

На правах рукописи



Занегин Сергей Юрьевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТЕРЬ В ВТСП ОБМОТКАХ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН**

Специальность 05.09.01

«Электромеханика и электрические аппараты»

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Самара 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» на кафедре «Электроэнергетические, электромеханические и биотехнические системы».

Научный руководитель: **Ковалев Константин Львович**, доктор технических наук, старший научный сотрудник, заведующий кафедрой №310 ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (МАИ), г. Москва.

Официальные оппоненты: **Курбатов Павел Александрович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электромеханики, электрических и электронных аппаратов ФГБОУ ВО «МЭИ», г. Москва.

**Дегтяренко Павел Николаевич**, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник ФГБУН ОИВТ РАН, г. Москва.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина» (ИГЭУ), г. Иваново.

Защита состоится 28 декабря 2021г. в 12 час. 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.217.04, при ФГБОУ ВО «СамГТУ» по адресу: г. Самара, ул. ул. Молодогвардейская, 244, Главный корпус, ауд. № 200.

С авторефератом и диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВО «СамГТУ», а также на официальном сайте диссертационного совета по адресу <http://d21221704.samgtu.ru>.

Отзывы на автореферат просим высылать в двух экземплярах, заверенных печатью, по адресу: 443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, Самарский государственный технический университет, главный корпус, ученому секретарю диссертационного совета Д212.217.04; факс: (846) 278-44-00, e-mail: [a-ezhova@yandex.ru](mailto:a-ezhova@yandex.ru)

Автореферат разослан «   » \_\_\_\_\_ 2021г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.217.04,  
кандидат технических наук, доцент



Е.В. Стрижакова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Одна из ведущих проблем современной авиации заключается в повышении ее экономичности. Речь идет не только о гражданской авиации, где данный вопрос стоит наиболее остро – от него зависит и стоимость перевозок, и прибыль авиакомпаний, – но и в сельскохозяйственной и военной сфере: увеличивается дальность полета, время, доступное для выполнения задачи. В краткосрочной перспективе авиастроение движется по пути создания так называемого «более электрического самолета». Качественно иным подходом является полностью электрический самолет. Однако, в независимости от выбранной концепции и присущих ей достоинств, и недостатков, на первый план выходит проблема создания электрических машин (ЭМ) с высокой удельной мощностью (более 10-20 кВт/кг), реализация которых возможна только с использованием высокотемпературных сверхпроводящих (ВТСП) проводников.

Вследствие развития прикладной сверхпроводимости, индустрии производства современных ВТСП проводников второго поколения (2G), обладающих высокой критической плотностью тока при температуре жидкого азота, и значительному прогрессу в криогенной технике стало возможным их использование в ЭМ. Разработка конструкций обмоток для ЭМ на основе 2G ВТСП проводников позволяет увеличить их удельную мощность за счет существенно более высокой допустимой токовой нагрузки, что делает возможным создание принципиально новых систем.

В мире уже созданы ЭМ с использованием ВТСП обмоток, работающие на постоянном токе, но их удельные параметры оказываются недостаточно высокими для применения в малоразмерных летательных аппаратах и в полностью электрических самолетах. Именно поэтому ведущие мировые научные центры, в том числе и МАИ, проводят работы по созданию ЭМ с использованием ВТСП обмоток, работающих на переменном токе.

При этом возникает необходимость решения сложных научно-технических задач. В частности, критические параметры ВТСП катушки и короткого ВТСП образца существенно отличаются. Кроме того, при работе устройств на переменном токе, как в металлических частях, так и в сверхпроводнике возникают потери, величина которых необходима при определении нагрузки на криогенную систему.

Потери на переменном токе в сверхпроводнике являются гистерезисными и преобладают в ВТСП устройствах; задача их правильного определения является одной из важнейших в прикладной сверхпроводимости. В настоящее время 2G ВТСП провода изготавливаются в виде лент и моделирование потерь в устройствах на их основе представляет собой наиболее сложную задачу и расчетным путем может быть успешно решена только с помощью численных методов. Экспериментальные исследования потерь для моделирования реальных условий работы ЭМ необходимо проводить при их питании током различной формы, частоты и амплитуды.

В этой связи, численное моделирование потерь в 2G ВТСП обмотках ЭМ при их разработке, а также экспериментальное исследование обмоток, являются актуальной и важной задачей.

**Степень разработанности темы исследования.** Потерям на переменном токе в 2G ВТСП проводниках и устройствах на их основе посвящены работы многих зарубежных исследователей, таких как F. Gömöry, F. Grilli и T. Coombs, а также российских авторов Е. Клименко, И. Руднева, С. Фетисова, П. Дегтяренко.

**Объект исследования.** 2G ВТСП обмотки ЭМ переменного тока, а также их элементы: катушки и стопки ВТСП лент.

**Предмет исследования.** Предметом исследования являются потери в обмотках электрических машин из 2G ВТСП ленты на синусоидальном токе, а также на несинусоидальных токах различной частоты и формы, в том числе, полученных при помощи высокочастотной модуляции.

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

Для достижения поставленной цели в ходе работы были поставлены и решены следующие задачи:

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

**Методы исследований.** Для решения задач диссертации применялись методы электромеханики и прикладной сверхпроводимости; численные методы решения уравнений в частных производных (метод конечных элементов). Обработка результатов экспериментов велась 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; а эскизное - в Компас-3D V12.

#### **Научная новизна.**

1. Разработана методика численного расчета потерь в катушках обмоток электрических машин из ВТСП ленты второго поколения, отличающаяся учетом нелинейной зависимости сопротивления в тонком сверхпроводящем слое от плотности тока, критической плотности тока от величины и направления внешнего магнитного поля, неоднородности критической плотности тока по ширине ВТСП слоя ленты и магнитных свойств подложки.

2. Впервые разработано уникальное экспериментальное оборудование и методики обработки результатов, позволяющие проводить измерения потерь в катушках из ВТСП ленты при питании их токами различной формы и частоты, полученными, в том числе при помощи высокочастотной модуляции.
3. На основе экспериментальных исследований проведен анализ влияния условий работы ВТСП катушки (отдельная катушка, система катушек с общим магнитопроводом, присутствие внешнего постоянного и переменного магнитного поля) на величину потерь в катушке.

#### **Практическая значимость работы.**

1. Разработан численный метод расчета потерь на переменном токе в ВТСП лентах второго поколения, в стопках и обмотках электрических машин на их основе.
2. Установлено, что для получения наиболее точных результатов расчета потерь необходимо использование функции, описывающей как неравномерность критической плотности тока по ширине ленты, так и её зависимость от вектора магнитного поля. Даны рекомендации для определения коэффициентов этой функции.
3. Результаты проведенных экспериментальных исследований потерь в ВТСП катушках и ВТСП обмотках электрических машин при несинусоидальных токах в режимах, имитирующих работу двигателя с электронным преобразователем-инвертором, могут быть использованы для выработки требований к оптимальным условиям работы ВТСП обмоток электрических машин.

