

На правах рукописи



ДЕЖИНА ИРИНА НИКОЛАЕВНА

**КРИОГЕННАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ МАШИНА БЕЗ
ФЕРРОМАГНИТОПРОВОДА С ОБМОТКАМИ НА ОСНОВЕ
ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВЕРХПРОВОДНИКОВЫХ
МАТЕРИАЛОВ**

Специальность 05.09.01

«Электромеханика и электрические аппараты»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2022

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

Научный руководитель:

Дежин Дмитрий Сергеевич

кандидат технических наук, доцент, доцент
ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Официальные оппоненты:

Курбатов Павел Александрович

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Электромеханика, электрические и электронные аппараты (ЭМЭЭА)»
ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Геча Владимир Яковлевич

доктор технических наук, профессор, заместитель генерального директора по научной работе АО «Научно-производственная корпорация «Космические системы мониторинга, информационно-управляющие и электромеханические комплексы» имени А.Г. Иосифьяна»

Ведущая организация:

Общество с ограниченной ответственностью
«Экспериментальная мастерская НаукаСофт»

Защита состоится **20 сентября 2022 г.** в **11 часов 00 минут** на заседании диссертационного совета Д 212.125.07, созданного на базе ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д.4, корп. 57.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МАИ по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4, и на сайте:

https://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT_ID=167200.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.125.07,
кандидат технических наук, доцент



Д.С. Дежин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Современная авиация представляет собой комплекс высокоэффективных летательных аппаратов (ЛА), позволяющий решать широкий круг непрерывно усложняющихся и расширяющихся задач. Это ведет к необходимости совершенствования как самих ЛА, так и бортового электроэнергетического оборудования. Последнее приводит к росту числа и мощности бортовых источников, преобразователей, регуляторов и потребителей электрической энергии, повышению требований к качеству и надежности снабжения ЛА электроэнергией постоянного и переменного тока.

Одним из наиболее перспективных направлений создания конкурентоспособного самолета является переход к концепциям создания «более электрического самолета» (БЭС) или самолета с полностью электрифицированным оборудованием (условное устоявшееся наименование – «полностью электрический самолет», или ПЭС).

БЭС подразумевает максимальное снижение доли гидравлических и пневматических систем в пользу электрических. Под «полностью электрическим самолетом» понимается самолет с единой централизованной системой электропитания, обеспечивающей все энергетические потребности самолета.

Сверхпроводниковые электрические машины (СП ЭМ) являются перспективным направлением при проектировании БЭС или ПЭС. Это связано с тем, что они превосходят машины традиционного исполнения по массогабаритным и удельным параметрам. Однако, это достигается при больших мощностях, начиная от 1 МВт. Исследованием эффекта сверхпроводимости и его использованием в электродвигателях и электрогенераторах занимается множество производителей в различных странах мира.

Во многих научных центрах мира ведутся работы по созданию электрических машин с использованием высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП). Очень активно в данном направлении ведутся работы в таких странах, как Китай, США, Германия, Япония и Россия. В частности, в «Центре сверхпроводниковых электрических машин и устройств» Московского авиационного института с 1993-го года ведутся активные работы по созданию ВТСП электрических машин.

Электрические машины, о которых идет речь, являются машинами нового поколения, а их разработка требует совершенно иных подходов, методов расчета и исследования, в отличие от электрических машин классического исполнения. При разработке ВТСП электрических машин приходится сталкиваться с рядом вопросов и трудностей. Так, например, высокие значения магнитной индукции, получаемые с помощью ВТСП обмоток, ограничены насыщением электротехнических сталей, что требует отказа от них для дальнейшего повышения удельной мощности. В этом случае, учет магнитного состояния СП ЭМ не может опираться только на классические методы и техники проектирования, поскольку нивелируются даже такие привычные понятия как «воздушный зазор» и «диаметр расточки». При отсутствии магнитопровода вся активная зона становится «воздушной». Применение сверхпроводниковых материалов в ЭМ также позволяет значительно увеличить линейную нагрузку, за счет высокой плотности тока в СП проводах обмотки якоря. Переход на более низкие криогенные температуры (неон, жидкий водород) позволит

еще больше увеличить предельную плотность тока в ВТСП проводах и окажет мультипликативный эффект, влияющий на увеличение выходной мощности. Большое внимание при проектировании ВТСП электрических машин следует уделить конструкции самой машины и новым конструкционным композитным материалам, которые позволяют обеспечить прочность узлов СП ЭМ без потери основных свойств. Помимо перечисленных выше особенностей, при проектировании СП электрических машин без ферромагнитопровода следует уделить особое внимание экранированию окружающего пространства от высоких магнитных полей активной зоны ЭМ. Таким образом, создание полностью сверхпроводниковых электрических машин нового поколения представляет собой сложную комплексную задачу, требующую новых подходов к проектированию, методик расчета, и способов моделирования подобных машин.

Математическое моделирование ставит новые задачи при проектировании и оптимизации устройств на основе ВТСП материалов из-за нелинейных зависимостей их тепловых и электромагнитных свойств. Также одной из наиболее сложных задач при проектировании сверхпроводниковых ЭМ является расчет потерь в ВТСП лентах 2-го поколения, которая может быть успешно решена только с помощью численных методов. Разработки численных моделей для расчета и анализа различных характеристик ВТСП устройств ведутся во многих научных центрах.

Таким образом, при расчете и проектировании электрических машин на основе сверхпроводимости необходимо учитывать несколько важных моментов: зависимость токонесущих свойств ленты от внешнего магнитного поля, радиус изгиба ленты, систему криостатирования, отсутствие стального магнитопровода, учитывать влияние лобовых частей обмоток, и многие другие особенности. Методики расчета электрических машин традиционного исполнения не позволяют корректно и в полной мере произвести расчет основных параметров ВТСП электрических машин. Поэтому, создание новых методик расчета и моделирования, позволяющих учитывать электромагнитное состояние машины без ферромагнитопровода и основные особенности ВТСП материалов, представляет собой актуальную задачу, решение которой приведет к созданию перспективных сверхпроводниковых электрических машин с высокой удельной мощностью.

Степень разработанности темы исследования. Отдельные вопросы проектирования и исследования СП электрических машин описаны в работах многих известных российских ученых, таких как: Л. К. Ковалев, К. Л. Ковалев, В. Т. Пенкин, К. В. Илюшин, В. С. Семенихин, Л. И. Чубраева, П. А. Курбатов и других, а также зарубежных ученых – P. J. Masson, R. Berg, X. Huang и многих других.

Объект исследования. Объектом исследования является криогенная электрическая машина без ферромагнитопровода с обмотками на основе современных ВТСП материалов и различными типами внешних экранов.

Предмет исследования. Предметом исследования являются рабочие процессы в криогенных электрических машинах без стального магнитопровода на основе ВТСП материалов, результатом исследования которых является методика проектирования данных электрических машин. Исходя из этого, предмет исследования — создание методики проектирования криогенных электрических машин без ферромагнитопровода на основе ВТСП лент 2-го поколения.

Цели и задачи работы. Целью диссертационной работы является создание методики проектирования криогенных электрических машин без ферромагнитопровода, обмотки которых изготовлены из высокотемпературных сверхпроводниковых материалов.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. созданы аналитическая и численная методики расчета двумерных магнитных полей и параметров многополюсных криогенных электрических машин без ферромагнитопровода с ВТСП обмотками и различными внешними экранами;
2. сопоставлены результаты аналитических и численных расчетов криогенных электрических машин без ферромагнитопровода с ВТСП обмотками;
3. произведена оценка достоверности разработанной аналитической методики проектирования за счет оценки точности при сопоставлении результатов с численными расчетами в двумерной постановке;
4. оценено влияние лобовых частей ВТСП катушек индуктора и якоря на основные параметры криогенной электрической машины с помощью численного расчета в трехмерной постановке;
5. разработан инженерный подход для расчета критического тока в сверхпроводниковых катушках электрических машин в зависимости от величины магнитного поля и криогенной температуры.

Методы исследования. Для решения поставленных в работе задач использовались методы математической физики, теории поля, электродинамики, электромеханики и прикладной сверхпроводимости, а также численные методы решения уравнений в частных производных (метод конечных элементов). Для решения уравнений и построения диаграмм были использованы пакеты *MathCAD* и *MATLAB*, для решения задач методом конечных элементов — *COMSOL Multiphysics*, для эскизного и твердотельного моделирования — *SOLIDWORKS*. Предложенный способ определения критического тока в сверхпроводниковых катушках сопоставлялся с результатами экспериментальных исследований обмоток 200 кВт синхронного ВТСП электродвигателя. При расчете погрешностей аналитического и численного расчетов использовались известные математические соотношения.

Научная новизна. При решении задач, поставленных в диссертационной работе, были получены следующие новые научные результаты:

1. Предложен способ повышения удельной мощности перспективных электрических машин за счет применения высокотемпературных сверхпроводниковых лент 2-го поколения для изготовления обмоток индуктора и якоря, и отказа от электротехнических сталей и медных обмоток.
2. Создана аналитическая методика расчета магнитных полей и параметров сверхпроводниковых электрических машин без ферромагнитопровода, позволяющая проводить быструю оценку влияния параметров на их основные характеристики.
3. Разработан алгоритм численного расчета в трехмерной постановке, позволяющий производить оценку влияния лобовых частей ВТСП обмоток на основные параметры и характеристики криогенных ЭМ без ферромагнитопровода.
4. Предложен численный способ автоматизированного расчета критического тока в ВТСП катушках в зависимости от величины внешнего магнитного поля и температуры охлаждения.

Практическая значимость работы.

1. Проведен обзор существующих технических решений в области создания электрических машин, в том числе сверхпроводниковых, который показал, что лучшие образцы ЭМ не обладают удельной мощностью, достаточной для применения их на борту перспективных электрических самолетов.

