



АО «НИИЭМ»

Исх. № 31/298 от 06.09.2022

Акционерное общество

«Научно-исследовательский институт электромеханики»

ОГРН 1095017003652 ОКПО 04657145 ИНН/КПП 5017084637/501701001

Панфилова ул., д. 11, г. Истра, Московская область, 143502; тел.: (495) 994 51 10, факс: (499) 254 53 75

Для телеграмм: 143500 Истра ВЕКТОР; E-mail: info@niiem.ru

ОТЗЫВ

на автореферат диссертации **Дежиной Ирины Николаевны**
«Криогенная электрическая машина
без ферромагнитопровода с обмотками на основе
высокотемпературных сверхпроводниковых материалов»,
представленной на соискание ученой степени
кандидата технических наук по специальности
05.09.01 «Электромеханика и электрические аппараты»

При создании современных передвижных источников питания, будь то самолёт, электровоз или другой подвижный объект, где возможно применение электрических машин (ЭМ) со сверхпроводящими (СП) обмотками, стоит вопрос минимизации их массы, создания ЭМ с высокой удельной мощностью (более 10-20 кВт/кг), что недостижимо при использовании традиционных конструкций, электротехнических материалов и технологий.

Применение сверхпроводниковых материалов (СП) в обмотках электрических машин позволяет в новых разработках исследовать и решить ряд проблем:

- снизить на порядок мощность, затрачиваемую на питание обмоток возбуждения электромеханических преобразователей, благодаря нулевому сопротивлению сверхпроводниковых обмоток при протекании постоянного электрического тока;
- повысить в разы мощность единичного агрегата за счет увеличения магнитной индукции в рабочем зазоре и увеличения токовой нагрузки ротора и статора;
- снизить металлоемкость электротехнических изделий за счет отказа от стального ферромагнитопровода и медных проводов.

Электрические машины для «более электрического самолета» или «полностью электрического самолета» являются машинами нового поколения, а их разработка требует создания иных подходов к методам расчета и исследования, в отличие от электрических машин классического исполнения, удельная мощность которых составляет порядка ≈ 1 кВт/кг и менее; именно поэтому тема диссертации выбрана весьма актуальной.

Одному из путей – снижению металлоемкости ЭМ путём отказа от ферромагнитопровода с применением СП-обмоток посвящена представленная диссертационная работа. При этом потребовалось создать методики проектирования ЭМ нетрадиционной конструкции, исследовать рабочие процессы безжелезной конструкции, провести соответствующие эксперименты, подтверждающие аналитические решения, дать инженерные рекомендации для разработки новых конструкций.

Основное содержание диссертации изложено во введении, четырех главах, заключении.

Большое внимание уделено разработке и применению аналитической модели магнитных полей и параметров сверхпроводниковых ЭМ без ферромагнитопровода, позволяющей проводить исследования основных характеристик. При этом были применены методы математической физики, теории поля, электродинамики, электромеханики и прикладной сверхпроводимости, что показывает компетентность и владение необходимым математическим аппаратом диссертанта. Обширные исследования были проведены с применения пакетов прикладных

программ к вычислительным машинам: *MathCAD*, *MATLAB*, *COMSOL Multiphysics*, *SOLIDWORKS*. Это подтверждает умение в применении современных методов и аппаратов для исследования в современных разработках. Представление расчетной схемы активной зоны машины как два источника поля — обмотка возбуждения (ОВ) ротора и обмотка якоря (ОЯ), позволяет провести анализ и исследование поля в виде суперпозиции решений отдельно для векторного потенциала ротора и отдельно для статора. Это позволяет получить отдельно влияние каждого из потенциалов на зоны статора, ротора и область внешнего экрана, а затем их суммирование по областям расположения обмоток. Такой подход позволяет изучить отдельно влияние поля одной обмотки на другую, на внешнюю зону экрана с учетом его материала, а также получить аналитические выражения для расчета основных параметров для построения характеристик ЭМ, необходимых для её проектирования.

Применение численных методов поверочного расчета магнитных полей и параметров СП ЭМ без ферромагнитопровода на основе метода конечных разностей позволило использовать пакет прикладных программ *COMSOL Multiphysics* как в плоской, так и в объемной постановке. Это позволило получить сопоставление результатов аналитического и численного методов для подтверждения ранее полученных результатов. Расчеты проведены во всем объеме активной зоны ЭМ для разных вариантов экрана и его отсутствия с учетом влияния лобовых частей и полнотности ЭМ. В автореферате показано, что погрешность расчетов по аналитической и численной моделям совпадает и составляет 2 – 3%.

