

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Московский авиационный институт  
(национальный исследовательский университет)»

На правах рукописи

ТУЛИНОВА Екатерина Евгеньевна



МНОГОПОЛЮСНЫЕ СИНХРОННЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ  
ДЛЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Специальность 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание учёной степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

Доктор технических наук, с.н.с.,

Ковалев Константин Львович

Москва – 2019

## СОДЕРЖАНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ .....	3
ВВЕДЕНИЕ .....	4
1 Перспективы применения электромеханических преобразователей при создании более/полностью электрических самолетов.....	9
1.1 Перспективы создания БЭС/ПЭС .....	9
1.2 Анализ рациональных схем ЭМП для БЭС/ПЭС .....	23
1.3 Обзор свойств перспективных современных материалов для ЭМП БЭС/ПЭС.....	38
2 Расчёт магнитных полей и основных характеристик ЭМП с возбуждением от постоянных магнитов .....	49
2.1 Постановка задачи расчета двумерных магнитных полей в активной зоне ЭМП с ПМ.....	49
2.2 Расчёт магнитных полей в активной зоне ЭМП с ПМ .....	51
2.3 Определение основных параметров и характеристик ЭМП с ПМ .....	57
3 Расчет магнитных полей и основных параметров высокотемпературных сверхпроводниковых ЭМП с увеличенной удельной мощностью .....	61
3.1 Постановка задачи расчета двумерных магнитных полей в активной зоне ВТСП ЭМП .....	61
3.2 Определение основных параметров ЭМП с обмоткой возбуждения и обмоткой якоря на основе ВТСП .....	71
4 Экспериментальные исследования макетных образцов ЭМП для БЭС/ПЭС.....	80
4.1 Описание стенда для исследования .....	80
4.2 Конструкция макетного образца .....	83
4.3 Сопоставление экспериментальных и расчетных данных .....	96
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	110
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	113

## ПЕРЕЧЕНЬ ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ

БЭС – более электрифицированный самолет

ВТСП – высокотемпературный сверхпроводник

ВТСП-2 – высокотемпературный сверхпроводник второго поколения

КПД – коэффициент полезного действия

ЛА – летательный аппарат

МДС – магнитодвижущая сила

МКЭ – метод конечных элементов

НТСП – низкотемпературный сверхпроводник

ОВ – обмотка возбуждения

ОЯ – обмотка якоря

ПЭС – полностью электрический самолет

СП – сверхпроводник

ЭДС – электродвижущая сила

ЭМП – электромеханический преобразователь

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** Повышение энергетической и топливной эффективности, т.е. способности летательного аппарата (ЛА) выполнять целевую функцию при минимальных затратах энергии, становится сегодня основным критерием при его разработке и проектировании. Решение этого вопроса является комплексной задачей и затрагивает все энергетические системы ЛА. Одним из наиболее перспективных направлений создания конкурентоспособного самолета будущего является переход к концепции более/полностью электрического самолета (БЭС/ПЭС).

Реализация данной концепции требует разработки принципиально новых электрических машин, отличающихся высокими удельными характеристиками, такими как удельная мощность (кВт/кг) и объемная мощность (кВт/м<sup>3</sup>). Большое количество мировых научных центров ведет работу над созданием таких электрических машин.

Как показывают российские и зарубежные исследования наиболее перспективными являются машины с возбуждением от высококоэрцитивных постоянных магнитов (ПМ) и выполненные с применением сверхпроводниковых обмоток в роторе и статоре.

Преимуществами машин с ПМ являются более высокое значение удельной мощности по сравнению с машинами с электромагнитным возбуждением, увеличенный КПД и простота конструкции. Однако, данные машины требуют использования мощных силовых электронных преобразователей. Ожидается, что удельная мощность электрических машин с ПМ может быть на уровне 4-6 кВт/кг.

Сверхпроводниковые электрические машины могут обеспечить еще более высокие значения удельной мощности (от 10 до 30 кВт/кг). Это может быть реализовано благодаря возможности существенного увеличения токовых нагрузок электрических машин. При этом наиболее перспективными являются машины с обмотками возбуждения (ОВ) и обмотками якоря (ОЯ), выполненными на основе высокотемпературных сверхпроводниковых (ВТСП) элементов. В данной связи

работа, посвященная многополюсным электрическим машинам для летательных аппаратов, является актуальной, с учетом перспективных ПЭС/БЭС.

В литературе широко рассмотрены вопросы проектирования традиционных многополюсных электрических машин, а также машин на основе НТСП и с ВТСП ОВ (И.П. Копылов, А.В. Иванов-Смоленский, Глебов И.П., Шахтарин В.Н., А.И. Бертинов, Д.А. Бут, В.Я. Беспалов, О.Д. Гольдберг, Ковалев Л.К., Зечихин Б.С., Пенкин В.Т., и др.). Информация о методиках расчета и проектирования полностью сверхпроводниковых машин, в том числе явнополюсных и "безжелезных", в литературе встречается в ограниченном объеме. В частности, нет информации о рекомендуемых значениях токовых нагрузок таких машин, выборе значения рабочего тока ВТСП обмоток, а также о способах расчета и определения потерь в ВТСП обмотках, работающих на переменном токе.

Разработка новых типов электромеханических преобразователей (ЭМП), включая на основе ПМ и современных ВТСП материалов, требует, в первую очередь, разработки новых методик расчета и проектирования, чему и посвящена данная работа.

**Степень разработанности темы исследования.** Отдельные вопросы расчета и проектирования ЭМП с высокой удельной мощностью рассмотрены в работах Исмагилова Ф.Р., Чубраевой Л.И., Захаренко А.Б. Оценочные методики расчета и проектирования ВТСП электрических машин частично изложены в работах Ковалева Л.К., Пенкина В.Т.

При этом следует отметить, что обобщенных подходов к вопросам расчета и проектирования электрических машин с высокой удельной мощностью на основе ПМ и ВТСП в настоящий момент не сформировано.

**Цели и задачи работы.** Целью диссертационной работы является разработка аналитических методик расчета многополюсных синхронных электрических машин на основе постоянных магнитов и машин с высокотемпературными сверхпроводниковыми обмотками возбуждения и якоря.

Для достижения поставленной цели должны быть решены следующие задачи:

1. выполнить обзор проектов перспективных ПЭС/БЭС, показать перспективность их развития, а также то, что применение в их составе новых типов электрических машин на основе ПМ и ВТСП позволяет ожидать снижения полной взлетной массы, эксплуатационных расходов, времени технического обслуживания, а также увеличения топливной эффективности;
2. выполнить обзор существующих проектов электрических машин для ПЭС/БЭС показать, что машины традиционного исполнения не могут обеспечить требуемые удельные характеристики;
3. разработать аналитическую методику расчета основных параметров многополюсных электрических машин с возбуждением от ПМ;
4. исследовать свойства современных сверхпроводников различных производителей, изучить зависимость критического тока от температуры и внешнего магнитного поля, сформулировать рекомендации по применению ВТСП лент в составе электрических машин для ПЭС/БЭС;
5. разработать аналитическую методику расчета основных параметров явнополюсных электрических машин с ВТСП ОВ и ОЯ;
6. разработать стенд для экспериментального исследования перспективных ЭМП для ПЭС/БЭС;
7. провести верификацию разработанных методик по результатам конечно-элементного моделирования и экспериментальных исследований.

**Научная новизна.** Разработана новая методика расчета многополюсных синхронных машин с возбуждением от постоянных магнитов, основанная на аналитическом расчете двумерных распределений магнитных полей в активной зоне синхронной машины, учитывающая геометрию ПМ и их свойства и электрические параметры ЭМП.

Разработана новая методика электромагнитного расчета явнополюсных синхронных машин с ВТСП ОВ и ОЯ, основанная на аналитическом расчете двумерных распределений магнитных полей в активной зоне синхронной машины. Особенностью данной методики является возможность учесть геометрические размеры активной зоны, свойства используемых материалов, в

том числе ферромагнитных и сверхпроводниковых. Полученные аналитические выражения позволяют получать соотношения размеров активной зоны ЭМП, которые позволят обеспечить при заданных исходных данных максимальное значение удельной или объемной мощности.

Проведена верификация теоретических расчетов на основе конечно-элементного моделирования и экспериментальных исследований макетного образца, подтвердившая правильность разработанных теоретических методик.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Теоретическая значимость полученных результатов заключается в том, что разработанная методика и подходы к проектированию дают возможность проводить глубокий анализ выходных параметров рассматриваемых электрических машин, в том числе, например, определить зависимость удельной и объемной мощности машины от критических параметров используемых ВТСП или ПМ.

Разработанные методики позволяют определить основные параметры синхронных электрических машин на основе ПМ или ВТСП. Это дает возможность на этапе предварительного проектирования определить соотношения размеров активной зоны машины, при которых будет получена наибольшая удельная или объемная мощность. Таким образом, практическая значимость работы заключается в том, что полученные результаты позволяют перейти к проектированию и созданию новых электрических машин с улучшенными массогабаритными показателями для ПЭС/БЭС.

**Методы исследования.** При решении поставленных задач с диссертационной работе использованы методы прикладной электродинамики, электромеханики, теории поля, уравнения математической физики, методы прикладной сверхпроводимости, метод конечных элементов и методы проектирования специальных электрических машин.

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

1. Возможность практической реализации ПЭС/БЭС только при применении в их составе высокоэффективных ЭМП на основе ПМ и современных ВТСП элементов.

2. Аналитическая методика расчета основных параметров многополюсной синхронной машины с возбуждением от ПМ, учитывающая полюсность машины, размеры активной зоны, объем ПМ.

3. Анализ параметров современных ВТСП материалов и методика выбора рациональных параметров ВТСП материалов для их использования в конкретных ЭМП для ПЭС/БЭС.

4. Аналитическая методика расчета основных параметров многополюсных синхронных машин с ВТСП ОВ и ОЯ, учитывающая полюсность машины, размеры активной зоны, свойства материалов активной зоны, критические параметры ВТСП.

5. Результаты экспериментального исследования полностью ВТСП электрической машины с явнополюсным ротором.

**Степень достоверности результатов.** Достоверность полученных результатов подтверждается сравнением расчетов с экспериментальными данными.

**Апробация работы.** Основные результаты обсуждались и докладывались на конференциях: 14-я Международная конференция «Авиация и космонавтика – 2015», 16-20 ноября, МАИ, Москва; XLII Международная молодежная научная конференция «Гагаринские чтения – 2016», 12-15 апреля, Москва; 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2017, 16-19 мая 2017, Санкт-Петербург; 17-я Международная конференция «Авиация и космонавтика», 19-23 ноября, МАИ, Москва; Международная (XX Всероссийская) научно-техническая конференция «Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии», 29-31 мая 2019, ИГЭУ, Иваново.

## 1 Перспективы применения электромеханических преобразователей при создании более/полностью электрических самолетов

Повышение энергетической эффективности, т.е. способности летательного аппарата (ЛА) выполнять целевую функцию при минимальных затратах энергии, становится сегодня основным критерием его совершенства. Решение этого вопроса является комплексной задачей и затрагивает все энергетические системы ЛА, в том числе и авиационный двигатель. Одним из наиболее перспективных направлений создания конкурентоспособного самолета будущего является переход к концепции полностью электрического самолета (ПЭС).

В данном разделе приведен обзор существующих полностью электрических самолетов, а также проектов по созданию крупных пассажирских электрических летательных аппаратов.

### 1.1 Перспективы создания БЭС/ПЭС

В тех случаях, где концепция ПЭС не является пока конкурентоспособной в силу ряда причин, максимально возможный уровень энергоэффективности достигается на самолетах с увеличенной степенью электрификации «более электрифицированных самолетах» (БЭС), на которых электрифицированное оборудование используется только во вторичном энергетическом комплексе и не затрагивает источников движения ЛА. На рисунке 1.1 проиллюстрирована концепция полностью электрифицированного самолета. Уже сейчас реализация этой концепции на таких самолетах как А-380 и Boeing 787 позволяет получить снижение потребления топлива на 8-12%, снижение полной взлетной массы на 6-10%, снижение прямых эксплуатационных расходов на 5-10%, снижение стоимости жизненного цикла на 3-5%, увеличение среднего налета на отказ на 5-6% и снижение времени технического обслуживания на 4-4,5% [1]. Концепция ПЭС отличается от концепции полностью электрифицированного самолета заменой традиционных авиадвигателей электрическими, что открывает новые перспективы по совершенствованию указанных выше показателей и повышению

энергетической эффективности.

В большинстве промышленно развитых стран концепция ПЭС уже близка к своей реализации в области малой авиации и создания беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) [1]. Создание конкурентоспособных ПЭС малой авиации во многом связано с решением вопросов генерации и накопления электрической энергии, необходимой для полета самолета.



Рисунок 1.1 – Концепция полностью электрифицированного самолета

Так в 2009 году китайской компанией Yuneec International был представлен двухместный ПЭС Yuneec E430 (рисунок 1.2) длиной 6,98 м и размахом крыла 13,8 м [2].



Рисунок 1.2 – Полностью электрический самолет Yuneec E430

Вес незагруженного самолета с батареей стандартной емкости составляет 250

кг, а максимальный взлетный вес 470 кг. Электродвигатель мощностью 40 кВт позволяет развить крейсерскую скорость в 90 км/ч, максимальная скорость составляет 150 км/ч. На одном заряде аккумуляторной батареи Yuneec E430 может находиться в воздухе от 1,5 до 2 часов (для аккумуляторной батареи стандартной емкости) и от 2 до 2,5 часов (для более емкой аккумуляторной батареи). Батарея состоит из отдельных блоков литий-ионных аккумуляторов с полимерным электролитом. Каждый блок обладает массой 13 кг, напряжением 66,6 В и емкостью 30 А·ч. На самолет устанавливается от шести до десяти таких блоков. Зарядка всех блоков занимает около 3-х часов. Также китайские инженеры прорабатывают версию самолета с солнечными батареями на крыльях для подзарядки аккумуляторной батареи [2].

Также в 2009 году испытательный полет совершил ПЭС Antares DLR-H2 производства Немецкого центра авиации и космонавтики (DLR) и фирм LangeAviation, BASFFuelCells, Serenergy. Самолет получает всю необходимую для полета энергию от водородных топливных элементов. Длина экспериментального самолета составляет 7,40 м, размах крыльев 20 м. Его дальность действия с заправленными водородом баками составляет 750 км, а максимальная высота полета превышает 4000 м. Силовая установка, включающая в себя бак с водородом и топливные элементы, расположена в грузовых консолях, подвешенных под крыльями (рисунок 1.3) [3].

Топливные элементы, использованные для снабжения энергией самолета могут выдать пиковую нагрузку до 25 кВт. В режиме обычного полета, в спокойных метеорологических условиях, силовая установка самолета потребляет 52% от пикового значения, т.е. около 10 кВт мощности. Эффективность машины на топливных элементах, по данным DLR, значительно выше, чем реактивных самолетов с двигателем внутреннего сгорания. При сгорании керосина в тягу, обеспечивающую движение, преобразуется не более 25% энергии. В случае Antares DLR-H2 КПД достигает 44% [3].



Рисунок 1.3 – Баки с водородом ПЭС Antares DLR-H2

В 2011 году словенской компанией Pipistrel был представлен самый мощный на то время в мире ПЭС Taurus G4 (рисунок 1.4). Он также является первым, на борту которого размещаются четыре человека. Taurus G4 представляет собой два фюзеляжа самолетов Taurus G2, соединенные гондолой бесколлекторного электродвигателя мощностью 145 кВт [4].



Рисунок 1.4 – Полностью электрический самолет Taurus G4

В 2012 году самолет компании Flight Of The Century Long – ESA во время первого испытательного полета сумел развить рекордную скорость в 326 км/ч.

Самолет приводится в движение одним электродвигателем мощностью 238 л.с. Первый полет продолжался около 16 минут. В сообщении компании говорится, что в ближайшее время воздушное судно будет снабжено новым набором батарей, который позволит увеличить длительность полета, а также максимальную скорость [5].

В 2013 году над территорией США совершил свой первый полет экспериментальный ПЭС SolarImpulse (рисунок 1.5) швейцарского производства. Самолет работает исключительно на солнечной энергии и является первым самолетом в своем роде, который может совершать перелеты как днем, так и ночью без использования условного топлива [6]. Движение обеспечивается четырьмя бесколлекторными электрическими двигателями, расположенными под крыльями на расстоянии 4,95 м друг от друга по два на каждом крыле. Двигатели развивают мощность от 15 до 70 л.с. (4 двигателя по 17,4 л.с.), а максимальная частота вращения составляет 525 об/мин. В конструкции предусмотрена возможность при поломке одного из двигателей передачи заряда его аккумуляторов другому двигателю [7].



Рисунок 1.5 – Полностью электрический самолет SolarImpulse

В 2014 году был совершен первый демонстрационный полет ПЭС E-Fan (рисунок 1.6), разработанного инженерами Airbus совместно со специалистами компании AeroCompositesSaintonge (ACS), а также Главного управления гражданской авиации Франции (DGAC). Данный самолет имеет длину 6,7 м при

размахе крыльев 9,5 м. Максимальная взлетная масса самолета составляет 550 кг, а максимальная скорость – 220 км/ч. Airbus E-FAN имеет два электрических пропеллера суммарной мощностью в 60 кВт, получающих электрическую энергию от батареи, состоящей из 120 литий-полимерных аккумуляторов емкостью 40 А·ч. При полном заряде батарей E-Fan может находиться в воздухе около часа при оптимальной скорости 160-180 км/ч [8]. В настоящее время компания Airbus работает над увеличением скорости полета и временем работы самолета от аккумуляторных батарей [8, 9].



Рисунок 1.6 – Полностью электрический самолет E-FAN

Компания JobyAviation (США) занимается разработкой летательного аппарата S2, представляющего собой гибрид самолета и вертолета (рисунок 1.7). Предполагается, что работающий от литий-полимерных аккумуляторов летательный аппарат сможет совершать вертикальный взлет, поэтому не будет нуждаться во взлетно-посадочной полосе. Гибрид самолета и вертолета имеет 12 винтов, которые поднимаются и опускаются в зависимости от режима полета машины. Инженерами компании проведено компьютерное моделирование своей модели массой 770 кг, а также изготовлен натурный макет массой 4,5 кг. По словам представителей JobyAviation, разрабатываемый полностью электрический

летательный аппарат будет в 3-5 раз безопаснее и эффективнее уже существующих самолетов малого класса. По их словам, при суммарной мощности электродвигателей 50 кВт он сможет преодолеть путь от Нью-Йорка до Бостона (322 км) за один час полета [10].



Рисунок 1.7 – Полностью электрический ЛА JobyAviation S2

Недавно NASA приступило к испытаниям электрического крыла «Leading Edge Asynchronous Propeller Technology» (LEAPTech). Этот полностью электрический ЛА разработан компаниями ESAero и JobyAviation и значительно отличается от традиционных самолетных крыльев, так как снабжен 18-ю миниатюрными электродвигателями (рисунок 1.8) [11].



Рисунок 1.8 – Испытания электрического крыла

Для питания двигателей используются батареи на основе лития и железного фосфата. Каждым двигателем можно управлять независимо, что позволяет

оптимизировать их режим работы для достижения максимальной производительности. На этапе испытаний крылья были установлены на грузовом автомобиле, который разогнался до 112 км/ч. Планируется, что крейсерская скорость этого самолета составит 320 км/ч [12].

Немецкая компания Lillium Aviation провела испытания прототипа летательного аппарата Lillium Jet, который способен совершать вертикальные взлет и посадку. ПЭС Lillium Jet вмещает двух человек и способен развивать скорость около 300 км/час. Главной особенностью самолета является двигательная установка, состоящая из 36 электродвигателей. Пропеллеры размещены в крыльях и носовой части и способны менять свое положение, уводя воздушный поток в необходимом направлении. В компании надеются, что самолет будет востребован, чтобы обходить загруженные и протяженные участки дорог с множеством развязок, экономя пассажиру время в пути. Инженеры также разрабатывают пятиместную версию летательного аппарата, чтобы создать полноценный сервис воздушного такси. По расчетам Lillium Jet будет способен доставить человека из Манхэттена в главный аэропорт Нью-Йорка JFK всего за 5 минут по сравнению с 55 минутами на машине. Когда такое такси появится, в компании пока не прогнозируют [13].

Среди ПЭС малой авиации необходимо упомянуть модель ElectraOne компании PC-Aero [14] с электродвигателем мощностью 16 кВт, модификация которого, NewElectraOne, способна совершать длительные перелеты (до 8 часов) за счет использования солнечных батарей, расположенных на корпусе и крыльях самолета [15].

### *Перспективные проекты ПЭС*

В настоящее время имеется проект ПЭС для малой авиации в отечественной компании ООО «Экспериментальная мастерская НаукаСофт». Согласно их проекту ПЭС АВФ-32НС (рисунок 1.9) предназначен для перевозки пассажиров из 5 человек и груза с суммарной массой до 400 кг. Время автономного полета ПЭС без дозаправки 5 часов. ПЭС АВФ-32НС будет снабжен четырьмя

электрическими силовыми установками ЭСУ-30НС. Силовые установки ЭСУ-30НС представляют из себя авиационные двигатели вентиляторного типа с приводом вентилятора от электродвигателя ДГ-30НС с возбуждением от постоянных магнитов.



Рисунок 1.9 – Проект полностью электрического самолета АВФ-32НС

В таблице 1.1 представлены основные характеристики ПЭС АВФ-32НС. Основным источником энергии на борту ПЭС будет батарея топливных элементов, работающих на запасенном на борту ПЭС водороде и кислороде, получаемом из окружающего воздуха. Топливные элементы для ПЭС АВФ-32НС разрабатываются Институтом проблем химической физики РАН. В качестве источников энергии на борту самолета также планируется использовать литиевые аккумуляторные батареи и солнечные батареи. Разработчики утверждают, что данный самолет является наиболее приемлемым с точки зрения экологичности и энергоэффективности. При эксплуатации самолета полностью отсутствуют вредные выхлопы. В результате работы самолета вырабатываются пары воды, которые затем выбрасываются в окружающее пространство [16].

Таблица 1.1 – Основные характеристики ПЭС АВФ-32НС

Характеристика	Значение
Габаритные размеры:	
длина	7,0 м

Продолжение таблицы 1.1

высота	3,0 м
размах крыла	16 м
Масса:	
незагруженного самолета	1100 кг
полезной нагрузки	400 кг
максимальная взлетная	1500 кг
Силовая установка	Вентиляторная электрическая
Мощность силовой установки	4 x 30 кВт
Максимальная дальность полета	600 км
Максимальная скорость полета	360 км/ч
Крейсерская скорость полета	180 км/ч
Высота полета на крейсерской скорости	3000 м
Длина разбега	300 м
Длина пробега	350 м

Использование электродвигателей для создания тяги средних и крупных воздушных судов позволило бы решить задачу создания экологически чистого и экономного авиалайнера. Здесь практически непреодолимым препятствием являются рекордные показатели современных турбовентиляторных двигателей. Однако прогресс, достигнутый в водородной энергетике в сочетании с использованием электродвигателей с применением высокотемпературных сверхпроводников, может стать тем направлением, которое окажется конкурентоспособным для традиционных двигателей в ближайшем будущем.

Так, группа американских исследователей рассмотрела комплекс вопросов, связанных с применением подобного подхода, для самолета В-737-200. Моделирование структур электроэнергетического комплекса с использованием аналитических тепловых и электромагнитных интегрированных моделей показало возможность реализации полностью электрического экологически чистого самолета с общей массой электроэнергетического оборудования на 40% больше, чем у традиционного образца. При этом эффективность системы значительно возросла, что способствовало уменьшению расхода топлива [17].

Инженеры компании WrightElectric весной 2018 года планируют провести первые испытания ПЭС Х-57 «Максвелл», создаваемого в рамках инициативы

NewAviationHorizons. Самолет с 12 относительно маломощными электропропеллерами (для создания подъемной силы во время взлета и посадки) и двумя электродвигателями повышенной мощности на крыльях (для набора скорости) – первая отрабатываемая концепция [18].

Также в 2018 году израильская компания Eviation планирует начать испытательные полеты прототипа 9-местного самолета с электрическим двигателем. Бизнес-джет Alice сможет перевезти 2 члена экипажа и 9 пассажиров на расстояние более 550 км с крейсерской скоростью 520 км/ч на высоте около 3000 м. Самолет оснащен тремя электродвигателями мощностью 290 кВт каждый, которые приводят в движение три винта, размещенные на концах крыльев и в хвосте фюзеляжа [19].

Необходимо отметить, что использование сверхпроводимости на борту ЛА открывает возможность создания конкурентоспособной технологии для полностью электрического и экологически безопасного воздушного транспорта. Существующие на сегодняшний день перспективные проекты по созданию крупных и средних ПЭС опираются на эту технологию.

В частности, компанией EADS совместно с RollsRoyce разработан проект гибридного электрического авиалайнера E-Thrust (рисунок 1.10) для сокращения количества потребляемого топлива и уменьшения вредных выбросов в окружающую среду, а также уменьшения уровня шума. В E-Thrust реализована система распределенной тяги «Distributed Propulsion», которая предполагает наличие нескольких электрических двигателей, сгруппированных вдоль каждого крыла самолета. Это позволяет проектировать и оптимизировать каждый компонент системы отдельно, за счет чего достигается большая эффективность процесса разработки электропривода. Всего на самолете предполагается использование шести электродвигателей, по три на каждом крыле. Источником энергии, который снабжает электричеством электродвигатели и заряжает аккумуляторные батареи авиалайнера, является высокоэффективный электрический генератор, приводящийся в действие газотурбинным двигателем (ГТД), который может работать на любом виде топлива (в том числе, на

биотопливе). Электродвигатели, приводящие в действие вентиляторы, а также все соединительные кабели между вентиляторами, электродвигателями и ГТД планируется проектировать с использованием высокотемпературных сверхпроводниковых материалов (ВТСП), что потребует наличия системы криогенного охлаждения на борту. Ожидается, что использование сверхпроводящих материалов позволит значительно улучшить массогабаритные показатели электродвигателей. Реализация проекта ожидается в 2050 году [20].



Рисунок 1.10 – Проект полностью электрического самолета E-Thrust

В 2012 году аналогичный проект был представлен компанией Bauhaus Luftfahrt в Берлине на авиашоу ILA. Целью проекта является создание полностью электрического пассажирского авиалайнера Ce-liner (рисунок 1.11), который будет объединять в себе многие перспективные технологии. Данный авиалайнер представляет собой широкофюзеляжный самолет с двумя электрическими двигателями для создания тяги, расположенными в задней части фюзеляжа. Особенностью самолета является применение крыла особой формы C-wing, предназначенного для создания дополнительной подъемной силы, позволяющей скомпенсировать достаточно большой вес аккумуляторных батарей на борту. Самолет рассчитан на 189 пассажиров. Канальные вентиляторы приводятся в действие электродвигателями на основе ВТСП, получающими питание от литий-ионных батарей посредством универсальной электросистемы «Universally electric systems architecture» (UESA). Общая мощность электродвигателей составляет 59800 л.с. Разработчики полагают, что первая модель появится в 2030 году, и более того, что осуществление перелетов на подобных самолетах составит 59% от

всех рейсов на дальность 1100 км, и 79% от всех рейсов на дальность 1600 км [21].

