, г. Москва, вн. тер. г. муниципальный округ Лефортово,  
ул. Красноказарменная, д. 14, стр. 1, Тел. 8-910-445-55-75, e-mail:  
kurbatovpa@mpei.ru

С отзывом ознакомлена 6.09.2022  
Дежина И.Н. Дуж