

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной работе
Федерального Государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования

«Ивановский государственный энергетический
университет имени В.И. Ленина»,

аук, профессор

В.В. Тютиков

«17» ноября 2021 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации Федерального Государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» на диссертацию Занегина Сергея Юрьевича на тему «ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТЕРЬ В ВТСП ОБМОТКАХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.01 – «Электромеханика и электрические аппараты»

Актуальность темы исследований

Возрастающие требования к снижению загрязняющих выбросов и уменьшению шума при эксплуатации авиадвигателей обуславливают тенденцию разработки новых типов силовых установок летательных аппаратов. Основные направления связаны с переходом на электропривод тяговых винтов и вентиляторов. В качестве электрического двигателя привода винтов в настоящее время рассматриваются вентильные машины постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов. Однако их удельная мощность не превышает 5 кВт/кг, что заметно хуже по сравнению с современными газотурбинными двигателями. Требуется разработка электрических машин с высокими удельными характеристиками. При мощностях,

превышающих 30 МВт, предполагается использование гибридной силовой установки, включающей газотурбинные двигатели для привода высокооборотных сверхпроводниковых синхронных генераторов, которые будут обеспечивать питание распределённых сверхпроводниковых электродвигателей. Одновременно разрабатываются и небольшие самолёты на электротяге с питанием от литий-ионных батарей или аккумуляторов. Запасание водорода в криогенной форме с температурой кипения жидкости 20,5 К открывает возможности применения высокотемпературных сверхпроводящих (ВТСП) обмоток в тяговых электродвигателях привода винтов летательных аппаратов. Разработка конструкций обмоток для электрических машин на основе ВТСП лент второго поколения позволяет увеличить удельную мощность за счет существенно более высокой допустимой токовой нагрузки. Уже созданы электрические машины с использованием ВТСП обмоток, работающие на постоянном токе, но их удельные параметры оказываются недостаточными для применения в летательных аппаратах и в полностью электрических самолетах. Ведущие научные центры проводят работы по созданию электрических машин с использованием ВТСП обмоток, работающих на переменном токе. При работе устройств на переменном токе, как в металлических частях, так и в сверхпроводнике возникают потери, значение которых требуется при определении нагрузки на криогенную систему. Потери на переменном токе в сверхпроводнике являются гистерезисными и преобладают в ВТСП устройствах. Задача их корректного определения является одной из важных в прикладной сверхпроводимости. Экспериментальные исследования потерь для моделирования реальных условий работы электрических машин необходимо проводить при их питании током различной формы, частоты и амплитуды. Задача расчёта потерь в ВТСП обмотках электрических машин, которая может быть решена численными методами, экспериментальное исследование потерь в обмотках, являются актуальными и важными задачами. В связи с этим диссертационная работа Занегина С.Ю., посвященная разработке моделей и исследованию потерь в ВТСП обмотках электрических машин, безусловно, актуальна и соответствует специальности 05.09.01 «Электромеханика и электрические аппараты».

Оценка структуры и содержания работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка цитируемой литературы, включающего 91 наименование. Объем диссертации составляет 130 страницы основного текста и 4 страницы приложений и включает 80 рисунков и 8 таблиц.

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована цель и поставлены задачи исследования, представлены основные положения, выносимые на защиту, теоретическая и практическая ценность работы.

В первой главе дан литературный обзор по теме диссертации. Здесь приведены примеры различных проектов ВТСП электрических машин, рассмотрены особенности работы сверхпроводников в системах электродвижения, описаны некоторые свойства ВТСП проводников, основное внимание уделено потерям в сверхпроводниках.

Вторая глава диссертации посвящена созданию численной модели для исследования потерь в обмотках на основе ВТСП лент второго поколения, работающих на переменном токе. В модели при определении гистерезисных потерь в сверхпроводящем слое ВТСП лент второго поколения учтена нелинейность их сопротивления и неоднородность критической плотности тока по ширине сверхпроводящего слоя ленты. Представлен разработанный испытательный стенд для измерения потерь при различных частотах. Представлена верификация численной модели.

В третьей главе изложены результаты численных и экспериментальных исследований потерь в различных модельных ВТСП катушках. Показано, что выполненные расчеты с высокой точностью согласуются с измеренными результатами.

В четвертой главе содержатся результаты изготовления и испытаний катушек для ВТСП двигателей. Показана возможность создания ВТСП электродвигателя при заданных параметрах.

В пятой главе описаны результаты испытания катушек в условиях, имитирующих работу в составе ВТСП двигателя. Приведены результаты влияния несинусоидальных токов, имитирующих работу двигателя с электронным преобразователем-инвертором, на потери в ВТСП обмотках.

В шестой главе приведены результаты экспериментальных исследований рейстрековой ВТСП катушки при воздействии внешнего постоянного магнитного поля, испытания обмоток ВТСП ЭМ в различных условиях, при работе ЭМ в генераторном режиме. Получены значения потерь на синусоидальном токе и на токе, сформированном с помощью высокочастотной модуляции. Приведены результаты влияния внешнего магнитного поля на потери в ВТСП катушках и обмотках.

