

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Занегина Сергея Юрьевича «Исследование потерь в ВТСП обмотках электрических машин», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.01 – «Электромеханика и электрические аппараты»

Структура и объем диссертационной работы

Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения и библиографического списка (91 наименование). Диссертация изложена на 134 страницах основного текста, иллюстрирована 80 рисунками и 8 таблицами. По диссертационной работе сделаны выводы, представляющие результаты работы, рекомендации их практического применения и перспективы развития. Диссертационная работа изложена логичным, аргументированным и ясным языком, технически корректно оформлена.

Актуальность темы диссертации

В диссертации приведены результаты исследований, направленные на совершенствование технологий применения высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП) в электрических машинах переменного тока с целью повышения их энергоэффективности. Рассмотрено применение современных ВТСП проводов второго поколения (2G), разработка и испытание которых активно ведется авиационной промышленностью для создания перспективных самолетов с электрической тягой. Значительным препятствием на пути внедрения сверхпроводниковых электрических машин представляется отсутствие однозначных методик для расчета и измерения потерь в сверхпроводящих катушках. Исследование механизма возникновения потерь в 2G ВТСП катушках, разработка моделей, определяющих зависимость потерь от частоты, формы и значения тока позволит уточнить характеристики сверхпроводниковой электрической машины и спроектировать соответствующую систему криогенного обеспечения. Актуальность темы исследований не вызывает сомнений.

Содержание диссертации

В введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследований, показана научная новизна и практическая ценность работы, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведен обзор существующих проектов ВТСП машин с высокими удельными параметрами и рассмотрены особенности их работы в

системах электродвижения, применительно к авиации будущего. Рассмотрены современные технические ВТСП проводники, и механизм гистерезисных потерь в сверхпроводниках на переменном токе. Приведено описание существующих моделей для расчета гистерезисных потерь в одиночных сверхпроводниках, а также более сложных устройствах: кабелях и обмотках. Описаны различные способы экспериментального измерения потерь в ВТСП устройствах. На основании проведенного обзора поставлена задача выполнения теоретических и экспериментальных исследований потерь в обмотках электрических машин из ВТСП лент второго поколения и разработки рекомендаций по применению ВТСП лент в обмотках электрических машин.

Во второй главе представлена разработанная автором оригинальная математическая модель на основе метода конечных элементов для исследования потерь в обмотках и стопках ВТСП лент второго поколения на переменном токе с использованием программного комплекса ANSYS.

Дано описание разработанного испытательного стенда для измерения потерь в стопках и обмотках ВТСП лент на переменном токе, а также методика испытаний. Приведены данные измерений на стенде потерь для стопок лент, результаты которых сопоставлены как с результатами расчетов потерь по разработанной конечно-элементной модели, так и с результатами расчетов по другим известным аналитическим и численным методикам. Показано, что для получения наиболее точных результатов расчетов модель должна содержать функцию, описывающую критическую плотность тока в зависимости от магнитной индукции, ориентации вектора магнитной индукции относительно плоскости ленты и неравномерности распределения плотности тока по ширине ленты.

Третья глава посвящена исследованию потерь в различных конфигурациях стопок ВТСП лент и в малоразмерных рейстроковых катушках с идентичной геометрией, изготовленных из 2G ВТСП лент двух производителей: American Superconductor (США) с магнитной подложкой и SuperOx (Россия) с немагнитной подложкой. При помощи разработанной математической модели в комплексе ANSYS рассчитаны потери для двух катушек. Проведены экспериментальные исследования потерь в изготовленных катушках, при питании их переменным током различной частоты и амплитуды. Результаты расчетов с небольшими расхождениями совпадают с экспериментальными данными, подтверждая возможность использования созданной численной модели для прогнозирования потерь на переменном токе в катушках любой конфигурации.

В четвертой главе описаны разработка и изготовление катушек для ВТСП электродвигателя. Создано специализированное намоточное устройство для изготовления рейстрековых галет. Изготовленная на намоточном устройстве ВТСП катушка испытана различными по форме и частоте токами с целью определения значений потерь на переменном токе при охлаждении жидким азотом при наличии и отсутствии стального ферромагнитного сердечника. Продемонстрирована возможность использования ВТСП обмоток на переменном токе в электрических машинах.

В пятой главе приведены данные испытаний рейстрековой ВТСП галеты в условиях, имитирующих работу в составе электродвигателя для подвижных объектов. Приведены описания оригинальных стендов, представляющих собой силовые преобразователи, работающие как в режиме источника напряжения, так и в режиме источника тока, предназначенные для исследований ВТСП обмоток электрических машин. Для случая с источником тока доработаны методика проведения эксперимента и алгоритм расчета потерь. Проведены исследования катушек в режимах, имитирующих работу электродвигателя с электронным преобразователем-инвертором. Показано, что наличие высокочастотных пульсаций тока на стенде-источнике тока приводит к значительному возрастанию потерь как в режиме модулированного синусоидального тока, так и тока трапециoidalной формы, характерного для бесколлекторного двигателя постоянного тока.