2. Создана аналитическая методика расчета в двухмерной постановке, позволяющая строить картины распределения магнитных полей и рассчитывать основные параметры криогенных электрических машин без ферромагнитопровода, обмотки которых изготовлены из высокотемпературных сверхпроводниковых лент 2-го поколения, с различными внешними экранами.

3. Предложенная аналитическая методика позволяет 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.

4. Разработан алгоритм численного расчета криогенных ЭМ без ферромагнитопровода в трёхмерной постановке, позволяющий оценить влияние лобовых частей ВТСП обмоток на основные параметры и характеристики ЭМ.

5. 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.

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

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

1. Аналитическая методика расчета распределения магнитных полей и параметров криогенных электрических машин без ферромагнитопровода с различными внешними экранами, обмотки которых изготовлены на основе высокотемпературных сверхпроводниковых лент 2-го поколения;

2. Алгоритм численного расчета методом конечных элементов распределения магнитных полей и параметров СП ЭМ без ферромагнитопровода, позволяющий уточнить решения, полученные по аналитической методике;

3. Способ оценки влияния лобовых частей ВТСП катушек на точность расчета параметров и характеристик криогенных ЭМ без ферромагнитопровода для разных типов внешних экранов;

4. Способ автоматизированного расчета критического тока в ВТСП катушках СП ЭМ в зависимости от величины магнитного поля и криогенной температуры.

Степень достоверности результатов. Основные положения и результаты диссертационной работы подтверждаются корректным использованием математического аппарата, а также верификацией результатов, полученных путем аналитических расчетов, математических и компьютерных моделей. Предлагаемый способ определения критического тока в ВТСП катушках подтверждается сопоставлением результатов численного компьютерного моделирования с результатами экспериментальных исследований.

Апробация работы. Основные результаты обсуждались и докладывались на следующих конференциях: международной научно-практической конференции «Электротехнические комплексы и системы» (г. Уфа, РФ, 2017 г.); международной научной конференции XLIII «Гагаринские чтения 2017» (г. Москва, РФ, 2021 г.); конференции «Иосифьяновские чтения 2017» (г. Истра, РФ, 2021 г.); международной конференции по прикладной сверхпроводимости EUCAS 2019 (г. Глазго, Шотландия, 2019 г.); международной научной конференции по электротехническим комплексам и системам (International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems), (г. Уфа, Россия, 2020 г.); XLV международной молодежной научной конференции «Гагаринские чтения – 2019» (г. Москва, 2019 г.) и XLVII Международной молодежной научной конференции «Гагаринские чтения – 2021» (г. Москва, 2021 г.); международной конференции по прикладной сверхпроводимости EUCAS 2021 (г. Москва, РФ, 2021 г.).

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 14 научных работ, включая 2 статьи в журналах и изданиях, рекомендуемых ВАК РФ и 6 статей в изданиях, индексируемых международными базами Scopus и WoS. Имеется 1 патент на изобретение и 1 патент на полезную модель.

Структура и объем 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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 описаны современные сверхпроводниковые материалы, которые используются для изготовления перспективных электрических машин, представлен обзор существующих мировых разработок в области СП электрических машин с высокими удельными показателями и их применение, рассмотрены некоторые концепции электрических самолетов и применения криогенного топлива в авиации. Приведен обзор достоинств и недостатков разработанных ранее технических решений в области создания сверхпроводниковых электрических машин. Сделаны выводы о том, что: реализация крупных ПЭС с электрической тягой возможна только на основе сверхпроводниковых электрических машин с удельной мощностью свыше 15 кВт/кг; в настоящее время совершенствование СП электрических машин и повышение их энергетических параметров связывают с возможностью использования в их активной зоне ВТСП лент 2-го поколения с охлаждением их жидким водородом; несмотря на важность, вопросы расчета электромагнитных полей и выходных параметров синхронных электрических машин без ферромагнитопровода с обмотками на основе высокотемпературных сверхпроводниковых материалов в литературе рассмотрены недостаточно полно.

Во второй главе представлена аналитическая методика расчета сверхпроводниковой электрической машины без ферромагнитопровода с различными типами внешних экранов и обмотками на основе ВТСП лент 2-го поколения. Расчетная схема активной зоны машины (см. рисунок 1) представляет собой два источника поля —

обмотку возбуждения (ОВ) ротора, расположенную в области $R_{fi} \leq \rho \leq R_{fo}$, обмотку якоря (ОЯ), расположенную в области $R_{ai} \leq \rho \leq R_{ao}$ и внешний экран, размещенный в области $R_{si} \leq \rho \leq R_{so}$.

Решение задачи о распределении магнитных полей в двухмерной постановке в цилиндрической системе координат может быть сведено к решению задачи Пуассона при введении векторного магнитного потенциала $A(0, 0, A_z)$, ($\mathbf{B} = \text{rot } A$) вида:

$$\Delta A = \begin{cases} 0, & \rho \leq R_{fi}; \\ -\mu_0 j_R, & R_{fi} \leq \rho \leq R_{fo}; \\ 0, & R_{fo} \leq \rho \leq R_{ai}; \\ -\mu_0 j_S, & R_{ai} \leq \rho \leq R_{ao}; \\ 0 & \rho > R_{ao}; \end{cases} \quad (1)$$

где j_R – плотность тока в обмотке возбуждения, j_S – плотность тока в обмотке якоря.

В силу однородности задачи и наличия только двух граничных условий типа Неймана на внутренней и внешней поверхностях экрана $\rho = R_{si}$ и $\rho = R_{so}$ решение системы уравнений (1) может быть представлено в виде суперпозиции решений относительно векторного потенциала ротора (A_R) и статора (A_S):

$$A = A_R + A_S \quad (2)$$

для каждой области.

При этом учёт режима работы машины может быть проведен путем введения угла поворота (γ) якоря относительно индуктора (рисунок 2б), $\gamma > 0$ – двигательный режим, $\gamma < 0$ – генераторный режим.

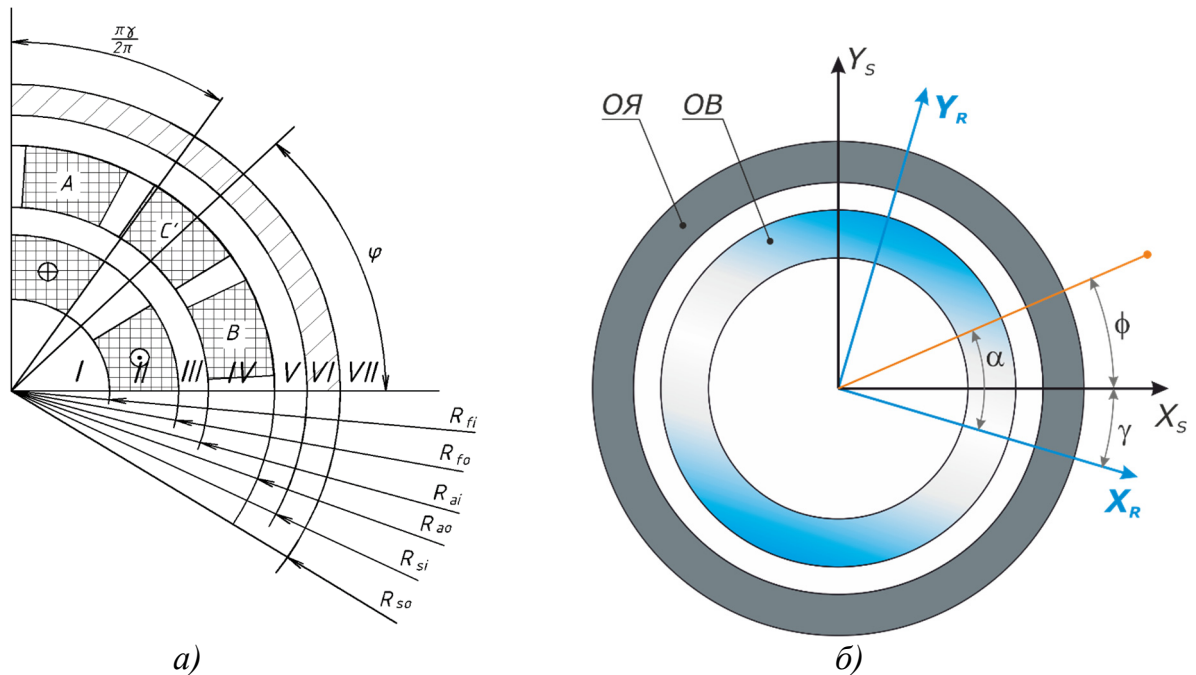


Рисунок 1 – Модель СП электрической машины:

a — расчетная схема активной зоны; *б* — связь координат статора и ротора

Таким образом были получены решения задачи о распределении векторного потенциала от токов обмотки возбуждения и обмотки якоря для всех областей активной зоны СП ЭМ и внешнего экрана.