В заключении приведены основные результаты и выводы диссертации.

Объект исследования – обмотки электрических машин переменного тока из ВТСП лент второго поколения.

Предмет исследования – потери в обмотках электрических машин из ВТСП лент второго поколения на синусоидальном и на несинусоидальных токах различной частоты и формы, полученных при помощи высокочастотной модуляции.

Цели и задачи работы – разработка численных алгоритмов и экспериментальных методик для определения и анализа потерь в 2G ВТСП обмотках электрических машин, работающих в различных режимах.

В диссертации поставлены и решены задачи:

- разработка математической модели для расчета и анализа потерь в обмотках и стопках 2G ВТСП лент;
- разработка комплекса оборудования для экспериментального исследования потерь в обмотках и стопках 2G ВТСП лент;
- численное и экспериментальное исследование потерь в обмотках и стопках 2G ВТСП лент на синусоидальном и несинусоидальном токах, токах, сформированном при помощи высокочастотной модуляции;
- сопоставление результатов математического моделирования и полученных результатов эксперимента.

Методы исследований. При решении задач диссертации использовались методы электродинамики, электромеханики и прикладной сверхпроводимости; численные методы решения уравнений в частных производных (метод конечных элементов). Обработка результатов экспериментов выполнялась в пакете прикладных

программ MATLAB 2014; для решения задач методом конечных элементов использовался пакет прикладных программ ANSYS; «твердотельное» моделирование было осуществлено на базе пакета SolidWorks 2015, эскизное - в Компас-3D V12.

Важнейшие результаты, полученные в диссертационной работе:

1. В результате проведенных экспериментальных и расчетных исследований на стопках ВТСП лент второго поколения подтверждена корректность разработанной конечно-элементной модели, результаты моделирования совпадают с результатами экспериментов с точностью 5%.

2. С помощью предложенной методики проведен комплекс измерений потерь в статорных ВТСП обмотках электрической машины в различных условиях: без установленного ротора, с неподвижным ротором при питании синусоидальными и несинусоидальными токами, полученными при помощи высокочастотной модуляции, а также в составе генератора, работающего на активную нагрузку.

3. Впервые определена тепловая нагрузка (на температурном уровне жидкого азота) ВТСП обмоток электрических машин переменного тока в диапазоне 10-100 Вт в зависимости от режима работы. Определение тепловой нагрузки является необходимым условием для оптимизации системы криостатирования сверхпроводниковой машины.

Научная новизна результатов, выводов и рекомендаций

1. Разработана численная модель и методика расчета потерь на переменном токе в катушках обмоток электрических машин из ВТСП ленты второго поколения, отличающаяся учетом нелинейных зависимостей сопротивления в тонком сверхпроводящем слое от плотности тока, а также зависимостью критической плотности тока как от величины и направления внешнего магнитного поля, так и от ее неоднородности по ширине ВТСП слоя ленты и магнитных свойств подложки.

2. Разработан метод исследования и анализа потерь в катушках из 2G ВТСП лент, отличающийся учетом формы (синусоидальный, несинусоидальный) и частоты питающего тока.

3. На основе экспериментальных исследований проведен анализ влияния условий работы ВТСП катушки (отдельная катушка, система катушек с общим магнитопроводом с немагнитной и магнитной подложкой, присутствие внешнего постоянного и переменного магнитного поля) на величину потерь.

Практическая значимость результатов работы

1. Разработаны уникальное экспериментальное оборудование и методики обработки результатов, позволяющие проводить измерения потерь в катушках электрических машин из ВТСП ленты при питании их токами различной формы и частоты, полученными, в том числе при помощи высокочастотной модуляции.

2. Разработанный численный метод позволяет выполнять расчет и анализ потерь на переменном токе в ВТСП лентах второго поколения, в стопках лент и обмотках электрических машин на их основе.

3. Установлено, что (в пересчете на одну катушку) переход от одиночной ВТСП катушки к собранному статору приводит к возрастанию потерь в 3...5 раз; присутствие неподвижного ротора с постоянными магнитами приводит к росту потерь в 5...8 раз; работа машины в генераторном режиме увеличивает потери в 3...5 раз по сравнению с неподвижным ротором. Для токов в обмотках, полученных путем высокочастотной модуляции, потери возрастают для случая с установленным неподвижным ротором в 1,5...2 раза по сравнению с синусоидальным током. Показано, что гистерезисные потери в магнитной подложке ВТСП лент в обмотке пренебрежимо малы, однако ее магнитные свойства изменяют потери в ВТСП слое.

4. Результаты исследований потерь в ВТСП обмотках электрических машин могут быть использованы для выработки требований к оптимальным условиям работы таких электрических машин.