Шестая глава посвящена исследованиям рейстрековых ВТСП катушек и обмотки электрической машины в присутствии внешнего постоянного и переменного магнитных полей. Установлено, что влияние высокочастотных колебаний тока на потери в присутствии внешнего постоянного магнитного поля значительно повышает их уровень, а также выявлены различия в уровне потерь на синусоидальном и модулированном токе во внешнем магнитном поле. Собранная обмотка электрической машины испытана модулированным синусоидальным током и током, аналогичным току фазы бесконтактного двигателя постоянного тока. Установлено, что при воздействии внешнего магнитного поля потери оказываются значительно выше. Это вызвано сочетанием двух факторов: снижением магнитной проницаемости материала подложки на высокой частоте, а также влиянием внешнего магнитного поля на характеристики ленты. Проведено исследование потерь в ВТСП обмотке в составе электрической машины, работающей в генераторном режиме на активную нагрузку.

В заключении диссертации сделаны подробные выводы по полученным результатам работы

Обоснованность и достоверность полученных результатов

Достоверность полученных результатов обоснована корректным использованием теории высокотемпературной сверхпроводимости, математических методов моделирования электромагнитных полей на основе метода конечных элементов с использованием известных компьютерных программ, полученными данными большого объема экспериментальных исследований.

Научная новизна исследований и полученных результатов

К новым научным результатам диссертационной работы Сергея Юрьевича Занегина можно отнести:

- методику численного расчета потерь в катушках обмоток электрических машин и стопках из 2G ВТСП лент, работающих в нестационарных режимах;
- методику обработки результатов экспериментальных исследований, позволяющую проводить измерения потерь в катушках из ВТСП лент при питании их токами различной формы и частоты;
- результаты анализа полученных экспериментальных данных о влиянии условий работы ВТСП катушек (отдельная катушка, система катушек с общим магнитопроводом, присутствие внешнего постоянного и переменного магнитного поля) на значение потерь в катушке.

Практическая значимость работы

Практическая значимость работы состоит:

- в разработанном уникальном комплексе экспериментального оборудования, которое предназначено для измерения потерь в 2G ВТСП лентах, сопках и катушках из лент как на синусоидальном, так и несинусоидальном токе различной частоты;
- в разработанных моделях в программном комплексе ANSYS для расчетов потерь в ВТСП лентах и изделиях из них.

Рекомендации по дальнейшему использованию результатов и выводов

Полученные в диссертации результаты целесообразно рекомендовать к дальнейшему использованию в научно-исследовательских организациях при разработке новых перспективных конструкций электрических машин с обмотками из ВТСП лент.

Соответствие автореферата основным положениям диссертации

Автореферат полно отражает содержание работы, содержит информацию об основных положениях и выводах диссертации, позволяет сделать заключение о научном и техническом уровне работы.

Полнота опубликования основных результатов диссертации

Основные положения диссертации отражены в публикациях автора. Результаты исследований докладывались на Международных и Всероссийских конференциях, опубликовано 19 печатных работы, из которых 2 опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК РФ, 5 статей в журналах, входящих в базу Scopus. Анализ публикаций позволяет утверждать, что полученные результаты представлены в них с требуемой полнотой.

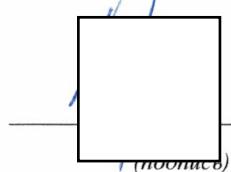
Замечания по диссертационной работе:

1. В формуле 2.6 введен параметр α , но не ясно, из каких соображений он выбран.
2. Следует пояснить выбор минимального значения сопротивления в формуле 2.7.
3. В выводе 7 на стр. 21 приведена лишь констатация того, что потери в ВТСП увеличиваются в несколько раз при изменении магнитных условий в области катушек, однако ничего не говорится о причинах, по которым это происходит.
4. Полезно сделать более четкие сопоставительные выводы о качественных и количественных характеристиках потерь при протекании тока в одиночной ленте и катушке из ленты.

В целом диссертация Занегина Сергея Юрьевича «Исследование потерь в ВТСП обмотках электрических машин» представляет законченную научно-квалификационную работу. Автором путем разработки и применения уточненных моделей, методик расчетов, разработки оборудования и проведения экспериментальных исследований решена актуальная научно-техническая задача создания методов и средств для анализа потерь в катушках обмоток электрических машин из ВТСП лент второго поколения как в стационарных, так и в нестационарных режимах работы. Научные и практические результаты диссертации обоснованы и достоверны, являются новыми и значимыми, имеют важное значение для

применения высокотемпературной сверхпроводимости в электромеханике и электрических аппаратах. Диссертация соответствует критериям п.п. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней» (Постановление Правительства РФ от 24.09.2013 №842), предъявляемым к кандидатской диссертации в области технических наук, а Занегин Сергей Юрьевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.01 «Электромеханика и электрические аппараты».

Профессор кафедры «Электромеханика, электрические и электронные аппараты» Федерального Государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» (НИУ «МЭИ»)
(111250, Россия, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14).
Тел. 8 (495) 362-78-35 E-mail: kurbatovpa@mpei.ru



/Курбатов Павел Александрович/

(фамилия имя отчество оппонента)

Подпись д.т.н., профессора Курбатова Павла Александровича удостоверяю:

Дата: «01» 12 2021