Для обмотки возбуждения

Для области $\rho \leq R_{fi}$:

при $p \neq 2$

$$A_{R1}(\rho, \phi) = \frac{2\mu_0 w_f i_f}{\pi \cdot (R_{fo}^2 - R_{fi}^2)} \frac{K_f}{p} \left(\frac{R_{fo}^{-p+2} - R_{fi}^{-p+2}}{2-p} + \frac{K_{\mu i}}{R_{SI}^{2p}} \cdot \frac{R_{fo}^{p+2} - R_{fi}^{p+2}}{2+p} \right) \rho^p \sin(p\phi), \quad (3)$$

Для области $R_{fi} \leq \rho \leq R_{fo}$:

при $p \neq 2$

$$A_{R2}(\rho, \phi) = \frac{2\mu_0 w_f i_f}{\pi \cdot (R_{fo}^2 - R_{fi}^2)} \frac{K_f}{p(p+2)} \left\{ \left[\left(\frac{R_{fo}}{\rho} \right)^{-p+2} \frac{2+p}{2-p} - \left(\frac{R_{fi}}{\rho} \right)^{p+2} \frac{2p}{2-p} \right] \rho^2 + \frac{K_{\mu i} \rho^p}{R_{SI}^{2p}} (R_{fo}^{p+2} - R_{fi}^{p+2}) \right\} \sin(p\phi), \quad (4)$$

Для области $R_{fo} \leq \rho \leq R_{si}$:

$$A_{R3}(\rho, \phi) = \frac{2\mu_0 w_f i_f}{\pi \cdot (R_{fo}^2 - R_{fi}^2)} \frac{K_f}{p(p+2)} \times \left[(R_{fo}^{p+2} - R_{fi}^{p+2}) \left(1 + K_{\mu i} \left(\frac{\rho}{R_{SI}} \right)^{2p} \right) \right] \rho^{-p} \sin(p\phi); \quad (5)$$

Для области $R_{si} \leq \rho \leq R_{so}$:

$$A_{R4}(\rho, \phi) = \frac{2\mu_0 w_f i_f}{\pi \cdot (R_{fo}^2 - R_{fi}^2)} \frac{K_f}{p(p+2)} \times \left[(R_{fo}^{p+2} - R_{fi}^{p+2}) \left(K_{\mu s} + K_{\mu s}' \left(\frac{\rho}{R_{si}} \right)^{2p} \right) \right] \rho^{-p} \sin(p\phi); \quad (6)$$

Для области $\rho \geq R_{so}$:

$$A_{R5}(\rho, \phi) = \frac{2\mu_0 w_f i_f}{\pi \cdot (R_{fo}^2 - R_{fi}^2)} \frac{K_f \cdot K_{\mu 0}}{p(p+2)} (R_{fo}^{p+2} - R_{fi}^{p+2}) \rho^{-p} \sin(p\phi). \quad (7)$$

Для обмотки якоря

Для области $\rho \leq R_{ai}$:

при $p \neq 2$

$$A_{S1}(\rho, \phi) = \frac{m\mu_0 w_a i_a}{\pi \cdot (R_{ao}^2 - R_{ai}^2)} \frac{K_a}{p} \left(\frac{R_{ao}^{-p+2} - R_{ai}^{-p+2}}{2-p} + \frac{K_{\mu i}}{R_{SI}^{2p}} \cdot \frac{R_{ao}^{p+2} - R_{ai}^{p+2}}{2+p} \right) \rho^p \sin(p\phi). \quad (8)$$

Для области $R_{ai} \leq \rho \leq R_{ao}$:

при $p \neq 2$

$$A_{S2}(\rho, \phi) = \frac{m\mu_0 w_a i_a}{\pi \cdot (R_{ao}^2 - R_{ai}^2)} \frac{K_a}{p(p+2)} \left\{ \left[\left(\frac{R_{ao}}{\rho} \right)^{-p+2} \frac{2+p}{2-p} - \left(\frac{R_{ai}}{\rho} \right)^{p+2} \frac{2p}{2-p} \right] \rho^2 + \frac{K_{\mu i} \rho^p}{R_{SI}^{2p}} (R_{ao}^{p+2} - R_{ai}^{p+2}) \right\} \sin(p\phi), \quad (9)$$

Для области $R_{ao} \leq \rho \leq R_{si}$:

$$A_{S3}(\rho, \phi) = \frac{m\mu_0 w_a i_a}{\pi \cdot (R_{ao}^2 - R_{ai}^2)} \frac{K_a}{p(p+2)} \times \left[(R_{ao}^{p+2} - R_{ai}^{p+2}) \left(1 + K_{\mu i} \left(\frac{\rho}{R_{si}} \right)^{2p} \right) \right] \rho^{-p} \sin(p\phi); \quad (10)$$

Для области $R_{si} \leq \rho \leq R_{so}$:

$$A_{S4}(\rho, \phi) = \frac{m\mu_0 w_a i_a}{\pi \cdot (R_{ao}^2 - R_{ai}^2)} \frac{K_a}{p(p+2)} \times \left[(R_{ao}^{p+2} - R_{ai}^{p+2}) \left(K_{\mu s} + K_{\mu s}' \left(\frac{\rho}{R_{si}} \right)^{2p} \right) \right] \rho^{-p} \sin(p\phi); \quad (11)$$

Для области $\rho \geq R_{so}$:

$$A_{S5}(\rho, \phi) = \frac{m\mu_0 w_a i_a}{\pi \cdot (R_{ao}^2 - R_{ai}^2)} \frac{K_a \cdot K_{\mu 0}}{p(p+2)} (R_{ao}^{p+2} - R_{ai}^{p+2}) \rho^{-p} \sin(p\phi); \quad (12)$$

Выражения для коэффициентов, входящих в соотношения (3) – (12) представлены в диссертационной работе.

Плотность тока ОВ, равномерно распределенная на полюсное деление, может быть представлена в виде:

$$j_R = \pm \frac{i_f \cdot w_f}{\pi \cdot (R_{fo}^2 - R_{fi}^2)} = \pm j_{OR} \cdot \gamma, \quad (13)$$

где i_f – ток в ОВ, w_f – число витков ОВ, R_{fo} , R_{fi} – внешний и внутренний радиус ОВ соответственно (см. рисунок 1а), γ – отношение занятой проводниками части полюсного деления к полюсному делению, j_{OR} – средняя конструктивная плотность тока ОВ.

Средняя конструктивная плотность тока в ОЯ (см. рисунок 1а), равномерно распределенная на полюсное деление:

$$j_S = \pm \frac{m \cdot i_a \cdot w_a}{\pi \cdot (R_{ao}^2 - R_{ai}^2)} = \pm j_{OS} \cdot m, \quad (14)$$

где i_a – ток в ОЯ; w_a – число витков фазы якоря; R_{ai} , R_{ao} – внутренний и внешний радиусы ОЯ соответственно; m – число фаз; j_{OS} – средняя конструктивная плотность тока ОЯ.

Коэффициенты, учитывающие тип наружного экрана, определяются как:

$$K_{\mu 0} = \frac{\left(\frac{R_{so}}{R_{si}} \right)^{2vp} \cdot (1 - K_{\mu}^2)}{\left(\frac{R_{so}}{R_{si}} \right)^{2vp} - K_{\mu}^2} = 1 - K_{\mu} K_{\mu i} - \quad (15)$$

коэффициент, учитывающий влияние наружного экрана на магнитное поле ротора во внешней области машины.

$$K_{\mu s} = \frac{\left(\frac{R_{so}}{R_{si}}\right)^{2vp} \cdot (1 + K_{\mu})}{\left(\frac{R_{so}}{R_{si}}\right)^{2vp} - K_{\mu}^2} - \quad (16)$$

коэффициент для расчета магнитного поля в зоне экрана.

$$K_{\mu s}' = \frac{K_{\mu} + K_{\mu}^2}{\left(\frac{R_{so}}{R_{si}}\right)^{2vp} - K_{\mu}^2} = K_{\mu s} \cdot K_{\mu} \left(\frac{R_{si}}{R_{so}}\right)^{2vp} - \quad (17)$$

коэффициент, учитывающий магнитные свойства наружного экрана.

Для ферромагнитного экрана $-K_{\mu} = 1$, для диамагнитного экрана $-K_{\mu} = -1$, в случае отсутствия экрана $-K_{\mu} = 0$.

Общее решение для нахождения распределения векторного магнитного потенциала обмоток возбуждения (ротора) и якоря (статора) может быть найдено, как:

$$A = \begin{cases} A_{S1}(\rho, \phi) + A_{R1}(\rho, \varphi \pm p\gamma), & \rho \leq R_{fi}; \\ A_{S1}(\rho, \phi) + A_{R2}(\rho, \varphi \pm p\gamma), & R_{fi} \leq \rho \leq R_{fo}; \\ A_{S1}(\rho, \phi) + A_{R3}(\rho, \varphi \pm p\gamma), & R_{fo} \leq \rho \leq R_{ai}; \\ A_{S2}(\rho, \phi) + A_{R3}(\rho, \varphi \pm p\gamma), & R_{ai} \leq \rho \leq R_{ao}; \\ A_{S3}(\rho, \phi) + A_{R3}(\rho, \varphi \pm p\gamma), & R_{ao} \leq \rho \leq R_{si}; \\ A_{S4}(\rho, \phi) + A_{R4}(\rho, \varphi \pm p\gamma), & R_{si} \leq \rho \leq R_{so}; \\ A_{S5}(\rho, \phi) + A_{R5}(\rho, \varphi \pm p\gamma), & \rho \geq R_{so}. \end{cases} \quad (19)$$

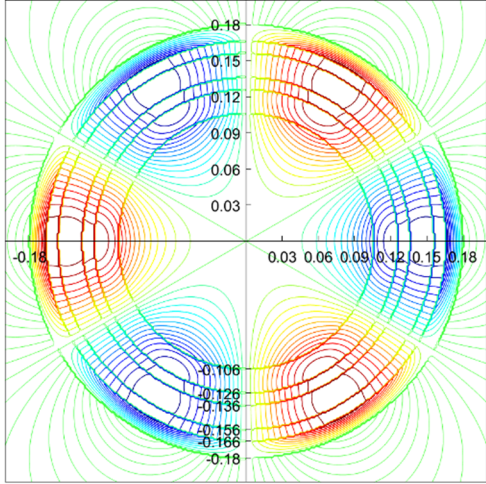
В системе (19) A_{Ri} ($i = 1 \dots 5$) даются соотношениями (3) – (7) соответственно; знак «+» или «-» в A_{Ri} соответствует двигательному или генераторному режиму соответственно; A_{Si} ($i = 1 \dots 5$) определяются формулами (8) – (12), соответственно.