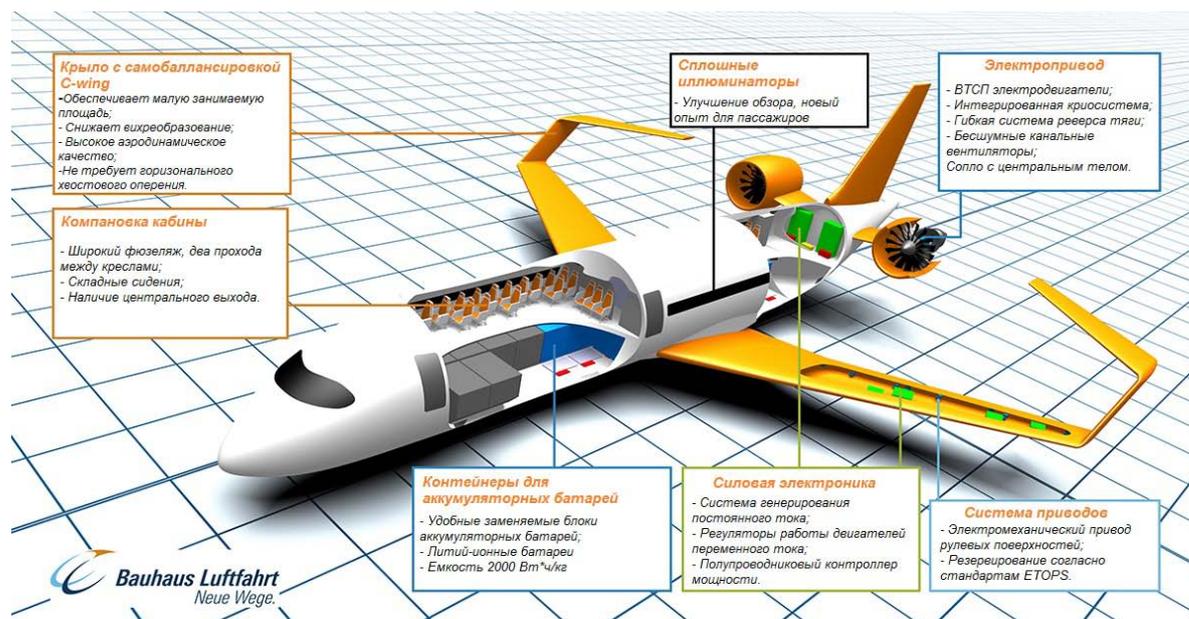


Рисунок 1.11 – Проект полностью электрического самолета Ce-liner

Также проект среднемагистрального самолета на электрической тяге был представлен американской компанией ZunumAero, которая планирует разработать семейство пассажирских гибридных самолетов, способных в зависимости от конфигурации перевозить от десяти до 50 пассажиров. Первым, как ожидается, будет создан 19-местный самолет с дальностью полета около 1300 км. Эта версия может начать выполнять пассажирские перевозки в начале 2020-х годов. Затем разработчики планируют модернизировать летательный аппарат, увеличив дальность его полета до 1900 км. Предварительное проектирование нового самолета началось в 2013 году. В ZunumAero рассчитывают, что при поддержке таких компаний как Boeing и JetBlueAirways прототип нового самолета планируется поднять в воздух в 2019 году, а сертификацию завершить в 2020 году. Гибридный самолет вместимостью в десять пассажиров получит электродвигатели мощностью 1 МВт, а 50-местный будет снабжен электродвигателями мощностью 4-5 МВт [22].

Еще одним перспективным проектом ПЭС является самолет EADS' VoltAir (EADS и Siemens) (рисунок 1.12). Этот инновационный футуристический самолет будет подниматься в воздух благодаря двум высокоэффективным электрическим сверхпроводящим двигателям, которые будут получать питание от двух

модифицированных литиевых батарей.

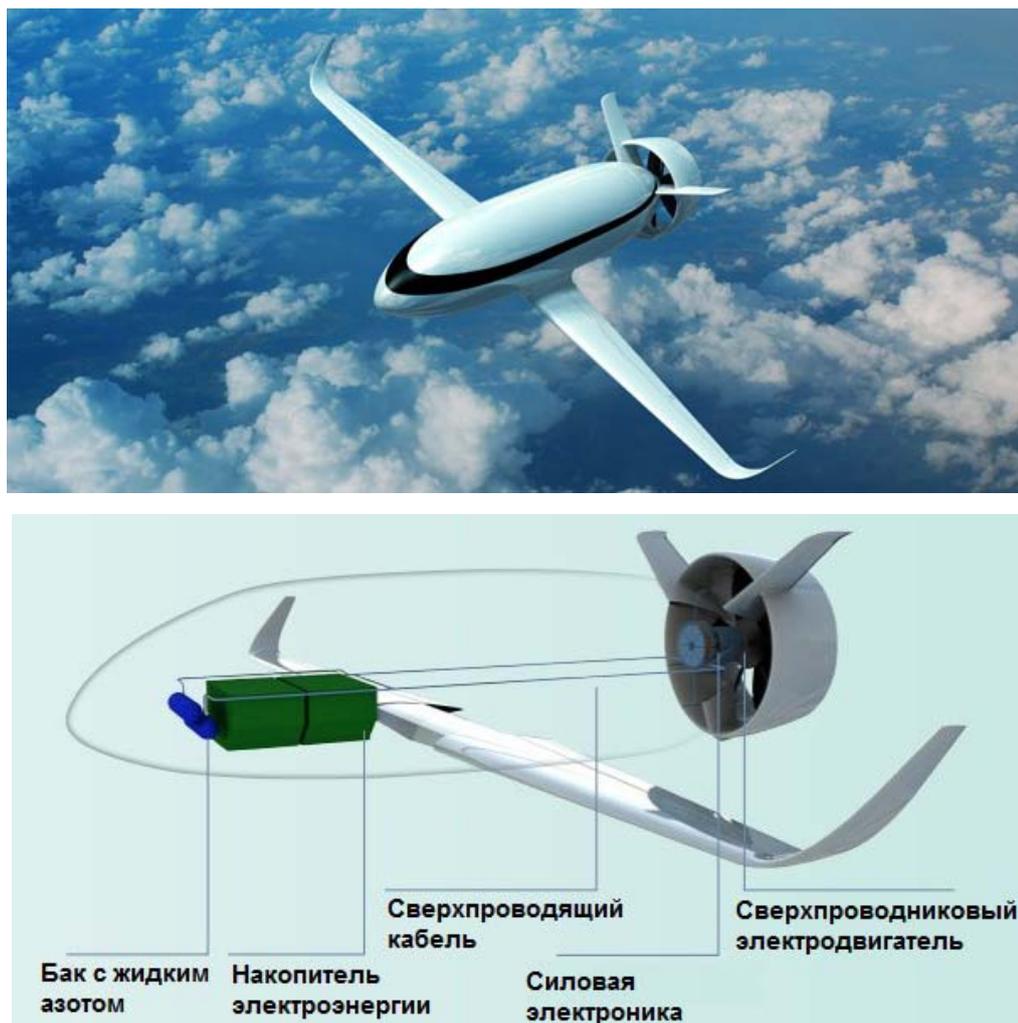


Рисунок 1.12 – Проект полностью электрического самолета EADS' VoltAir

В задней части EADS' VoltAir располагаются два пропеллера, которые будут вращаться в противоположных направлениях. Материалом для корпуса самолета послужит углеродное волокно, благодаря чему EADS' VoltAir будет достаточно легким. Основными преимуществами EADS' VoltAir, которые будут выгодно отличать его от обычных самолетов, являются улучшенная аэродинамика, корпус из композитного материала и малая масса. Батареи электросамолета будут перезаряжаемыми, а время, необходимое для их зарядки, будет соответствовать стандартному времени дозаправки. Несмотря на все эти плюсы EADS' VoltAir пока находится на этапе разработки и исследований. Однако с продвижением в области высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) разработчики надеются решить многие технические проблемы. Так планируется

произвести замену традиционных обмоток из медных или алюминиевых проводов на провода из ВТСП. Благодаря этому потери электроэнергии будут сведены практически к нулю [23].

На МАКС-2017 НИЦ «Институт имени Н.Е. Жуковского» была продемонстрирована часть модели гибридно-электрической силовой установки, в мотогондоле которой находится электродвигатель, вращающийся винт и система его управления. Этот экспонат был призван продемонстрировать работу по формированию опережающего научно-технического задела для разработки перспективного полностью электрического самолета. Главной особенностью представленной модели силовой установки являлось применение электрического оборудования (электродвигатель, генератор и др.), использующего эффект высокотемпературной сверхпроводимости. В гибридно-электрической силовой установке питание электродвигателя осуществляется от аккумуляторных батарей и/или от генератора, приводимого во вращение от вала газотурбинного двигателя. Такая установка рассматривается разработчиками как промежуточный этап перед созданием полностью электрической силовой установки. Ее применение позволит уменьшить затраты топлива, эмиссию вредных веществ, снизить шум и увеличить ресурс газотурбинной части. Планируемая номинальная мощность перспективной гибридно-электрической силовой установки составляет 500 кВт. В проекте также участвуют такие отечественные организации как ЦИАМ, СибНИА, ЦАГИ, а также частная компания «СуперОкс» [24].

## 1.2 Анализ рациональных схем ЭМП для БЭС/ПЭС

Электрические машины, работающие в качестве двигателей и генераторов, являются важнейшим элементом электроэнергетической системы будущих БЭС и ПЭС. Их мощность, масса и габаритные размеры будут оказывать существенное влияние на характеристики всей системы.

В данном разделе приведен обзор существующих сегодня электрических машин для БЭС и ПЭС. Часть из них уже применяется в составе ЛА и была разработана специально для установки в конкретном аппарате, часть имеет

универсальный характер и может быть использована в составе любого летательного аппарата. Показано, что электрические машины авиационного исполнения имеют наилучшие удельные характеристики. Проведен обзор разработок в области ВТСП электрических машин, приведены их удельные параметры.

### *Традиционные электрические машины для ПЭС*

Современные системы создания тяги ЛА базируются на применении реактивных газовых турбин. Наиболее современные авиационные двигатели — турбовентиляторные, с высокой степенью двухконтурности, создающие тягу путем выхлопа горячего газа и вращения крупного туннельного вентилятора.

При большой степени двухконтурности (отношение расхода вентилятора к расходу реактивной струи) основная часть тяги создается вентилятором, и лишь небольшая — выбросом горячего газа (обычно не более 10%).

Заметную выгоду принесла бы замена газовой турбины электродвигателем с высоким показателем удельной мощности и создание тяги целиком за счет вращения туннельного вентилятора. Концепция такой замены представлена на рисунке 1.13 [25].

Исследованиями по созданию электрических машин для ПЭС занимаются многие научные центры в России и за рубежом.

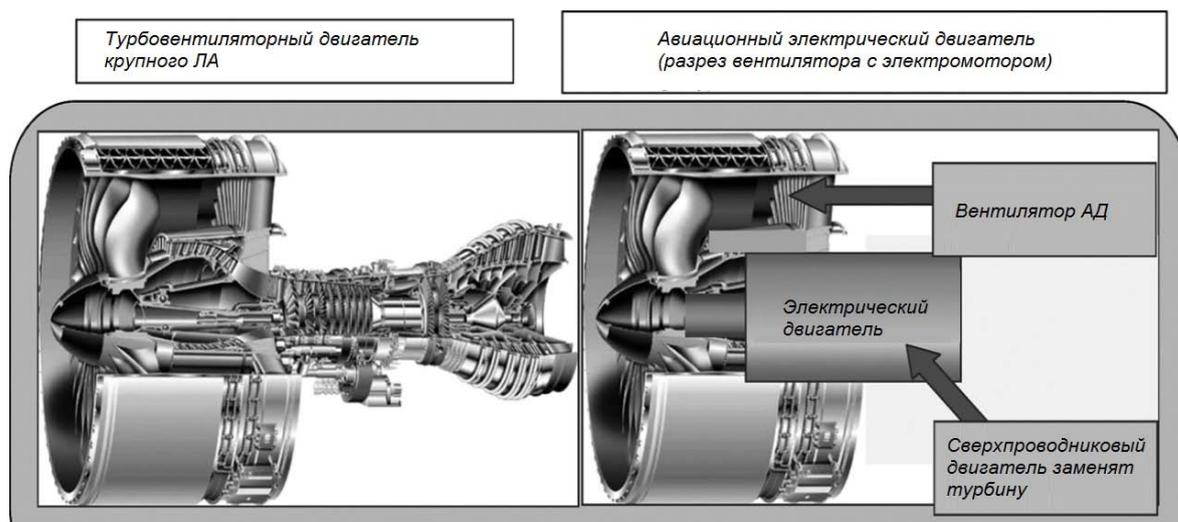


Рисунок 1.13 – Компоновка авиадвигателя с ВТСП электроприводом

Фирма *LaunchPoint Technologies* представила концепции электродвигателей для малых ПЭС (рисунок 1.14). Их основные характеристики приведены в таблице 1.2. [26].

Таблица 1.2 — Характеристики двигателя *LaunchPoint Technologies*

Мощность, кВт	5,2	118
Частота вращения, об/мин	8400	3500
КПД	0,95	0,97
Масса, кг	0,64	15
Диаметр, см	15,3	46
Удельная мощность, кВт/кг	8,1	7,9

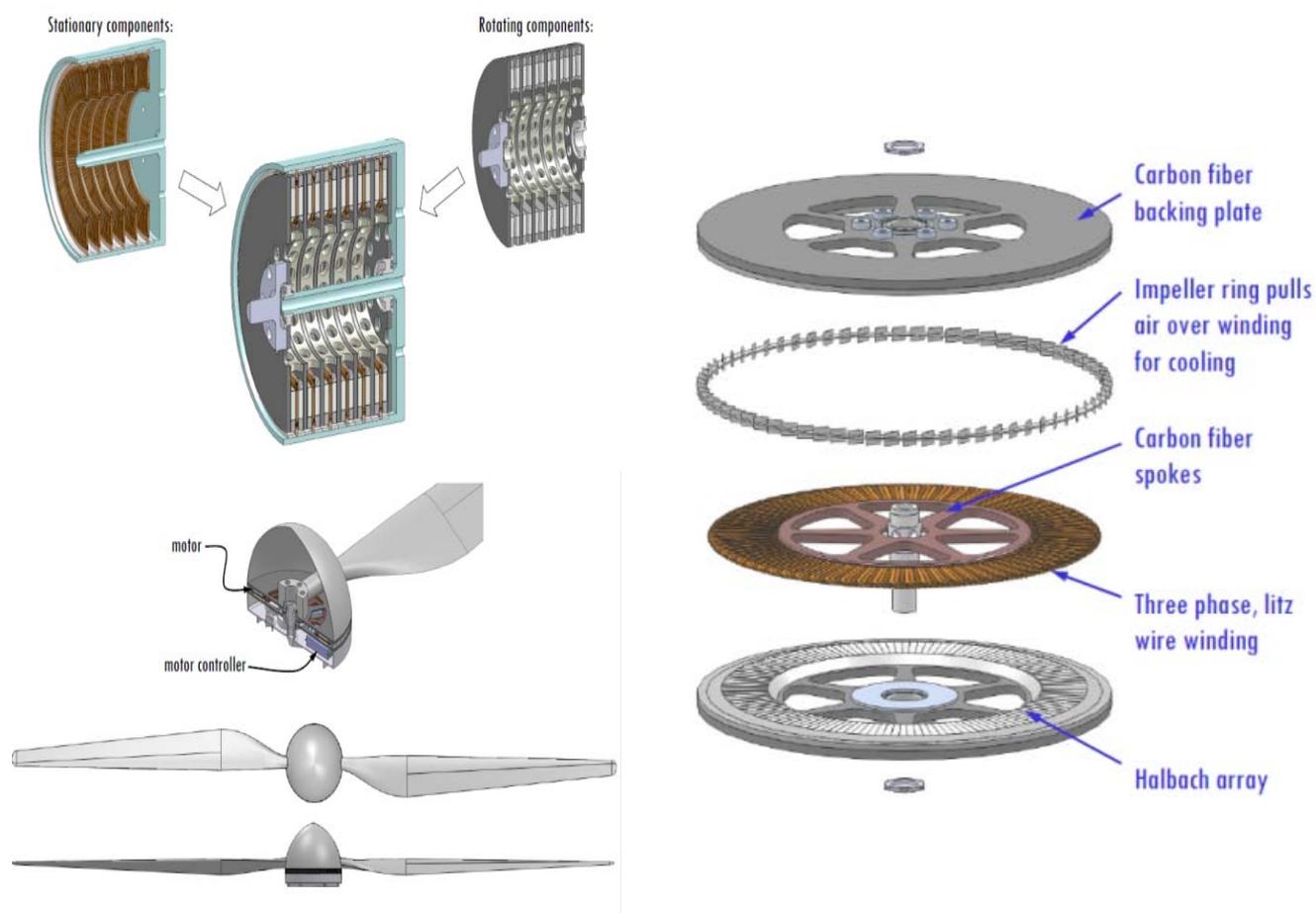


Рисунок 1.14 – Схема и внешний вид двигателя *LaunchPoint Technologies*

Особенностью данных двигателей является торцевая конструкция. Это позволяет максимально использовать полезный объем машины. При этом, производитель указывает на возможность модульной конструкции, когда двигатель заданной мощности набирается из нескольких дисков. Пока остается под вопросом возможность изготовления подобных двигателей на мощности порядка 1 МВт и более. Работы по исследованию данных электродвигателей компания *LaunchPoint* проводит при поддержке NASA (SBIR NNX14CC48P) в рамках проекта по созданию технологии "Propulsion-by-wire" [27], которая будет востребована в будущих ПЭС.

Фирма *Siemens* также разработала несколько двигателей, которые можно использовать для создания тяги в ПЭС [27]. Мощность первого двигателя — 65 кВт (80 кВт — 180 сек.) при частоте вращения - 11000 мин<sup>-1</sup> (с редуктором 2400 мин<sup>-1</sup>). Двигатель имеет водяное охлаждение и весит 13 кг. Удельная мощность этого двигателя ~ 5 кВт/кг (рисунок 1.15).

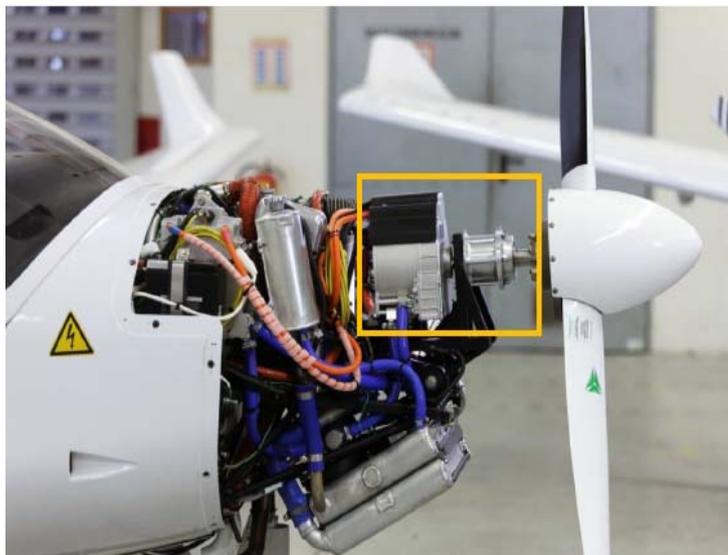


Рисунок 1.15– Двигатель фирмы *Siemens*

Еще один двигатель фирмы *Siemens* мощностью 261 кВт и частотой вращения 2500 мин<sup>-1</sup> (редуктора нет) представлен на рисунке 1.16. Этот двигатель также имеет водяное охлаждение (90 – 110 °С). КПД такого двигателя — 0,95. Напряжение питания — 580 В. Двигатель имеет две независимые обмотки, ток в каждой из них составляет по 218 А. Масса мотора с пропеллерным подшипником

— 50 кг. Удельная мощность двигателя, не включая инвертор и систему охлаждения, 5.22 кВт/кг. Основные размеры двигателя:  $D = 418$  мм,  $L = 300$  мм (без подшипника) [28].

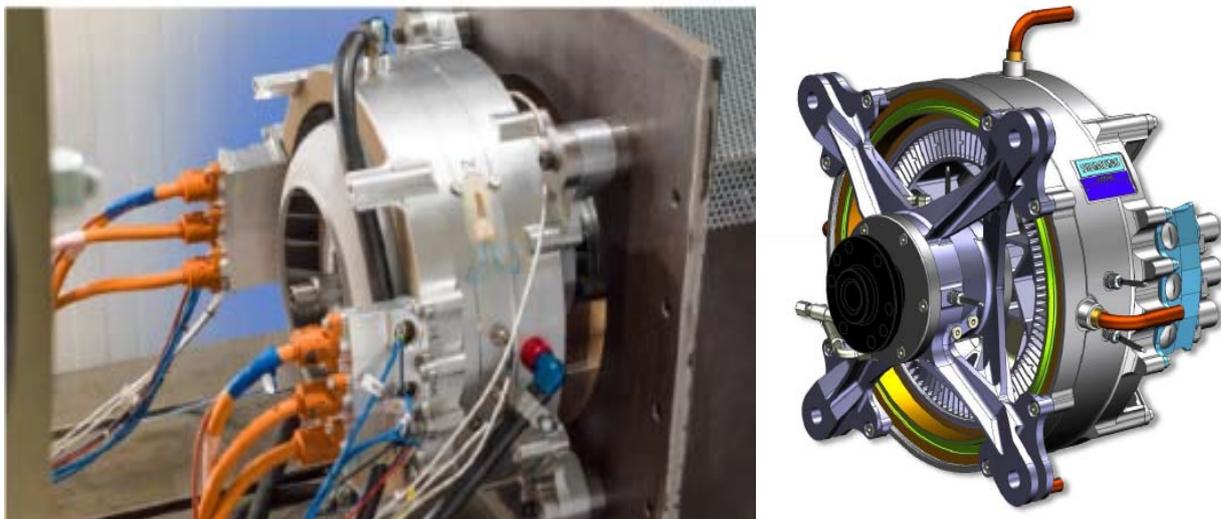


Рисунок 1.16 — Внешний вид и модель двигателя мощностью 261 кВт (*Siemens*)

Также фирмой *Siemens* был разработан генератор мощностью 170 кВА, с частотой вращения  $6250 \text{ мин}^{-1}$  (макс.  $6500 \text{ мин}^{-1}$ ) (рисунок 1.17) [28]. Как и предыдущие машины, он имеет водяное охлаждение, КПД машины — 0,95, напряжение питания — 580 В. Выполнен также с двумя независимыми обмотками, по 131 А каждая. Масса двигателя с пропеллерным подшипником составляет 24,4 кг. Удельная масса активных элементов электрической машины без системы охлаждения составляет 7 кВт/кг. Основные размеры:  $D = 308$  мм,  $L = 150$  мм (без подшипника).

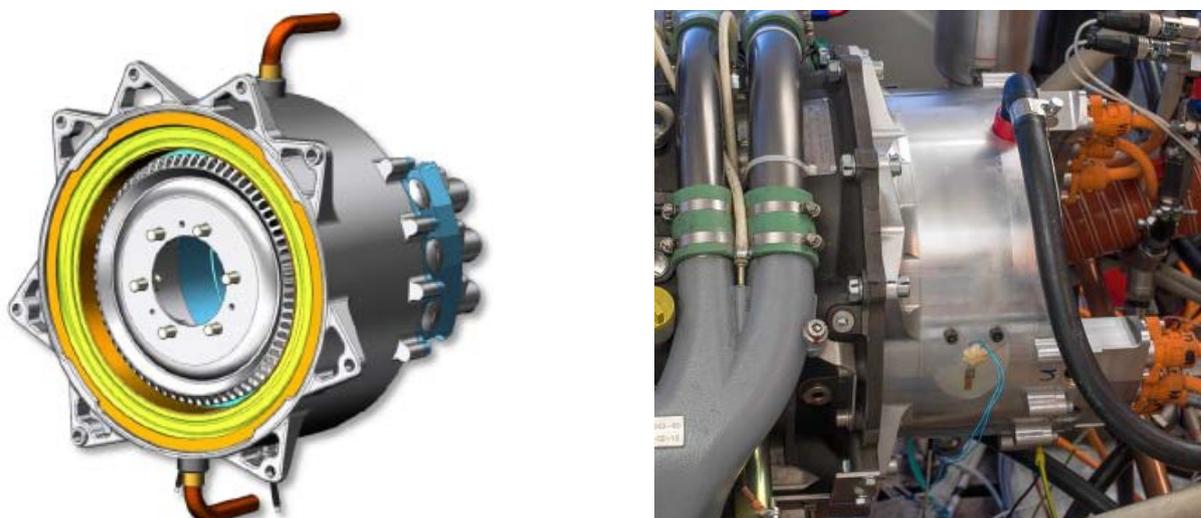


Рисунок 1.17 – Генератор 170 кВА *Siemens*

Английская фирма *Yasa Motors* разработала мотор *YASA-750R* мощностью 70 кВт при работе в продолжительном режиме (100 кВт пиковой мощности) с частотой вращения  $3250 \text{ мин}^{-1}$  (рисунок 1.18). Мотор имеет масляное охлаждение (расход — 20 л/мин), напряжение питания — 700 В. Масса мотора — 37 кг. Удельная мощность данной машины — 1,89 кВт/кг, размеры:  $D = 368 \text{ мм}$ ,  $L = 98 \text{ мм}$  [29]. Данный электродвигатель представляет собой торцевую синхронную машину с возбуждением от постоянных магнитов. Они расположены с торцов электрической машины на вращающемся роторе. На статоре в центральной части находятся сегментированная трехфазная обмотка, состоящая из отдельных катушек. С целью снижения общей массы электродвигателя центральные сердечники внутри катушек отсутствуют. На их месте располагаются элементы масляной системы охлаждения. Стальные элементы магнитопровода расположены по торцам статорных катушек и на роторе электродвигателей.

Компания *Yasa Motors* производит несколько разновидностей электромоторов разной мощности. Также она оказывает услуги по "кастомизации", т.е. может разработать электродвигатель в соответствии с техническим заданием заказчика при условии его реализуемости.

Предприятие в Словении *ENSTROJ* разработала серию моторов под названием *EMRAX* [30]:

1) *EMRAX 348* (рисунок 1.19а). Мощность машины — 150 кВт (300 кВт в кратковременном режиме) при напряжении питания 800 В. Частота вращения — 2800 об/мин. Мотор имеет водяное охлаждение (8 л/мин) и весит 40 кг. Удельная мощность оценивает примерно в 3,75 кВт/кг. КПД такого мотора до 0,98. Размеры:  $D = 348 \text{ мм}$ ,  $L = 107 \text{ мм}$ .

2) *EMRAX 268* (рисунок 1.19б) мощностью 100 кВт при напряжении питания 690 В (90 кВт в продолжительном режиме). Частота вращения —  $4700 \text{ мин}^{-1}$ . Мотор с водяным охлаждением (8 л/мин), масса машины — 20,3 кг. Удельная мощность машины — 4,92 кВт/кг, КПД — до 0,98. Размеры:  $D = 268 \text{ мм}$ ,  $L = 91 \text{ мм}$ .

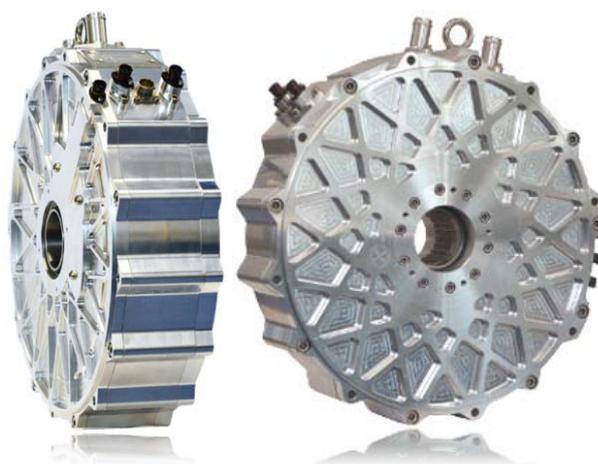


Рисунок 1.18 — YASA-750R



а)

б)

а) – EMRAX 348; б) – EMRAX 268

Рисунок 1.19 – Двигатели EMRAX

На авиасалоне МАКС-2017 компания "Экспериментальная мастерская НаукаСофт" представила проект полностью электрического самолета АВФ-32НС [31]. ПЭС АВФ-32НС будет снабжен четырьмя электрическими силовыми установками ЭСУ-30НС (рисунок 1.20). Силовые установки ЭСУ-30НС представляют собой авиационные двигатели вентиляторного типа с приводом от электрической машины на редкоземельных магнитах ДГ-30НС.