#### **Основные положения диссертации, выносимые на защиту:**

1. Численная модель для расчета потерь в стопках и катушках из 2G ВТСП лент, отличающаяся тем, что в ней учтена нелинейная зависимость сопротивления в тонком сверхпроводящем слое от плотности тока при этом учитывается зависимость критической плотности тока от величины и направления внешнего магнитного поля. Оригинальные методики испытаний и комплекс установок для измерения потерь в стопках и катушках из 2G ВТСП лент.
2. Результаты экспериментального исследования потерь в стопках лент различной конфигурации и катушках, подтверждающие разработанную численную модель.
3. Метод исследования и анализа потерь в катушках из 2G ВТСП лент при питании их синусоидальным и несинусоидальным током различной формы и частоты.
4. Результаты исследования влияния внешнего магнитного поля на потери в катушках из ВТСП лент при питании их синусоидальным и несинусоидальным током различной формы и частоты.

**Степень достоверности результатов.** Основные положения и результаты диссертационной работы подтверждаются корректным

использованием математического аппарата, и соответствием результатам, полученным путем аналитических расчетов, математических, физических и имитационно-компьютерных моделей. При решении задач диссертации использовались методы электродинамики, электромеханики и прикладной сверхпроводимости; численные методы решения уравнений в частных производных (метод конечных элементов). Расчетные данные согласуются, как с собственными экспериментальными данными, так и данными, известными из литературы.

**Апробация работы.** Материалы, которые легли в основу диссертации, докладывались на: Международных конференциях по прикладной сверхпроводимости EUCAS-2013 (Генуя, Италия, 2013 г.), ASC-2016 (Денвер, США, 2016 г.), EUCAS 2017 (Женева, Швейцария, 2017 г.), EUCAS 2019 (г. Глазго, Шотландия, 2019 г.); Международных конференциях по магнитным технологиям MT-25 (Амстердам, Нидерланды, 2017 г.), MT-26 (Ванкувер, Канада 2019); Международной конференции по криогенной инженерии и материалам ICES 27 - ICMS 2018 (Оксфорд, Великобритания, 2018 г.); International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems, (г. Уфа, 2020 г.); Международный межотраслевой молодежный научно-технический форум «Молодежь и будущее авиации и космонавтики-2018», (г. Москва, 2018 г).

Представленные в диссертации результаты опубликованы в российских журнале “Электричество”, и публикациях за рубежом (IEEE Transactions on Applied Superconductivity, “Journal of Superconductivity and Novel Magnetism”, “Journal of Physics: Conference Series”). Список основных опубликованных научных работ, представляющих важнейшие результаты диссертации, составляет 7 наименований, все публикации в рецензируемых журналах и других изданиях по перечню ВАК РФ.

**Соответствие паспорту специальности 05.09.01.** Работа 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».

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка цитируемой литературы, включающего 91 наименование. Объем диссертации составляет 134 страницы, в том числе 80 рисунков и 8 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ

**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** на основе различных публикаций проведен обзор существующих проектов ВТСП машин с высокими удельными параметрами

для систем электродвижения, применительно к авиации будущего (полностью электрические самолеты).

Проведен анализ современных ВТСП проводников. Приведены аналитические модели для расчета и различных известных способов измерения потерь в сверхпроводниках.

В результате обзора поставлена задача: провести теоретическое и экспериментальное исследование потерь в 2G ВТСП обмотках ЭМ, выработать конкретных рекомендаций по применению 2G ВТСП обмоток в ЭМ.

**Во второй главе** представлена модернизированная двухмерная (2D) численная модель, для решения нестационарных уравнений электродинамики Максвелла методом конечных элементов (МКЭ) с использованием программного комплекса ANSYS. Для таких задач в ANSYS реализовано представление векторного магнитного потенциала  $A$  с тремя степенями свободы в непроводящих зонах, в проводящих зонах добавляется интегрируемый по времени электрический потенциал  $V$ :

$$\begin{aligned} \nabla \times \left( \frac{1}{\mu} \nabla \times A \right) &= -\frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial A}{\partial t} + \nabla V \right) \\ J &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial A}{\partial t} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial (\nabla V)}{\partial t} \end{aligned} \quad (1)$$

Для точного моделирования гистерезисных потерь в сверхпроводящем слое 2G ВТСП ленты необходимо учитывать сильную нелинейность его сопротивления  $\rho$ . В МКЭ модели нелинейное соотношение между сопротивлением и плотностью тока в сверхпроводнике  $J$  описывается степенным законом:

$$\rho \left( J, \vec{B}, x \right) = \frac{E_0}{J_c \left( \vec{B}, x \right)} \left[ \frac{J}{J_c \left( \vec{B}, x \right)} \right]^{n-1}, \quad (2)$$

где  $E_0 = 1 \mu\text{В/см}$ ,  $n$  – параметр нарастания.

Зависимость критической плотности тока от величины и направления магнитного поля и координаты вдоль ширины ВТСП слоя ленты

$J_c(\vec{B}, x) = J_c(B, \theta, x)$  определяется выражением:

$$J_c(B, \theta, x) = J_c(B, \theta) \cdot J_{c0}(x) = \frac{\alpha J_{c0}(x)}{\left( 1 + \left( k^2 \cos^2(\theta) + \sin^2(\theta) \right)^{0.5} \frac{B}{B_0} \right)^\beta} \quad (3)$$

где  $\theta$  – угол ориентации магнитного поля относительно к нормали ВТСП-ленты,  $k$ ,  $B_0$  и  $\beta$  – параметры для аппроксимации  $J_c(B, \theta, x)$ ,  $\alpha$  – учитывает, что  $I_c$  отличается от измерений образца ленты в собственном поле. Зависимость

$J_{c0}(x)$  для описания неравномерности критической плотности тока вдоль ширины ленты в собственном магнитном описывается кусочно-линейной функцией.

2G ВТСП лента — это совокупность тонких слоев, где сверхпроводящий слой толщиной 1-3 мкм нанесен (через буферные слои) на магнитную или немагнитную подложку. Такие сверхпроводники также стабилизируются слоями несверхпроводящего металла. На рисунке 1 показана структура конечно-элементной сетки 2G ВТСП ленты. Очень высокое соотношение длины к ширине сверхпроводящего слоя приводит к появлению значительного количества элементов с малыми линейными размерами.

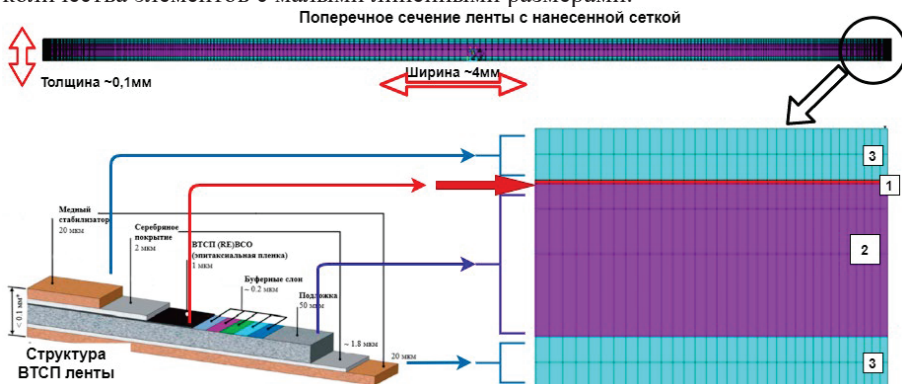


Рисунок 1 - структура конечно-элементной сетки из МКЭ модели. На выделенном стрелкой укрупненном участке края ленты «1» – ВТСП слой, «2» – подложка, «3» – стабилизирующие слои

Для реализации возможности расчета гистерезисных потерь в 2G ВТСП слое ленты в модели используется итерационный алгоритм. На начальном этапе, после создания конечно-элементной сетки, каждому элементу ВТСП слоя ( $i$ ) задается соответствующее сопротивление ( $\rho_i^0$ ). Затем рассчитывается плотность тока ( $J_i$ ) в каждом элементе сетки. Далее, итеративным методом, сопротивление каждого элемента пересчитывается по формуле 2. Критерий окончания итерационного процесса определяется выражением  $\frac{\rho_i^{k+1} - \rho_i^k}{\rho_i^k} < \zeta$ . Минимальными начальными значениями для  $\rho_i^0$  и для  $\zeta$  принято  $10^{-17}$  Ом·м и  $10^{-4}$  соответственно.