На рисунке 2 приведены картины распределения векторного магнитного потенциала суперпозиции токов ОВ и ОЯ при числе пар полюсов $p = 3$ и различных углах γ для каждого типа экрана. Картины полей для других чисел p и γ представлены в диссертационной работе.

Определение ЭДС холостого хода (E_0). В случае, когда толщина обмотки якоря существенно меньше толщины внешнего экрана ($R_{ao} - R_{ai} \ll (R_{so} - R_{si})$), а также в случае, когда обмотка якоря заменяется токовым слоем ($R_{ai} \rightarrow R_{ao}$), расположенным на внутренней поверхности экрана ($R_{ai} = R_{ao} \rightarrow R_{si}$), действующее значение ЭДС ротора E_0 может быть найдено через магнитный поток, создаваемый обмоткой возбуждения ротора, при нулевых токах статора как:

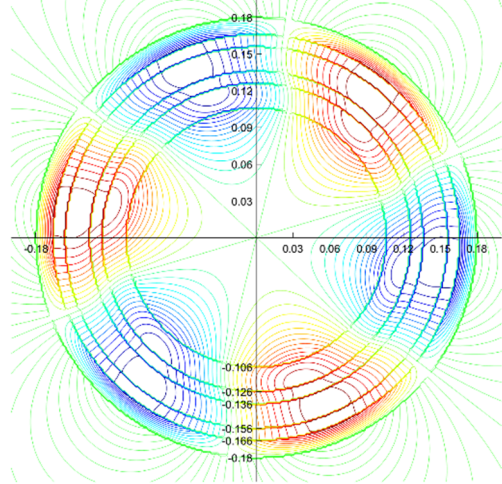
$$E_0 = 4\sqrt{2}K_a W_a f L_s \frac{\mu_0 W_f i_f}{\pi \cdot (R_{fo}^2 - R_{fi}^2)} \frac{K_f}{p \cdot (p+2)} \times (R_{fo}^{p+2} - R_{fi}^{p+2}) \cdot \left[1 + K_{\mu i} \left(\frac{R_{ai}}{R_{si}}\right)^{2p} \right] \cdot R_{ai}^{-p-1} \quad (20)$$

Магнитный потенциал индуктора и якоря ($p=3, \gamma = 0^\circ, K_\mu = 1$)



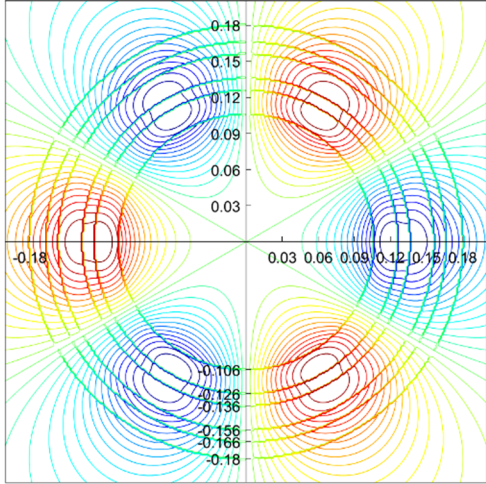
а)

Магнитный потенциал индуктора и якоря ($p=3, \gamma = 20^\circ, K_\mu = 1$)



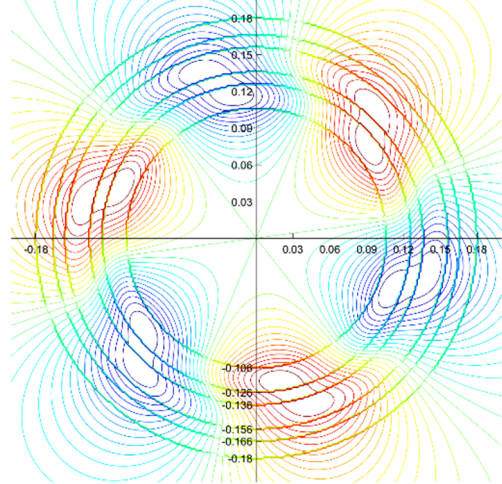
б)

Магнитный потенциал индуктора и якоря ($p=3, \gamma = 0^\circ, K_\mu = 0$)



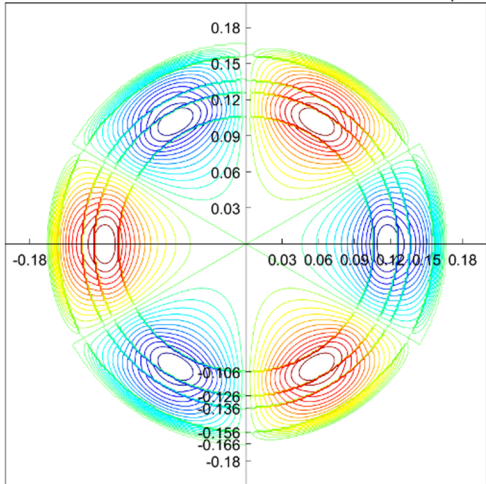
в)

Магнитный потенциал индуктора и якоря ($p=3, \gamma = 30^\circ, K_\mu = 0$)



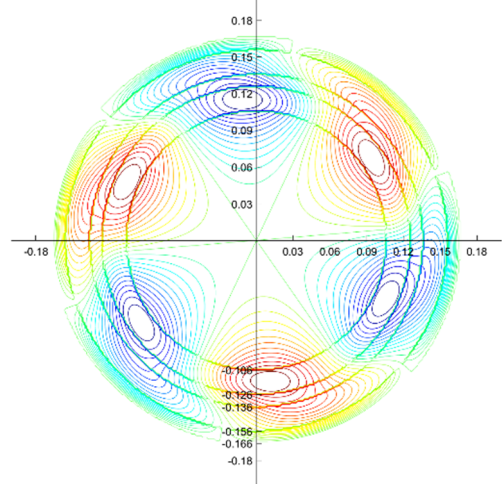
г)

Магнитный потенциал индуктора и якоря ($p=3, \gamma = 0^\circ, K_\mu = -1$)



д)

Магнитный потенциал индуктора и якоря ($p=3, \gamma = 30^\circ, K_\mu = -1$)



е)

Рисунок 2 – Картина распределения магнитных полей при числе пар полюсов $p = 3$ и углах поворота $\gamma = 0$ и $\gamma = \pi/2p$: а, б — ферромагнитный экран; в, г — экран отсутствует; д, е — диамагнитный экран

В случае, когда обмотка якоря имеет сопоставимый размер с внешним экраном, а также в случае, когда внешний экран расположен на некотором расстоянии от ОЯ, ЭДС холостого хода следует определять через взаимную индуктивность обмоток возбуждения и якоря как:

$$E_0 = \omega \cdot i_f \cdot M_{af}, \quad (21)$$

В выражении (21): ω – угловая частота вращения ротора (рад/с), i_f – ток в ОВ ротора (А), M_{af} – максимальная взаимная индуктивность ОВ и фазы ОЯ (Гн). Значение взаимной индуктивности ОЯ и ОВ может быть найдено по соотношению:

$$M_{af} = \frac{2\mu_0 w_f w_a L_s K_f K_a}{\pi(R_{fo}^2 - R_{fi}^2)(R_{ao}^2 - R_{ai}^2)(2+p)p} \left[\frac{(R_{fo}^{2+p} - R_{fi}^{2+p})(R_{ao}^{2-p} - R_{ai}^{2-p})}{2-p} + \frac{K_{\mu i}}{R_{si}^{2p}} \frac{(R_{fo}^{2+p} - R_{fi}^{2+p})(R_{ao}^{2+p} - R_{ai}^{2+p})}{2+p} \right] \cos p\alpha, \quad (22)$$

где w_a – число витков фазы якоря, w_f – число витков обмотки возбуждения.

Определение главного индуктивного сопротивления (X_a). Для определения главного индуктивного сопротивления X_a необходимо найти энергию магнитного поля в активной зоне машины от токов статора при нулевых значениях токов обмотки возбуждения. Значение X_a может быть найдено по соотношению:

$$X_a = 2\omega \cdot \frac{mW_a^2 K_a^2 L_s}{p\pi \left[1 - \left(\frac{R_{ai}}{R_{ao}} \right)^2 \right]^2} \frac{\mu_0}{p+2} \left[1 - \frac{p+2}{p-2} \left(\frac{R_{ai}}{R_{ao}} \right)^4 + \frac{4}{p-2} \left(\frac{R_{ai}}{R_{ao}} \right)^{p+2} + \frac{2K_{\mu i}}{p+2} \frac{(R_{ao}^{p+2} - R_{ai}^{p+2})^2}{R_{si}^{2p} \cdot R_{ao}^4} \right] \quad (23)$$

На рисунке 3 приведен характер зависимости ЭДС холостого хода и индуктивного сопротивления от числа пар полюсов при ферромагнитном (на рисунке кривая выделена желтым цветом) и диамагнитном экранах (на рисунке кривая представлена синим цветом), а также при его отсутствии (красный цвет).