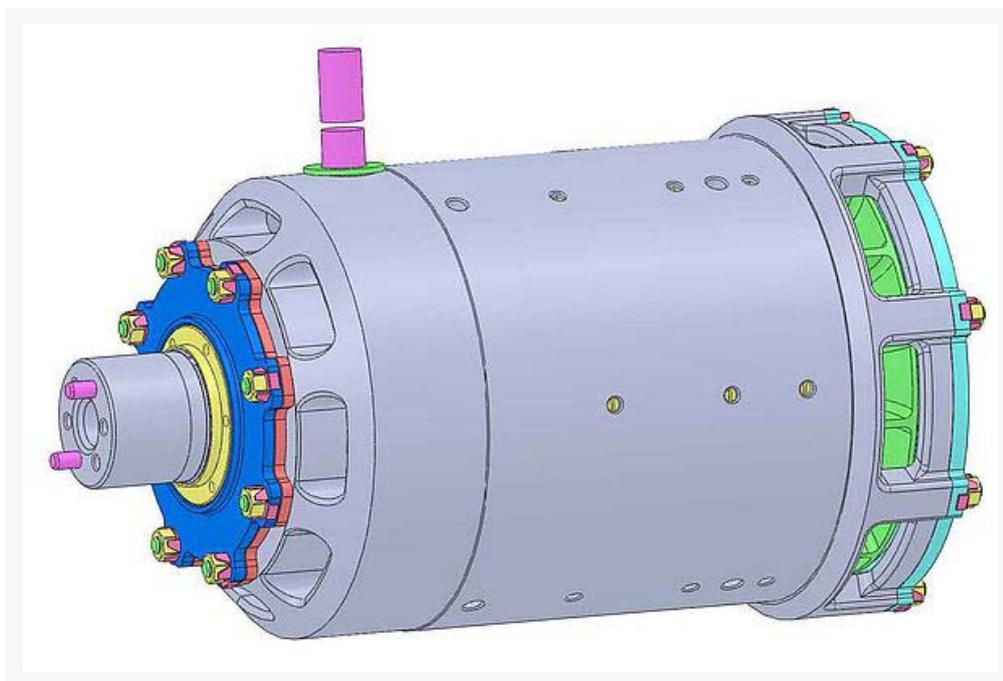


Рисунок 1.20 – ЭСУ – 30НС

Основные характеристики двигателя-генератора ДГ-30НС представлены в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Основные характеристики двигателя-генератора ДГ-30НС

Характеристика	Значение
Номинальная мощность	30 кВт
Номинальная частота вращения	7000 мин <sup>-1</sup>
Разгонная частота вращения	8400 мин <sup>-1</sup>
Номинальное фазное напряжение	200 В
Число фаз рабочей обмотки	3
Рабочая температура обмотки	180 °С
Ток фазы	53,7 А
Масса	16,5 кг
Габаритные размеры, мм:	178x318
Удельная мощность, кВт/кг	1,81

### *Сверхпроводниковые электрические машины*

Во многих странах мира проводятся исследования по созданию СП электрических машин для БЭС/ПЭС. На первых этапах большинство работ по

созданию сверхпроводниковых электрических машин были ориентированы на использование низкотемпературных сверхпроводников (НТСП) Nb-Ti, Nb<sub>3</sub>Sn с последующим переходом на ВТСП провода при достижении соответствующего прогресса в технологии их изготовления и обеспечении высоких критических параметров [32]. Так в Японии, в рамках национальной программы по сверхпроводниковым генераторам, разработан класс модельных сверхпроводниковых генераторов мощностью 10 МВт со сверхпроводниковой обмоткой, выполненной из шины на основе Nb-Ti на роторе и обмоткой статора из медных катушек. Следует отметить, что в национальной программе Японии особое внимание уделяется также разработке СП генераторов на высокотемпературных сверхпроводниках. В США на начальном этапе работ (1970-80 гг.) был выполнен ряд проектов по созданию легких СП синхронных генераторов большой мощности на основе НТСП проводов из Nb-Ti. Так, например, были созданы и успешно испытаны бортовые СП генераторы мощностью 5 МВА и 20 МВА для питания специальных бортовых потребителей. Удельная масса таких генераторов составляла 0,045 кг/кВт на уровне мощности - 10 МВ А и 0,028 кг/кВт для уровня мощности - 50 МВ А [32].

Как отмечалось выше, в разрабатываемых ВТСП электрических машинах на основе ленточных ВТСП проводов, как правило, необходимо использовать системы криостатирования, обеспечивающие достаточно низкие температуры в зоне индуктора (на уровне существенно ниже температуры кипения жидкого азота). Для этих целей используются либо системы криостатирования с жидким гелием или неоном в качестве испаряемых хладагентов, либо криокулеры с промежуточными хладагентами, работающие по циклу Стирлинга и Гиффорда-МакМагона. В этой связи, в настоящее время в ведущих научных центрах России, Германии и Японии интенсивно исследуются новые типы СП электрических машин с объемными и композитными листовыми ВТСП элементами с системами криостатирования на уровне жидкого азота (77 К).

Среди этих разработок представляют интерес исследования ВТСП гистерезисных и реактивных (электрических с магнитной анизотропией ротора)

двигателей, а также высокодинамичных криогенных электрических машин на основе объёмных ВТСП керамик (YBCO) и постоянных магнитов на основе редкоземельных элементов, выполненные отечественными учёными, в частности группой учёных МАИ [33], которые разработали, изготовили и успешно испытали различные конструкции ВТСП двигателей с выходной мощностью 10-100 кВт.

В период 1995-2001 гг. в МАИ были разработаны и успешно испытаны серии гистерезисных ВТСП двигателей мощностью до 4 кВт с массивными ВТСП элементами в роторе. Было показано, что ВТСП гистерезисные двигатели имеют в 2-3 раза более высокие массоэнергетические показатели по сравнению с традиционными гистерезисными машинами. В 2000-2005 гг. в МАИ в рамках сложившейся кооперации, была разработана и успешно испытана серия реактивных ВТСП двигателей с объёмными ВТСП элементами в роторе мощностью от 1 кВт до 100 кВт (рисунок 1.21) [33].

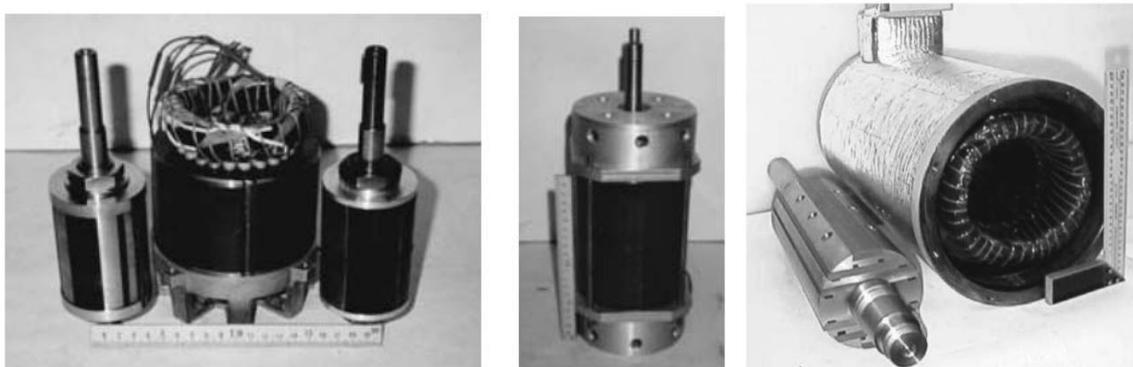


Рисунок 1.21 — Общий вид реактивных ВТСП электродвигателей

На основе этих работ фирмой «*Oswald Elektromotoren GmbH*», в кооперации с МАИ, был создан и успешно испытан реактивный ВТСП двигатель мощностью 500 кВт.

Также в МАИ проводились разработки электрических двигателей с использованием массивных ВТСП элементов и постоянных магнитов на основе редкоземельных материалов (РЗМ). В рамках исследований был разработан, изготовлен и прошёл испытания макетный образец высокодинамичного ВТСП двигателя мощностью 20 кВт с радиально-тангенциальными постоянными магнитами.

В последние годы в США проводят широкий круг исследований, направленных на создание нового поколения СП синхронных машин не только на основе НТСП проводов, но и на основе ВТСП проводов. Так в США (*DoE SPI*) осуществляется программа по созданию высокоэффективных крупномасштабных СП двигателей, в рамках которой предполагается реализовать преимущества ВТСП двигателей, включающие снижение габаритов, массы и потерь примерно в 2 раза по сравнению с традиционными высокоэффективными двигателями. На первом этапе этой программы был сконструирован и испытан ВТСП двигатель мощностью 100-150 кВт (синхронный двигатель без ферромагнитного сердечника с ВТСП обмоткой возбуждения, частотой вращения  $1800 \text{ мин}^{-1}$ ), являющийся прототипом более крупных машин. На втором этапе сконструированы, изготовлены и испытаны ВТСП электродвигатели мощностью 745 кВт и 3700 кВт [34].

В США также разработана концепция конструкции бортовых ВТСП генераторов для мобильной радарной установки (*Westinghouse* при поддержке исследовательской лаборатории *Wright Patterson AirForce Base*) [35]. Генератор мощностью  $\sim 700 \text{ кВА}$  предназначен для питания радара и вспомогательных элементов системы и приводится во вращение с частотой  $1800 \text{ мин}^{-1}$  дизельным двигателем. Все статорные катушки выполнены из стандартного медного кабеля типа «литца». Обмотка возбуждения состоит из рейстречковых ВТСП катушек. Охлаждение ВТСП обмотки осуществляется путем теплообмена с газообразным гелием, охлаждаемым криокулером типа Гиффорда-МакМагона. Первоначально генератор был сконструирован с катушками возбуждения из сверхчистого алюминия  $\text{Al}_{999}$ , охлаждаемого жидким водородом. В настоящее время проведена замена алюминиевых катушек возбуждения катушками из ВТСП лент, охлаждаемых жидким водородом, и показано, что возможно охлаждение ВТСП обмоток до  $20 \text{ К}$  при использования криокулеров. При этом отпадает необходимость в наличии на борту судов дьюара со значительными запасами сжиженного криоагента на всё время полёта. Разработанная технология создания ВТСП электрических машин в перспективе может быть применена ВВС США в

авиационных электрических машинах большей мощности, а также в промышленных электрических машинах.

В рамках проекта *AirForce ResearchLab* в компании *General Electric* разрабатывается униполярный генератор с ВТСП обмотками подмагничивания мощностью 5 МВт и частотой вращения  $16000 \text{ мин}^{-1}$  для мощных авиационных энергетических установок [36]. Демонстрационный образец униполярного генератора мощностью 1 МВт был изготовлен и успешно испытан.

В МАИ (НИУ) в рамках программы «Сверхпроводниковая индустрия» в кооперации с ОАО «НИИЭМ», МГТУ им. Баумана, ИФВЭ, ОАО «ВПО Точмаш» и ГУАП в 2011-2015 гг. были созданы и успешно испытаны экспериментальные прототипы ВТСП электрических машин (двигателей и генераторов) с мощностями от 50 до 1000 кВА. Сравнительные параметры представлены в таблице 1.4 [37, 38].

Таблица 1.4 — Основные параметры ВТСП машин, созданных в МАИ (НИУ)

	ГС-50	ДС-50	СПСД-200	СПСГ-1000
Мощность, кВт (кВА)	50	50	200	1000
Напряжение фазное, В	230	220	450	690
Номинальный ток фазы, А	72	86	170	500
Частота вращения, $\text{мин}^{-1}$	150	300	1500	600
Электрическая частота, Гц	15	20	75	50
Диаметр расточки, мм	355	284	370	800
Активная длина, мм	246	185	300	400

Во всех прототипах использовались ВТСП обмотки возбуждения (рисунок 1.22), расположенные на роторе, а медные трёхфазные обмотки якоря располагались на статоре.



Рисунок 1.22 — Катушки возбуждения на основе ВТСП лент 2-го поколения

Т.к. подобные машины были первыми в мире, то для отработки конструкторских и технологических решений были изготовлены модели двигателя (ДС-50) и генератора (ГС-50) мощностью 50 кВт. Они имели общий внешний криостат, т.е. обмотки и ротора, и статора охлаждались жидким азотом. Это позволило упростить конструкцию преобразователей и получить необходимый для создания крупных машин опыт, отработать технологию изготовления ВТСП обмоток возбуждения. В следующих моделях (СПСД-200, СПСГ-1000), с целью снижения расхода хладагента (жидкого азота) из-за гидродинамических потерь и потерь в статоре, ротор заключался во вращающийся криостат. Статоры этих машин имеют водяное охлаждение с прокачкой ее по каналам. Недостатком вращающихся криостатов являются ограничение максимальной частоты вращения ротора, сложности создания герметичных скользящих уплотнений и увеличенный немагнитный зазор. Опыт создания вращающихся криостатов показал, что для полностью сверхпроводниковых безжелезных электрических машин, имеющих сверхпроводящие обмотки и на роторе, и на статоре, целесообразнее вернуться к общему внешнему криостату.

Внешние виды экспериментальных ВТСП электрических машин мощностью 200 кВт и 1 МВА показаны на рисунке 1.23.



а) б)

а — СПСД-200; б — СПСГ-1000

Рисунок 1.23— Внешний вид ВТСП машин

Для повышения энергетической эффективности приводной газовой турбины и генератора, их частота вращения должна быть максимально возможной. С этой целью при финансировании НАСА был создан опытный образец ВТСП генератора мощностью 3 МВт. Его частота вращения составляет 15000 оборотов в минуту [39]. Ротор и статор этой машины охлаждаются до криотемператур, но только в катушке возбуждения используются сверхпроводники, а в статоре находятся обычные медные катушки. Удельная масса генератора составляет около 0,2 кг/кВт.

Другая модель аналогичного генератора основана на иной конструкции ротора. Для того чтобы увеличить частоту вращения ротора, использованы массивные части из магнитопроводящих материалов, а магнитное поле создается сверхпроводниковыми кольцами. Такая конструкция достаточно прочна и способна выдерживать повышенные частоты вращения (рисунок 1.24). Распределение магнитных полей при такой конструкции не оптимально, но за счет больших скоростей удельная мощность машины достаточно велика и составляет более  $\sim 7$  кВт/кг [40].

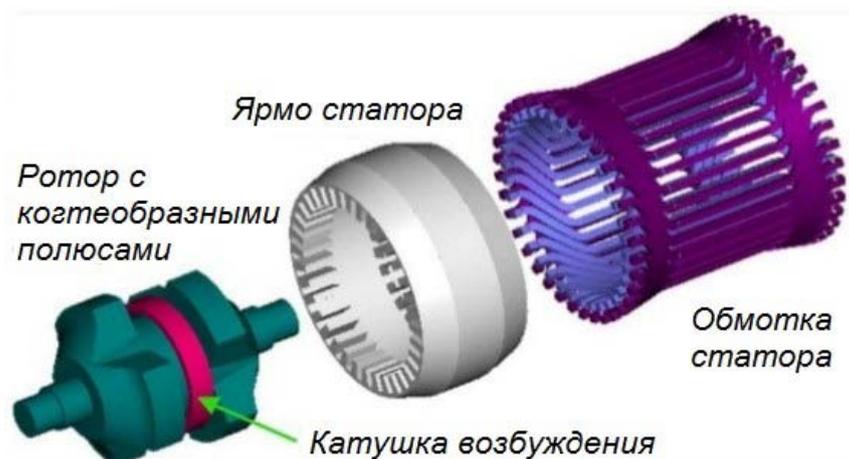


Рисунок 1.24 — ВТСП генератор с когтеобразными полюсами

Наилучшим прототипом ВТСП авиационного генератора является индукторный генератор переменного тока, разработанный фирмой *General Electric*, т.к. он достигает удельной мощности 8 кВт/кг и выдает в сеть 4 МВА благодаря высокой частоте вращения, достигающей  $16000 \text{ мин}^{-1}$  [41].

Фирмой *Siemens* в Германии также был разработан ВТСП генератор мощностью 4 МВА на  $3600 \text{ мин}^{-1}$ .

Фирмой *American Superconductor* был создан низкооборотный двигатель мощностью 36,5 МВт с удельным моментом 38 Нм/кг [42]. Эту разработку также можно рассматривать в качестве прототипа тягового электродвигателя для ПЭС.

Американская компания *GE Aviation* обнародовала некоторые данные о перспективной гибридной силовой установке, разрабатываемой с 2015 года. Установка представляет собой газотурбинный двигатель, приводящий во вращение генераторы, энергия с которых подается на электродвигатели, приводящие во вращение вентиляторы или воздушные винты. Основу гибридной установки *GE Aviation* составляет модифицированный турбовентиляторный двигатель *F110* [43].

Согласно утверждению компании, энергия с газогенератора двигателя снимается пневматически в два этапа. На первом этапе отбирается избыточное давление из зоны турбины высокого давления. Газ поступает в генератор и раскручивает его. На этом этапе отбираемая мощность составляет 250 киловатт.

Затем избыточное давление отбирается из зоны турбины низкого давления. Тут мощность составляет уже 750 киловатт.

Вторая часть перспективной гибридной авиационной установки представлена электродвигателем с коэффициентом полезного действия 0,98.

Центральным институтом авиационного моторостроения имени Баранова [44] на стенде ЦИАМ на авиасалоне МАКС-2017 был продемонстрирован рабочий макет с системой охлаждения электродвигателя и силовых ключей на основе жидкого азота. По словам разработчиков, мощность электродвигателя в макете составляет 1 кВт, но полномасштабная электрическая установка сможет развивать мощность до 0,5 МВт. Представленный макет с частью крыла оснащен воздушным винтом с изменяемым шагом. Предполагается, что новая гибридная установка будет использоваться на более электрических региональных самолетах.

Научно-исследовательский институт в г. Ухань (Китай) продемонстрировал тяговый ВТСП двигатель мощностью 1 МВт [45]. Ротор ВТСП электродвигателя имеет 4 полюса. Частота вращения  $500 \text{ мин}^{-1}$ . Сообщается, что двигатель проходит испытания при максимальной нагрузке.

Научно-исследовательский институт науки и техники Кореи представил ВТСП генератор с воздушным сердечником мощностью 10 кВА [46]. На роторе машины используются 4 рейтрековые катушки, которые охлаждаются до температуры 30 К неоном.

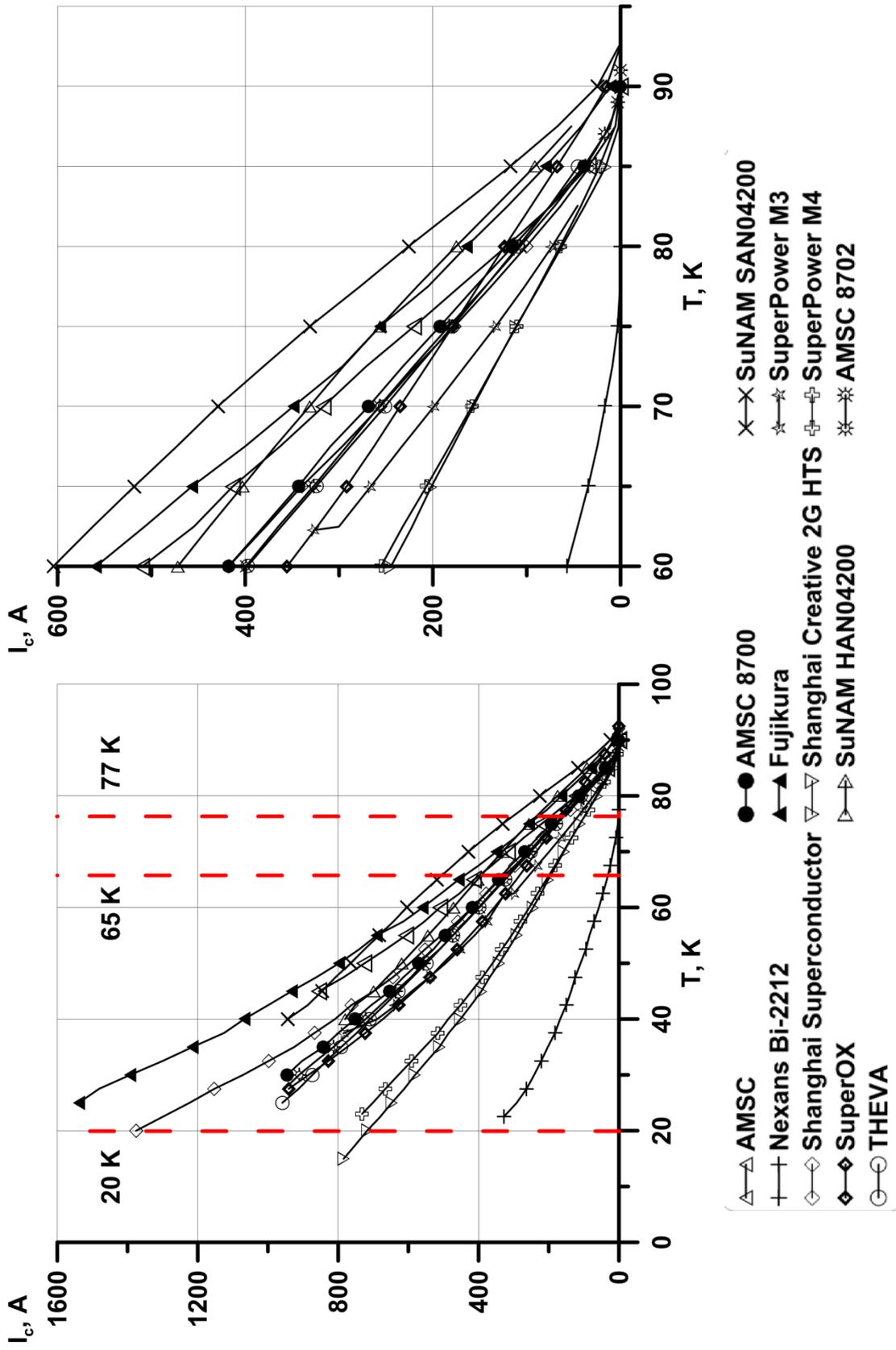
### 1.3 Обзор свойств перспективных современных материалов для ЭМП БЭС/ПЭС

В настоящее время существует несколько видов сверхпроводниковых материалов, используемых в различных устройствах: низкотемпературные сверхпроводники (НТСП), высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП) первого и второго рода и диборид магния. На предыдущем этапе работ было показано, что наиболее рациональным типом сверхпроводника для применения в составе электрических машин являются ВТСП второго. В данном разделе приведены подробные сведения критических параметрах ВТСП лент различных

производителей и получены рекомендации по их применению в составе электрических машин.

*Зависимость критического тока ВТСП ленты от температуры.* Известно, что сверхпроводимость проявляется при температуре ниже критической. Для современных ВТСП лент рабочей является температура жидкого азота – 77К. Разработке электрических машин с использованием эффекта сверхпроводимости при температуре 77К посвящено большое количество работ [47, 48], т.к. мощность криоустановки может быть снижена по сравнению с установками, обеспечивающими рабочую температуру 4 К. Однако, при понижении температуры увеличивается токонесущая способность проводника. Это может быть использовано при проектировании электрических машин. Например, увеличение удельной мощности может быть достигнуто в том числе благодаря снижению рабочей температуры и увеличению магнитодвижущих сил (МДС) обмоток [49].

На рисунке 1.25 приведены зависимости критического тока различных ВТСП лент от температуры. Зависимости получены на основе данных, полученных в университете королевы Виктории в Веллингтоне при исследовании образцов ВТСП лент [50]. Все графики построены для образцов шириной 4 мм.

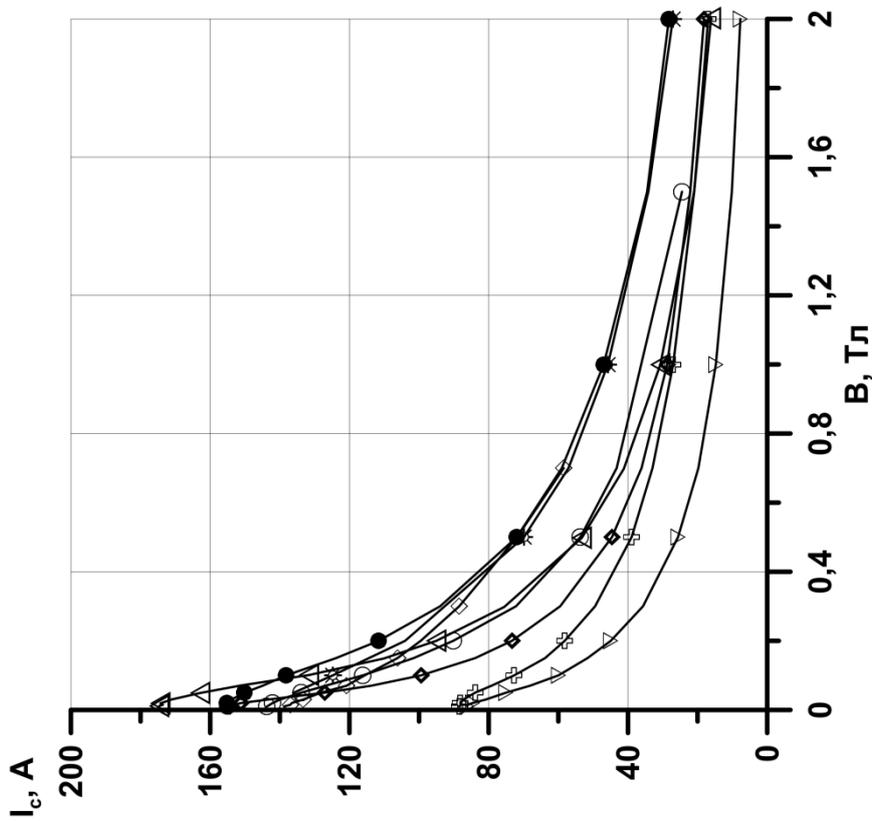
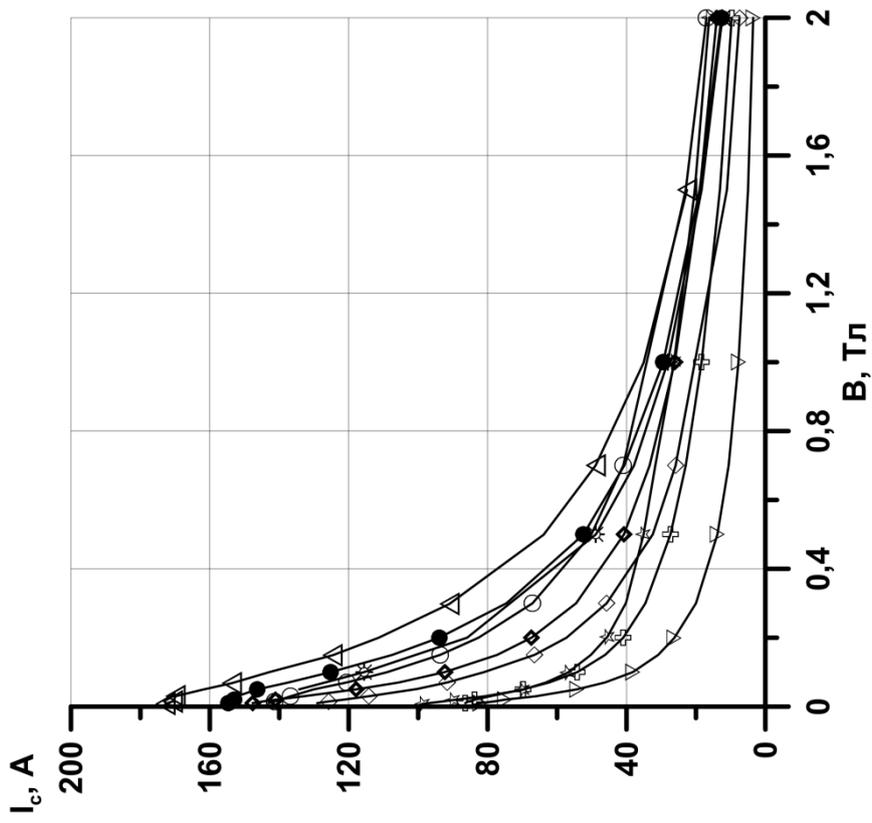


а) 0-100 K; б) 60-90 K

Рисунок 1.25 – Зависимость критического тока от температуры

Рисунок 1.25а показывает зависимость критического тока от температуры в диапазоне от 0 до 100 К. Здесь хорошо видно, что большинство материалов имеют схожие характеристики. Более высокими значениями критического тока в области низких температур отличаются Fujikura и Shanghai Superconductor. Ленты Shanghai Creative и SuperPower M4 обладают более низкими значениями критического тока по сравнению с большинством других производителей. Только график для проводов Nexans Bi-2212 лежит на рисунке ниже, этот материал имеет самую низкую токонесущую способность во всем диапазоне температур и в дальнейшем в данной работе не рассматривается. В области высоких температур ситуация несколько меняется (смотри рисунок 1.25б). Видно, что при температуре от 60 К до 90 К наибольшую токонесущую способность имеют проводники SuNAM SAN04200. При этом оставшиеся ленты можно объединить в две группы: ленты производства Fujikura, AMSC, SuNAM HAN4200 с более высокими токами и ленты AMSC 8700 и 8702, THEVA, SuperPower M3, SuperOx с более низкими токами. Таким образом, температурный режим работы машин может существенно влиять на выбор типа проводника. Неправильный выбор может привести к снижению удельной мощности машины.