В диссертации уделено внимание форме и технологии изготовления СП-обмоток с учетом особенностей их конструкции – СП-обмотки теряют свои сверхпроводниковые свойства при механических деформациях, которые неизбежно возникают при изгибе катушки по радиусу.

В большинстве созданных электрических машин на основе ВТСП лент второго поколения используются рейстрековые катушки либо в форме одиночной двойной галеты, либо намотанные в несколько отдельных слоев, впоследствии соединенных между собой, что не является оптимальным с точки зрения занимаемого пространства в рамках одного полюса. В связи с этим вопросам расчета геометрической формы, числа витков и слоев таких катушек необходимо уделить особое внимание при проектировании. В диссертации приведены оптимальные решения.

В диссертации рассмотрен также вопрос расчета критического тока в ВТСП лентах и катушках с учетом температуры и величины магнитного поля, основанный на численном методе конечных элементов, расчет проведен с высокой точностью, что подтверждено при сопоставлении расчетных и экспериментальных данных. Численные расчеты проведены с учетом нелинейности зависимости критического тока СП-проводника от индукции и температуры среды. Это означает, что учет нелинейности характеристики проводника требует от вычислительной модели применения метода итерации.

В заключении автореферата приведены выводы, полученные на основании исследований, основными из которых можно считать следующие:

- несмотря на важность, вопросы расчета электромагнитных полей и выходных параметров синхронных ЭМ без ферромагнитопровода с обмотками на основе СП-материалов в литературе рассмотрены недостаточно полно, что привело к необходимости разработки алгоритмов и численных методов;

- для увеличения удельной мощности предложена схема полностью безжелезной СП-машины с внешним экраном на основе ВТСП лент второго поколения;

- на основе полученных распределений магнитных полей найдены выражения для аналитических и численных расчетов основных параметров и построения выходных характеристик сверхпроводниковых ЭМ без ферромагнитопровода с различными внешними экранами в

двух- и трехмерной постановке с высокой точностью результатов с учетом влияния лобовых частей;

– расчетно-теоретические исследования показали, что влияние лобовых частей на индуктивные параметры СП ЭМ может быть существенным и зависит как от числа пар полюсов, так и от типа внешнего экрана или его отсутствия;

– механические свойства ВТСП лент 2-го поколения делают невозможным изготовление катушек электрических машин на их основе изогнутыми по нужному радиусу. В связи с этим задача расчета предельных размеров и максимального числа витков ВТСП катушки, вписанной в заданный диаметр активной зоны СП ЭМ, является актуальной;

– ввиду нелинейности зависимости критического тока в ВТСП лентах от величины магнитного поля и криогенной температуры задача его расчета приобретает важное значение для проектирования СП электрических машин, предложен итерационный способ расчета критического тока в ВТСП катушках на основе аппроксимирующих функций с использованием метода конечных элементов;

– сопоставление результатов численного расчета критического тока в ВТСП катушке 200 кВт СП электродвигателя с результатами экспериментальных исследований показало, что погрешность расчета не превышает 16%, и в значительной степени зависит от разброса параметров используемой ВТСП ленты;

– предложенный способ расчета критического тока может использоваться в численных расчетах как отдельных магнитных систем, так и активных зон СП ЭМ с катушками на основе ВТСП лент 2-го поколения, в том числе при осуществлении оптимизационных расчетов.

Основное содержание диссертации опубликовано в виде научных статей в журналах России и зарубежных, доложены на многих конференциях. Автором получены патенты на полезную модель.

К сожалению, в автореферате применению математической модели метода конечных разностей не уделено такого же подробного внимания, как и аналитическому методу ни при анализе магнитного поля, ни для расчета величины критического тока, а отправлена ссылка для употребления пакета прикладных программ *COMSOL Multiphysics*, который не является широко употребительным. Поэтому раскрытие этой части модели было бы желательно.

Не понятно, почему диссертантом сделано предпочтение в использовании в качестве охладителя жидкого водорода, далеко не самого безопасного вида хладагента.

Однако, следует отметить, что работа является актуальной, сделанные замечания не умаляют её достоинства, а недостатки не влияют на общую положительную оценку работы **Дежиной И.Н.**

Диссертация отвечает требованиям ВАК, а ее автор заслуживает присвоения ей ученой степени кандидата технических наук.

Исполняющий обязанности первого заместителя
ген. директора АО «НИИЭМ»
Ведущий научный сотрудник,
канд. техн. наук



А.В. Бубен

М.Л. Круглова