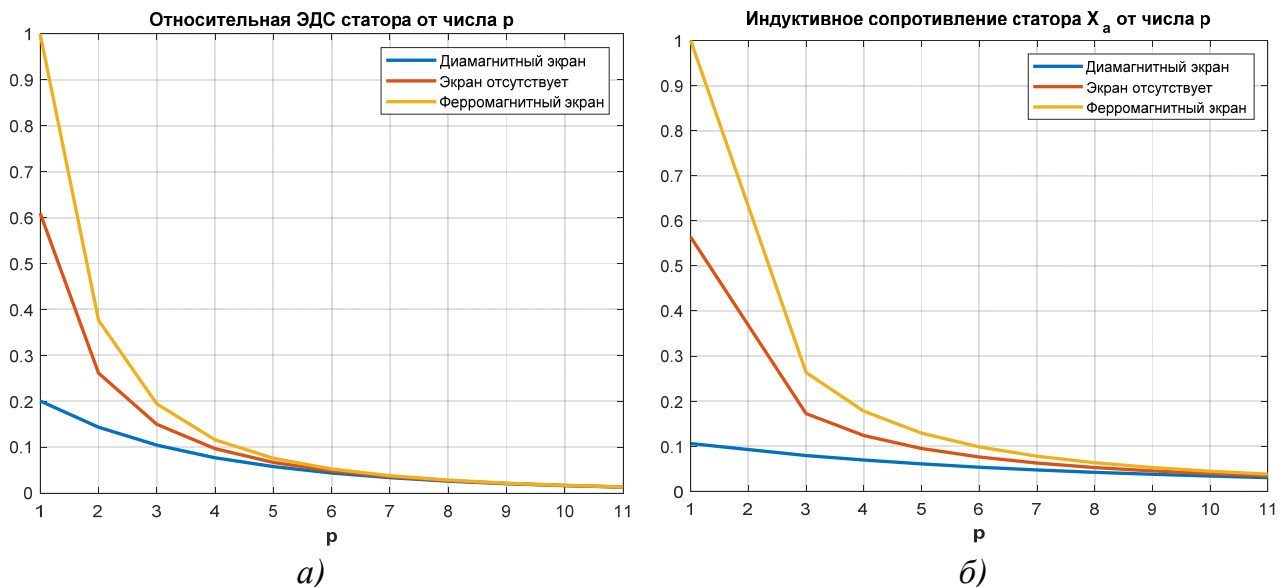


Рисунок 3 – Зависимость параметров СП ЭМ от числа пар полюсов p :
 а — ЭДС холостого хода; б — индуктивное сопротивление

Построение характеристик СП ЭМ. В диссертационной работе также были построены угловые и внешние характеристики полностью сверхпроводниковой машины без ферромагнитопровода в двигательном и генераторном режимах. Выражения для расчета характеристик были получены на основе векторных диаграмм синхронной электрической машины. В расчетах принималось: $R_{fi} = 106$ мм, $R_{fo} = 126$ мм, $R_{ai} = 136$ мм, $R_{ao} = 156$ мм, $R_{si} = 166$ мм, $L_S = 160$ мм, $p = 3$, $f = 400$ Гц, $w_a = 40$, $U = 270$ В, $i_f = 85$ А, $w_f = 1000$.

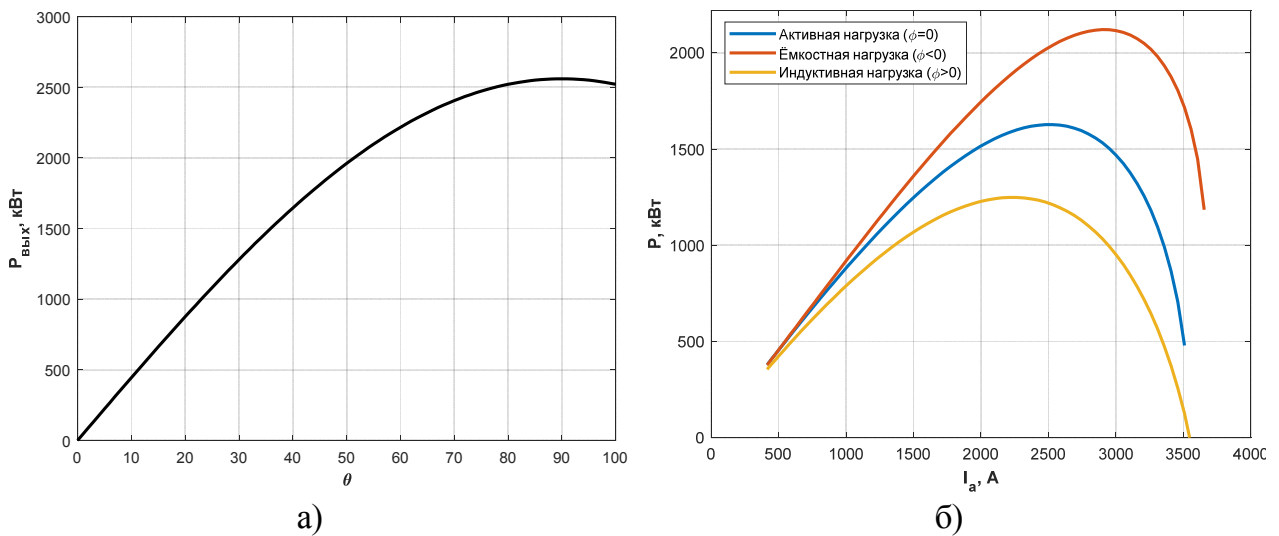


Рисунок 4 – Зависимости выходной мощности СП ЭМ: *а* — угловая характеристика в двигательном режиме; *б* — зависимость от тока якоря в генераторном режиме

Таким образом, в работе получены аналитические выражения для расчета распределения магнитных полей и параметров криогенных электрических машин без ферромагнитопровода с различными внешними экранами в двухмерной постановке. На основе полученных распределений магнитных полей найдены аналитические выражения для расчета основных параметров и построения характеристик. Построенные зависимости ЭДС фазы обмотки возбуждения и индуктивного сопротивления от числа пар полюсов и толщины обмотки возбуждения позволили качественно проанализировать влияние каждого из параметров на выходную мощность СП электрической машины. В дальнейшем это может быть использовано для оптимизации активной зоны таких электрических машин.

В третьей главе были рассмотрены численные методы поверочного расчета магнитных полей и параметров СП ЭМ без ферромагнитопровода и производилось сопоставление результатов аналитического и численного расчетов.

Для получения численных решений методом конечных элементов (МКЭ) использовался пакет прикладных программ *COMSOL Multiphysics*. Процедура и особенности численного расчета СП электрической машины без ферромагнитопровода подробно рассмотрены в диссертационной работе. На их основе были проведены уточняющие расчеты криогенных электрических машин с ВТСП обмотками как в плоской, так и в объемной постановке.

Для проверки достоверности полученных аналитических решений была проведена серия численных расчетов активной зоны машины в двухмерной поста-

новке. При этом, основные размеры и параметры ОВ и ОЯ полагались такими же, как и при аналитическом расчете. Это было сделано специально для того, чтобы корректно сравнить полученные аналитические и численные решения. Расчеты были проведены для всех типов внешних экранов, при этом, число пар полюсов варьировалось от 1 до 11. Из-за того, что в области расположения обмотки якоря был задан токовый слой, сопоставление расчетов проводилось по максимальному значению Z-компоненты магнитного векторного потенциала в активной зоне СП ЭМ. В таблице 1 показаны значения для векторного магнитного потенциала $A_{z \max}$, рассчитанные по аналитическим и численным методикам для числа пар полюсов $p=1$ и 3.

Таблица 1 – Сопоставление результатов расчета по $A_{z \max}$

Максимальное значение $A_{z \max}$	Аналитический расчет, Вб/м	Численный расчет, Вб/м	Погрешность, %
<i>$p = 1$ (внешний экран отсутствует)</i>			
– от токов ОВ	0,0163	0,0150	-8,0
– от токов ОЯ	0,0188	0,0165	-12,2
– от токов ОВ и ОЯ	0,0327	0,029	-11,3
<i>$p = 3$ (внешний экран отсутствует)</i>			
– от токов ОВ	0,0050	0,00499	-0,2
– от токов ОЯ	0,0059	0,00585	-0,8
– от токов ОВ и ОЯ	0,0089	0,0089	0,0
<i>$p = 1$ (ферромагнитный внешний экран)</i>			
– от токов ОВ	0,0244	0,02441	0,0
– от токов ОЯ	0,0336	0,0336	0,0
– от токов ОВ и ОЯ	0,057	0,05695	-0,1
<i>$p = 3$ (ферромагнитный внешний экран)</i>			
– от токов ОВ	0,0057	0,00566	-0,7
– от токов ОЯ	0,0091	0,00904	-0,7
– от токов ОВ и ОЯ	0,0131	0,0131	0,0
<i>$p = 1$ (диамагнитный внешний экран)</i>			
– от токов ОВ	0,0081	0,00811	0,1
– от токов ОЯ	0,0041	0,00408	-0,5
– от токов ОВ и ОЯ	0,0115	0,01146	-0,3
<i>$p = 3$ (диамагнитный внешний экран)</i>			
– от токов ОВ	0,0043	0,00432	0,5
– от токов ОЯ	0,003	0,002977	-0,8
– от токов ОВ и ОЯ	0,0061	0,00609	-0,2

Видно, что с увеличением числа пар полюсов p погрешность падает, и в некоторых случаях разница в максимальных значениях векторного потенциала A_z между аналитическим и численным расчетом отсутствует. Такое точное совпадение результатов позволяет говорить о правильности полученных аналитических выражений для расчета распределения магнитных полей в активной зоне сверхпроводниковых электрических машин без ферромагнитопровода.

На следующем этапе были проверены основные расчетные соотношения для расчета ЭДС (E_0), индуктивного сопротивления (X_a) и других величин. Для этого в *COMSOL Multiphysics* была доработана расчетная модель, в которую для учета реального пространственного распределения катушек обмотки якоря по фазам с учетом числа пар полюсов, в соответствующей зоне ($R_{ai} - R_{ao}$) расчетной модели были добавлены необходимые геометрические объекты, представляющие собой катушки

ОЯ. При численном моделировании активной зоны СП ЭМ расчет основных параметров разбивался на два этапа. На первом выполнялся расчет ЭДС в фазах ОЯ, а на втором — определялись индуктивные параметры фаз якоря. Эта особенность связана с тем, что при одновременно заданных токах в ОЯ и в ОВ невозможно получить значения потокосцеплений, определяющих только величину ЭДС или индуктивность фазы. Необходимо их разделение.