После всех итераций потери в ВТСП-слое на единицу длины и за цикл определяются как:

$$Q = 4 \cdot \int_0^{T_m} \int_S J^2 \rho ds d\tau = 4 \cdot \sum_{i_1}^{N_1} \Delta\tau \sum_i^N J_i^2 \rho_i s_i, \quad (4)$$

где  $N$  - количества элементов в ВТСП слое,  $N_1$  - номер шага по времени от 0 до значения  $T_m$  (1/4 полного цикла),  $s_i$  - сечение каждого элемента ВТСП слоя,  $\Delta\tau$  - временной шаг.



Так как потери в ВТСП слоях являются гистерезисными, следовательно, при пересчете на цикл, не зависят от частоты. Потери однозначно определяются профилями плотности тока в ВТСП слоях и максимальной амплитудой протекающего тока. Отсутствие зависимости от частоты позволяет провести нестационарный расчет только за один интервал времени для амплитудного значения тока  $I_m$ , или, иными словами, на  $\Delta t = 1/4$  полного периода и, таким образом, использовать магнитный векторный потенциал для расчета потерь в ВТСП слоях. Основой данного метода является наличие «электрического центра» или «ядра», то есть региона или линии внутри сверхпроводника, где электрическое поле остается нулевым в течении всего периода тока. Данный подход позволяет уменьшить число итераций при расчете потерь в ВТСП-слое, которые при этом на единицу длины и за цикл определяются выражением:

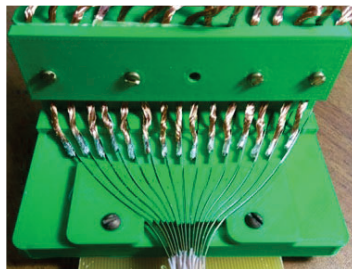
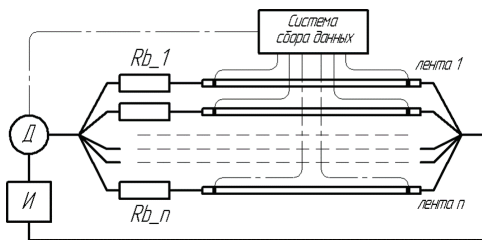
$$Q = 4 \cdot \sum_i^N J_i (A_{z,i} - A_{z,0}) s_i, \quad (5)$$

где  $A_{z,i}$  есть магнитный векторный потенциал в узле ( $i$ ) каждого из элементов сетки, а  $A_z$  – магнитный векторный потенциал в узле рядом с ядром.

Если подложка в 2G ВТСП-ленте магнитная, то в ней, как и в любом магнитном материале, возникают гистерезисные потери из-за нелинейного характера и различий при намагничивании и размагничивании. За время цикла  $T$  площадь, охватываемая кривой намагниченности в координатах  $B(H)$ , представляет гистерезисные потери энергии в единице объема:

$$W_h = \int_T H dB \quad (6)$$

Далее представлен специализированный испытательный стенд для измерения потерь в стопках и обмотках ВТСП лент. На его основе проведены эксперименты по измерению потерь в стопке лент, имитирующей прямой участок ВТСП-катушки типа рейстрек. Ленты сложены в стопку либо в несколько стопок, расположенных рядом; электрическая схема изображена на рисунке 2 а). На рисунке 2 б) показана фотография тоководов лент.



а) Рисунок 2 – а) - электрическая схема измерительного стенда, б) – фотография индивидуальных тоководов лент экспериментального стенда

Программируемый источник (И) может отдавать в нагрузку ток до 4 кА с частотой от 17 до 400 Гц. Сигналы с потенциальных контактов от каждой из

ВТСП лент в стопке, а также от датчика тока  $I$  записываются системой сбора данных с частотой 1млн. выборок в секунду. Затем записанные сигналы обрабатываются на ПК, электрические потери вычисляются по формуле:

$$P = \frac{1}{t_m} \int_0^{t_m} u \cdot i \cdot dt, \quad (7)$$

где  $u, i$  - мгновенные значения тока и напряжения в одной ленте,  $t_m$  - временной интервал, состоящий из нескольких периодов (для повышения точности).

Первоначально сравнение результатов экспериментов и моделирования потерь было проведено для следующих конфигураций: одна лента и стопка из пяти лент, для этого использовалась 2G ВТСП лента производства ЗАО «СуперОкс» со следующими характеристиками: поперечное сечение 4·0,1 мм, критический ток  $J_c$  (1μВ/см, 77,4 К) около 110 А, при этом параметр нарастания  $n \sim 26$ .

Для большей полноты также проведено сравнение с аналитическими моделями Норриса, которые позволяют рассчитать потери для одной ленты и соответствуют случаю  $J_c = \text{const}$ , а также с результатами моделирования потерь более простым численным методом (variational formulation), который позволяет рассчитать потери в стопке 2G ВТСП лент только для случая  $J_c = \text{const}$ .

На рисунке 3 показана зависимость измеренных потерь при температуре кипящего азота от амплитуды тока.

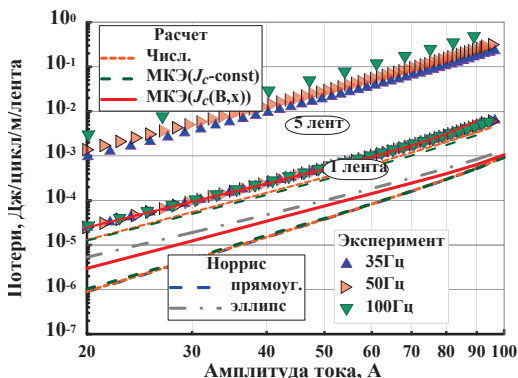


Рисунок 3 - Сравнение измеренных и вычисленных различными способами потерь для единичной ВТСП ленты и стопки из 5 ВТСП лент в зависимости от амплитуды тока. Расчеты проведены по разработанной МКЭ модели для варианта  $J_c = \text{const}$  и учетом зависимости  $J_c(B, \theta, x)$ ; а также по двум моделям Норриса и другой численной моделью.

Экспериментальные данные обозначены символами, линиями – расчётные данные

Измерения проводились на разных частотах (35, 50 и 100 Гц). Расчеты для единичной ленты как по разработанной МКЭ модели с  $J_c = \text{const}$ , так и по модели Норриса для прямоугольного сечения сверхпроводника и по другим моделям, показывают хорошее совпадение между собой. Также демонстрируют

совпадение друг с другом расчеты по другим моделям, и по разработанной МКЭ модели если  $J_c = \text{const}$  для стопки из пяти лент. Из рисунка 3 видно, что результаты полученные расчетной моделью совпадают с экспериментальными данными только если правильно учтена зависимость  $J_c(B, \theta, x)$ .