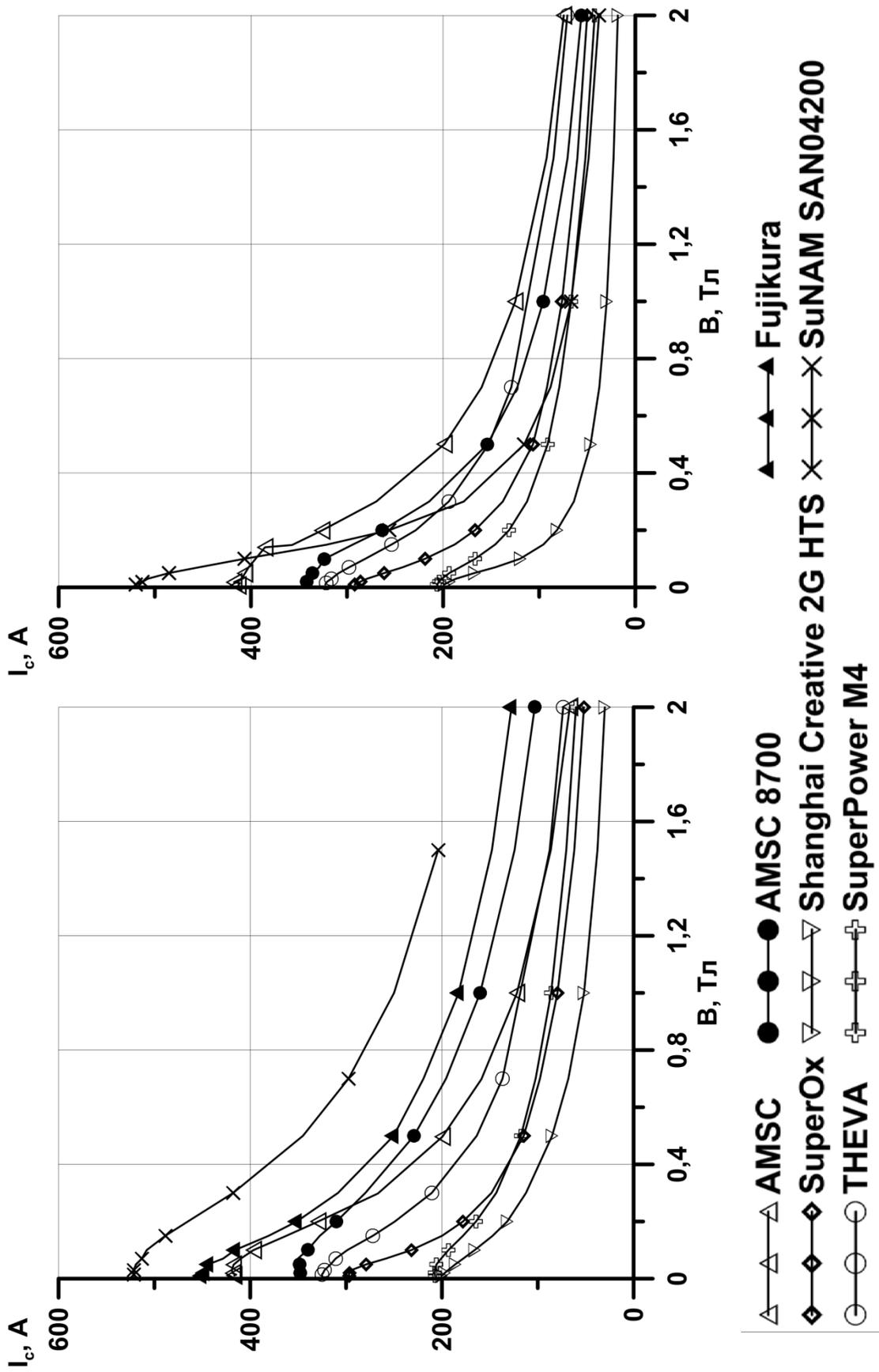
*Зависимость критического тока ВТСП ленты от внешнего магнитного поля.* Вторым важным критическим параметром ВТСП является критическое магнитное поле. Современные ВТСП материалы способны работать в магнитных полях более 10 Тл. Однако, при этом их токонесущая способность существенно снижается. Причем степень снижения зависит от величины и направления приложенного магнитного поля. Учитывая, что с понижением температуры критический ток растет, то полевые зависимости будут иметь различный характер при различной температуре. Зависимости критического тока от внешнего магнитного поля приведены на рисунках 1.26-1.28 [50].



- △ AMSC
- ◇ Shanghai Superconductor
- ◆ SuperOX
- THEVA
- AMSC 8700
- ☆ SuperPower M3
- ⊕ SuperPower M4
- ⊗ Shanghai Creative 2G HTS
- ⊛ AMSC 8702

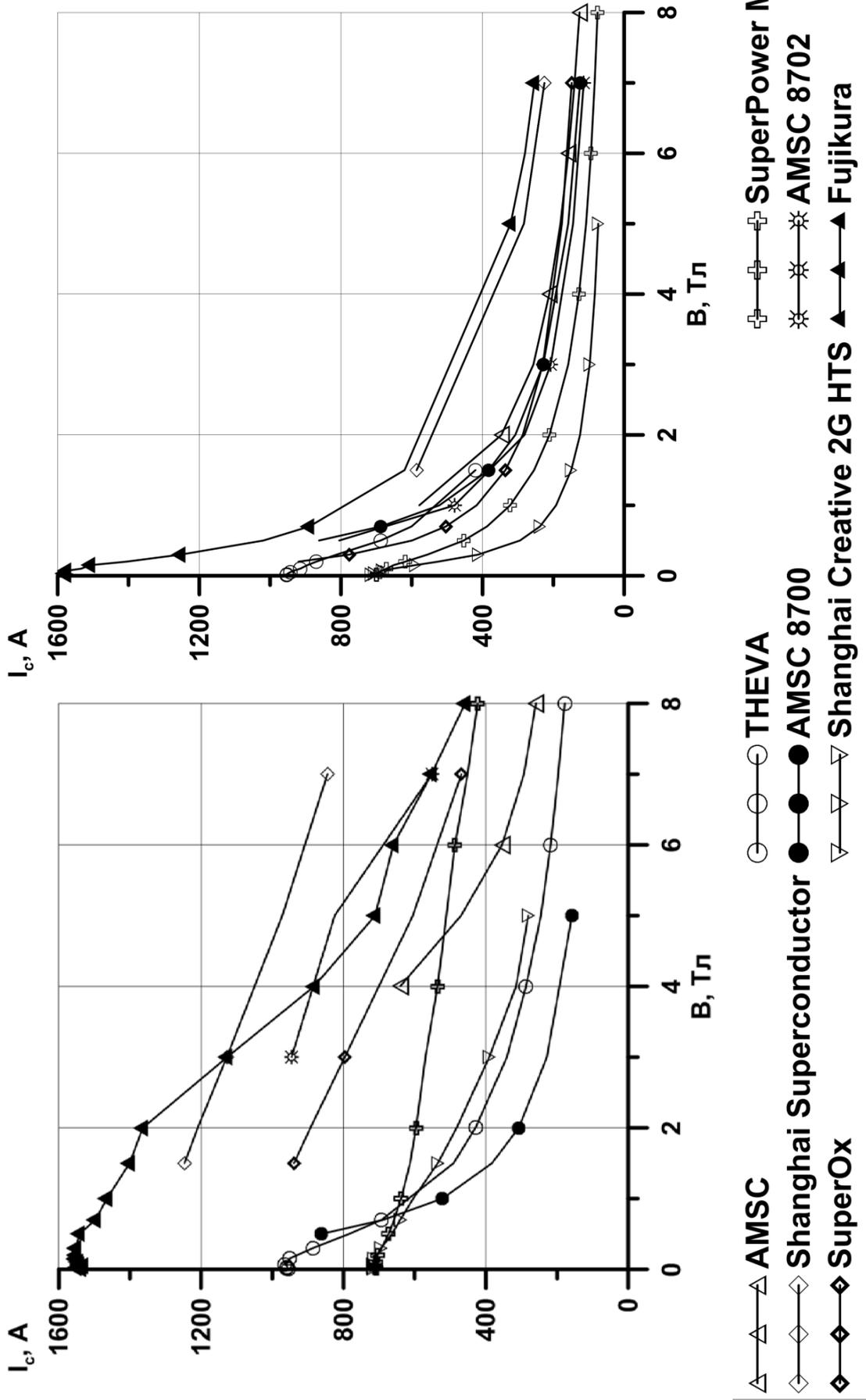
а) – поле параллельно ленте; б) – поле перпендикулярно ленте

Рисунок 1.26 – Полевая зависимость при температуре 77 К



а) – поле параллельно ленте; б) – поле перпендикулярно ленте

Рисунок 1.27 – Полевая зависимость при температуре 65 К



а) – поле параллельно ленте; б) – поле перпендикулярно ленте

Рисунок 1.28 – Полевая зависимость при температуре 20 К

Характерное значение индукции магнитного поля в области катушек электрических машин редко превышает 2 Тл. Именно поэтому зависимости на рисунке 1.26 и 1.127 построены для диапазона 0-2 Тл.

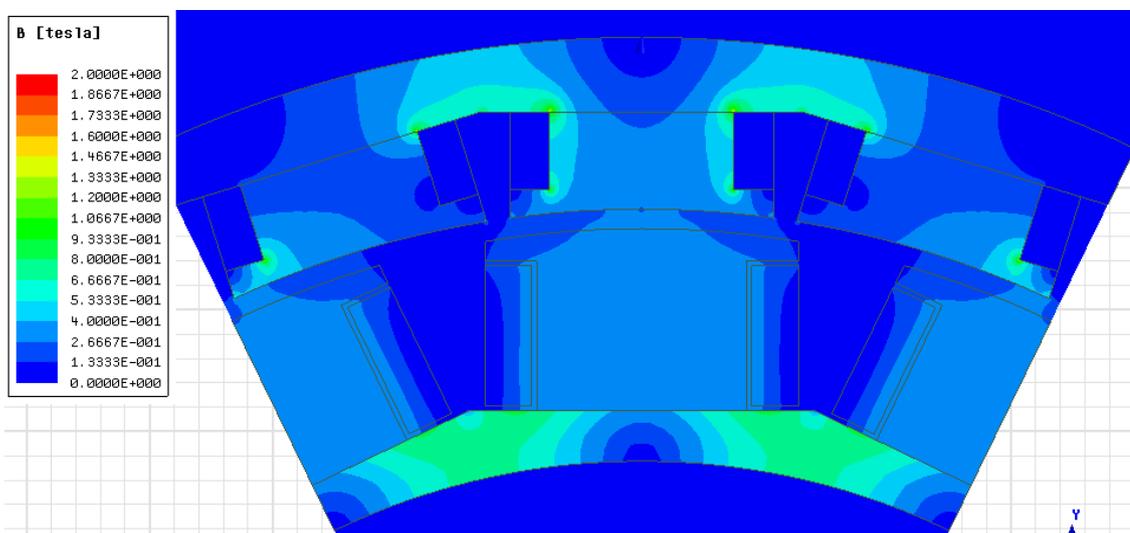
Из рисунка 1.26 видно, что уже при 1 Тл при 77 К величина тока в проводниках не превышает 60А. Это означает, что при изготовлении катушек это значение будет еще ниже. Таким образом, средняя плотность тока составит 25 А/мм<sup>2</sup>, что сопоставимо с медными проводниками. Также видно, что направление приложения магнитного поля влияет на ток СП и при перпендикулярной ориентации вектора магнитной индукции ток оказывается ниже. Лучшую полевую зависимость при температуре 77 К имеют проводники AMSC и AMSC 8700. Чуть хуже обстоит дело с лентами THEVA и SuperOx. По-прежнему наихудшие характеристики имеют Shanghai Creative Technology и SuperPower M4. Данных о полевой зависимости Fujikura при 77 К, к сожалению, нет.

При 65 К характер полевой зависимости существенно не изменяется (рисунок 1.27). Критические токи ВТСП лент возрастают и при величине индукции магнитного поля 1 Тл уже превышают 100 А. При этом по-прежнему наилучшие показатели критического тока имеют ленты производства AMSC. Здесь также выделяются ВТСП ленты SuNAM SAN04200, которые имеют высокие значения критического тока в малых полях. Однако, уже при величине магнитной индукции 0.2 Тл, приложенной перпендикулярно ленте, ток SuNAM 4200 падает ниже показателей AMSC и THEVA.

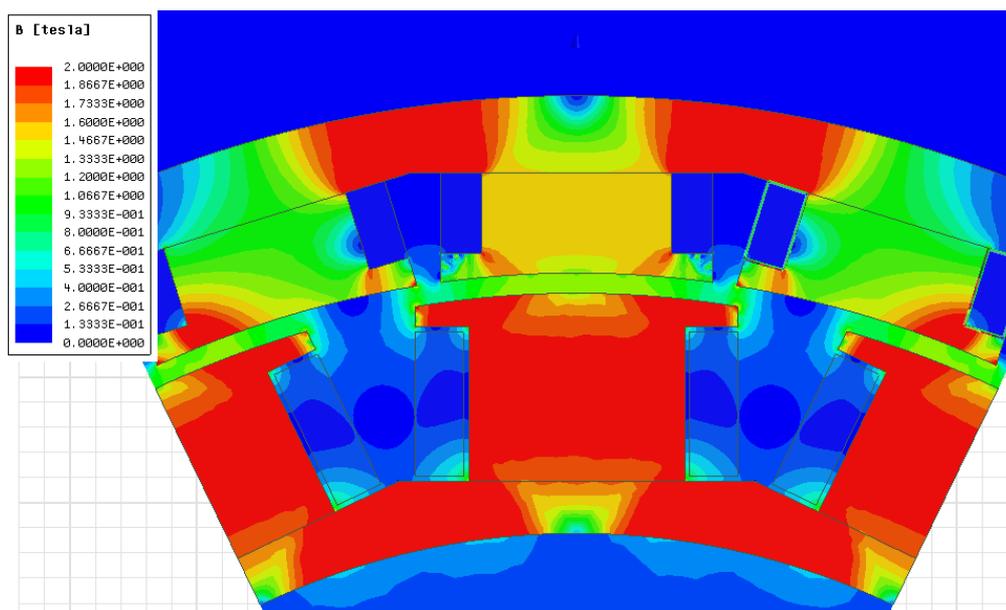
Картина зависимости критического тока от магнитного поля существенно меняется при температуре 25-20 К (рисунок 1.28). Для ряда лент при 1 Тл критический ток превышает 400 А даже при перпендикулярной ориентации поля. При данной температуре можно выделить ленты производства Fujikura, которые в полях до 2Тл существенно превышают по токнесущей способности ленты других производителей.

Важно отметить, что в зависимости от конфигурации магнитной цепи машины, распределение магнитного поля в области ВТСП катушек будет

различным. Так, на рисунке 1.29 показаны случаи при наличии и отсутствии магнитных сердечников катушек в обмотках возбуждения и якоря.



а)



б)

а) – при отсутствии магнитных сердечников б) – при наличии магнитных сердечников

Рисунок 1.29 – Картина распределения магнитной индукции

В обоих случаях наибольшее влияние магнитное поле имеет на ток в катушках возбуждения. При отсутствии стального сердечника магнитная

индукция распределена более равномерно (рисунок 1.29а). При установке магнитных сердечников поле в области катушек становится неравномерным (рисунок 1.29б), кроме того локальные значения магнитной индукции в области ВТСП ленты возрастают. Однако, поле в основном сосредоточено в магнитном сердечнике. Снизить величину индукции магнитного поля в области ВТСП катушек возбуждения возможно, увеличив немагнитный зазор между ними и ферромагнитными участками (сердечником, полюсным наконечником и ярмом). Это может привести к росту рабочего тока ВТСП катушек без снижения магнитного потока возбуждения.

Проектирование ВТСП электрических машин без учета зависимости их удельной мощности от критических параметров сверхпроводников приводит к неверным результатам расчета, а также перерасходу дорогостоящей ленты. Именно поэтому важно определить наиболее подходящую для использования в составе электрических машин ВТСП ленту. Учитывая зависимости, приведенные на рисунках можно сделать вывод, что для применения в составе обмоток электрических машин с точки зрения полевой зависимости наиболее рациональными являются ленты AMSC при азотных температурах (65-77К) и Fujikura при температуре 20 К.

Выводы по главе:

1. Обзор данных по преимуществам более/полностью электрифицированных самолетов и ПЭС показывает, что при их создании возможно снижение полной взлетной массы, эксплуатационных расходов, времени технического обслуживания, а также увеличение топливной эффективности.

2. В настоящее время концепция ПЭС реализована только для малых летательных аппаратов, т.к. удельная энергия аккумуляторных батарей не позволяет реализовать мощные их силовые установки.

3. Обзор публикаций, посвященных созданию электрических машин для БЭС/ПЭС, показал, что в настоящее время коммерчески доступны электрические двигатели и генераторы с удельной мощностью не выше 5 кВт/кг при частоте вращения  $2500 \text{ мин}^{-1}$ .

4. Установлено, что созданные на сегодняшний день ВТСП электрические машины обладают удельной мощностью более 8 кВт/кг при высокой частоте вращения и охлаждении жидким азотом. Также отмечено, что созданием ВТСП двигателей и генераторов занимаются ведущие научные центры по всему миру.

5. Рассмотрены критические параметры ВТСП лент ведущих мировых производителей. На основе анализа характера полевой зависимости критического тока при различных температурах выбраны наиболее рациональные ВТСП ленты для использования в составе ВТСП электрических машин. При температуре жидкого азота (65К-77К) наиболее рациональным является использование ВТСП лент производства AMSC. При температуре жидкого водорода (20К) – лент производства Fujikura.

6. Рассмотрены картины распределения магнитного поля в активной зоне машины при наличии и отсутствии стальных сердечников полюсов. Показано, что установка магнитных сердечников делает распределение магнитной индукции в области ВТСП катушек неравномерным и увеличивает ее локальные значения. Снизить влияние магнитного поля возбуждения на рабочий ток ВТСП катушек можно, увеличив немагнитные зазоры.

7. Проектирование ВТСП электрических машин без учета зависимости их удельной мощности от критических параметров сверхпроводников приводит к неверным результатам расчета, а также перерасходу дорогостоящей ленты.

## 2 Расчёт магнитных полей и основных характеристик ЭМП с возбуждением от постоянных магнитов

### 2.1 Постановка задачи расчета двумерных магнитных полей в активной зоне ЭМП с ПМ

Схема многополюсного синхронного генератора (СГ) с постоянными магнитами представлена на рисунке 2.1. Конструктивной особенностью данной машины является прямая конструкция, при которой индуктор находится на роторе ЭМП, а якорь неподвижен и является статором ЭМП.

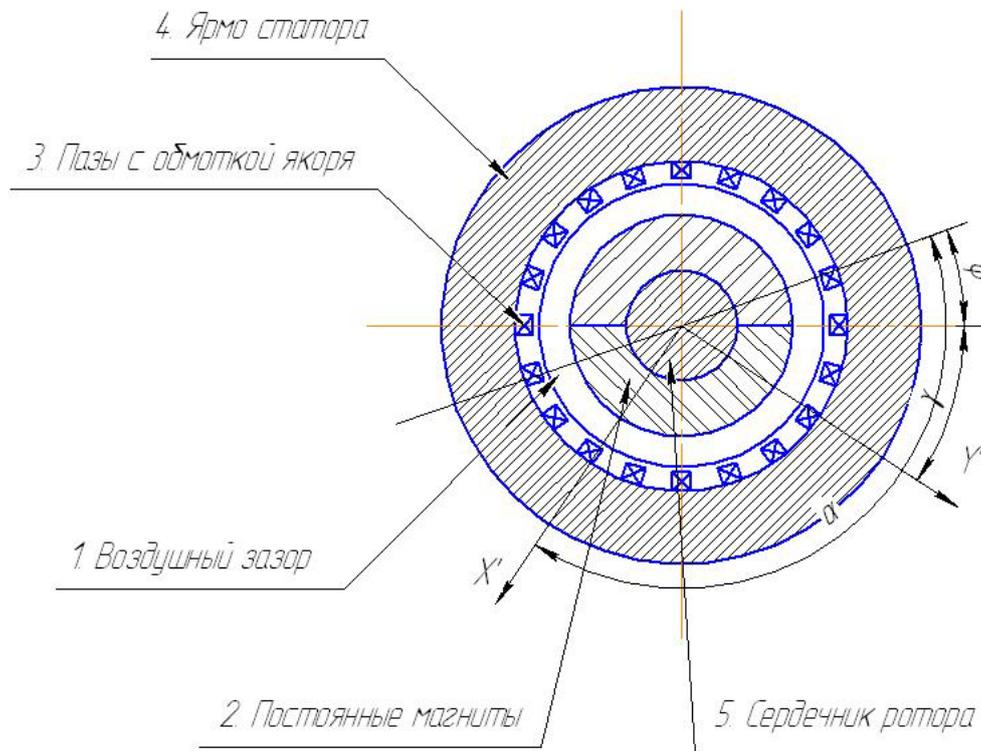


Рисунок 2.1 – Расчетная схема многополюсной с ПМ

При постановке задачи расчета двумерных магнитных полей в дальнейшем принимаются следующие основные допущения:

- вектор намагниченности всех постоянных магнитов (ПМ) РЗМ  $\overline{M}$  имеет компоненту только по радиусу ( $\overline{M} \{0, M_r\}$ );

- в расчетах при рассмотрении магнитного поля машины ядро статора считается ненасыщенным,  $\mu_c \rightarrow \infty$ ;

- для получения простых аналитических решений, описывающих электромагнитные процессы в СГ с ПМ используется приближение активной зоны обмотки статора эквивалентным токовым слоем на радиусе  $R_s$  с линейной плотностью  $J_0$ , синусоидально распределенной по угловой координате  $\varphi$ ;

- машина считается достаточно длинной  $\frac{\tau}{L} \ll 1$ .

Геометрия задачи имеет следующее описание (см. рис.1):

1 зона – воздушный зазор,  $R_r < r < R_a$ ;

2 зона – область с постоянными магнитами (ротор),  $R_i < r < R_r$ ;

3 зона – область пазов и обмотки статора,  $R_a < r < R_s$ ;

4 зона – зона ярма статора,  $R_s \leq r \leq R_o$ .

На рисунке 2.2 приведена расчетная схема ЭМП с учетом сделанных выше допущений.

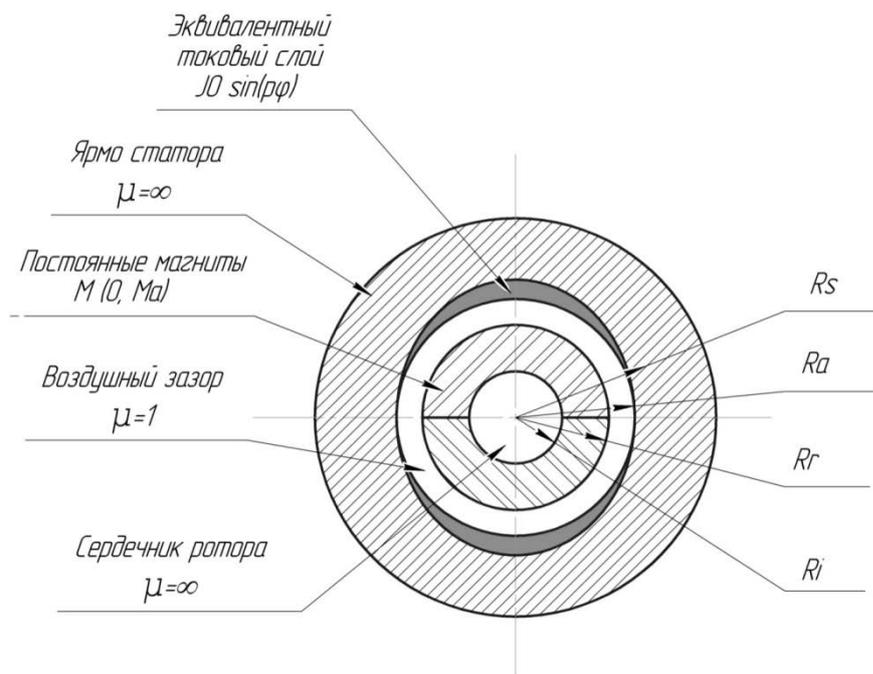


Рисунок 2.2 – Переход к токовому слою

С учетом принятых допущений задача о распределении двумерных стационарных магнитных полей сводится к решению уравнения Пуассона относительно векторного магнитного потенциала  $A$  ( $B = \text{rot}A$ )[51,52,53,54]:

$$\Delta A = -\mu\mu_0 J_0 \sin(p\varphi) \delta(\rho - R_s)$$

с соответствующими граничными условиями на поверхностях раздела сред с различными свойствами. Здесь  $\delta(\rho - R_s)$  – дельта-функция.

Таким образом, при расчете магнитного поля в активной зоне генератора можно выделить следующие области, отличающиеся электрическими и магнитными свойствами (используется полярная система координат):

- Сердечник ротора:  $\mu_r = \infty$ ;

- Область с постоянными магнитами (зона 2):  $\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \vec{M}$ ;

$$M = M_0 \frac{R_r}{\rho} \sin(p\alpha);$$

- Область воздушного зазора (зона 1):  $\mu_{вз} = 1$ ;

- Область статора СГ (зона 4):  $\mu_{ст} = \infty$ .

Распределение магнитного поля в указанных областях находится на основе решения уравнения Лапласа для векторного потенциала с использованием граничных условий на границах раздела сред с различными магнитными проницаемостями. Поправка на параметры двигателя за счет конечного размера зубцовой зоны и спинки статора может быть найдена по теории магнитных цепей.

## 2.2 Расчёт магнитных полей в активной зоне ЭМП с ПМ

*Структура решения в воздушном зазоре.*

Решение уравнения:

$$\Delta A = -\mu\mu_0 J_0 \sin(p\varphi) \delta(\rho - R_s) \quad (2.1)$$

в воздушном зазоре будет иметь вид [54]:

$$A_\delta = \frac{\mu_0 I k_a}{2p} \left( \left( \frac{\rho}{R_a} \right)^{\pm p} \sin(p\varphi) + (a_p \sin(p\varphi) + c_p \cos(p\varphi)) \rho^p + (b_p \sin(p\varphi) + d_p \cos(p\varphi)) \rho^{-p} \right). \quad (2.2)$$

Здесь:  $\mu_0$  – магнитная проницаемость;  $I$  – амплитудное значение тока фазы;  $R_a$  – радиус токового слоя;  $p$  – число пар полюсов;  $a_p, c_p, b_p, d_p$  – неизвестные константы.