В таблице 2 показаны результаты расчета ЭДС фазы А обмотки якоря по аналитическим выражениям (20) и (21) и численным способом при отсутствии внешнего экрана. Для ферромагнитного и диамагнитного экранов разница результатов расчета ЭДС не превышает 3,4 % для всех $p = 1...10$. При этом, значение для численного расчета оказывалось больше на указанную величину, чем полученное по аналитическому выражению (21).

Таблица 2 – Сопоставление результатов аналитического и численного расчета E_0 при *отсутствии внешнего экрана*

p	Значение ЭДС фазы А, Вольт			Разница, В	Погрешность, %
	Аналит. (токовый слой)	Аналит., (с учетом толщины ОЯ)	Численно		
2	861,50	831,60	848,35	-16,75	2
3	493,50	445,13	460,02	-14,89	3
4	318,79	269,11	278,55	-9,44	3
5	220,18	174,23	180,37	-6,14	3
6	158,78	117,95	122,11	-4,16	3
7	118,03	82,45	85,36	-2,91	3
8	89,77	59,05	61,13	-2,09	3
9	69,51	43,13	44,65	-1,52	3
10	54,61	32,00	33,13	-1,13	3
11	43,43	24,07	24,92	-0,85	3

Результаты расчета индуктивных параметров (X_A, L_A) фазы А обмотки якоря по аналитическому выражению (23) и численным способом для различных внешних экранов показали следующее.

Для варианта, когда внешний экран отсутствует наблюдается высокая точность расчета ($> 99\%$) индуктивных параметров для числа p равного 4 и 5. При этом, при увеличении и уменьшении числа пар полюсов от этих значений, точность расчета падала. Однако, предельная погрешность не превышала 8%. Для ферромагнитного экрана наблюдалось увеличение погрешности расчета индуктивных параметров с ростом числа пар полюсов, однако и она не превышала 13,1%. Для диамагнитного экрана наблюдалась обратная картина: точность расчета увеличивалась с ростом числа p . При этом погрешность при $p = 1...6$ составляла более 10%.

В работе также был проведен учет влияния лобовых частей сверхпроводниковых катушек безжелезной СП ЭМ с помощью численного расчета в трехмерной постановке. Аналитические выражения для расчета магнитных полей и параметров СП ЭМ были получены с учетом допущения о том, что электрическая машина является

достаточно длинной ($\tau / L_s \ll 1$). Однако, в случае отсутствия концентраторов магнитного поля, которыми являются ферромагнитные элементы магнитопровода, магнитные поля рейстрекковых катушек в лобовых частях могут превышать поля в их линейных частях. В таком случае необходимо проводить учёт влияния лобовых частей ЭМ со сверхпроводниковыми катушками либо на основе теории цепей, либо с помощью численного моделирования.

В случае, если электрическая машина не содержит ферромагнитных материалов проводить расчет на основе теории цепей достаточно трудно из-за сильного рассеивания магнитных полей, и, как следствие, более трудоемкого и менее точного расчета магнитных сопротивлений. Поэтому, наиболее целесообразным подходом учета влияния лобовых частей представляется численное моделирование в трехмерной постановке. В диссертационной работе подробно описаны модель и алгоритм численного расчета этой задачи в программе *COMSOL Multiphysics*.

Результаты расчета ЭДС для нескольких значений p и сопоставление их с аналитическими расчетами и моделированием в двухмерной постановке показали, что величина ЭДС фазы, полученные на трехмерной модели, имела меньшие значения, несмотря на наличие лобовых частей. Это связано с тем, что магнитное поле от ОВ не полностью сцепляется с катушкой ОЯ в пределах активной длины ЭМ. Уменьшение погрешности трехмерного расчета по сравнению с двухмерным с ростом числа пар полюсов связано с тем, что изменяется пропорция между активной длиной L_s и шириной катушки. То есть, по сути, изменяется соотношение τ / L_s , приближая трехмерный расчет с учетом лобовых частей к расчету в двухмерной постановке.

Далее была проведена серия расчетов с учетом того, что в зонах ОВ и ОЯ находятся катушки, спрофилированные (изогнутые) по радиусу. Расчеты показали, что в этом случае погрешность сильно варьируется в зависимости от числа пар полюсов и варианта используемого внешнего экрана. В пределе, погрешность численного расчета в сравнении с аналитическим составляла 155% для диамагнитного внешнего экрана и $p = 2$. Это означает невозможность применения аналитических и численных расчетных методик в двухмерной постановке для данного варианта конфигурации активной зоны СП ЭМ. Однако можно предположить, что колебания точности расчета ЭДС в зависимости от числа пар полюсов происходят из-за того, что меняется соотношение между углом раскрытия полюса статора и активной длиной СП электрической машины. То есть в случае, если число пар полюсов СП ЭМ без ферромагнитопровода мало, сцепление магнитного потока от ОВ с лобовыми частями катушек ОЯ будет существенным (см. рисунок 5а). Это приведет к значительному увеличению значения ЭДС. И, напротив, с ростом числа пар полюсов вклад лобовых частей в общее потокосцепление будет уменьшаться, что сократит погрешность расчета ЭДС.

Таким образом, в третьей главе диссертационной работы создана численная методика расчета магнитных полей и параметров сверхпроводниковых электрических машин без ферромагнитопровода с различными внешними экранами в двух- и трехмерной постановке. Точность полученных численных решений распределения магнитных полей в активной зоне СП ЭМ в двухмерной постановке в большинстве случаев превышала 98%. Такое совпадение результатов позволяет говорить о правильности полученных аналитических решений для разработанной методики

проектирования сверхпроводниковых электрических машин без ферромагнитного провода. Показано, 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.

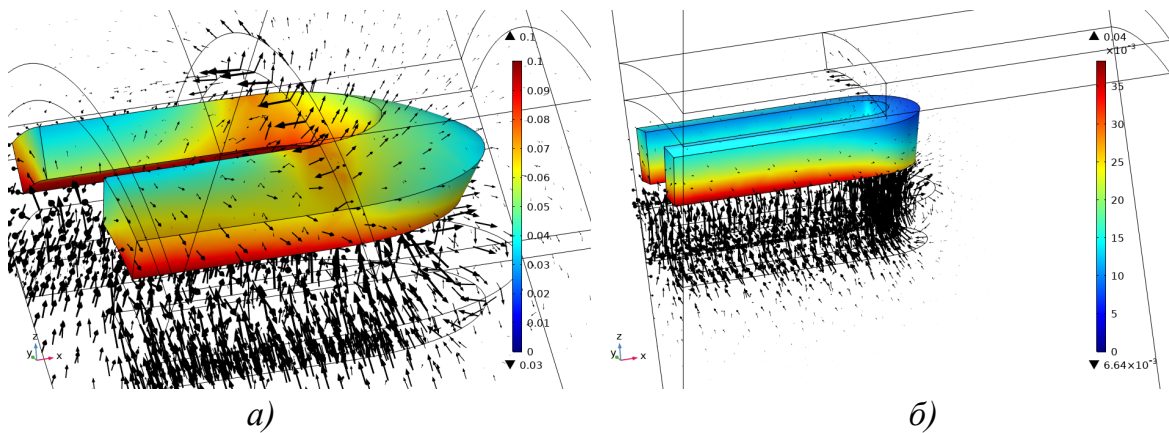
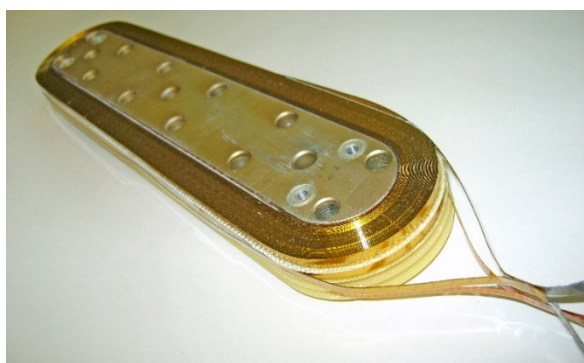


Рисунок 5 – Сопоставление распределения магнитного поля в зоне катушки ОЯ (диамагнитный экран) при различном числе пар полюсов: *a* — $p = 2$, *б* — $p = 7$

В четвертой главе описана методика расчета величины критического тока от величины магнитного поля и криогенной температуры в катушках из высокотемпературных сверхпроводниковых лент 2-го поколения и результаты сравнения расчета с экспериментом.

В настоящий момент технология создания магнитных катушек из высокотемпературных сверхпроводников второго поколения позволяет создавать их в форме окружности, рейстрека (см. рисунок 6*a*) или им подобным. Это связано с технологическими особенностями самих ВТСП лент, которые теряют свои сверхпроводниковые свойства при механических деформациях. Такие деформации неизбежно будут наблюдаться при изгибе катушки по радиусу. В результате их воздействия в ВТСП ленте разрушается микронный слой сверхпроводника (см. рисунок 6*б*), что делает катушку индуктивности непригодной для использования в электрической машине.



a)



б)

Рисунок 6 – Катушка на основе ВТСП лент 2-го поколения с намоткой в форме рейстрека (*a*); композитный ленточный ВТСП провод 2-го поколения (*б*)

Таким образом, 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. С точки зрения размещения в активной зоне криогенных элект-

трических машин, форма ВТСП катушек в виде многослойных рейстреков не является самой оптимальной 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 диссертационной работе приведены соотношения, позволяющие рассчитать размеры СП катушки и предельное число витков ВТСП ленты при заданном радиусе размещения катушки, числе пар полюсов и зазоре между статором и ротором.

Поскольку для ВТСП ленты характерной является зависимость критического тока от величины магнитного поля и криогенной температуры (см. рисунок 7а), необходимо в процессе электромагнитного расчета учитывать эту особенность. В связи с этим, был разработан способ расчета критического тока в ВТСП лентах и катушках с учетом температуры и величины магнитного поля, основанный на численном методе конечных элементов. Также этот метод обладает высокой точностью при сопоставлении расчетных и экспериментальных данных.