Построена двухмерная конечно-элементная модель в среде ANSYS для расчета потерь в ВТСП лентах второго поколения, стопках и обмотках из данных лент, работающих на переменном токе. Разработан и создан специализированный стенд, а также методика измерений потерь на переменном токе в ВТСП лентах и стопках из данных лент. Результаты расчета потерь по разработанной конечно-элементной модели сравнены как с результатами расчетов по другим известным аналитическим и численным методикам, так и с собственными экспериментальными данными, полученными на созданном стенде для стопок лент в различной конфигурации. Показано, что для получения наиболее точных результатов расчета необходимо точное определение коэффициентов функции  $J_c(B, \theta, x)$ .

**В третьей главе** представлено исследование потерь в модельных ВТСП обмотках.

В двухмерном подходе рейстректовую обмотку в линейной части можно представить, как стопку ВТСП лент. Ниже приведены результаты экспериментов с тремя стопками, расположенными рядом по 5 лент в каждой. Использовалась 2G ВТСП лента компании SuperOx со следующими характеристиками: поперечное сечение  $3 \cdot 0,1$  мм, критический ток в  $I_c$  ( $1 \mu\text{B}/\text{cm}$ ,  $77,4$  К) составляет  $150$  А при значении параметра нарастания  $n \sim 36$ . Толщина изоляции между лентами составила  $60$  микрон.

На рисунке 4 приведено сравнение измеренных и рассчитанных потерь (в пересчете на метр длины) в зависимости от амплитуды тока.

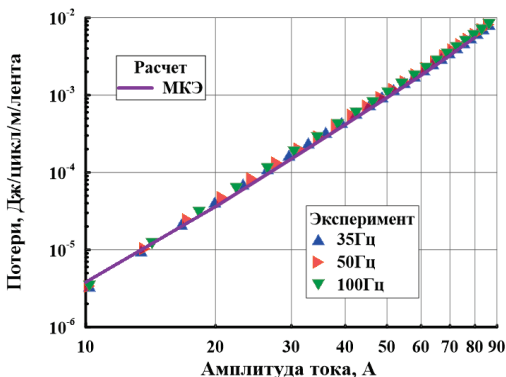


Рисунок 4 - Сравнение измеренных и рассчитанных потерь (на метр длины) в зависимости от амплитуды тока для конфигурации три стопки по пять лент

На рисунке 5 изображено распределение магнитного поля для поперечного сечения конфигурации 3 стопки по 5 лент в момент времени, когда

значение протекающего через них синусоидального тока принимает амплитудное значение 80А. Конечно-элементная сетка каждой из лент представляет собой структуру, изображенную на рисунке 1.

Обмотки ВТСП ЭМ, как правило, изготавливаются в виде рейстрекowych катушек. Поэтому было проведено сравнение экспериментальных данных и результатов расчета потерь для двух катушек типа двойной рейстрек. Катушки имеют идентичные размеры каркаса: внутренний радиус лобовой части 10 мм, длина прямого участка 70 мм, полное число витков 24, - но отличаются производителем ленты, SuperOx и AMERICAN Superconductor (AMSC).

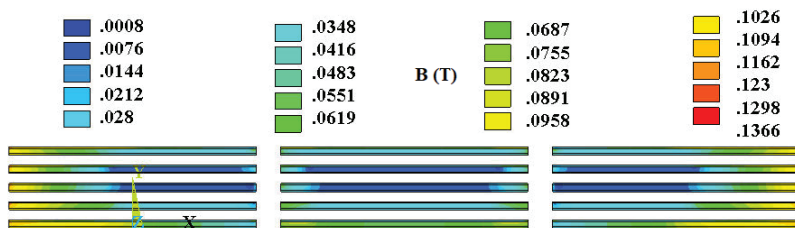


Рисунок 5 - Распределение магнитного поля в лентах конфигурации 3x5 в момент, когда значение протекающего через них синусоидального тока принимает амплитудное значение 80А

Для моделирования реальной геометрии катушки потери на переменном токе (в пересчете на метр длины) были рассчитаны для двух сечений обмотки: первое  $W_1$  – середина линейной части катушки (расчет велся в декартовой системе координат); второе  $W_2$  – середина лобовой части (расчет велся в цилиндрической системе координат). В таком случае потери можно представить в виде суммы  $W_{coil}=L_1 \cdot W_1 + L_2 \cdot W_2$ , где  $L_1$  и  $L_2$  – это длины пакетов лент, соответственно, линейной и лобовой части катушки.

Результаты измерений на трех частотах, а также соответствующих результатов моделирования приведены на рисунке 6а.

2G ВТСП лента производства AMSC имеет следующие параметры: поперечное сечение по проводнику 4,8·0,21 мм, с изоляцией: 4,95·0,36 мм, критический ток  $I_c = 105$  А (1μВ/см, 77,4 К), параметр нарастания  $n \sim 28$ . Данный проводник изготовлен по технологии MOD/RABiTS™ с использованием никель-вольфрамовой подложки, обладающей слабовыраженными ферромагнитными свойствами. Их наличие оказывает влияние на потери в ВТСП ленте двумя способами: наличие гистерезиса у материала подложки вызывает в ней потери, а её магнитная проницаемость изменяет картину распределения магнитного поля вокруг ВТСП слоя за счет усиления перпендикулярной к нему компоненты.

На рисунке 6б показано сравнение измеренных на трех частотах потерь (символы), а также гистерезисных потерь в ВТСП слое и подложке ленты (линии). Гистерезисные потери в подложке 2G ВТСП ленты обмотки пренебрежимо малы, однако ее магнитные свойства приводят к изменению магнитного поля в ВТСП слое ленты, что ведет к увеличению потерь в обмотке.

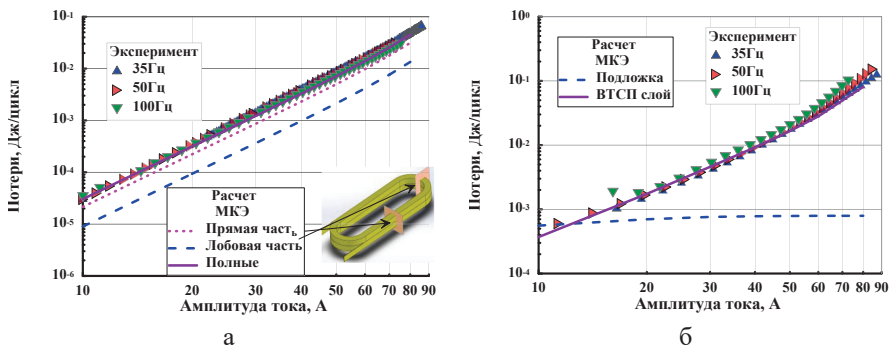


Рисунок 6- а) Рассчитанные потери в прямой и лобовой частях катушки, а также сравнение их суммы с данными эксперимента. Катушка выполнена из ленты SuperOx; б) Сравнение измеренных и расчетных потерь в VTСП слое и магнитной подложке AMSC ленты обмотки

Изготовлены рейстрекковые катушки из 2G VTСП лент (с магнитной и немагнитной подложкой) для обмоток электрических машин. При помощи разработанной численной модели проведены расчеты распределения магнитных полей и гистерезисных потерь в изготовленных катушках. Показано, что результаты расчетов с высокой точностью совпадают с экспериментальными данными, на синусоидальном токе различной частоты подтверждая возможность использования созданной численной модели для прогнозирования потерь на переменном токе в катушках любой конфигурации. Установлено, что гистерезисные потери в магнитной подложке VTСП лент в обмотке пренебрежимо малы, однако ее магнитные свойства приводят к повышению потерь.