Знак “+” соответствует области внутри токового слоя.

Знак “-” соответствует области вне токового слоя.

Граничные условия на поверхности статора ( $\rho=R_s$ ):

$$H_\varphi \Big|_{R_s} = -\frac{1}{\mu_0} \frac{\partial A_\delta}{\partial \rho} \Big|_{R_s} = 0. \quad (2.3)$$

Т.к. граница статор – воздушный зазор лежит вне токового слоя, т.е.  $\rho=R_s$ , то в выражении (2.2) используем знак “-”:

$$A_\delta = \frac{\mu_0 I k_a}{2p} \left( \left( \frac{R_r}{R_s} \right)^{-p} \frac{1}{R_s} \sin(p\varphi) + \left( a_p \sin(p\varphi) + c_p \cos(p\varphi) \right) \frac{R_r^p}{R_s} - \right. \\ \left. - (b_p \sin(p\varphi) + d_p \cos(p\varphi)) \frac{R_r^{-p}}{R_s} \right). \quad (2.4)$$

Решая (2.3) с учетом (2.4) относительно  $b_p$  и  $d_p$ , и, учитывая, что токовый слой лежит на поверхности статора ( $R_a=R_s$ ) получим уравнения для связи констант  $b_p$  и  $a_p$ ,  $c_p$  и  $d_p$ :

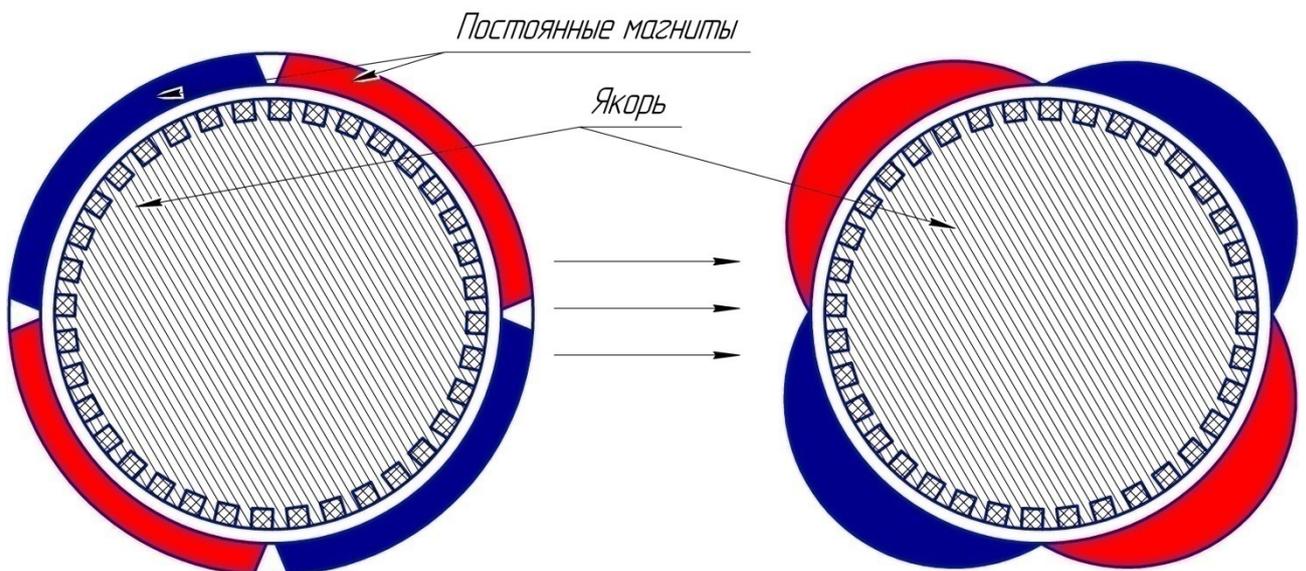
$$\begin{cases} b_p = a_p R_s^{2p} + R_s^p \\ d_p = c_p R_s^{2p} \end{cases}. \quad (2.5)$$

Подставляя (2.5) в (2.4) получим:

$$A_\delta = \frac{\mu_0 I k_a}{2p} \left( \left( \frac{\rho}{R_s} \right)^{-p} \sin(p\varphi) + \left( a_p \left( \rho^p + \frac{R_s^{2p}}{\rho^p} \right) - \left( \frac{R_s}{\rho} \right)^p \right) \sin(p\varphi) + \right. \\ \left. + c_p \left( \rho^p + \frac{R_s^{2p}}{\rho^p} \right) \cos(p\varphi) \right). \quad (2.6)$$

*Структура решения в магнитной оболочке.*

Полагается, что магнитный момент  $M \{0, M_\rho\}$  области с ПМ имеет только радиальную компоненту и синусоидально меняется по угловой координате  $\alpha$ .



Таким образом, он считается заданным как:

$$M = M_0(R_r/\rho)\sin(p\alpha), \quad (2.7)$$

где  $M_0$  — магнитный момент постоянных магнитов,  $\alpha$  — полярный угол, отсчитываемый в системе координат, связанной с ротором. Угол  $\alpha$  в системе координат ротора связан с системой координат статора как:

$$\alpha = \frac{\pi}{2}p + (\gamma + \varphi)p,$$

где  $\gamma$  — угол поворота ротора относительно статора.

В данной области уравнение (2.1) имеет вид:

$$\Delta A_m = 0. \quad (2.8)$$

В случае  $p$  пар полюсов магнитная оболочка будет:

$$B = \{B_r, B_\varphi\};$$

$$B_\varphi = \mu_0 H,$$

$$B_r = \mu_0 H + M, \quad (2.9)$$

$$M = \frac{M_0}{\rho^p} \sin\left(\frac{\pi}{2}p + (\gamma + \varphi)p\right); \quad (2.10)$$

$$\text{rot}H = \vec{t}_z \left\{ \frac{1}{\rho} \frac{\partial(\rho H_\varphi)}{\partial \rho} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial H_\rho}{\partial \varphi} \right\}; \quad (2.11)$$

Учитывая соотношения для  $H_\varphi = -\frac{1}{\mu_0} \frac{\partial A}{\partial \rho}$ ;  $H_\rho = \frac{1}{\mu_0} (B_\rho - \frac{M_0}{\rho^p} \sin(p\alpha))$ , подставляя их в (2.11), получим уравнение, описывающее распределение векторного магнитного потенциала в данной области:

$$\frac{\partial}{\partial \rho} \left( \rho \frac{\partial A}{\partial \rho} \right) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial^2 A}{\partial \varphi^2} = \frac{M_0 p}{\rho^p} \cos\left(\frac{\pi}{2}p + p\varphi + p\gamma\right). \quad (2.12)$$

Решение ищем  $A$  в виде  $A = G(\rho) \frac{1}{p} \cos\left(\frac{\pi}{2}p + p\varphi + p\gamma\right)$ .

Решение для  $A$  состоит из частного и общего решения уравнения (12).

Частное решение имеет вид:  $G(r) = -M_0 p^2 \frac{\rho^{1-p}}{2p-1}$ . В итоге, общее решение для  $A$  в магнитной оболочке имеет вид:

$$A_m = \frac{M_0 p}{1-2p} \rho^{1-p} \cos\left(\frac{\pi}{2}p + p\varphi + p\gamma\right) + \left(d_1 \rho^p + \frac{d_2}{\rho^p}\right) \sin(p\varphi) + \left(d_3 \rho^p + \frac{d_4}{\rho^p}\right) \cos(p\varphi) \quad (2.13)$$

где  $d_1, d_2, d_3, d_4$  — неизвестные константы.

*Структура решения в сердечнике ротора*

В данной области решение  $\Delta A_i = 0$  имеет вид:

$$A_i = c_1 \rho^p \sin(p\varphi) + c_2 \rho^p \cos(p\varphi). \quad (2.14)$$

где  $c_1, c_2$  – неизвестные константы.

*Граничные условия на поверхности ротора.*

Граничные условия ищем при  $\rho=R_r$ :

$$[B_n]=0 \quad \frac{1}{\rho} \frac{\partial A_\delta}{\partial \varphi} \Big|_{R_r} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial A_m}{\partial \varphi} \Big|_{R_r} \quad (2.15)$$

$$[H_\varphi] = 0 \quad -\frac{1}{\mu_0} \frac{\partial A_\delta}{\partial \rho} \Big|_{R_r} = -\frac{1}{\mu_0} \frac{\partial A_m}{\partial \rho} \Big|_{R_r} \quad (2.16)$$

Граничные условия на поверхности раздела магнитная оболочка – сердечник ротора.

Граничные условия ищем при  $\rho=R_i$ :

$$[B_n]=0 \quad \frac{1}{\rho} \frac{\partial A_i}{\partial \varphi} \Big|_{R_r} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial A_m}{\partial \varphi} \Big|_{R_r} \quad (2.17)$$

$$[H_\varphi]=0 \quad -\frac{1}{\mu\mu_0} \frac{\partial A_i}{\partial \rho} \Big|_{R_r} = -\frac{1}{\mu\mu_0} \frac{\partial A_m}{\partial \rho} \Big|_{R_r} \quad (2.18)$$

Подставляя явный вид  $A_\delta, A_i$  и  $A_m$  в (2.15), (2.16), (2.17) и (2.18), и решая систему уравнений (2.15)-(2.18), получаем систему алгебраических уравнений для определения неизвестных констант  $a_p, c_p, d_1, d_2, d_3, d_4, c_1$  и  $c_2$  :

$$\frac{\mu_0 I k_a}{2p} \left(\frac{R_r}{R_s}\right)^p + \frac{\mu_0 I k_a}{2p} \left( a_p \left( R_r^p + \frac{R_s^{2p}}{R_r^p} \right) - \frac{R_s^p}{R_r^p} \right) + \frac{M_0 p}{1-2p} R_r^{1-p} \sin\left(\frac{\pi}{2}p + p\gamma\right) - (d_1 R_r^p + \frac{d_2}{R_r^p}) = 0, \quad (2.19)$$

$$-\frac{\mu_0 I k_a}{2p} c_p \left( R_r^p + \frac{R_s^{2p}}{R_r^p} \right) + \frac{M_0 p}{1-2p} R_r^{1-p} \cos\left(\frac{\pi}{2}p + p\gamma\right) + (d_3 R_r^p + \frac{d_4}{R_r^p}) = 0, \quad (2.20)$$

$$\frac{\mu_0 I k_a}{2p} c_p \left( R_r^{p-1} + \frac{R_s^{2p}}{R_r^{p+1}} \right) - \frac{M_0 (1-p)}{1-2p} R_r^{-p} \cos\left(\frac{\pi}{2}p + p\gamma\right) - (d_3 R_r^{p-1} - \frac{d_4}{R_r^{p+1}}) = 0, \quad (2.21)$$

$$\frac{\mu_0 I k_a}{2p} \left(\frac{R_r}{R_s}\right)^p \frac{1}{R_r} + \frac{\mu_0 I k_a}{2p} \left( a_p \left( R_r^{p-1} + \frac{R_s^{2p}}{R_r^{p+1}} \right) + \frac{R_s^p}{R_r^{p+1}} \right) +$$

$$\frac{M_0(1-p)}{1-2p} R_r^{-p} \sin\left(\frac{\pi}{2}p + p\gamma\right) - (d_1 R_r^{p-1} - \frac{d_2}{R_r^{p+1}}) = 0, \quad (2.22)$$

$$- \frac{M_0 p}{1-2p} R_i^{1-p} \sin\left(\frac{\pi}{2}p + p\gamma\right) - (d_1 R_i^p + \frac{d_2}{R_i^p}) - c_1 R_i^p = 0, \quad (2.23)$$

$$- \frac{M_0 p}{1-2p} R_i^{1-p} \cos\left(\frac{\pi}{2}p + p\gamma\right) - (d_3 R_i^p + \frac{d_4}{R_i^p}) + c_2 R_i^p = 0, \quad (2.24)$$

$$\frac{M_0(1-p)}{1-2p} R_i^{-p} \cos\left(\frac{\pi}{2}p + p\gamma\right) + (d_3 R_i^{p-1} + \frac{d_4}{R_i^{p+1}}) - \frac{1}{\mu} c_2 R_i^{p-1} = 0, \quad (2.25)$$

$$\frac{M_0(1-p)}{1-2p} R_i^{-p} \sin\left(\frac{\pi}{2}p + p\gamma\right) + (d_1 R_i^{p-1} - \frac{d_2}{R_i^{p+1}}) - \frac{1}{\mu} c_1 R_i^{p-1} = 0. \quad (2.26)$$

Для решения данной системы алгебраических уравнений воспользуемся пакетом прикладных программ Maple. Результатом решения будут алгебраические выражения для  $a_p, c_p, d_1, d_2, d_3, d_4, c_1$  и  $c_2$ .

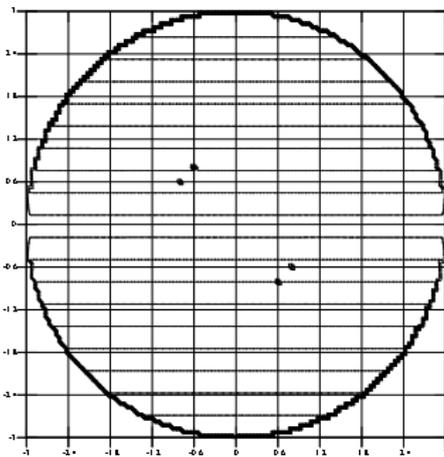
$$\begin{aligned} a_p &= \frac{M_0 R_r^{1-p} \cos(p\gamma)}{4pEE} ((\overline{R^p} + \overline{R^{2p}})m_1 + (\overline{R^p} - \overline{R^{2p}})) \frac{\overline{R^p} - 1}{\overline{R^p}} + \frac{1}{R_s^p} m_1, \\ c_p &= \frac{M_0 R_r^{1-p} \sin(p\gamma)}{4pEE} ((\overline{R^p} + \overline{R^{2p}})m_1 + (\overline{R^p} - \overline{R^{2p}})) \frac{\overline{R^p} - 1}{\overline{R^p}}, \\ d_1 &= \frac{M_0 R_r^{1-p} \cos(p\gamma)}{4p} (k((\overline{R^p} + \overline{R^{2p}})m_1 + \overline{R^p}) - \overline{R^{2p}}) \frac{\overline{R^p} + 1}{\overline{R^{2p}}} + (m_1 + 1) \frac{EE}{R_s^p}, \\ d_2 &= \frac{M_0 R_r^{1-p} \cos(p\gamma)}{4p} (k((\overline{R^p} + \overline{R^{2p}})m_1 - \overline{R^{2p}}) - \overline{R^p}) (\overline{R^p} + 1) R_i^{2p} + (m-1) R_s^p EE, \\ d_3 &= \frac{M_0 R_r^{1-p} \sin(p\gamma)}{4p} (k((\overline{R^p} + \overline{R^{2p}})m_1 + \overline{R^p}) - \overline{R^{2p}}) \frac{\overline{R^p} + 1}{\overline{R^{2p}}}, \\ d_4 &= \frac{M_0 R_r^{1-p} \sin(p\gamma)}{4p} (k((\overline{R^p} + \overline{R^{2p}})m_1 - \overline{R^{2p}}) - \overline{R^p}) (\overline{R^p} + 1) R_i^{2p}, \\ c_1 &= (m-l) EE \frac{(1 + \overline{R^{2p}})}{R_s^p} + \frac{M_0 \cos(p\gamma)}{4R^{2p}} (\overline{R^p} + \overline{R^{2p}}) (\overline{R^p} - 1) (\overline{R^{2p}} + 1) (m_1 - l), \\ c_2 &= \frac{M_0 \sin(p\gamma)}{4R^{2p}} (\overline{R^p} + \overline{R^{2p}}) (\overline{R^p} - 1) (\overline{R^{2p}} + 1) (m_1 - l). \end{aligned} \quad (2.18)$$

$$\text{Где } EE = \frac{\mu_0 I k_a}{2p}, m_1 = \frac{\mu + L}{\mu L + 1}, L = \frac{R_s^{2p} - R_i^{2p}}{R_s^{2p} + R_i^{2p}}, l = \frac{\overline{R^{2p}} - 1}{\overline{R^{2p}} + 1}, k = \frac{\overline{R^p} - 1}{\overline{R^p} + 1}, \overline{R} = \frac{R_r}{R_i},$$

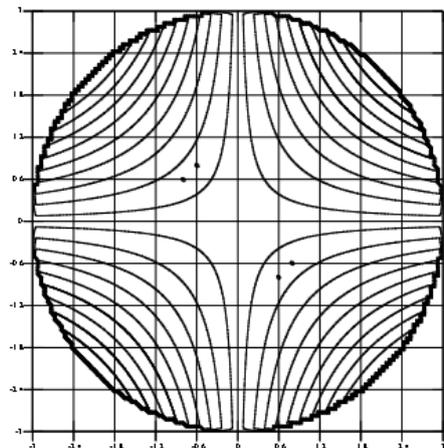
$$\overline{R} = \frac{R_s}{R_i}$$

Для иллюстрации решения систем уравнений построим трехмерные распределения векторного магнитного потенциала в различных областях машины при различном числе пар полюсов  $p$ .

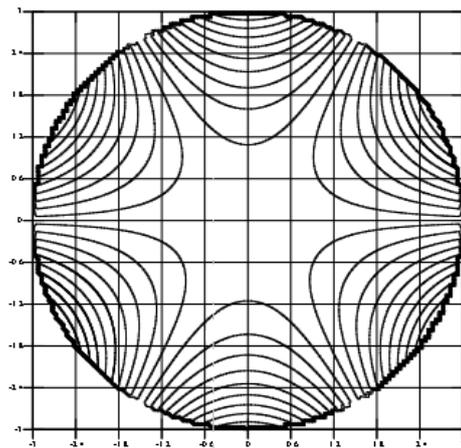
На рисунке 2.3 представлены тестовые расчеты распределения векторного магнитного потенциала в активной зоне синхронной машины с ПМ при различном числе пар полюсов  $p$ .



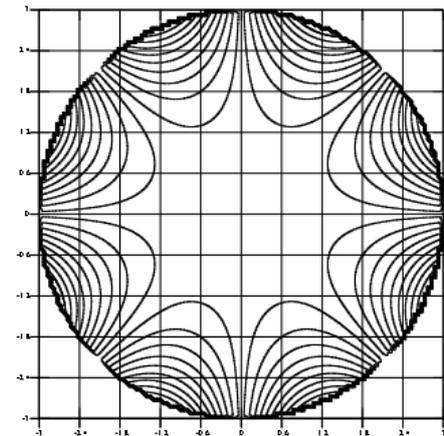
а)



б)



в)



г)

а)  $p=1$ , б)  $p=2$ , в)  $p=3$ , г)  $p=4$

Рисунок 2.3 – Картина распределения магнитного поля в активной зоне ЭМП

Из рисунков видно, что при увеличении числа пар полюсов  $p$  распределение векторного магнитного потенциала становится существенно неоднородным. При больших  $p$  распределение локализовано в основном в области воздушного зазора и быстро затухает вне его.

### 2.3 Определение основных параметров и характеристик ЭМП с ПМ

Данный тип машин относится к магнитоэлектрическим неявнополюсным машинам, а значит, магнитный поток индуктора не регулируется, а главные индуктивные сопротивления по осям  $d$  и  $q$  совпадают. Поэтому основными параметрами машины являются ЭДС холостого хода и главное индуктивное сопротивление [55,56].

Главное индуктивное сопротивление  $X_a$  может быть найдено энергию магнитного поля в активной зоне машины от токов статора ( $M_0=0$ ). Энергия магнитного поля в активной зоне машины определяется как:

$$W = \frac{1}{2} \int J A_\delta dV = \frac{1}{2} J_0 L_s R_s \int_0^{2\pi} A_\delta \sin(p\varphi) d\varphi. \quad (2.28)$$

После интегрирования получаем выражение для энергии магнитного поля:

$$W = \frac{1}{2} \frac{m^2 i_m^2 k_a^2 w_a^2 L_s R_s^p \mu_0}{\pi p} \left( \frac{\bar{R}^2 R_r^p (\mu+1) - R_r^{-p} R_i^{2p} (1-\mu)}{\bar{R} (\bar{R}^2 R_r^{2p} (\mu+1) - R_i^{2p} (\mu-1))} \right), \quad (2.29)$$

где  $J_0 = \frac{m i_m w_a k_a}{\pi R_s}$ ,  $L_s$  – активная длина машины,  $m$  – число фаз,  $i_m$  – амплитудное значение тока фазы,  $w_a$  – число витков фазы,  $k_a$  – обмоточный коэффициент.

Используя соотношения  $W_1 = \frac{L I_c^2}{2}$ ,  $X = \omega L$ , где  $W_1 = W/m$  – энергия одной фазы,  $I_c = i_m \sqrt{2}$  – действующее значение тока статора, получим явное выражение для главного индуктивного сопротивления:

$$x_a = \frac{4 \mu_0 f k_a^2 m w_a^2 L_s}{p} m_1. \quad (2.30)$$

Действующее значение ЭДС ротора ЭМП  $E_0$  находится через поток от магнитов при нулевых токах статора с помощью следующих соотношений [57]:

$$E_0 = \pi\sqrt{2}k_a w_a f \Phi_m, \Phi_m = \frac{2}{\pi} \tau L_s B_m, \tau = \frac{\pi}{p} R_s, \quad (2.31)$$

где  $\tau$  – полюсное деление,  $L_s$  – активная длина машины,  $B_m$  – амплитудное значение радиальной составляющей магнитной индукции в воздушном зазоре на расточке статора  $\rho=R_s$ . В результате математических преобразований ЭДС холостого хода можно записать в следующем виде:

$$E_0 = 2\sqrt{2} \frac{\pi}{p} k_a w_a f R_s^p L_s M_0 \left( (\overline{R^p} + \overline{R^{2p}}) m_1 + (\overline{R^p} - \overline{R^{2p}}) \right) \frac{\overline{R^p} - 1}{2R_r^{p-1} R^p}. \quad (2.32)$$

Используя выражения (2.30) и (2.32) можно построить зависимости индуктивного сопротивления и ЭДС холостого хода от количества пар полюсов  $p$  при различной толщине постоянных магнитов (рисунок 2.4). В расчетах принималось одинаковое значение числа витков фазы  $w_a$  при различных  $p$ . Из рисунков (2.4) и (2.5) видно, что с увеличением числа пар полюсов  $p$  индуктивное сопротивление и ЭДС уменьшаются.

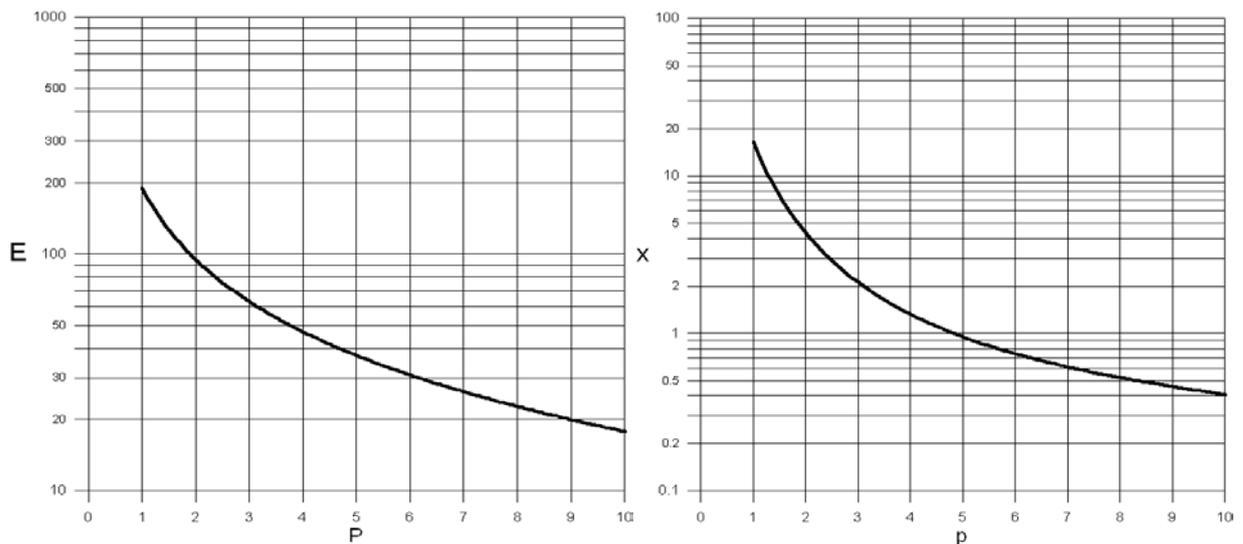


Рисунок 2.4 –Зависимость ЭДС холостого хода  $E_0$  и индуктивного сопротивления  $X_a$  от количества пар полюсов  $p$

Из векторной диаграммы ЭМП с ПМ в двигательном режиме можно получить следующие выражения для коэффициента мощности  $\cos\varphi$ , тока фазы  $I$  и электромагнитной мощности  $P_2$  (приведены соотношения в предположении нулевого сопротивления обмоток статора):

$$\cos \varphi(\theta) = \frac{E_0 \sin(\theta)}{\sqrt{(U \cos(\theta) - E_0)^2 + (U \sin(\theta))^2}}, \quad (2.33)$$

$$I(\theta) = \frac{\sqrt{(U \cos(\theta) - E_0)^2 + (U \sin(\theta))^2}}{x^2}, \quad (2.34)$$

$$P_2(\theta) = \frac{mUE_0}{x} \sin(\theta). \quad (2.35)$$

Используя выражения (2.33-2.35) построим угловые характеристики машины в двигательном режиме (рисунок 2.5). Из рисунка 2.5 видно, что коэффициент мощности  $\cos \varphi$  имеет максимум при небольшом угле нагрузки. Мощность двигателя  $P_2$  имеет максимальное значение при угле нагрузки 90 градусов. А ток статора  $I$  возрастает с ростом угла нагрузки.

Внешняя характеристика ЭМП с ПМ в генераторном режиме приведена на рисунке 2.6:

$$U = \sqrt{E_0^2 - (X_a I)^2 \cos(\varphi)^2} - X_a I \sin(\varphi), \quad (2.36)$$

где  $X_a$  – индуктивное сопротивление,  $E_0$  – ЭДС холостого хода,  $\varphi$  – угол нагрузки, который зависит от характера нагрузки:  $\varphi=0$  – для активной нагрузки,  $\varphi<0$  – для емкостной нагрузки,  $\varphi>0$  – для индуктивной нагрузки.