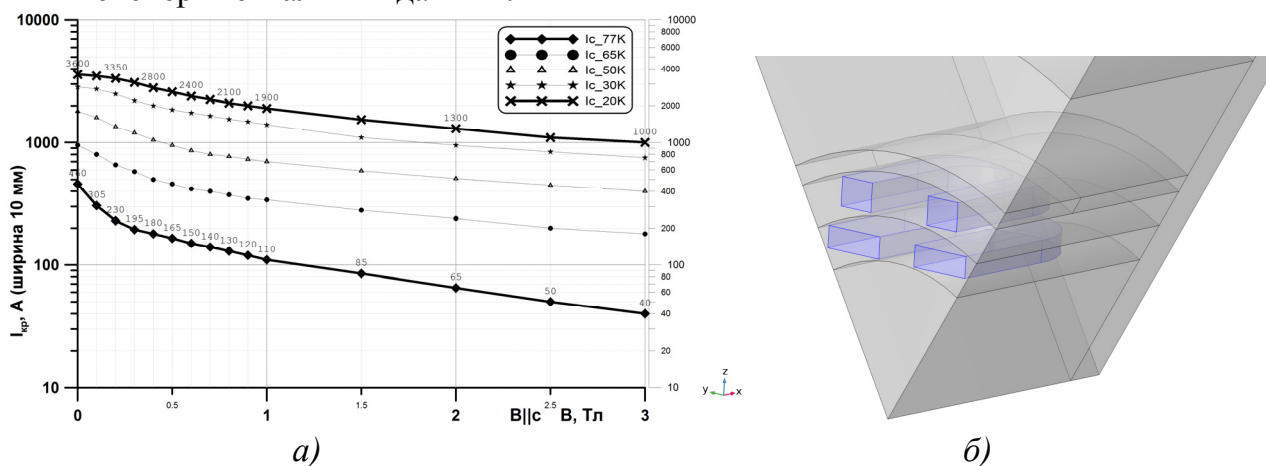


Рисунок 7 – Типичная зависимость критического тока в ВТСП ленте от величины перпендикулярного магнитного поля и криогенной температуры (ширина ленты — 10 мм) (а); трехмерная расчетная модель активной зоны СП ЭМ (б)

Инженерный способ расчета критического тока в ВТСП включает несколько этапов. Подробно он описан в диссертационной работе. В начале создается двух или трехмерная расчетная модель ВТСП катушки, ленты или активной зоны СП ЭМ, которая затем импортируется в программу численного моделирования. Трехмерная модель активной зоны криогенной СМ без ферромагнитопровода показана на рисунке 7б. Катушки ОВ и ОЯ выполнены в форме рейстрека. После создания расчетной модели производится описание электромагнитной задачи и ее решение. Для расчета предельного тока в ВТСП катушках в расчетную программу была добавлена кусочно-гладкая кривая, описывающая зависимость критического тока от величины магнитного поля, пронизывающего ленту перпендикулярно её ширине.

В процессе проведения численных расчетов величина критического тока I_{HTS} подставлялась в качестве переменной, определяющей ток в соответствующей ВТСП катушке ОВ или ОЯ. При этом, для обмотки возбуждения, питаемой постоянным током, величина предельного рабочего тока выбиралась с учетом 15% запаса, чтобы избежать работы на критическом токе ВТСП ленты. В случае с обмоткой якоря, по которой протекает переменный ток, предельный рабочий ток определялся по формуле:

$$I_{a\text{ RMS}} = \frac{0,85 \cdot I_{HTS\text{ Max}}}{\sqrt{2}} \quad (24)$$

где $I_{a\text{ RMS}}$ — действующее значение тока в ВТСП катушке; $I_{HTS\text{ Max}}$ — максимальное значение тока в ВТСП ленте, рассчитываемое как $f(B)$.

В процессе проведения численных расчетов измерялось максимальное значение индукции магнитного поля во внутренней области ВТСП катушки (см. рисунок 8а), на основании которого, согласно зависимости $I_{HTS\text{ Max}} = f(B)$, определялось значение критического тока в сверхпроводнике. Следует отметить, что такой выбор области для определения максимального значения магнитной индукции был продиктован тем, что в индукционных катушках подобной формы поле сконцентрировано в центральной части (в окне катушки). В тех случаях, когда по конфигурации ВТСП катушки заранее нельзя сказать, где сосредоточено магнитное поле, максимум магнитной индукции следует определять не на внутренней плоскости катушки, а в её объеме (см. рисунок 8б). При этом компоненту индукции необходимо определять в плоскости ХУ катушки.

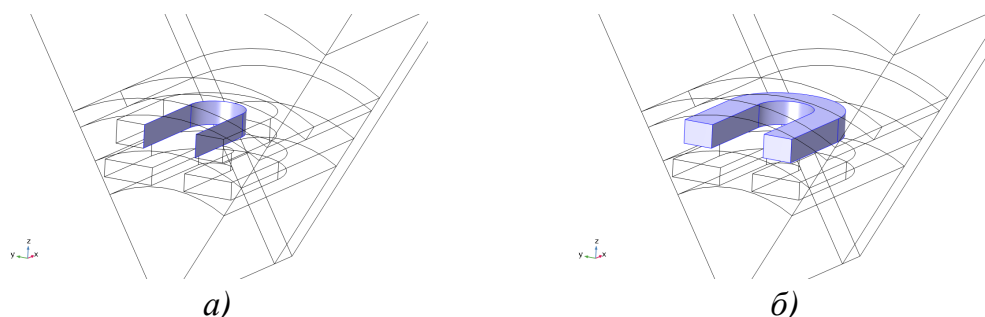


Рисунок 8 – Области измерения ХУ-компоненты индукции для расчета критического тока ВТСП катушки: а — внутренняя поверхность; б — объем проводников

Таким образом, при проведении численных расчетов программа *COMSOL Multiphysics* позволяет в автоматическом режиме учитывать одну из ключевых зависимостей, характеризующую современные ВТСП ленты — $I_{HTS\text{ Max}} = f(B, T)$. Несмотря на то, что численная задача приобретает нелинейный, итерационный характер, это значительно сокращает усилия на проведение серии расчетов, и позволяет производить оптимизацию размеров катушки с целью максимизации как тока в ВТСП ленте, так и величины магнитного поля, создаваемого катушкой.

Для проверки предложенного инженерного способа автоматизированного учёта зависимости критического тока ВТСП ленты от величины магнитного поля и температуры был выполнен численный расчет полюса синхронного электродвигателя (ЭД) мощностью 200 кВт с обмоткой возбуждения на основе ВТСП лент второго поколения (см. рисунок 9а). ОВ состояла из шести полюсов, в каждом из которых располагались катушки, состоящие из трёх двойных галет, намотанных ВТСП лентой шириной 4 мм.

Все ВТСП катушки были изготовлены Институтом физики высоких энергий (ИФВЭ, г. Протвино) и перед сборкой магнитной системы ротора испытаны на работоспособность при температуре жидкого азота (77 К).

Для намотки сверхпроводниковых катушек использовалась ВТСП лента компании *American Superconductors (AMSC)* шириной 4 мм, с критическим током в собственном поле при 77 К, лежащем в диапазоне 104–117 А (см. таблицу 3). В диссертационной работе приведены зависимости критического тока от величины магнитного поля и температуры вдоль и поперек ВТСП ленты, которые использо-

вались для задания аппроксимирующих кривых $I_{HTS Max} = f(B)$ в программе *COMSOL Multiphysics*. Помимо этих зависимостей, при подготовке расчета была задана кривая намагничивания электротехнической стали (Сталь 3), используемой при изготовлении полюса 200 кВт СП ЭД. Численный расчет был выполнен на $\frac{1}{4}$ части полюса.



Рисунок 9 – Катушка из ВТСП ленты: *а* — экспериментальный образец; *б* — модель

В результате расчета были получены картины распределения магнитных полей внутри и снаружи ВТСП полюса. Часть из них показана на рисунке 10. Автоматически рассчитанное значение предельного тока в ВТСП катушке составило 44,3887 А. Максимальное значение магнитной индукции в области с ВТСП лентой — 0,406 Тл.

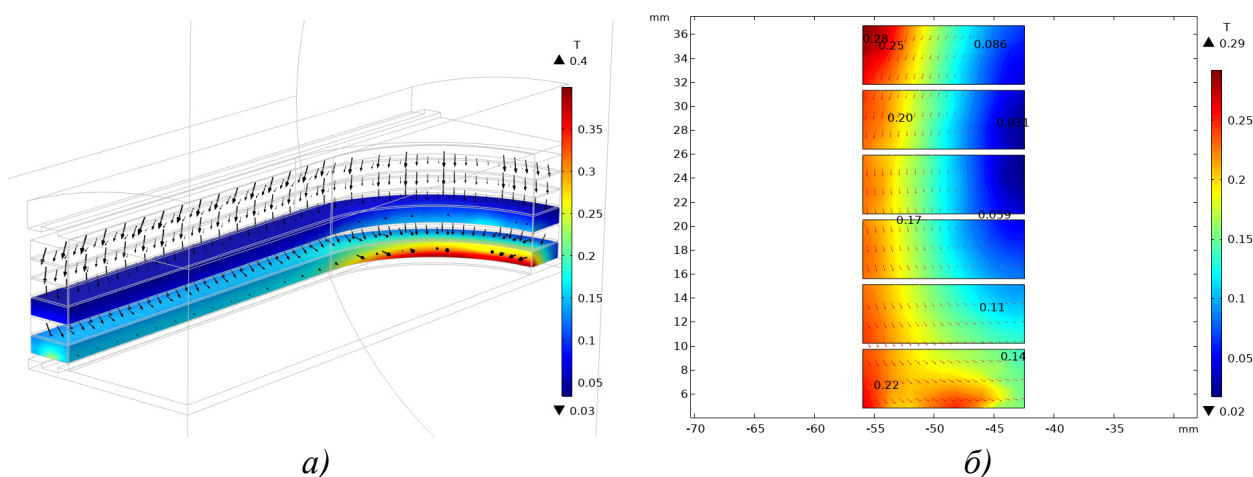


Рисунок 10 – Картины распределения магнитных полей ВТСП полюса: *а* — область с наибольшим значением индукции; *б* — область слоев катушки

Расчет показал, что в уединённом полюсе, находящемся вне магнитопровода электрической машины, насыщение ферромагнитных элементов происходит в основании и в лобовых частях сердечника. Замыкание магнитного поля вне стальных элементов происходит через все слои ВТСП катушки (см. рисунок 10б). Это приводит к тому, что сверхпроводник подвергается воздействию перпендикулярного плоскости ленты магнитного поля с индукцией 0,1 – 0,4 Тл. При этом, как видно на рисунке 10а, её наибольшее значение наблюдается во внутренней области нижнего слоя ВТСП катушки. Так как в изготовленном полюсе все слои сверхпроводниковой катушки соединены друг с другом последовательно, можно сделать предположение о том, что наибольший вклад в уменьшение критического тока оказывают именно внутренние витки ВТСП ленты нижнего слоя, расположенные близко к стальному сердечнику.