**В четвертой главе** описана разработка и изготовление катушек для VTСП двигателя.

Первоначально было разработано специализированное намоточное устройство для изготовления рейстрекковых катушек. После отработки технологического процесса, выбора марки смолы и способа её нанесения был изготовлен опытный станок под управлением ПК, фото которого представлено на рисунке 7.

Далее была изготовлена катушка из 2G VTСП ленты производства AMSC. Размер ленты – 5x0.5 мм с изоляцией. Катушка имеет 24 витка, по 12 в слое, суммарная длина ленты – 5м. Каркас катушки предусматривает возможность установки ферромагнитного сердечника для имитации магнитопровода. Охлаждение осуществляется жидким азотом при температуре 77К.

Затем проведены измерения потерь на синусоидальном токе, в катушке при наличии и отсутствии стального (ферромагнитного) сердечника (рисунок 8а). На рисунке 8б приведены результаты измерения потерь при прямоугольном сигнале при наличии и отсутствии стального сердечника в катушке. При

установке стального сердечника величина потерь возрастает вследствие гистерезисных потерь в сердечнике.



Рисунок 7 - Станок для намотки ВТСП катушек

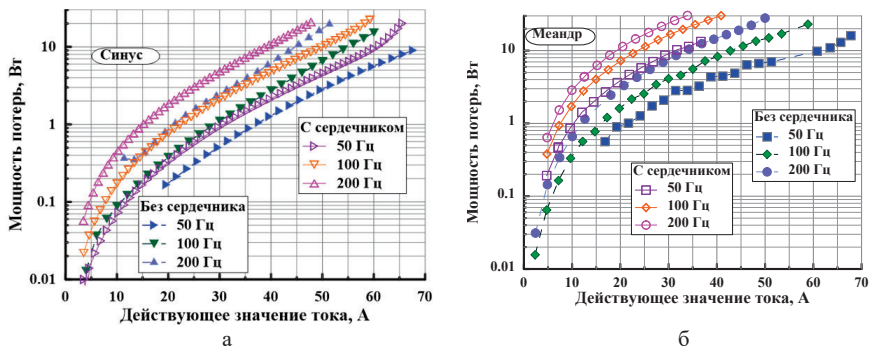


Рисунок 8- Измеренные потери в катушке (с сердечником и без него): а) на синусоидальном токе; б) на меандре

Разработан и изготовлен намоточный станок для катушек из 2G ВТСП ленты, а также создана технология изготовления ВТСП катушек для обмоток электрических машин. ВТСП катушка, произведенная на указанном оборудовании, испытана различными по форме и частоте токами с целью определения величины потерь на переменном токе., показана возможность использования ВТСП обмоток на переменном токе в составе СП электрических машин.

**В пятой главе** приведены испытания ВТСП катушки в условиях, имитирующих работу в составе двигателя для подвижных объектов.

Для этих целей собран Н-мост, имитирующий работу катушки от силового преобразователя (инвертора), изображенный на рисунке 9, состоящий из четырех IGBT транзисторов «К1-К4».

Сигналы управления «У1-У4» подаются на затворы от внешней системы управления, позволяющей путем коммутации ключей создать на нагрузке «L» ШИМ-модулированный знакопеременный ток (рисунок. 10а).

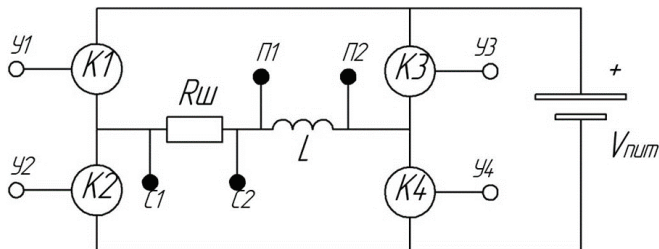


Рисунок 9 - Схема испытательного стенда для исследования ВТСП-катушки при питании от инвертора

Сигналы «С1-С2» с токового шунта и потенциальных контактов «П1-П2» катушки поступают на плату АЦП компьютера под управлением LabView. Частота ШИМ составила 10кГц (рисунок 10б).

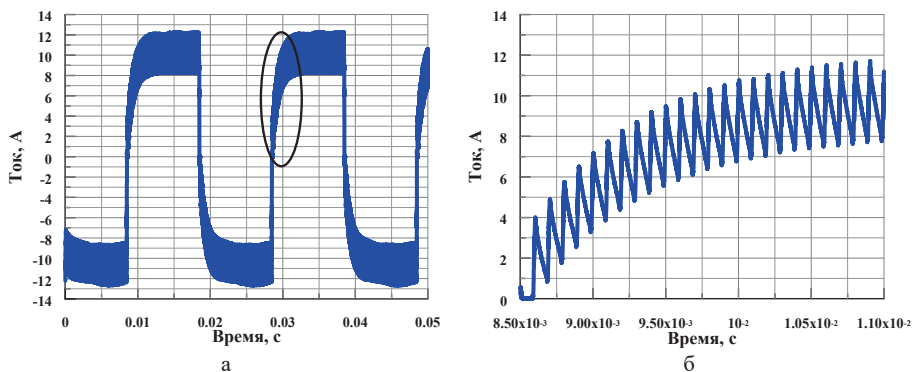


Рисунок 10 - ШИМ-форма тока в катушке: а) основная частота 50Гц; б) увеличенный участок нарастания тока, видны осцилляции на частоте ШИМ 10кГц

Результаты измерений, как и прежде, сравниваются со случаем синусоидального тока в катушке без сердечника (рисунок 11). Графики на рисунке 11 показывают, что при увеличении амплитуды питающего тока значение потерь в катушке увеличивается. При этом потери при синусоидальном сигнале оказываются выше.

Далее представлены испытания катушки от инвертора в режиме источника тока.

Для того, чтобы создать ток специальной форме в отдельно взятой ВТСП-катушке, возникла необходимость в создании специализированного испытательного стенда, базирующегося на Н-мосте (рисунок 9), но имеющем более сложную систему управления силовыми ключами.

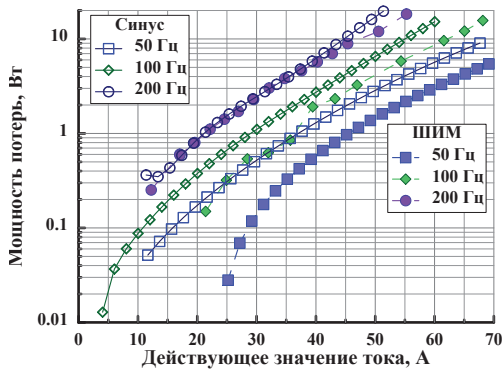


Рисунок 11 - Сравнение измеренных потерь на синусоидальном токе и ШИМ

Стенд был запрограммирован на создание в ВТСП катушке двух форм тока: синусоида, характерная для режима питания синхронной машины от силового преобразователя (режим «СМ») (рисунок 12а) и ток фазы БДПТ (режим «БДПТ») на рисунке 12б.