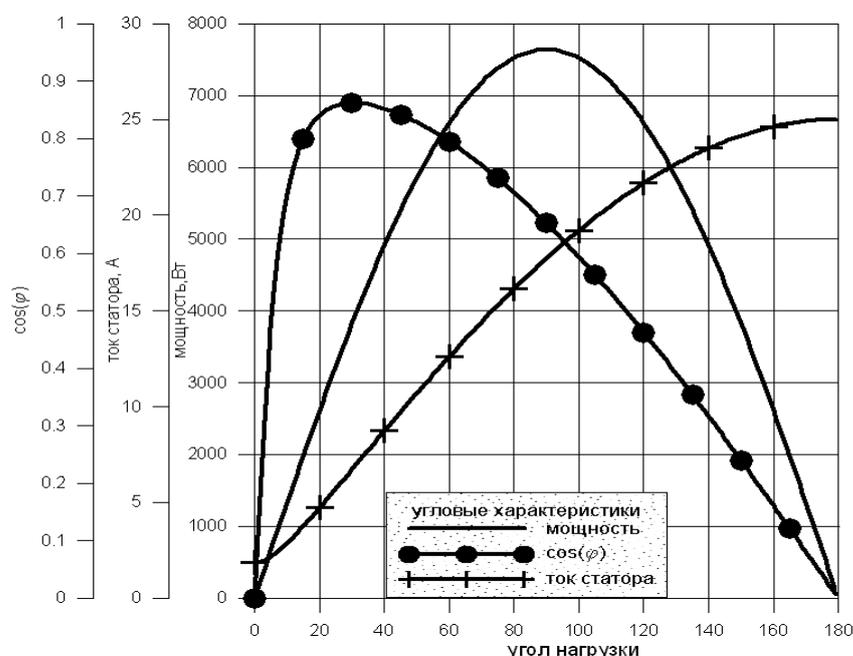


Рисунок 2.5 – Угловые характеристики машины в двигательном режиме

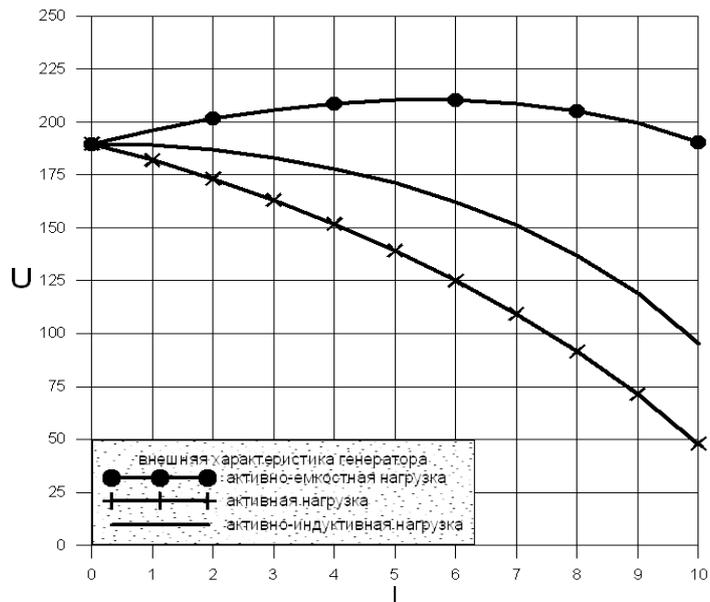


Рисунок 2.6 – Внешняя характеристика генератора

Выводы по главе:

1. На основе решений двумерных электродинамических задач получены аналитические соотношения для расчета двумерных магнитных полей в активной зоне ЭМП с ПМ.

2. Показано, что при увеличении числа пар полюсов, ЭДС холостого хода  $E_0$  убывает пропорционально  $\sim 1/p$ , а главное индуктивное сопротивление  $X_a$  пропорционально  $1/p^2$ .

3. Построенные аналитические решения двумерных электродинамических задач для определения магнитных полей и выходных параметров ЭМП с ПМ позволяют проводить количественные оценки выходных характеристик синхронной машины с учетом количества пар полюсов, размеров постоянных магнитов и режима работы ЭМП. И могут быть использованы при выборе предварительных размеров ЭМП с ПМ на этапе их эскизного проектирования.

### 3 Расчет магнитных полей и основных параметров высокотемпературных сверхпроводниковых ЭМП с увеличенной удельной мощностью

В главе 1 представлены преимущества использования ВТСП электрических машин в составе гибридных и электрических силовых установок перспективных летательных аппаратов. Однако создание полностью ВТСП электрических машин требует разработки специальных методик расчета их основных параметров в силу специфики применяемых ВТСП лент, из которых выполняются обмотки. В связи с этим, вопросы построения аналитических решений для расчета основных параметров ВТСП электрических машин представляют практический интерес.

#### 3.1 Постановка задачи расчета двумерных магнитных полей в активной зоне ВТСП ЭМП

Конструктивная и расчетная схемы многополюсной синхронной электрической машины с ВТСП обмотками на массивном магнитомягком роторе представлены на рисунках 3.1 и 3.2.

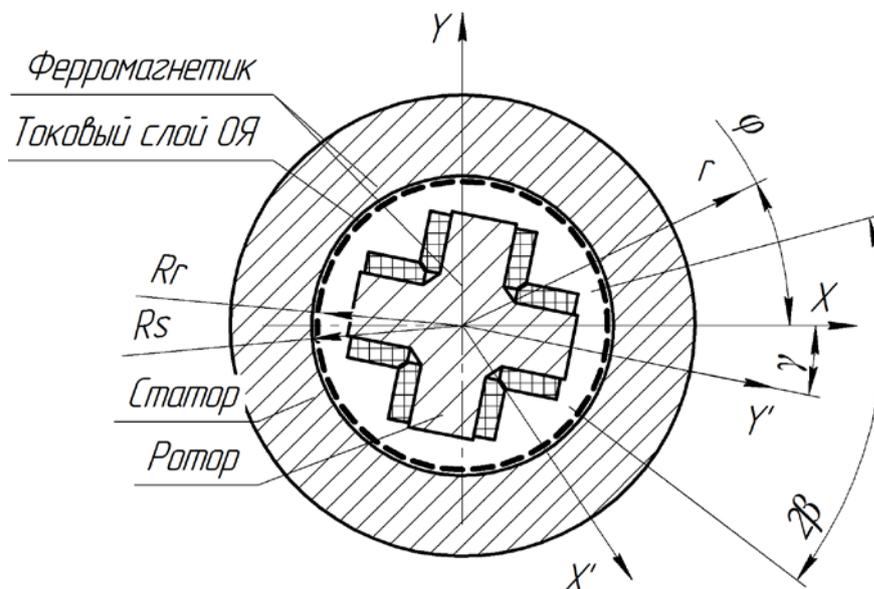


Рисунок 3.1 – Конструктивная схема электрической машины с ферромагнитным ротором и ВТСП обмотками

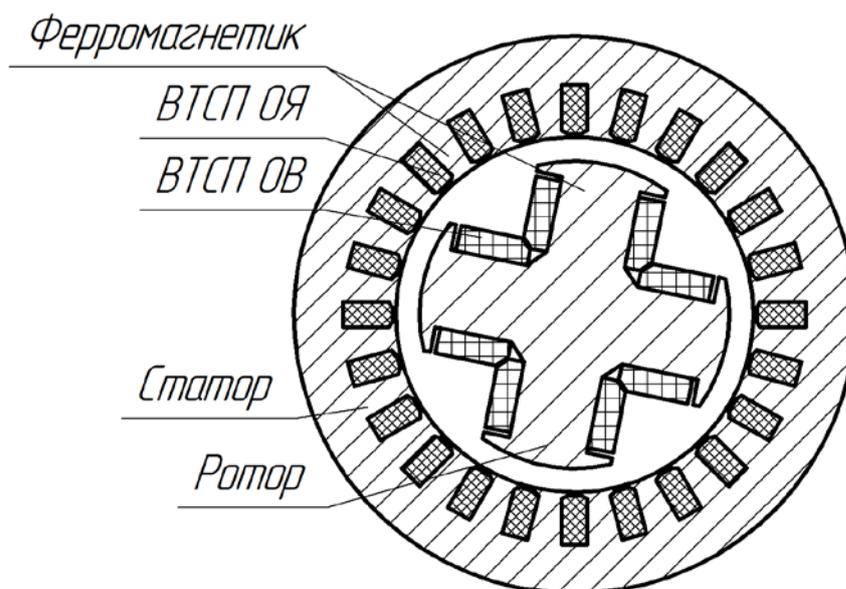


Рисунок 3.2 – Расчетная схема машины с токовым слоем ротора и статора

В общем случае распределение магнитных полей можно найти из решения двумерных задач, которые описываются системой уравнений Максвелла [51]:

$$\operatorname{rot} \bar{H} = \bar{J}, \operatorname{div} \bar{B} = 0, \bar{B} = \mu \bar{H}. \quad (3.1)$$

Граничные условия на границах сред с различными магнитными проницаемостями имеют следующий вид:

$$\begin{cases} H_{\tau+} - H_{\tau-} = 0, \\ B_{n+} - B_{n-} = 0. \end{cases} \quad (3.2)$$

Здесь индексы «+» и «-» соответствуют обозначению разных сторон границы.

При постановке задачи расчета двумерных магнитных полей в дальнейшем принимаются следующие основные допущения:

- относительная магнитная проницаемость магнитомягких сегментов ротора  $\mu_{Fe} \gg 1$ ;
- относительная магнитная проницаемость областей с ВТСП обмотками в роторе  $\mu_s \ll 1$ ;
- используется приближение активной зоны обмотки статора эквивалентным токовым слоем на радиусе  $R_s$  (рисунок 3.1);

– машина считается достаточно длинной  $\tau/L \ll 1$  ( $\tau$  – полюсное деление,  $L$  – активная длина машины).

Таким образом, при расчете магнитного поля в активной зоне электрической машины можно выделить следующие области, отличающиеся электрическими и магнитными свойствами (используется полярная система координат):

- Область композитного ротора электрической машины ( $\rho \leq R_r$ ):  $\mu_{Fe} \gg 1$  и  $\mu_s \ll 1$ ;
- Область воздушного зазора:  $\mu_{вз} = 1$ ;
- Область статора электрической машины:  $\mu_{я} \gg 1$ .

С учетом принятых допущений задача о распределении двумерных стационарных магнитных полей сводится к решению уравнения Пуассона относительно векторного магнитного потенциала  $A$  ( $\mathbf{B} = \text{rot} \mathbf{A}$ ):

$$\Delta A = -\mu \mu_0 J \Delta \delta(\rho - R_s)$$

с соответствующими граничными условиями на поверхностях раздела сред с различными свойствами. Здесь  $\delta(\rho - R_s)$  – дельта-функция,  $J$  – плотность тока,  $\Delta$  – толщина токового слоя.

*Расчёт двумерных полей в активной зоне синхронной машины с композитным ротором.*

Вводя векторный магнитный потенциал  $\mathbf{A}$  ( $\mathbf{B} = \text{rot}(\mathbf{A})$ ) [52], задача о распределении стационарных двумерных магнитных полей в синхронной машине сводится к решению уравнения Пуассона относительно  $\mathbf{A}$  [51]:

$$\Delta A = \mu_0 J \Delta \delta(\rho - R_s). \quad (3.3)$$

Решение уравнения (3.3) в воздушном зазоре для первой гармоники векторного потенциала [51] имеет вид:

$$A_\delta = \frac{\mu_0 I k_a}{2p} \left( \frac{\rho}{R_a} \right)^{\pm p} \sin(p\varphi) + \left( a_p \sin(p\varphi) + c_p \cos(p\varphi) \right) \rho^p + \left( b_p \sin(p\varphi) + d_p \cos(p\varphi) \right) \rho^{-p} \quad (3.4)$$

где  $\mu_0$  – магнитная проницаемость вакуума;  $I$  – амплитудное значение тока фазы;  $R_a$  – радиус токового слоя;  $p$  – число пар полюсов;  $a_p, c_p, b_p, d_p$  – неизвестные константы.

Знак “+” соответствует области внутри токового слоя ( $\rho \leq R_a$ ), знак “-” соответствует области вне токового слоя ( $\rho > R_a$ ).

Граничное условие на поверхности статора ( $\rho = R_s$ ) имеет вид:

$$H_\tau|_{R_s} = -\frac{1}{\mu_0} \frac{\partial A_\delta}{\partial \rho} \Big|_{R_s} = 0. \quad (3.5)$$

Т.к. граница «статор – воздушный зазор» лежит вне токового слоя, т.е.  $\rho = R_s$ , то в выражении (3.4) используем знак “-”:

$$A_\delta = \frac{\mu_0 I k_a}{2p} \left( \frac{\rho}{R_a} \right)^{-p} \frac{1}{R_s} \sin(p\varphi) + \left( a_p \sin(p\varphi) + c_p \cos(p\varphi) \right) \frac{\rho^p}{R_s} - \left( b_p \sin(p\varphi) + d_p \cos(p\varphi) \right) \frac{\rho^{-p}}{R_s} \quad (3.6)$$

Решая (3.5) с учетом (3.6) относительно  $b_p$  и  $d_p$ , и, учитывая, что токовый слой лежит на поверхности статора ( $R_a = R_s$ ), получим уравнения для связи констант  $b_p$  и  $a_p, c_p$  и  $d_p$  в следующем виде:

$$\begin{cases} b_p = a_p R_s^{2p} - R_s^p \\ d_p = c_p R_s^{2p} \end{cases} \quad (3.7)$$

Подставляя (3.7) в (3.6) получим:

$$A_\delta = \frac{\mu_0 I k_a}{2p} \left( \frac{\rho}{R_s} \right)^p \sin(p\varphi) + \left( a_p \left( \rho^p + \frac{R_s^{2p}}{\rho^p} \right) - \left( \frac{R_s}{\rho} \right)^p \right) \sin(p\varphi) + c_p \left( \rho^p + \frac{R_s^{2p}}{\rho^p} \right) \cos(p\varphi). \quad (3.8)$$

При решении уравнения (3.8) композитный ротор из магнитомягких и ВТСП сегментов можно заменить эквивалентным распределённым токовым слоем  $I_R = I_R(\varphi) = J \Delta \sin(p\varphi)$ , где  $J$  – плотность тока,  $\Delta$  – толщина токового слоя [53]. В качестве первого приближения при малой относительной толщине воздушного

ззора распределение токов в области ВТСП обмоток ротора ( $\mu_s \ll 1$ ) определяется из решения дополнительной задачи о распределении поля в воздушном зазоре от токов на поверхности диамагнитного ротора. Распределение токов на магнитомягком сердечнике определяется из решения задачи о распределении поля в воздушном зазоре с идеальным магнитомягким сердечником с магнитной проницаемостью  $\mu_{Fe} \gg 1$ . Суммарное распределение поля получается с помощью суперпозиции этих токовых слоев. Данное допущение позволяет получить простые аналитические выражения для расчета магнитного поля в воздушном зазоре электрической машины.

Решение уравнения (3.3) в области ротора имеет вид [54]:

$$A_R = c_p \rho^p \sin(p\varphi) + c_{p1} \rho^p \cos(p\varphi). \quad (3.9)$$

Амплитуды тока в обмотках ротора и статора определяются максимальным значением критического тока ВТСП ленты, из которых они выполнены. Зная эти амплитуды распределения тока в ВТСП и магнитомягких сегментах, суммарное распределение тока на роторе можно представить в следующем виде (рисунок 3.3) [55]:

$$I_R = \begin{cases} I_{RFe} \sin(p\varphi), & (-\pi + \gamma) \leq p\varphi \leq (-\pi + \gamma + \beta) \\ I_{RS} \sin(p\varphi), & (-\pi + \gamma + \beta) \leq p\varphi \leq (\gamma - \beta) \\ I_{RFe} \sin(p\varphi), & (\gamma - \beta) \leq p\varphi \leq (\gamma + \beta) \\ I_{RS} \sin(p\varphi), & (\gamma + \beta) \leq p\varphi \leq (\pi + \gamma - \beta) \\ I_{RFe} \sin(p\varphi), & (\pi + \gamma - \beta) \leq p\varphi \leq (\pi + \gamma) \end{cases}, \quad (3.10)$$

где  $\gamma$  – угол между вектором тока статора и осью  $d$  ротора,  $\beta$  - угол полюсного раскрытия ротора по магнитомягкому сегменту (см. рисунок 3.1).

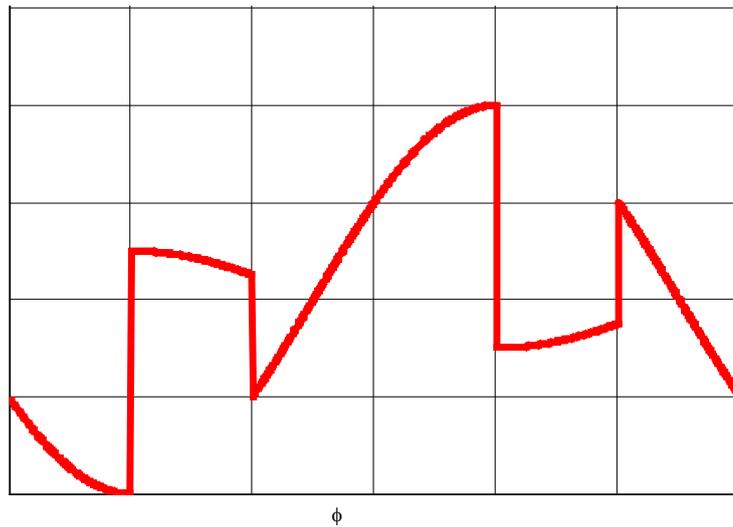


Рисунок 3.3 – Развертка тока ротора на ВТСП и магнетомягких сегментах

Кусочно-непрерывную функцию  $I_R$  можно представить в виде ряда Фурье [59]:

$$I_R = \sum_{k=1,3,5\dots}^{\infty} a_k \sin(kp\varphi) + b_k \cos(kp\varphi),$$

где  $k$  – номер гармоники.

Так как для определения главных параметров электрической машины достаточно использовать только первую гармонику магнитного поля [58], то функция распределения токового слоя (3.10) будет иметь следующий вид:

$$I_R = J\Delta = a_k \sin(p\varphi) + b_k \cos(p\varphi), \quad (3.11)$$

где  $a_k = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} I_R(p\varphi) \sin(p\varphi) d\varphi$ ,  $b_k = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} I_R(p\varphi) \cos(p\varphi) d\varphi$  – коэффициенты Фурье.

С учетом (3.10) выражения для коэффициентов Фурье  $a_k$  и  $b_k$  будут иметь вид:

$$\begin{aligned}
a_k &= \frac{1}{\pi} \int_{(-\pi+\gamma)p}^{(-\pi+\beta+\gamma)p} I_{RFe} \sin^2(p\varphi) d\varphi + \int_{(-\pi+\beta+\gamma)p}^{(\gamma-\beta)p} I_{RS} \sin^2(p\varphi) d\varphi \\
&\quad + \int_{(\gamma-\beta)p}^{(\gamma+\beta)p} I_{RFe} \sin^2(p\varphi) d\varphi \\
&\quad + \int_{(\gamma+\beta)p}^{(\pi-\beta+\gamma)p} I_{RS} \sin^2(p\varphi) d\varphi + \int_{(\pi+\beta-\gamma)p}^{(\pi+\gamma)p} I_{RFe} \sin^2(p\varphi) d\varphi, \\
b_k &= \frac{1}{\pi} \int_{(-\pi+\gamma)p}^{(-\pi+\beta+\gamma)p} I_{RFe} \sin(p\varphi) \cos(p\varphi) d\varphi + \int_{(-\pi+\beta+\gamma)p}^{(\gamma-\beta)p} I_{RS} \sin(p\varphi) \cos(p\varphi) d\varphi \\
&\quad + \int_{(\gamma-\beta)p}^{(\gamma+\beta)p} I_{RFe} \sin(p\varphi) \cos(p\varphi) d\varphi \\
&\quad + \int_{(\gamma+\beta)p}^{(\pi-\beta+\gamma)p} I_{RS} \sin(p\varphi) \cos(p\varphi) d\varphi + \int_{(\pi+\beta-\gamma)p}^{(\pi+\gamma)p} I_{RFe} \sin(p\varphi) \cos(p\varphi) d\varphi.
\end{aligned}$$

После интегрирования и упрощения получим простые аналитические выражения для коэффициентов Фурье:

$$a_k = \frac{I_{RS} - I_{RFe}}{\pi} \sin(2p\beta) \cos(2p\gamma) - 2 \frac{I_{RS} - I_{RFe}}{\pi} p\beta + I_{RS} p, \quad (3.12)$$

$$b_k = \frac{I_{RFe} - I_{RS}}{\pi} \sin(2p\beta) \sin(2p\gamma). \quad (3.13)$$

Значения амплитуд токов  $I_{RS}$  и  $I_{RFe}$  находятся из решения двух вспомогательных задач.

*Задача о распределении векторного потенциала в воздушном зазоре машины с однородным ротором с магнитной проницаемостью  $\mu_r = const$ .*

Задача о распределении векторного потенциала в воздушном зазоре машины сводится к частным решениям уравнений (3.8) и (3.9).

Общий вид распределения токового слоя на поверхности статора можно представить в виде:

$$I_s = i_m \sin(p\varphi).$$

Т.к. это распределение имеет только синусную составляющую, то уравнение (3.8), которое описывает магнитное поле от токового слоя статора без влияния композитного ротора, также будет иметь только синусную составляющую и может быть записано в виде:

$$A_{\delta} = \frac{\mu_0 I k_a}{2p} \left( \left( a_p + \frac{1}{R_s^p} \right) \rho^p + \frac{\left( a_p - \frac{1}{R_s^p} \right) R_s^{2p}}{\rho^p} \right).$$

Общий вид распределения токового слоя на поверхности ротора, как было указано выше, имеет вид:

$$I_R = J \Delta \sin(p\varphi).$$

Уравнение (3.9), которое описывает магнитное поле от токового слоя ротора без влияния статорных обмоток, будет иметь также только синусную составляющую и может быть записано в виде:

$$A_r = c_p \rho^p \sin(p\varphi).$$

В связи с этим задача о распределении векторного потенциала в воздушном зазоре сводится к решению следующей системы [58]:

$$\begin{cases} A_{\delta} = \frac{\mu_0 I k_a}{2p} \left( \left( a_p + \frac{1}{R_s^p} \right) \rho^p + \frac{\left( a_p - \frac{1}{R_s^p} \right) R_s^{2p}}{\rho^p} \right) \sin(p\varphi) \text{ при } R_r < \rho < R_s, \\ A_r = c_p \rho^p \sin(p\varphi) \text{ при } \rho < R_r, \end{cases} \quad (3.14)$$

где  $I = \frac{i_m m W_a}{\pi}$  – ток статора,  $i_m$  – амплитудное значение тока статора,  $m$  – число фаз,  $W_a$  – число витков фазы обмотки якоря,  $\mu_0$  – магнитная проницаемость вакуума;  $I$  – амплитудное значение тока фазы;  $R_s$  – радиус статора;  $p$  – число пар полюсов;  $a_p, c_p$  – неизвестные константы.

Константы  $a_p$  и  $c_p$  находятся из следующих граничных условий на поверхности ротора:

$$\begin{cases} [B_n] = 0, \frac{1}{\rho} \frac{\partial A_\delta}{\partial \varphi} \Big|_{R_r} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial A_r}{\partial \varphi} \Big|_{R_r} \\ [H_\tau] = 0, -\frac{1}{\mu_0} \frac{\partial A_\delta}{\partial \rho} \Big|_{R_r} = -\frac{1}{\mu_0} \frac{\partial A_r}{\partial \rho} \Big|_{R_r} \end{cases} \quad (3.15)$$

Подставляя (3.14) в (3.15), получим систему алгебраических уравнений для нахождения неизвестных констант  $a_p$  и  $c_p$ . Результат решения системы будет иметь вид:

$$a_p = \frac{\mu_{Fe} + l}{R_s^p (\mu_{Fe} l + 1)}, \quad c_p = \frac{4\mu_{Fe} \mu_0 l K_a R_s^p}{2p(R_s^{2p} + R_r^{2p})(\mu_{Fe} l + 1)}, \quad (3.17)$$

где  $l = \frac{(R_s^{2p} - R_r^{2p})}{(R_s^{2p} + R_r^{2p})}$ .

*Задача о распределении векторного потенциала в воздушном зазоре с токовым слоем на поверхности ротора с распределением  $I = J\Delta \sin(p\varphi)$ .*

Также как и в случае предыдущей вспомогательной задачи, общий вид распределения токовых слоев на поверхностях статора и ротора имеет только синусные составляющие. Частные решения уравнений (3.8) и (3.9) также будут иметь только синусные составляющие.

Задача о распределении векторного потенциала в воздушном зазоре сводится к решению следующей системы:

$$\begin{cases} A_{\delta 1} = \frac{\mu_0 l k_a}{2p} \left( \left( a_{p1} + \frac{1}{R_s^p} \right) \rho^p + \frac{\left( a_{p1} - \frac{1}{R_s^p} \right) R_s^{2p}}{\rho^p} \right) \sin(p\varphi) \quad \text{при } R_r < \rho < R_s \\ A_{r1} = c_{p1} \rho^p \sin(p\varphi) \quad \text{при } \rho < R_r, \end{cases} \quad (3.18)$$

Неизвестные константы  $a_{p1}$  и  $c_{p1}$  находятся из граничных условий на поверхности ротора, которые имеют вид:

$$\begin{cases} [B_n] = 0, \frac{1}{\rho} \frac{\partial A_{\delta 1}}{\partial \varphi} \Big|_{R_r} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial A_{r1}}{\partial \varphi} \Big|_{R_r} \\ [H_\tau] = J\Delta \sin(p\varphi), -\frac{1}{\mu_0} \frac{\partial A_{\delta 1}}{\partial \rho} \Big|_{R_r} = -\frac{1}{\mu_0} \frac{\partial A_{r1}}{\partial \rho} \Big|_{R_r} \end{cases} \quad (3.19)$$

Подставляя (3.18) в (3.19), получим систему алгебраических уравнений для нахождения коэффициентов  $a_{p1}$  и  $c_{p1}$ . Решая данную систему, получим явный вид неизвестных констант  $a_{p1}$  и  $c_{p1}$ :

$$a_{p1} = \frac{1}{R_s^p} - \frac{J\Delta R_r^{p+1}}{R_s^{2p} \mu_0 I K_a}, c_{p1} = \frac{2\mu_0 I K_a R_s^{-p} - R_s^{-2p} J\Delta R_r^{p+1} - J\Delta R_r^{-p+1}}{2p}. \quad (3.20)$$

Так как функции  $A_\delta$  и  $A_{\delta l}$  совпадают, то, приравняв коэффициенты  $a_p$  и  $a_{p1}$ , можно получить зависимости для амплитудных значений токов на поверхности сегментов ротора в следующем виде:

$$J(\mu)\Delta(\mu) = 2 \frac{R_s^p}{\bar{R}+1} \frac{\mu_0 I K_a}{R_r^{p+1}} \frac{(1-\mu)}{(\mu l+1)}. \quad (3.21)$$

С учетом (3.21) коэффициенты  $I_{RS}$  и  $I_{RFe}$  будут иметь вид:

$$I_{RS} = 2 \frac{R_s^p}{\bar{R}+1} \frac{\mu_0 I K_a}{R_r^{p+1}} \frac{(1-\mu_s)}{(\mu_s l+1)}, I_{RFe} = 2 \frac{R_s^p}{\bar{R}+1} \frac{\mu_0 I K_a}{R_r^{p+1}} \frac{(1-\mu_{Fe})}{(\mu_{Fe} l+1)}, \quad (3.22)$$

где  $\bar{R} = \frac{R_r^{2p}}{R_s^{2p}}$ .

Подставляя (3.22) в уравнения (3.12) и (3.13), получим выражения для коэффициентов  $a_k$  и  $b_k$ :

$$a_k = \frac{\bar{R}}{R_s^p} \frac{\mu_0 I K_a}{R_r^{1-p}} \left( \frac{m_1 - n_1}{\pi} \sin(2p\beta) \cos(2p\gamma) - 2 \frac{m_1 - n_1}{\pi} p\beta + (1 - n_1)p \right), \quad (3.23)$$

$$b_k = -\frac{\bar{R}}{R_s^p} \frac{\mu_0 I K_a}{R_r^{1-p}} \frac{m_1 - n_1}{\pi} \sin(2p\beta) \sin(2p\gamma). \quad (3.24)$$

Здесь  $m_1 = \frac{\mu_{Fe} l + 1}{\mu_{Fe} l + 1}$ ,  $n_1 = \frac{\mu_s l + 1}{\mu_s l + 1}$ .

Общее решение задачи о распределении векторного потенциала в воздушном зазоре с учетом (3.23) и (3.24) будет иметь вид:

$$A_\delta = \frac{\mu_0 I k_a}{2p} \left( \left( \frac{\rho}{R_s} \right)^p \sin(p\varphi) + \left( a_{k1} \left( \rho^p + \frac{R_s^{2p}}{\rho^p} \right) - \left( \frac{R_s}{\rho} \right)^p \right) \sin(p\varphi) + c_{k1} \left( \rho^p + \frac{R_s^{2p}}{\rho^p} \right) \cos(p\varphi) \right). \quad (3.25)$$

Используя граничные условия (3.19) и выражение (3.25), получим значения коэффициентов  $a_{kl}$  и  $b_{kl}$ :

$$a_{k1} = -\frac{m_1 - n_1}{\pi R_s^p} \sin(2p\beta) \cos(2p\gamma) + 2 \frac{m_1 - n_1}{\pi R_s^p} p\beta + \frac{n_1}{R_s^p}, \quad (3.26)$$

$$b_{k1} = \frac{m_1 - n_1}{\pi R_s^p} \sin(2p\beta) \sin(2p\gamma). \quad (3.27)$$

На основе полученных в данной главе аналитических соотношений можно построить двумерные картины распределения магнитных полей в активной зоне синхронной машины с ВТСП обмотками роторе и статоре. На рисунке 3.4 представлены примеры таких распределений при числе пар полюсов  $p=1$  и  $3$ .