Степень достоверности результатов. Основные положения и результаты диссертационной работы подтверждаются корректным использованием математического аппарата, соответствием результатов, полученных путем аналитических расчетов, математических, физических и имитационно-компьютерных моделей. Расчетные данные согласуются, как с собственными экспериментальными данными, так и данными, известными из литературы.

Перспективы использования результатов. Результаты диссертационной работы могут представлять интерес для научно-технических предприятий и производственных, занимающихся разработкой сверхпроводникового оборудования: АО ВНИИ неорганических материалов им. А.А. Бочвара; МГУ им. М.В. Ломоносова; Московский авиационный институт (НИУ); Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ; ВНИИ кабельной промышленности; ПАО «Федеральная сетевая компания единой энергетической системы»; ЗАО СуперОкс и др.

Апробация результатов осуществлялась на многочисленных Российских и Международных научно-технических конференциях. Основные научные результаты диссертации достаточно полно отражены в изданиях, рекомендованных ВАК РФ и изданиях, входящих в базу Scopus, других публикациях.

Автореферат отражает основное содержание диссертационной работы.

Замечания по диссертационной работе:

1. Автором использован оригинальный шунтовой датчик синусоидальных и несинусоидальных токов, для которого определено изменение амплитудной погрешности с изменением частоты. Однако изменение фазовой погрешности датчика тока с изменением частоты, вследствие паразитной индуктивности датчика ($0,1 \div 0,3$) нГн, не учтено. Фазовая погрешность датчика тока будет вызывать погрешность определения потерь в обмотках, определяемых через мгновенные значения напряжения и тока, например, по соотношениям 2.14 и 6.3, что не оценено.

2. Не пояснено вследствие чего потери в ВТСП обмотках на синусоидальном токе для частоты 50 Гц значительно больше, чем при токе, сформированным при помощи ШИМ с несущей частотой 10 кГц (рис. 5.8, стр. 86).

3. Не представлены методики численного расчета увеличения потерь в ВТСП обмотках электрических машин переменного тока при наличии внешнего магнитного поля и при импульсном модулировании питающего напряжения.

4. Исследование потерь в ВТСП обмотках должно сопровождаться тепловыми расчетами с целью определения пространственного изменения критического тока, сохранения эффекта сверхпроводимости, что сделано не было.

5. Встречаются стилистические и смысловые недочеты: в названии диссертации использовано сокращение «ВТСП»; уравнение (1.1) описывается как закон Фарадея, однако это одно из уравнений Максвелла; уравнение (1.2) описывается как закон Ампера, это также одно из уравнений Максвелла, в котором вместо оператора «набла» должен быть оператор «ротатор»; при ссылке на соотношение (2.3) отмечается «интегрируемый по времени электрический потенциал», тогда как в действительности дифференцируется по времени градиент электрического потенциала; на рис. 6.10 (стр. 106) потери имеют размерность [Дж].

Указанные замечания не носят принципиального характера и не снижают научной и практической ценности диссертационной работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В целом диссертация Занегина Сергея Юрьевича «ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТЕРЬ В ВТСП ОБМОТКАХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН» представляет законченную научно-квалификационную работу. Автором путем разработки и применения расчетных и экспериментальных методик решена актуальная научно-техническая задача анализа и определения потерь в обмотках электрических машин на основе ВТСП лент второго поколения при питании их переменными синусоидальными и несинусоидальными токами разной частоты, формы и амплитуды, в том числе с использованием высокочастотной импульсной модуляции напряжения. Научные и практические результаты диссертации обоснованы и достоверны, являются новыми и значимыми, имеют важное значение для электромеханики и электрических аппаратов. Диссертация соответствует паспорту специальности 05.09.01 «Электромеханика и электрические аппараты» по пункту «Анализ и исследование физических явлений, лежащих в основе функционирования электрических, электромеханических преобразователей энергии и электрических аппаратов».

Диссертация соответствует критериям п.п. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ (№ 842, от 24 сентября 2013 г., ред. 11.09.2021 г.), предъявляемым к кандидатской диссертации в области технических наук, а ее автор Занегин Сергей Юрьевич заслуживает

Отзыв подготовлен доктором технических наук, профессором кафедры «Электромеханика» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» (ИГЭУ) Тихоновым Андреем Ильичем.

Диссертация, автореферат диссертации и отзыв ведущей организации обсуждены на заседании кафедры «Электромеханика» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», протокол № 3 от 09 ноября 2021 г.

Сведения о ведущей организации: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина».

Адрес: 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34

Тел.: +7 (4932) 269706 факс: +7 (4932) 385-701

Электронная почта: office@ispu.ru elmash@em.ispu.ru

Сайт: <http://ispu.ru/>.

Исполняющий обязанности заведующего кафедрой «Электромеханика» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», к.т.н.

(Специальность 05.09.01 «Электромеханика и электрические аппараты»)

Подпись и.о. заведующего

Ученый секретарь ученого

Дата составления отзыва



Нестеров Сергей Александрович

ики Нестерова С.А. заверяю:

Юлия Вадимовна Вылгина