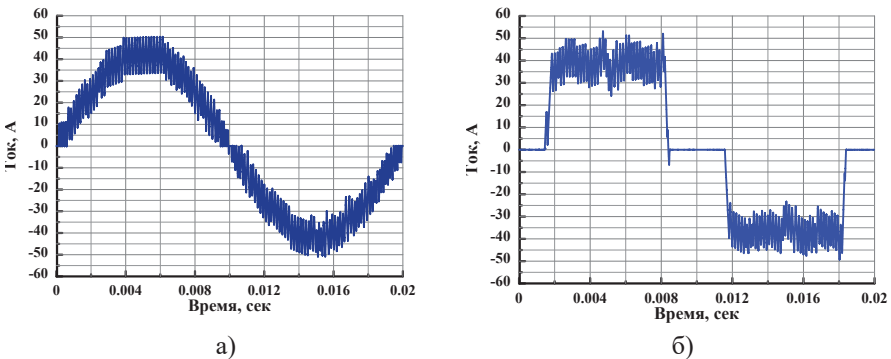


Рисунок 12- а) Сгенерированный в ВТСП катушке синусоидальный ток с частотой 50Гц; б) Трапецеидальный (БДПТ) ток в ВТСП катушке с основной частотой 50Гц

Итоговые значения потерь для каждой из катушек (SuperOx и AMSC) по формам тока отображены на рисунке 13. Для корректного вычисления потерь на зашумленных сигналах алгоритм расчета измеренных потерь, описанный в главе 2, был существенно доработан. Потери возрастают монотонно и более плавно, чем на чистом синусоидальном токе, но значения оказываются в несколько раз выше.

Для исследования ВТСП обмоток электрических машин разработаны и изготовлены оригинальные испытательные стенды, использующие ШИМ-модуляцию, работающие как в режиме источника напряжения, так и в режиме источника тока. Доработаны ранее использовавшаяся методика проведения эксперимента и алгоритм расчета потерь. Измерения потерь показали, что в режим источника тока с ШИМ приводит к значительному возрастанию потерь.



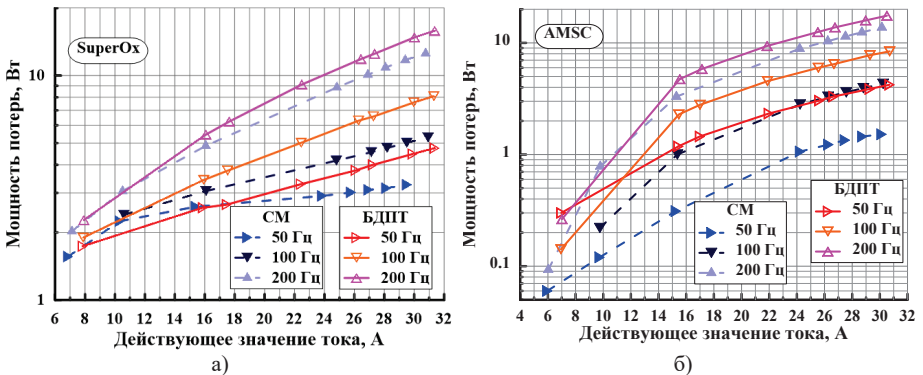


Рисунок 13 - а) Потери в обмотке из ленты SuperOx для режимов «СМ» и «БДПТ»; б) Потери в обмотке на основе лент AMSC для режимов «СМ» и «БДПТ»

В шестой главе проведены исследования рейстрекowych ВТСП катушек и обмотки электрической машины в присутствии внешнего постоянного и переменного магнитного поля.

В качестве базового объекта взята катушка типа двойной рейстрек из ленты AMSC с длиной линейной части 100мм, числом витков 24 и полной длиной ленты 8м. Первоначально проведены исследования одиночной катушки в присутствии внешнего постоянного магнитного поля 0,2 Тл, перпендикулярного плоскости лент. Испытания проведены для синусоидального тока (рисунок 14), а также в режимах «БДПТ» и «СМ» по методике, описанной в главе 5 (рисунок 15).

При сравнении потерь на рисунках 14-15 видно, что влияние высокочастотных колебаний тока на потери очень значительно и повышает их уровень в несколько раз. Внешнее магнитное поле также увеличивает потери.

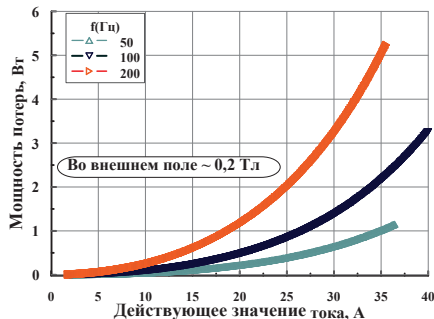
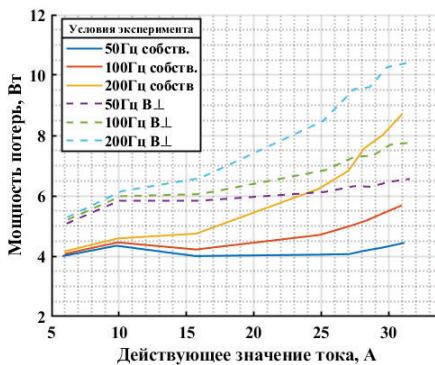
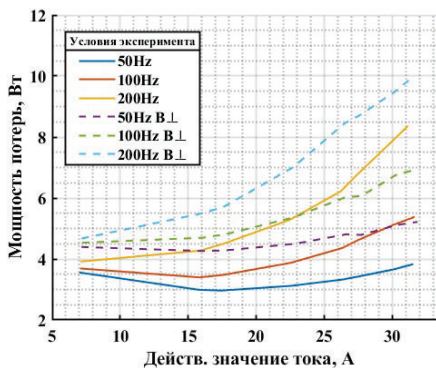


Рисунок 14 – Измеренные потери на синусоидальном токе в катушке, используемой в кольцевой статорной обмотке во внешнем поле 0,2 Тл



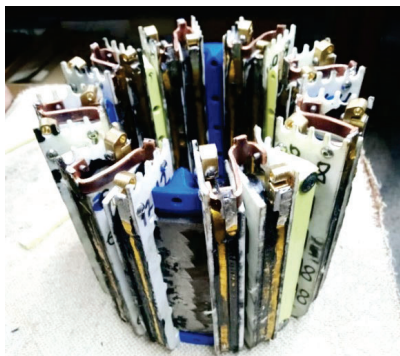
а)



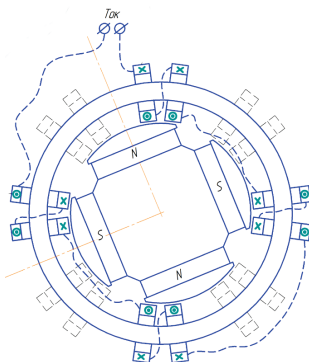
б)

Рисунок 15 - а) Измеренные потери в катушке в «СМ» режиме в собственном поле катушки и во внешнем магнитном поле; б) То же, но в «БДПТ» режиме

Далее проведены исследования двухфазной кольцевой статорной обмотки (рисунок 16 а) из 16 вышеописанных катушек (по 8 катушек на фазу). Испытания проводились в том числе с установленным (рисунок 16 б) заторможенным ротором с постоянными магнитами.