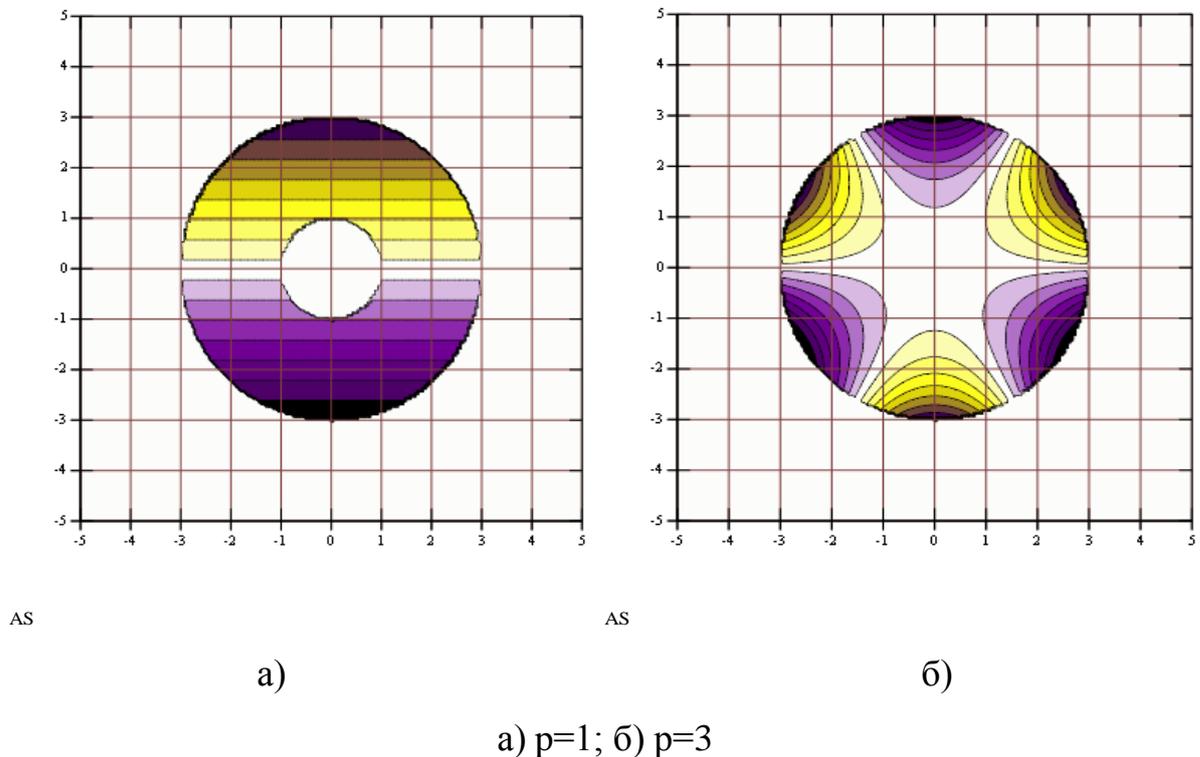


Рисунок 3.4 – Распределение магнитных полей

### 3.2 Определение основных параметров ЭМП с обмоткой возбуждения и обмоткой якоря на основе ВТСП

Как известно, для построения характеристик синхронной машины и определения ее выходных параметров при известных исходных данных необходимо определить главные индуктивные сопротивления обмотки якоря и ЭДС холостого хода [47].

Рассматриваемая электрическая машина является явнополюсной, т.к. магнитные сопротивления по осям  $d$  и  $q$  не совпадают. В связи с этим, необходимо определить индуктивные сопротивления по осям  $d$  и  $q$  отдельно для последующего использования их значений для определения выходной мощности машины и построения ее характеристик.

Для определения главных индуктивных сопротивлений  $x_d$  и  $x_q$  найдем энергию магнитного поля в активной зоне машины. Энергия магнитного поля в активной зоне машины определяется как [51]:

$$W = \frac{1}{2} \int J A_\delta dV = \frac{1}{2} J_0 L_s R_s \int_0^{2\pi} A_\delta \sin(p\varphi) d\varphi, \quad (3.28)$$

где  $J_0 = \frac{m i_m w_a k_a}{\pi R_s}$ ,  $L_s$  – активная длина машины,  $m$  – число фаз,  $w_a$  – число витков фазы ОЯ,  $k_a$  – обмоточный коэффициент,  $R_s$  – радиус статора,  $A_\delta$  определяется из (3.25) с учетом (3.26) и (3.27).

После интегрирования получаем выражение для энергии магнитного поля:

$$W = \frac{\mu_0 k_a^2 i_m^2 m^2 w_a^2 L_s R_s^p}{2 p \pi} a_{k1}, \quad (3.29)$$

Энергия одной фазы ЭМ:  $W_1 = W/m$ . Используя соотношения  $W_1 = \frac{L I_c^2}{2}$ ,  $x = \omega L$ ,  $i_m = I_c \sqrt{2}$  – действующее значение тока статора, получим явные выражения для главных индуктивных сопротивлений  $x_d$  и  $x_q$  по осям  $d$  и  $q$ :

$$x_d(\gamma = 0) = \frac{2\mu_0 m \omega L_s W_a^2 K_a^2}{p\pi} \left( -\frac{m_1 - n_1}{\pi} \sin(2p\beta) + 2 \frac{m_1 - n_1}{\pi} p\beta + n_1 \right), \quad (3.30)$$

$$x_q(\gamma = \frac{\pi}{2}) = \frac{2\mu_0 m \omega L_s W_a^2 K_a^2}{p\pi} \left( -\frac{m_1 - n_1}{\pi} \sin(2p\beta) \cos(p\pi) + 2 \frac{m_1 - n_1}{\pi} p\beta + n_1 \right), \quad (3.31)$$

где  $m$  – число фаз,  $W_a$  – число витков фазы обмотки якоря,  $\omega$  – угловая частота,  $\mu_0$  – магнитная проницаемость вакуума;  $L_s$  – активная длина машины,  $K_a$  – обмоточный коэффициент;  $p$  – число пар полюсов,  $m_1 = (\mu_{Fe} + l)/(\mu_{Fe} l + 1)$ ,  $n_1 = (\mu_s + l)/(\mu_s l + 1)$ .

Действующее значение ЭДС холостого хода  $E_0$  может быть найдено через главный магнитный поток от ОВ при нулевых токах статора с помощью следующих соотношений [54]:

$$E_0 = \pi\sqrt{2}K_a W_a f \Phi_0, \quad (3.32)$$

где  $K_a$  – обмоточный коэффициент ОЯ,  $W_a$  – число витков фазы ОЯ,  $f$  – электрическая частота,  $\Phi_0$  – главный магнитный поток.

Определение главного магнитного потока при указанных допущениях, принятых при расчете индуктивных сопротивлений, может быть получено из закона полного тока [50]:

$$\oint H dl = \sum_k I_k, \quad (3.33)$$

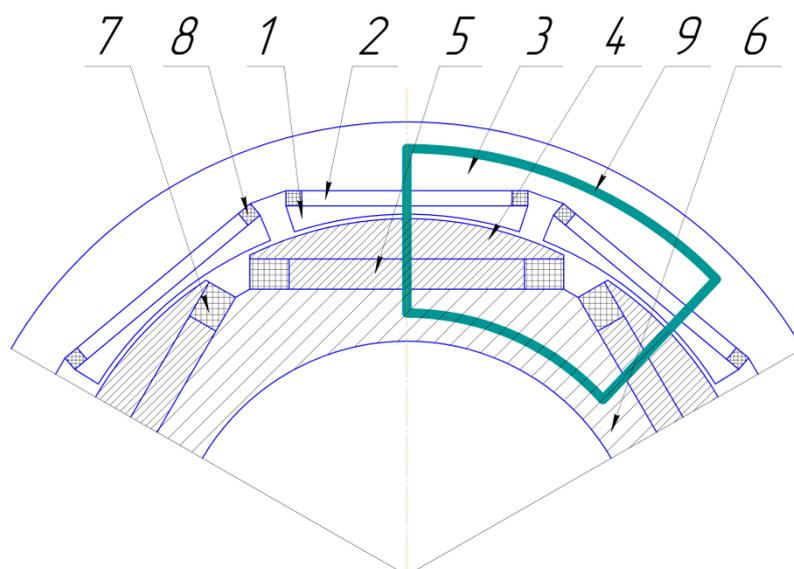
где  $H$  – напряженность магнитного поля,  $dl$  – элемент длины замкнутого контура  $L$ ,  $\sum I_k$  – алгебраическая сумма токов, связанных с контуром  $L$ .

Учитывая, что магнитную цепь машины можно разделить на участки, на которых напряженность  $H$  постоянна, на основе выражения (3.33), можно получить закон Ома для магнитной цепи [51]:

$$F = \sum \Phi_\delta \cdot R_\mu, \quad (3.34)$$

где  $\Phi_\delta$  – магнитный поток,  $R_\mu$  – магнитное сопротивление,  $F=IW$  – магнитодвижущая сила (МДС) ( $I$  – ток в обмотке,  $W$  – число витков).

Расчетная схема машины, приведенная на рисунке 3.1, может быть использована при построении конструктивной схемы. Учитывая механические свойства современных ВТСП лент, может быть выбрана конструкция машины с числом пазов на полюс и фазу  $q < 1$ , т.к. это позволяет использовать катушки типа «рейстрек» в статоре и роторе машины. Конструктивная схема такой машины показана на рисунке 3.5.



1 – наконечник зубца статора; 2 – зубец; 3 – ярмо статора; 4 – полюсный наконечник; 5 – сердечник полюса; 6 – ярмо ротора; 7 – ВТСП катушка ОВ; 8 – ВТСП катушка ОЯ; 9 – линия основного магнитного потока

Рисунок 3.5 – Конструктивная схема полностью ВТСП электрической машины

Из рисунка 3.5 видно, что основной магнитный поток, создаваемый ОВ, замыкается по следующим участкам магнитной цепи: сердечник полюса ротора, полюсный наконечник, воздушный зазор, наконечник зубца статора, зубец, ярмо статора, зубец, наконечник зубца статора, полюсный наконечник, сердечник полюса ротора, ярмо ротора. При этом все элементы конструкции выполнены из ферромагнитного материала. Таким образом, относительная магнитная проницаемость  $\mu$  всех участков магнитной цепи, кроме воздушного зазора, отлична от нуля и является нелинейной.

Определение параметров нелинейных систем является сложной задачей, решение которой требует итерационного решения. Кроме того, наличие нелинейности делает невозможным применение принципа суперпозиции магнитных полей. Однако, большинство электрических машин работает вблизи колена характеристики намагничивания [52]. Это дает возможность принять некоторое значение  $\mu$  ферромагнитных участков, опираясь на опыт проектирования традиционных и ВТСП электрических машин.

Учитывая пути замыкания магнитного потока, приведённые на рисунке 3.5, с учётом размеров машины, и на основе выражения (3.34), можно получить уравнение для определения МДС машины:

$$F = \Phi_{\delta} \cdot (R_{\mu i} / 2 + 2 \cdot R_{\mu s} + 2 \cdot R_{\mu p} + 2 \cdot R_{\mu \delta} + 3 \cdot R_{\mu pz} / 2 + 3 \cdot R_{\mu z} / 2 + R_{\mu a} / 2) \quad (3.35)$$

где  $R_{\mu i}$  – магнитное сопротивление ярма ротора;  $R_{\mu s}$  – магнитное сопротивление сердечника полюса ОБ;  $R_{\mu p}$  – магнитное сопротивление полюсного наконечника;  $R_{\mu \delta}$  – магнитное сопротивление воздушного зазора;  $R_{\mu pz}$  – магнитное сопротивление наконечника зубца статора;  $R_{\mu z}$  – магнитное сопротивление зубца статора;  $R_{\mu a}$  – магнитное сопротивление ярма статора;  $\Phi_{\delta}$  – главный магнитный поток машины.

Стоит отметить, что магнитный поток, пронизывающий зубец и его наконечник в одном случае равен магнитному потоку в воздушном зазоре, а в другом равен его половине. Это связано с тем, что обмотка якоря выполнена с числом пазов на полюс и фазу  $q=0.5$ .

В общем виде магнитное сопротивление участка цепи записывается, как [54]:

$$R_{\mu} = l / (\mu \cdot \mu_0 \cdot S), \quad (3.36)$$

где  $l$  – длина магнитной силовой линии;  $S$  – площадь, через которую замыкается магнитный поток,  $\mu_0$  – магнитная постоянная;  $\mu$  – относительная магнитная проницаемость.

Учитывая геометрические размеры участков магнитной цепи машины, выражения для магнитных сопротивлений имеют вид:

– сердечник полюса ротора

$$R_{\mu s} = H_s / (\mu_s \mu_0 L_s B_s), \quad (3.37)$$

– полюсный наконечник полюса ротора

$$R_{\mu p} = H_p / (\mu_p \mu_0 L_s \tau_p), \quad (3.38)$$

– воздушный зазор:

$$R_{\mu \delta} = \delta / (\mu_0 L_s \tau_{\delta}), \quad (3.39)$$

– зубец статора:

$$R_{\mu z} = H_z / (\mu_z \mu_0 L_s B_z), \quad (3.40)$$

– полюсный наконечник зубца статора:

$$R_{\mu p-st} = H_{p-st} / (\mu_{p-st} \mu_0 L_s \tau_{p-st}), \quad (3.41)$$

– ярмо статора:

$$R_{\mu a-st} = \tau_a / (\mu_{a-st} \mu_0 L_s H_{a-st}), \quad (3.42)$$

– ярмо ротора:

$$R_{\mu a-r} = \tau_{a-r} / (\mu_{a-r} \mu_0 L_s H_{a-r}), \quad (3.43)$$

где  $H_s, H_p, H_z, H_{p-st}, H_{a-st}, H_{a-r}$  – высота сердечника полюса ротора, полюсного наконечника, зубца статора, полюсного наконечника статора, ярма статора и ярма ротора соответственно;  $\delta$  – величина воздушного зазора;  $\mu_s, \mu_p, \mu_z, \mu_{p-st}, \mu_{a-st}, \mu_{a-r}$  – относительная магнитная проницаемость сердечника полюса ротора, полюсного наконечника, зубца статора, полюсного наконечника статора, ярма статора и ярма ротора соответственно;  $L_s$  – активная длина;  $\mu_0$  – магнитная проницаемость вакуума;  $\tau_p, \tau_{p-st}, \tau_a, \tau_{a-r}$  – полюсное деление на диаметре полюсного наконечника ротора, полюсного наконечника зубца статора, среднего диаметра ярма статора и ротора соответственно.

На основании соотношений (3.37)-(3.43), может быть получено выражение для магнитного потока в зазоре машины:

$$\Phi_\delta = \frac{0.4 H_s I_f L_s R_{fi} \alpha_i \mu_0 \operatorname{tg} \alpha}{b_l h_l} \left( \frac{\mu_z H_{a-r} \tau_{p-st}}{\left[ 3 H_{a-r} (H_{p-st} + H_z \tau_{p-st}) + \mu_z \tau_{p-st} (1 + H_1) / \mu_s \right]} + \frac{\tau_p}{4 \left( (H_p + H_s \tau_p) / \mu_p + \delta / \tau_\delta \right)} \right) \quad (3.44)$$

где  $L_s$  – активная длина машины;  $R_{fi}$  – внутренний радиус ОБ;  $\alpha_i$  – полюсное деление ротора;  $\alpha = \pi / (2p)$  – угол, соответствующий одному полюсу ОБ;  $b_b, h_l$  – ширина и толщина ВТСП ленты соответственно;  $H_1 = H_{a-st} / H_{a-r}$ ;

Выражение (3.44) учитывает геометрические размеры активной зоны машины, число пар полюсов, критические параметры ВТСП ленты. Таким образом размеры машины могут быть выбраны так, чтобы в воздушном зазоре

был получен требуемый магнитный поток. Кроме того, входящие в выражение (3.44) относительные магнитные проницаемости ферромагнитных участков магнитной цепи позволяют учитывать степень их насыщения и выполнить итерационные расчеты с высокой точностью.

Как известно, электромагнитная мощность электрической машины при допущении, что активное сопротивление ОЯ равно нулю, записывается как [54]:

$$P_2 = \frac{m \cdot U \cdot E_0}{X_d} \cdot \sin(\theta) + \frac{m \cdot U^2}{2} \cdot \left( \frac{X_d - X_q}{X_d \cdot X_q} \right), \quad (3.45)$$

где  $m$  – число фаз;  $U$  – напряжение питания;  $E_0$  – ЭДС холостого хода;  $X_d, X_q$  – индуктивные сопротивления ОЯ по осям  $d$  и  $q$ ;  $\theta$  – угол нагрузки.

Таким образом, используя соотношения (3.32), (3.34), (3.44) и (3.45), может быть определена электромагнитная мощность полностью ВТСП электрической машины с ферромагнитопроводом.

В качестве примера был выполнен оценочный расчет синхронного двигателя с ВТСП ОВ и ОЯ по разработанной аналитической методике. При расчете принималось, что используется охлаждение жидким азотом. В связи с этим было выбрано значение критического тока ВТСП обмоток, которое может быть реализовано при данной температуре. Результаты расчета приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Результаты расчета ВТСП двигателя

Параметр	Обозначение	Значение
Механическая мощность, кВт	$P_2$	3000
Фазное напряжение питания, В	$U$	1000
Частота вращения, мин <sup>-1</sup>	$n$	4000
Число пар полюсов	$p$	14
Радиус ОЯ, м	$R_{ai}$	0.290
Активная длина, м	$L_s$	0.290
Конструктивный коэффициент	$\lambda$	1

Продолжение таблицы 3.1

Критический ток СП, А	$I_{sp}$	60
Линейная нагрузка, А/м	$A_n$	81 664
Магнитная индукция в воздушном зазоре, Тл	$B_\delta$	1.3
ЭДС холостого хода, В	$E_0$	963
Индуктивное сопротивление по оси d, Ом	$X_d$	0.67
Индуктивное сопротивление по оси q, Ом	$X_q$	1.06
Масса, кг	$M$	300
Удельная мощность, кВт/кг	$P_2'$	10

Как видно из таблицы 3.1, удельная мощность двигателя составляет 10 кВт/кг. Это значение является довольно высоким, однако, все еще имеются возможности по его увеличению. В частности, простота полученных аналитических выражений для основных параметров машины открывает широкие возможности по оптимизации геометрических размеров с целью получения наибольшего значения удельной мощности.

Данная методика не учитывает распределение магнитных полей в области ВТСП ОВ и ОЯ. Учесть зависимость критического тока ВТСП от внешнего магнитного поля позволяет трехмерное моделирование методом конечных элементов. Приведенная в данном разделе методика расчета основных параметров и главных размеров машины является первым этапом проектирования полностью ВТСП машин, т.к. аналитическая запись выражений для определения основных параметров электрической машины позволяет проводить их оптимизацию, которая не требует существенных вычислительных мощностей. На следующем этапе полученные решения могут быть уточнены с помощью конечно-элементного анализа.

Выводы по главе:

1. Получено аналитическое решение задачи о распределении двухмерных магнитных полей в активной зоне синхронной электрической машины с ВТСП ОВ и ОЯ и ферромагнитопроводом. Полученное аналитическое решение учитывает геометрию активной зоны машины, число пар полюсов, число фаз и параметры ВТСП обмоток.

2. На основе полученных решений о распределении магнитных полей найдены аналитические выражения для расчета основных параметров полностью ВТСП ОВ и ОЯ при наличии ферромагнитопровода в активной зоне машины.

3. На основе полученных аналитических решений выполнен пример расчета синхронного двигателя с ВТСП ОВ и ОЯ мощностью 12,5 кВт. Показано, что данная машина может обладать удельной мощностью более 10 кВт/кг при охлаждении жидким азотом.

4. Приведенная в данном разделе методика расчета основных параметров и главных размеров ВТСП ЭМП является первым этапом проектирования полностью ВТСП машин, т.к. аналитическая запись выражений для определения основных параметров электрической машины позволяет проводить их частичную оптимизацию, которая не требует существенных вычислительных мощностей.

## 4 Экспериментальные исследования макетных образцов ЭМП для БЭС/ПЭС

На основе проведенных расчетов разработана конструкция макетного образца полностью ВТСП электрической машины мощностью 10 кВт. Предусмотрена возможность замены полюсов и ярма ротора для изменения свойств магнитной цепи машины. Это дает возможность получить более обширные данные в ходе экспериментов.

В данном разделе приведено описание ее основных элементов, обоснование выбора материалов, основные характеристики, приведено описание стенда для исследований.

### 4.1 Описание стенда для исследования

Для экспериментальных исследований синхронных ВТСП ЭМП был использован криогенный стенд, на котором проводились испытания разработанной машины при температуре жидкого азота (рисунок 4.1). Схема стенда приведена на рисунке 4.2. В состав стенда вошли следующие основные системы:

- система подключения электрической нагрузки;
- приводной двигатель;
- система автоматизированного контроля и регистрации параметров;
- система криогенного обеспечения.

Далее каждая из систем рассмотрена подробнее.

*Система подключения электрической нагрузки.* Подключение нагрузки осуществляется с помощью трехфазного синусоидального статического преобразователя *Mitsubishi FR-F740-00770ES*, мощностью 37 кВт. Система управления преобразователя построена на основе микропроцессора. Данный преобразователь также может быть использован для управления машиной при ее работе в двигательном режиме. Регулирование по частоте и амплитуде синусоидального напряжения осуществляется методом широтно-импульсной

модуляции. Таким образом, коммутация нагрузки, разгон и поддержание заданной частоты вращения экспериментальных ВТСП электрических машин осуществляется полностью в автоматическом режиме.



Рисунок 4.1 –Общий вид стенда

*Приводной двигатель.* Для привода ВТСП машин, работающих в генераторном режиме, в состав автоматизированного измерительного стенда включен приводной электродвигатель, выполненный на базе двигателя постоянного тока МЛ-25. Для регулирования частоты вращения двигателя управление машиной осуществляется путем изменения тока в обмотках возбуждения и управления. Двигатель закреплен на стенде таким образом, чтобы его корпус мог совершать колебания относительно продольной оси. Для измерения момента, действующего со стороны испытуемой ВТСП машины, использовался датчик силы, который был прикреплен одной стороной к несущей раме, а другой к корпусу приводного двигателя.

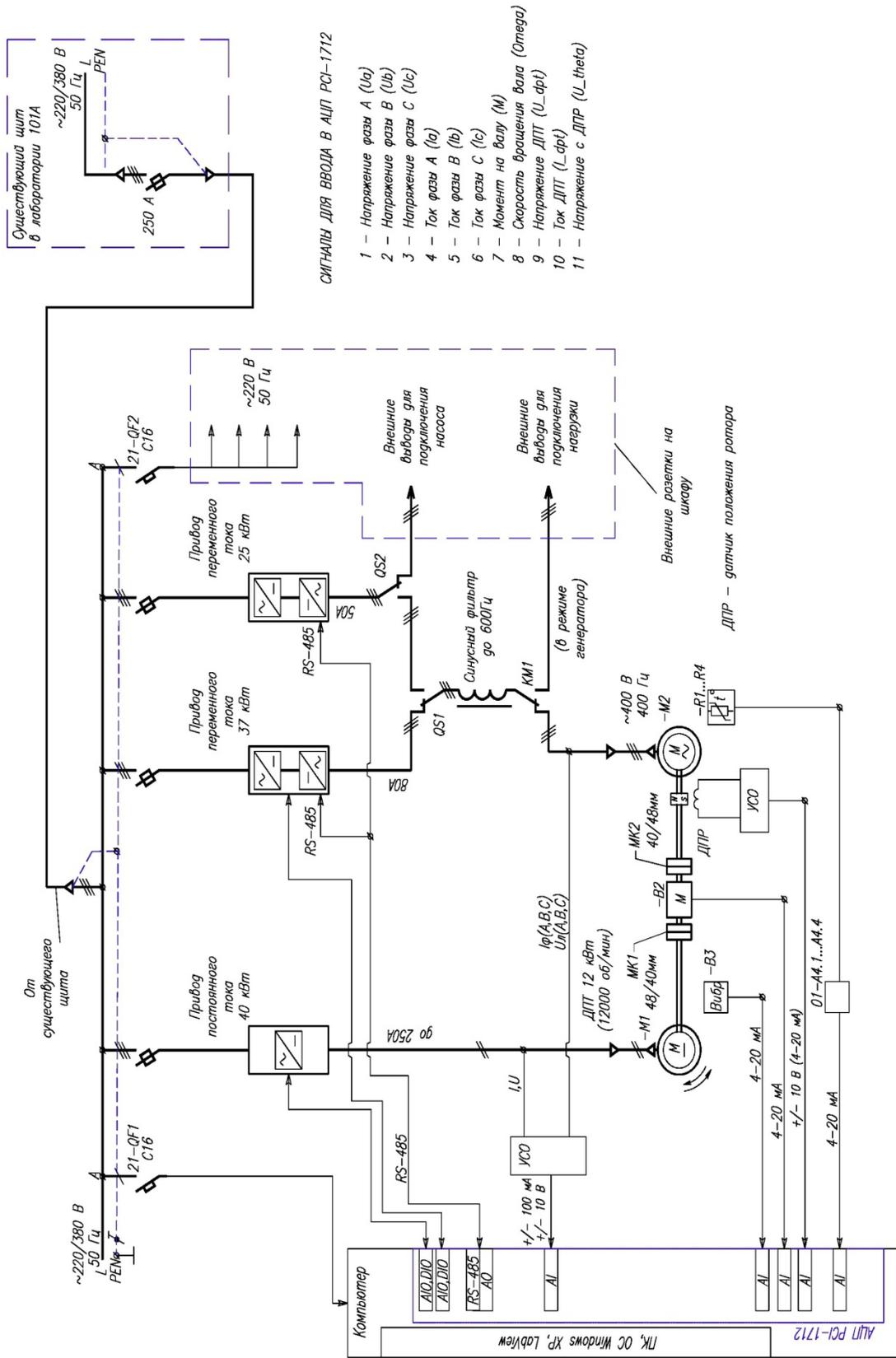


Рисунок 4.2 – Схема испытательного стенда

*Система автоматизированного контроля и регистрации параметров.* Для экспериментальных исследований ВТСП машин используется специализированный автоматизированный измерительный комплекс (ИК). ИК состоит из системы датчиков, усилителей и преобразователей сигнала, двух плат АЦП, персонального компьютера и специально разработанного программного обеспечения. ИК позволяет осуществлять регистрацию, сбор, визуализацию и сохранение результатов измерений параметров ВТСП электродвигателей в режиме реального времени.

Помимо контроля основных электрических параметров испытуемой машины (токов и напряжений по трем фазам), система измерений содержит специальные каналы для регистрации следующих величин:

- частоты вращения вала ВТСП машины;
- механического момента на валу ВТСП машины;
- давления внутри криостата;
- магнитного поля, измеряемого датчиком Холла;
- мощности на нагрузке.

*Система криогенного обеспечения.* Система криообеспечения состоит из двух заправочных танков ИТК-500 ёмкостью 500 л каждый, промежуточной емкости, криостата, криогенных магистралей и арматуры. Испытания двигателей на стенде осуществлялись по разомкнутому циклу со сбросом испарившейся части азота в атмосферу. Уровень жидкости в промежуточной емкости контролировался с помощью специального поплавкового указателя на основе герконов.