Таблица 3 – Результаты сравнения численного моделирования и экспериментальных исследований ВТСП полюса

№ полюса	Критический ток ВТСП катушки, А		Погрешность, $\delta_{отн.}$
	Измерение (1 мкВ/см, 77 К)	Численное моделирование (77К)	
1	46,3	44,39	4%
2	48,8		9%
3	49,7		11%
4	50,0		11%
5	52,1		15%
6	53,0		16%
7	49,7		11%

Как видно из таблицы 3 погрешность определения критического тока предложенным численным способом лежит в пределах от 4 до 16% и определяется свойствами самих ВТСП лент, отличаются от образца к образцу, а не ошибкой способа расчета. Таким образом, предложенный инженерный подход показал хорошую точность, что позволяет рекомендовать данную технику расчета для автоматизированного определения критического тока при проектировании ВТСП катушек, магнитных систем и активных зон СП ЭМ.

В приложении А представлен программный код на языке MATLAB, с помощью которого был проведен аналитический расчет параметров СП ЭМ без ферромагнитопровода и построены картины распределения магнитных полей в двухмерной постановке.

В приложении Б представлен Акт о внедрении результатов диссертационной работы.

В приложении В представлены Патенты на изобретение и полезную модель.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенных исследований в диссертационной работе получены следующие результаты:

1. Применение высокотемпературных сверхпроводников и развитие технологии создания токонесущих элементов на их основе дало новый импульс для совершенствования электромеханических и электроэнергетических систем с целью создания новых электрических машин с высокой удельной мощностью.

2. В настоящее время совершенствование СП электрических машин и повышение их энергетических параметров связывают с возможностью использования в их активной зоне ВТСП лент 2-го поколения с охлаждением их жидким водородом.

3. Обзор источников и публикаций показал, что, несмотря на важность, вопросы расчета электромагнитных полей и выходных параметров синхронных электрических машин без ферромагнитопровода с обмотками на основе высокотемпературных сверхпроводниковых материалов в литературе рассмотрены недостаточно полно.

4. Для увеличения удельной мощности предложена схема безжелезной полностью сверхпроводниковой электрической машины с внешним экраном на основе ВТСП лент второго поколения.

5. Получены аналитические выражения для расчета распределения магнитных полей и параметров криогенных электрических машин без ферромагнитопровода с ВТСП обмотками и различными внешними экранами в двухмерной постановке.

6. На основе полученных распределений магнитных полей найдены аналитические выражения для расчета основных параметров и построения выходных характеристик сверхпроводниковых электрических машин без ферромагнитопровода с различными внешними экранами.

7. Создана численная методика расчета магнитных полей и параметров сверхпроводниковых электрических машин без ферромагнитопровода с различными внешними экранами в двух- и трехмерной постановке.

8. Проведены серии численных расчетов магнитных полей СП ЭМ в двухмерной постановке, подтвердившие правильность получаемых решений на основе предлагаемой аналитической методики.

9. Точность полученных численных решений распределения магнитных полей в активной зоне СП ЭМ в двухмерной постановке в большинстве случаев превышала 98%.

10. Проведены серии численных расчетов магнитных полей и параметров СП ЭМ в трехмерной постановке, показавшие необходимость учета лобовых частей СП обмоток.

11. 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.

12. Механические свойства ВТСП лент 2-го поколения делают невозможным изготовление катушек электрических машин на их основе спрофилированными (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.

13. Ввиду сильной зависимости критического тока в ВТСП лентах от величины магнитного поля и криогенной температуры, задача его расчета приобретает важное значение для проектирования СП электрических машин.

14. Предложен численный, итерационный способ расчета критического тока в ВТСП катушках на основе аппроксимирующих кривых, описывающих зависимость $I_{кр}(B, T)$ и определении максимального значения индукции в перпендикулярном направлении плоскости ВТСП ленты.

15. 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.

16. Предложенный способ расчета критического тока может использоваться в численных расчетах как отдельных магнитных систем, так и активных зон сверхпроводниковых электрических машин с катушками на основе ВТСП лент 2-го поколения, в том числе при осуществлении оптимизационных расчетов.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В журналах, входящих в перечень ВАК при Минобрнауки РФ:

1. Кобзева (Дежина) И. Н., Дежин Д. С., Иванов Н. С., Ковалев К. Л. Полностью сверхпроводниковая электрическая машина с высокой удельной мощностью. Статья // Электротехника – М: 2018, № 2 – с. 2-7.

2. Дежина И. Н., Ильясов Р. И., Дежин Д. С. Сверхпроводниковая индукторная электрическая машина с комбинированным возбуждением. Статья // Электричество – М: 2019, № 7 – с. 46-52.

В журналах, входящих в международные системы цитирования:

1. Kobzeva (Dezhina) I., Kovalev K., Ivanov N., Tulinova E. High specific power HTS electric machines // Przegląd elektrotechniczny, ISSN 0033-2097, R. 93 NR 11/2017.

2. Kobzeva (Dezhina) I., Dezhin D., Ivanov N., Kovalev K., Semehin V. System Approach of Usability of HTS Electrical Machines in Future Electric Aircraft. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 28, no. 4, pp. 1-5, June 2018, Art no. 5201905, doi: 10.1109/TASC.2017.2787180.

3. Dezhina I., Dezhin D., Ilyasov R. Superconducting propulsion system with LH₂ cooling for all-electric aircraft. Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1559(1), 012143.

4. Dezhina I., Dezhin D., Ilyasov R. Small-scale prototype of a fully HTS-2G six-phase induction electrical machine. IOP Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1559(1), 012146.

5. Dezhina I., Dezhin D., Ilyasov R. Development of Superconducting Propulsion System with Liquid Hydrogen Cooling for Future Electric Aircraft. Proceedings - ICOECS

2020: 2020 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems, 2020, 9278494.

6. Dezhina I., Dezhin D. Development of the Future Aircraft Propulsion System Based on HTS Electrical Equipment with Liquid Hydrogen Cooling. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 32, no. 4, pp. 1-5, June 2022, Art no. 3601105, doi: 10.1109/TASC.2022.3153246.

В материалах научных конференций:

1. Кобзева (Дежина) И.Н., Ковалев К.Л., Иванов Н.С. Прогноз увеличения удельной мощности полностью высокотемпературных сверхпроводниковых электрических машин для полностью электрического самолета // Материалы международной научно-практической конференции «Электротехнические комплексы и системы»: В 2 томах. 2017. – Уфа: УГАТУ, 2017. – С. 20-27.

2. Кобзева (Дежина) И.Н., Иванов Н.С. Оценка параметров полностью сверхпроводниковой электрической машины и ее системы охлаждения // Сборник тезисов работ международной научной конференции XLIII «Гагаринские чтения 2017». – М.: МАИ, 2017. – С. 944-945.

3. Кобзева (Дежина) И.Н., Ковалев К.Л., Иванов Н.С. Методика расчета полностью высокотемпературных сверхпроводниковых электрических машин с высокой удельной мощностью // Тезисы докладов конференции «Иосифьяновские чтения 2017». – Истра: Издательство: Научно-исследовательский институт электромеханики, 2017. – С. 64-67.

4. Дежина И.Н. Аналитическая методика расчета магнитных полей и основных параметров криогенной электрической машины без ферромагнитопровода с обмотками на основе высокотемпературных сверхпроводников // Сборник тезисов докладов XLV Международной молодежной научной конференции «Гагаринские чтения 2019». – М.: МАИ, 2019. – С. 453

5. Дежина И.Н., Подгузов В.А. Методика расчета полностью сверхпроводниковой электрической машины. // Сборник тезисов работ международной научной конференции XLVII «Гагаринские чтения 2021». – М.: МАИ, 2021. – С. 488.

Патенты:

1. Сверхпроводниковая синхронная электрическая машина: пат. RU 169041 U1 Рос. Федерация: МПК Н 02 К 55/02, Н 02 К 3/04 / Ковалев К. Л., Кобзева (Дежина) И. Н. и др.; заявитель и патентообладатель Московский авиационный институт. – № 2016136398; заявл. 09.09.2016; опубл. 02.03.2017, Бюл. № 7. – 2 с.

2. Электрическая машина с постоянными магнитами и обмотками из высокотемпературного сверхпроводникового материала: пат. RU 2648677 C1 Рос. Федерация: МПК Н 02 К 1/14, Н 02 К 1/27, Н 02 К 55/02 / Ковалев К. Л., Кобзева (Дежина) И. Н. и др.; заявитель и патентообладатель Московский авиационный институт. – № 2017123810; заявл. 06.07.2017; опубл. 28.03.2018, Бюл. № 10. – 10 с.