а)

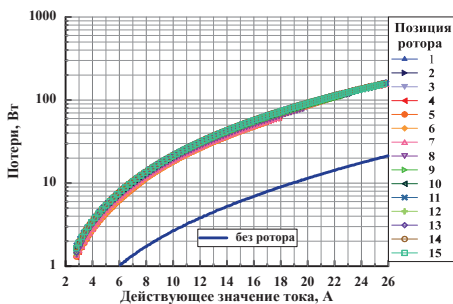


б)

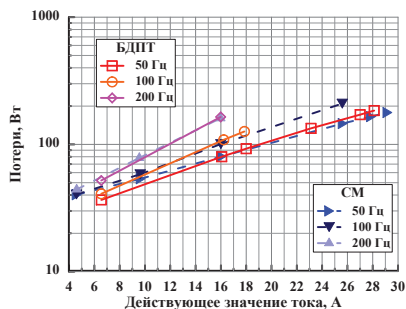
Рисунок 16 - а) Собранный пакет кольцевой статорной обмотки; б) Схематичное изображение статорной обмотки с установленным внутри ротором; сплошными линиями обозначена обмотка одной из двух фаз

Исследовано влияние внешнего постоянного магнитного поля на потери, как на синусоидальном (рисунок 17 а), так и на модулированном токе в режимах «СМ» и «БДПТ» в различных положениях заторможенного ротора (рисунок 17 б).

Заключительным этапом стали испытания сверхпроводниковой электрической машины в режиме генератора на специализированном стенде (рисунок 18).



а)



б)

Рисунок 17 - а) Потери в статоре в зависимости от тока при различных углах установки ротора на частоте 100 Гц; б) Усредненные (для положений «0», «8», «15») потери в статоре для режимов «СМ» и «БДПТ»

Для определения потерь в сверхпроводниковой обмотке можно воспользоваться следующим выражением баланса мощности:

$$P_{\text{мех}} = P_{\text{хх}} + P_{\text{акт}} + P_{\text{ВТСП}}, \quad (8)$$

При этом:

$$P_{\text{мех}} = M * \omega, \quad (9)$$

где  $M$  и  $\omega$  – крутящий момент и частота вращения вала соответственно, регистрируемые при помощи датчика. Для двухфазной электрической машины активную мощность можно вычислить как

$$P_{\text{акт}} = \frac{1}{t_m} \int_0^{t_m} u_1 i_1 dt + \frac{1}{t_m} \int_0^{t_m} u_2 i_2 dt, \quad (10)$$

где  $u_1 i_1$  и  $u_2 i_2$  – мгновенные значения напряжений и токов в фазах,  $t_m$  – период интегрирования, равный периоду напряжения в фазе. Мощность вычислена для каждой из фаз для увеличения точности. Потери холостого хода  $P_{\text{хх}} = P_{\text{мех}}$  для каждой частоты вращения вала.

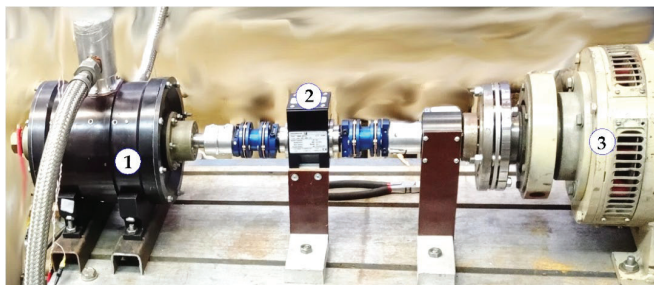


Рисунок 18 - Стенд для испытаний электрических машин: 1 – экспериментальная ВТСП машина, 2 – датчик момента и частоты вращения, 3 – приводной двигатель

На рисунке 19 представлены потери в фазе, приведенные на период (цикл) тока (Дж/цикл), в зависимости от усредненного действующего значения

тока в фазе. Также пунктиром представлены данные по потерям в фазе с установленным неподвижным ротором.

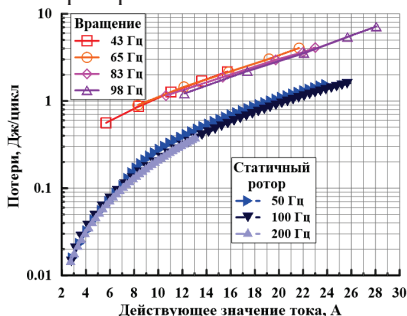


Рисунок 19 - Измеренные потери на синусоидальном токе в кольцевой статорной обмотке с подвижным ротором и с неподвижным ротором

Экспериментально исследованы рейстрекковые ВТСП обмотки в присутствии внешнего постоянного магнитного поля, в том числе в режиме модулированных токов. Показано значительное возрастание потерь во всех режимах во внешнем магнитном поле. Проведен комплекс испытаний по измерению потерь в статорных ВТСП обмотках электрической машины в различных условиях: без установленного ротора, со статичным ротором при питании синусоидальными и несинусоидальными токами, полученными при помощи высокочастотной модуляции, а также в составе электрической машины, работающей в генераторном режиме на активную нагрузку.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе получены следующие результаты:

1. Проведенный обзор отечественных и зарубежных источников показал, что реализация систем электродвижения летательных аппаратов невозможна без применения в их составе электромеханических преобразователей с высокой удельной мощностью. Реализация электромеханических преобразователей с высокой удельной мощностью (более 10-20 кВт/кг) возможна только с использованием современных ВТСП проводников.
2. Разработана уникальная двухмерная МКЭ модель для расчета потерь на переменном токе в 2G ВТСП лентах, стопках и обмотках на их основе, учитывающая значительную нелинейность сопротивления от плотности тока в ВТСП слое лент, также зависимость критической плотности тока как от величины и направления внешнего магнитного поля, так и ее неоднородность по ширине ВТСП слоя ленты. Если подложка 2G ВТСП ленты магнитная, то учтены ее магнитные свойства.
3. На основе разработанной экспериментальной методики проведено детальное исследование потерь в 2G ВТСП лентах с немагнитной и магнитной подложкой, стопках и катушках на их основе. Результаты численного моделирования с высокой точностью совпадают с экспериментальными

данными, подтверждая возможность использования данной модели для оценки потерь на переменном токе в катушках различной конфигурации.

4. В результате проведенных экспериментальных и расчетных исследований на стопках 2G ВТСП лент подтверждена верность разработанной конечно-элементной модели, результаты моделирования совпадают с результатами экспериментов с 5% точностью. Установлено, что для получения наиболее точных результатов расчета потерь необходимо правильное определение коэффициентов в функции  $J_c(B, \theta, x)$ , описывающей зависимость критической плотности тока от величины и направления магнитного поля, а также координаты вдоль ширины ВТСП слоя ленты. Показано, что гистерезисные потери в магнитной подложке ВТСП лент в обмотке пренебрежимо малы, однако ее магнитные свойства изменяют потери в ВТСП слое.
5. Спроектирован и изготовлен специализированный намоточный станок ВТСП катушек, в том числе типа двойной рейстрек. Изготовленные с помощью данного оборудования ВТСП катушки использованы для обмоток ЭМ, разрабатываемых на кафедре 310 МАИ. Акт использования результатов диссертации в НИР находится в приложении к диссертации.
6. Для детального изучения работы ВТСП катушек и изготовленных на их основе обмоток ЭМ проведены их испытания на несинусоидальных токах в режимах, имитирующих работу двигателя с электронным преобразователем-инвертором. Разработаны и изготовлены специализированные испытательные стенды, работающие как в режиме источника напряжения, так и в режиме источника тока. Для случая с источником тока существенно доработаны методика измерения и алгоритм расчета потерь. Изготовлен безиндуктивный токовый шунт. Также экспериментально исследованы рейстрековые ВТСП обмотки в присутствии внешнего постоянного магнитного поля. Результаты проведенных испытаний могут быть использованы для выработки требований к геометрии ВТСП обмоток ЭМ.
7. С помощью предложенной методики проведен комплекс измерений потерь в статорных ВТСП обмотках ЭМ в различных условиях: без установленного ротора, со статичным ротором при питании синусоидальными и несинусоидальными токами, полученными при помощи высокочастотной модуляции, а также в составе ЭМ, работающей в генераторном режиме на активную нагрузку. Установлено, что (в пересчете на одну катушку) переход от одиночной катушки к собранному статору приводит к возрастанию потерь в 3...5 раз; присутствие неподвижного ротора с постоянными магнитами приводит к дальнейшему росту потерь в 5...8 раз, работа машины в генераторном режиме увеличивает потери еще в 3...5 раз по сравнению с неподвижным ротором. Для токов, полученных путем высокочастотной модуляции, потери возрастают, для случая с установленным неподвижным ротором, в 1,5...2 раза по сравнению с синусоидальным током.
8. Впервые определена тепловая нагрузка (на температурном уровне жидкого азота) ВТСП обмоток ЭМ переменного тока на уровне около 10-100 Вт в зависимости от режима работы. Определение тепловой нагрузки является

обязательным для оптимизации системы криостатирования сверхпроводниковой машины.

## **БЛАГОДАРНОСТЬ**

Автор выражает особую благодарность своему коллеге, Зубко Василию Васильевичу, д.т.н, главному научному сотруднику ОАО «ВНИИКП», за советы и замечания по выполненной работе.

## **ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

**В рецензируемых научных журналах, входящих в перечень рекомендуемых изданий ВАК:**

1. Занегин С., Зубко В., Иванов Н. Анализ потерь в обмотках и стопках из ВТСП лент второго поколения // Электричество. – 2020. – №5. – С. 54-60.
2. Занегин С., Иванов К., Шишов Д., Шишов И., Ковалев К., Зубко В. Изготовление и испытание высокотемпературной сверхпроводниковой катушки для макета двигателя беспилотного летательного аппарата // Электричество. – 2019. – Vol. 7, №7. – С.53-58.

## **Работы в журналах, входящих в базы Scopus**

1. Zanegin, S., Ivanov, N., Zubko V., Kovalev K., Shishov I. , Shishov D. , Podguzov V. Measurements and Analysis of AC Losses in HTS Windings of Electrical Machine for Different Operation Modes // Appl. Sci. – 2021. – Vol. 11, No 5, 2741.
2. Zanegin S., Zubko V., Fetisov S., Vysotsky V. AC Losses Analysis in stack of 2G HTS tapes in a coil // J. Phys.: Conf. Ser. – 2020. Vol. – 1559, N1, p. 012115.
3. Zanegin S., Ivanov N., Shishov D., Shishov I., Kovalev K., Zubko V. AC losses test of HTS racetrack coils for HTS motor winding // J. Phys.: Conf. Ser. – 2020. – Vol. 1559, N1, p. 012142.
4. Zanegin S., Ivanov N., Zubko V., Kovalev K., Shishov I., Podguzov V. Losses analysis of HTS racetrack coil operating in an external magnetic field // Intern. Confer. on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS) – 2020.
5. Zanegin S., Ivanov N., Shishov D., Shishov I., Kovalev K., Zubko V. Manufacturing and Testing of AC HTS-2 Coil for Small Electrical Motor // Journal of Superconductivity and Novel Magnetism–2019.

**Другие работы автора в журналах, входящих в базы перечень рекомендуемых изданий ВАК и в базы Scopus**

1. Kovalev K., Ivanov N., Rusanov D., Kuznetsov G., Shishov D., Zanegin S. Developing and testing of rotor with HTS coils for electric machine // Przegląd Elektrotechniczny, ISSN 0033-2097, R. 96 NR 1/2020.
2. Kovalev K., Ivanov N., Shishov D., Zanegin S HTS generator, cable and rectifier as a system for hybrid propulsion system // Journal of Physics: Conference Series –2021. – Vol. 1891, 012004.

3. Fetisov S., Zubko V., Zanehin S., Nosov A., Vysotsky V. Optimization and Cold Test of a Triaxial 2G HTS Power Cable With High Current Capacity // IEEE Trans. on Appl. Supercond. – 2021. – Vol. 31, No 5. – P. 5400104.

4. Kovalev K., Zhuravlev S., Rusanov D., Ivanov N., Zanehin S., Podguzov V. Experimental research of stator with HTS ring winding // International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems. – 2020. – P. 20258159.

5. Kovalev K., Ivanov N., Rusanov D., Kuznetsov G., Shishov D., Zanehin S. Developing and testing of rotor with HTS coils for electric machine // Przegląd Elektrotechniczny. – 2020. – Vol. 1, P.80-83

6. Fetisov S., Zubko V., Zanehin S., Vysotsky V. Cold test and numerical analysis of the compact 2G HTS power cable // Conf. Series: Materials Science and Engineering–2019.– Vol. 502, No1.

7. Zubko V., Fetisov S., Zanehin S., Vysotsky V. Analysis of behaviour of HTS tapes cooled by liquid nitrogen under currents more than the critical current // Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 502, No 1.

8. Fetisov S., Zubko V., Zanehin S., Nosov A., Vysotsky V. Numerical Simulation and Cold Test of a Compact 2G HTS Power Cable // IEEE Trans. on Appl. Supercond. – 2018. – Vol. 28, No4. – P. 5400905

9. Vysotsky V., Zanehin S., Fetisov S., Ryabov S., Zubko V. Study of Heat Localization in HTS Wires at Overload Conditions // IEEE Trans. on Appl. Supercond. – 2017. – Vol.27, No4. – P. 5400305.

10. Высоцкий В., Благоев Е., Костюк В., Носов А., Фетисов С., Занегин С., Антюхов И., Фирсов В., Каторгин Б. Передача энергии с помощью водорода и сверхпроводимости – обзор концепции и первых экспериментальных результатов // в сб. Инновационные технологии в энергетике, Российская академия наук. - М.: Наука – 2016. – стр. 5-25.

11. Fetisov S., Zubko V., Zanehin S., Nosov A., Vysotsky V., Kario A., Kling A., Goldacker W., Molodyk A., Mankevich A., Adamenkov A., Samoilenkov S., Melyukov D. Development and Characterization of a 2G HTS Roebel Cable for Aircraft Power Systems // IEEE Trans. on Appl. Supercond. – 2016. – Vol.26, No3. – P. 4803204.

12. Зубко В., Высоцкий В., Фетисов С., Носов А., Занегин С. Анализ гистерезисных потерь в силовых кабелях на основе высокотемп. - сверхпровод. лент второго поколения // Электричество. – 2014. – №4. – С. 24-32.

Автореферат отпечатан с разрешения диссертационного совета Д 212.217.04

ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»

(протокол № 6 от 26.10.2021 г.)

Заказ № \_\_\_\_\_. Тираж 100 экз.

Отпечатано на ризографе.

ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»

Отдел типографии и оперативной полиграфии

443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244.