## 4.2 Конструкция макетного образца

Макетный образец представляет собой синхронную электрическую машину с обмоткой возбуждения на роторе и обмоткой якоря на статоре. Катушки обмоток выполнены из ВТСП ленты, намотаны на сердечник и имеют форму рейстреков. Охлаждение осуществляется с помощью жидкого азота при температуре 77К,

путем заполнения внутреннего объема машины. Такой тип охлаждения является наиболее рациональным для лабораторных испытаний, т.к. позволяет сократить расходы на разработку системы охлаждения. Машина выполнена в двухщитовом исполнении. Передача электрической мощности на вращающуюся обмотку возбуждения осуществляется с помощью щеточно-контактного узла.

Для удобства проведения лабораторных испытаний выведены все начала и концы фаз обмотки статора. Это позволяет организовать их соединение как в звезду, так и в треугольник.

Для установки машины на лабораторный стенд используются лапы, которые крепятся к ее корпусу.

Теплоизоляция выполнена с помощью материала Cryogel-Z.

Передача вращающего момента на нагрузочную машину на испытательном стенде осуществляется с помощью сильфонной муфты [60].

*Анализ способов охлаждения ВТСП обмоток макетного образца.* Для охлаждения сверхпроводящих устройств сегодня используется целый ряд способов, каждый из которых имеет свои достоинства и недостатки. Способ охлаждения каждого конкретного сверхпроводящего устройства выбирается исходя из специфики его эксплуатации и экономических показателей. Технические решения, которые хорошо зарекомендовали себя для охлаждения одних сверхпроводящих устройств, оказываются совершенно неприемлемыми для других сверхпроводящих устройств.

На системы охлаждения сверхпроводниковых устройств электротехнического назначения накладываются значительно более жесткие требования по стоимости, надежности и удобству технического обслуживания, чем для систем криогенного обеспечения используемых для охлаждения сверхпроводящих устройств используемых в физике, даже таких масштабных как ускорители или токамаки. Более того, к системам охлаждения электротехнических сверхпроводниковых устройств предъявляются требования, связанные с обеспечением необходимой диэлектрической прочности изоляции

при криогенных температурах, а также со спецификой работы системы автоматического повторного включения (АПВ). Ниже будут рассмотрены различные способы охлаждения сверхпроводниковых катушек, показаны их плюсы и минусы.

*Охлаждение сверхпроводниковых катушек за счет теплопроводности.* Охлаждение сверхпроводящих магнитных систем от микро-рефрижераторов за счет теплопроводности широко используется при создании лабораторных соленоидов с индукцией до 15 Тл и даже выше, которые сейчас производит целый ряд фирм: Janis, Oxford Instruments и др. Путем теплопроводности охлаждаются даже такие крупные сверхпроводящие магнитные системы как детектор ATLAS установленный на большом адронном коллайдере LHC, источником холода являются трубки, через которые прокачивается жидкий гелий, между трубками и охлаждаемой массой организован хороший тепловой контакт.

Охлаждение за счет теплопроводности при использовании для ВТСП катушек сопряжено с большим количеством проблем. Оно представляет собой крайне медленный процесс на этапе захолаживания, время охлаждения до рабочей температуры современных лабораторных соленоидов составляет от нескольких часов до нескольких суток. Принцип работы ВТСП магнитных систем основан на переходе сверхпроводника в сверхпроводящее состояние. Никакая криогенная система, основанная на охлаждении за счет теплопроводности, не способна быстро охладить ВТСП катушки.

При охлаждении путем теплопроводности в сверхпроводящих обмотках возникают значительные градиенты температуры, что для ВТСП катушки неминуемо приведет к возникновению локальных перегревов, из-за которых может произойти перегорание устройства. Одним из способов борьбы с температурными градиентами в сверхпроводящих магнитных системах является введение в структуру сверхпроводящих обмоток тепловых мостов, что дополнительно усложняет конструкцию обмотки.

*Охлаждение ВТСП катушек теплообменным газом.* Для охлаждения различных сверхпроводящих устройств в ряде случаев используют

теплообменный газ (обычно гелий). В отличие от охлаждения за счет теплопроводности охлаждение теплообменным газом не требует разветвленной системы тепловых мостов соединяющих сверхпроводящую обмотку с источником холода. Охлаждение теплообменным газом широко используется в прототипах ВТСП электротехнических устройств, таким образом, охлаждался целый ряд ВТСП трансформаторов и электрических машин с рабочей температурой 20-30 К, в том числе и гребной судовой электродвигатель мощностью 36,5 МВт производства компании American Superconductor.

Основным достоинством охлаждения теплообменным газом является возможность работы ВТСП устройств при пониженной до 20-40 К температуре, за счет чего удается добиться существенного роста критических токов ВТСП проводников, в том числе и в магнитных полях. Однако охлаждение теплообменным газом, также как и охлаждение за счет теплопроводности - медленный процесс, охлаждение сверхпроводящей обмотки до рабочей температуры занимает несколько часов или даже суток.

Использование охлаждения теплообменным газом приводит к заметному усложнению конструкции электрической изоляции, особенно в токовых вводах. Охлаждение теплообменным газом успешно применяется в ВТСП электротехнических устройствах с рабочим напряжением до 35 кВ, однако его использование для высоковольтной аппаратуры проблематично.

*Жидкостное охлаждение ВТСП катушек.* Охлаждение погружением в жидком азоте при температуре 77 К является наиболее простым, надежным и дешевым способом охлаждения ВТСП электротехнических устройств. Повсеместного распространения погружное охлаждение в жидком азоте не получило лишь по причине недостаточной токонесущей способности современных ВТСП проводников, особенно в магнитных полях. Существенно повысить токонесущую способность ВТСП проводников можно путем снижения рабочей температуры, в связи с чем рабочая температура мощных ВТСП электрических машин и трансформаторов обычно выбирается в диапазоне температур 20-40 К. Прогресс в области ВТСП материалов 2-го поколения

позволяет надеется на то, что большинство будущих ВТСП электротехнических устройств будет работать при температуре 77 К.

Если в ВТСП электротехнических устройствах сверхпроводник находится в относительно слабых магнитных полях, то значительного падения критического тока ВТСП проводника не происходит, что делает привлекательным простое и экономичное охлаждение жидким азотом.

Преимущества охлаждения ВТСП катушек жидким азотом с температурой 77 К очевидны. Если ВТСП обмотка имеет достаточно развитую поверхность, то она может быть охлаждена до рабочей температуры за считанные секунды. Разработки компании Siemens показали что время возврата ВТСП катушки в сверхпроводящее состояние (в случае превышения критической точки) может быть сокращено до 2,5 с. Специалистам компании SuperPower удалось добиться восстановления сверхпроводящего состояния ВТСП при протекании через них тока.

Жидкий азот обладает прекрасными диэлектрическими свойствами, а газообразный азот при атмосферном и повышенном давлении по своим диэлектрическим свойствам близок к воздуху. Конструкция электрической изоляции и токовых вводов значительно упрощается по сравнению с ВТСП устройствами охлаждаемыми при помощи теплообменного газа. Путем увеличения избыточного давления в криостате можно значительно поднять диэлектрическую прочность изоляции.

Системы криогенного обеспечения на жидком азоте дешевы и надежны. ВТСП система может охлаждаться как от микрорефрижератора реконденсирующего испаряющийся азот, так путем постоянного подлива жидкого азота в криостат. Второй вариант является наиболее предпочтительным при установке ВТСП устройств на предприятиях обладающих воздухо-разделительными установками (металлургия, химическая промышленность, и.т.д.). Запас хладагента в криостате позволяет проводить регламентные работы с микрорефрижератором без отключения системы. Улучшения характеристик

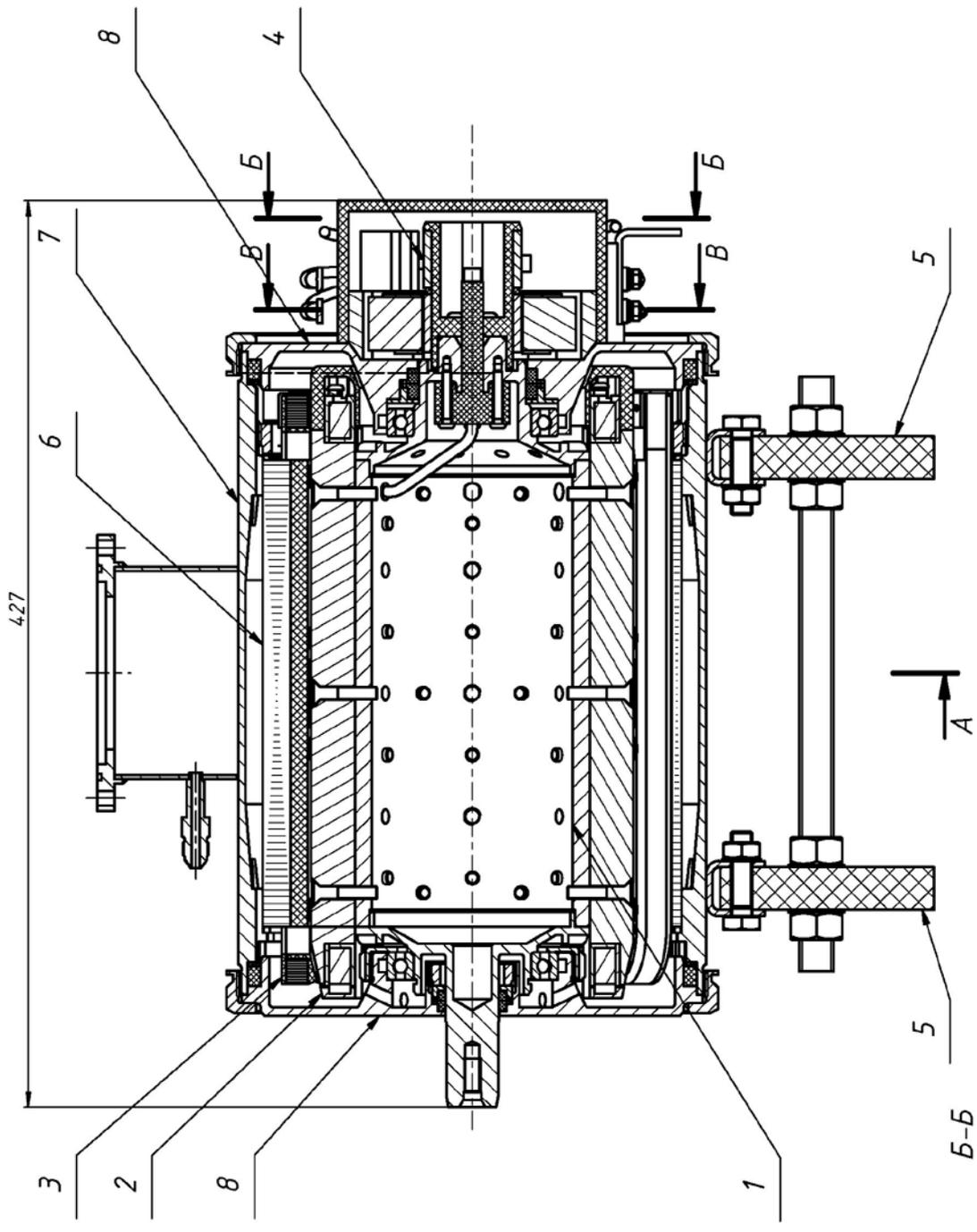
ВТСП устройств можно добиться путем их охлаждения переохлажденным жидким азотом с температурой 65–70 К.

На основании проведенных расчетов спроектирована конструкция макета полностью ВТСП электрической машины. На рисунке 4.3 представлен общий вид макетного образца с указанными основными элементами.

ЭМП состоит из следующих основных элементов:

- 1) статора с ВТСП ОЯ;
- 2) ротора с ВТСП ОВ;
- 3) корпуса с теплоизоляцией;
- 4) узла подачи тока в ВТСП ОВ;
- 5) полувазов, подшипниковых щитов, узлов подачи и вывода азота и других необходимых конструктивных элементов.

Охлаждение осуществляется жидким азотом при температуре 77К. При этом весь внутренний объем машины заполняется хладагентом. Это позволяет увеличить надежность работы машины, благодаря непосредственному контакту тепловыделяющих поверхностей с хладагентом. Подача жидкого азота осуществляется через штуцер в нижней части машины, а выход его в газообразном виде - через патрубок в верхней части машины. Теплоизоляция выполнена с помощью материала CryoGel.



1 – ротор; 2 – катушка ОВ; 3 – катушка ОЯ; 4 – щеточно-контактный узел; 5 – опоры; 6 – магнитопровод статора; 7 – корпус; 8 – щиты подшипниковые

Рисунок 4.3 –Общий вид макета полностью ВТСП электрической машины

Машина выполнена по двухщитовой схеме. Такая конструкция упрощает процесс сборки машины, а также обеспечивает доступ к местам электрического соединения ВТСП обмоток. Задача герметизации выхода вала успешно решена в ходе данного проекта с помощью специально подобранных уплотнений.

В качестве опор вала используются подшипники качения. Т.к. машина полностью заполняется жидким азотом, то подшипники очищают от заводской смазки и промывают во избежание кристаллизации смазки и заклинивания подшипников во время работы. В качестве смазки при работе машины используется жидкий азот. Для обеспечения циркуляции азота в области подшипников в щитах выполнены специальные каналы.

*Статор и корпус.* На статоре машины расположен пакет якоря (магнитопровод) и ОЯ. Магнитопровод выполнен из листов электротехнической стали толщиной 0.5 мм. Вид листа пакета статора с размерами показан на рисунке 4.4.

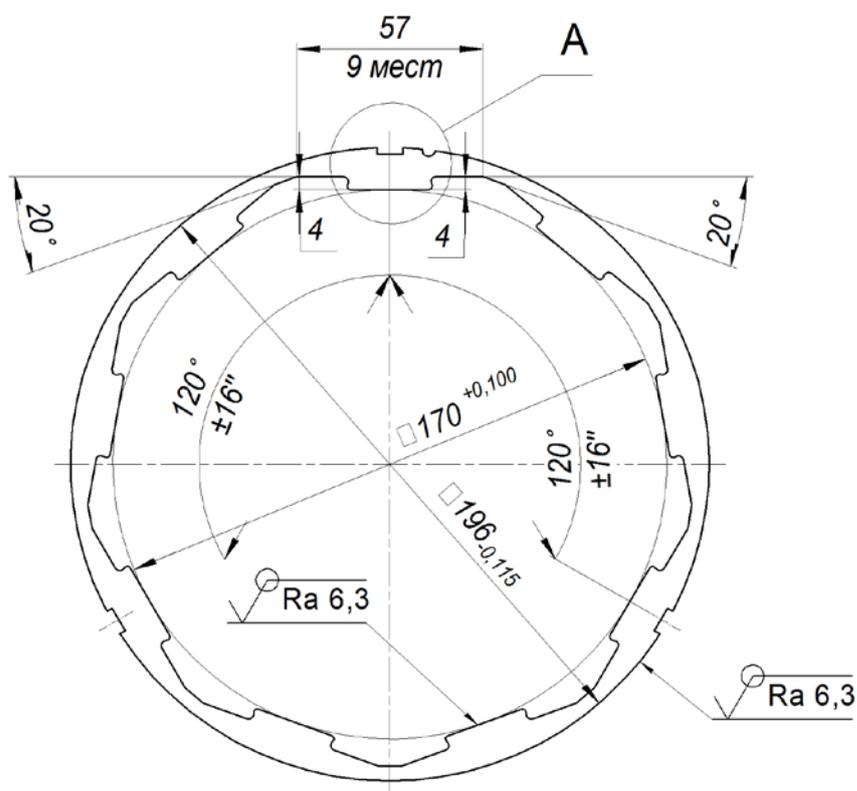


Рисунок 4.4 – Лист статора ПСПЭМ

Листы могут быть вырезаны с применением лазерной резки, электроэрозионной резки, или другой подобной технологии. Магнитопровод одновременно выполняет роль магнитного экрана, изолирующего внешнее пространство от сильных магнитных полей. Внутренняя часть магнитопровода имеет выступы, на которые устанавливаются ВТСП катушки, соединяемы последовательно и образующие зубцовую обмотку якоря. Обмотка трехфазная с числом пазов на полюс и фазу равным 0.5.

Магнитопровод статора с установленными в него катушками обмотки устанавливаются в корпус. Корпус представляет собой трубу из стали 12Х18Н10Т ГОСТ 5632-72 [61], которая является нержавеющей. Выбор данного материала обоснован условиями работы корпуса, при которых возможно образование конденсата на его внутренней и внешней поверхности и образование коррозии. Во внутренней части выполнена проточка, позволяющая осуществить вывод газообразного хладагента.

Внешняя поверхность корпуса покрыта теплоизоляцией для снижения теплопритока из внешней среды в криогенную область. Также на статоре расположены узлы подачи жидкого и выхода газообразного азота. Ввод криогенной жидкости осуществляется через неподвижный патрубок в нижней части корпуса, вывод – через газоотвод в верхней части корпуса. Также в газоотводе имеется штуцер для присоединения датчика уровнемера для отслеживания уровня хладагента. В случае использования системы охлаждения замкнутого типа обратный контур присоединяется к штуцеру, выполненному также в верхней части корпуса в трубе газоотвода. Таким образом, в штатном режиме верхний уровень жидкого хладагента находится выше корпуса машины. В этом случае все ВТСП обмотки оказываются в среде жидкого азота.

В нижней части корпуса выполнены скобы для крепления лап. С их помощью производится установка машины на испытательном стенде. Для удобства транспортировки лапы могут быть демонтированы. Для увеличения жесткости лапы соединяются между собой.

*Ротор.* Ротор машины имеет составную конструкцию, включающую в себя левый и правый полувалы, магнитопровод и ВТСП катушки возбуждения. Т.к. машина является погружной, то на роторе не предусмотрен вращающийся криостат, что существенно упрощает конструкцию машины в целом.

Особенностью данного макета является возможность замены магнитопровода ротора. Это необходимо для проверки теоретических результатов расчета. В связи с этим предполагается, что магнитопровод ротора может быть изготовлен из магнитной стали, или из немагнитного материала. В случае немагнитного ротора он может быть выполнен из нержавеющей стали, титана, алюминия, или композитных материалов. Полюсы ротора также могут быть выполнены из магнитного, или немагнитного материала. При этом катушки обмотки являются съемными. Это позволяет использовать только один комплект катушек при замене магнитопровода ротора и полюсов.

В качестве магнитного материала используется сталь 30ХГСА ГОСТ ГОСТ 4543-71. Сталь 30ХГСА является широко распространенной и общепринятой для изделий авиационной промышленности и общего машиностроения. Кроме того, данный материал был успешно применен в составе криогенных электрических машин в качестве материала вала и магнитопровода [62, 63]. В данном макетном образце в качестве немагнитного материала выбран алюминий, т.к. он имеет меньшую стоимость, вес и технологичен. При этом в обоих вариантах полувалы ротора выполняются из стали 30ХГСА.

Таким образом конструкция статора и ротора машины позволяет выполнить ее с тремя различными конфигурациями магнитной цепи:

- с ферромагнитным ярмом ротора и статора и ферромагнитными полюсами ротора;

- с ферромагнитным ярмом ротора и статора, но с немагнитными полюсами ОВ и ОЯ;

- только с ферромагнитным экраном.

Все это дает возможность исследовать параметры полностью сверхпроводниковой машины при различных конфигурациях магнитной системы.

При разработке конструкции макетного образца большое внимание уделено охлаждению машины. При выбранном типе охлаждения ротор вращается в среде жидкого азота. При этом важно потоки хладагента распределить таким образом, чтобы не возникало областей, в которых образуются газовые пробки. С этой целью для увеличения циркуляции жидкого азота в роторе выполнены отверстия, через которые осуществляется подача азота в воздушный зазор под действием центробежной силы при вращении. Для снижения гидродинамического сопротивления ротора, которое является источником потерь, используется кожух. Модель ротора с кожухом показана на рисунке 4.5.

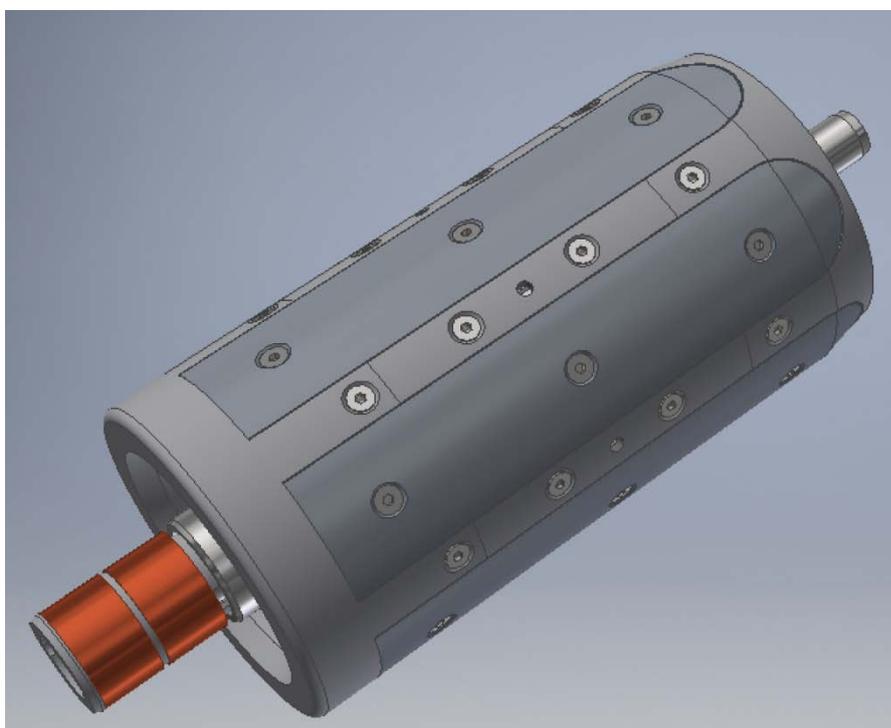


Рисунок 4.5 – Ротор с установленными полюсами и кожухом

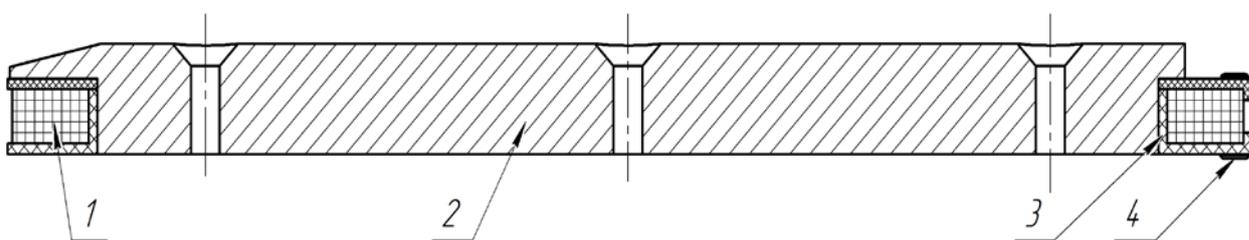
*ВТСП катушки обмоток возбуждения и якоря.* ВТСП катушки являются важнейшим элементом разработанного макета, т.к. именно применение СП дает возможность создания электрических машин с высокими значениями удельной мощности. Точность расчета характеристик ВТСП лент и катушек, проработанность технологических процессов создания обмоток, входной контроль их характеристик становятся основополагающими при создании таких электрических машин. Параметры катушек ОВ и ОЯ макетного образца приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Параметры катушек ОВ и ОЯ

Параметр	Значение	
	ОВ	ОЯ
Число витков	68	48
Ширина ленты, мм	5	
Толщина ленты, мм	0.5	
Длина линейной части, мм	220	
Высота катушки, мм	10	10
Ширина катушки, мм	17	12
Длина ВТСП ленты, м	37.8	27.5
Материал каркаса	PLA	

Катушки ротора выполняются в форме рейстреков. Данная форма является традиционной для машин с явно выраженными полюсами. Также при использовании данной формы катушки соблюдаются требования минимального радиуса изгиба ВТСП ленты [62, 63, 64]. Особенностью является то, что катушки выполнены по схеме "двойная галета", что позволяет вывести начало и конец катушки на ее внешнюю сторону. Это существенно упрощает процесс соединения катушек, установленных на магнитопровод ротора. Однако, в этом случае намотка осуществляется единым отрезком ленты из середины. Это требует разработки технологического процесса.

Общий вид полюса ротора приведен на рисунке 4.6.



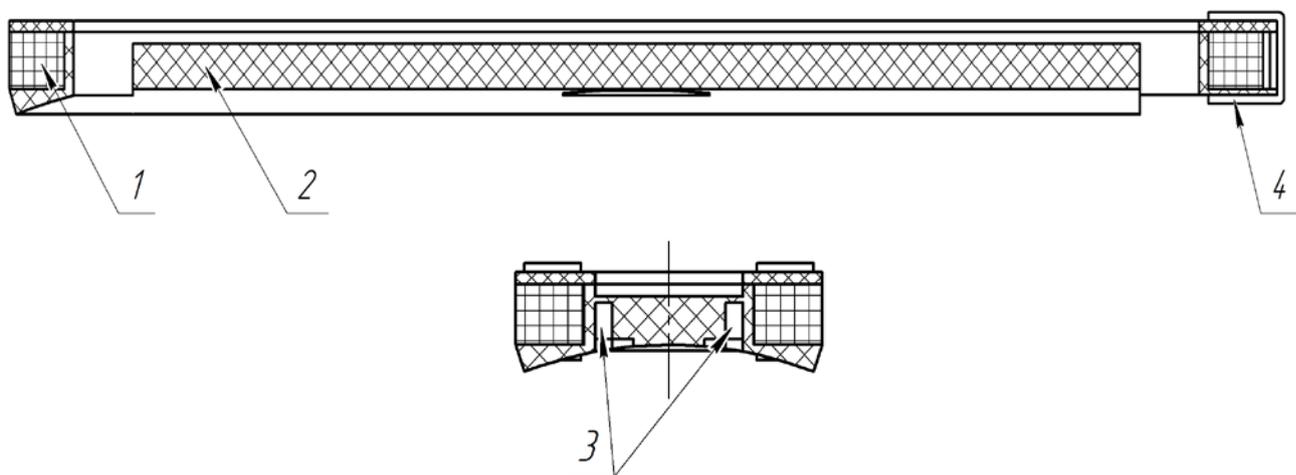
1 – ВТСП катушка; 2 – сердечник с полюсным наконечником; 3 – каркас;  
4 – медные втулки

Рисунок 4.6 – Полюс ОВ

Намотка катушек 1 осуществляется на немагнитный непроводящий каркас 3. Для обмоток возбуждения используется немагнитный каркас, изготовленный с помощью технологии 3D печати. Для увеличения жесткости катушки и исключения смещения слоев друг относительно друга используется

компаунд, который не разрушается при температуре жидкого азота. В центре каркаса имеется отверстие, в которое после установки его на магнитопровод ротора, крепятся стальной сердечник и полюсный наконечник 2. Концы катушки припаиваются к медным втулкам 4, установленным на ее торце. Для электрического соединения катушек в обмотку после их установки на ротор используются жесткие медные шины. Таким образом достигается достаточная жесткость катушек и соединений.

Полюсы статора выполнены аналогично ОВ. Полюс ОЯ показан на рисунке 4.7. Отличительной особенностью является то, что сердечник 2 не имеет отверстия в центре и крепится непосредственно на магнитопровод статора. Сердечник имеет сложную форму, в силу чего принято решение также изготовить его из неметалла с помощью 3D печати. С целью увеличения площади контакта катушки с хладагентом в каркасе выполнены продольные каналы 3. Выводы катушек припаиваются к медным втулкам 4. Соединение катушек между собой происходит с помощью медных шин в соответствии со схемой соединения обмотки.



1 – ВТСП катушка; 2 – каркас; 3 – каналы для охлаждения; 4 – медные втулки

Рисунок 4.7 – Полюс ОЯ

Важно отметить, что все катушки как в ОВ, так и в ОЯ соединены последовательно. Это означает, что выход из сверхпроводящего состояния одной из них может привести к снижению рабочего тока катушек во всей обмотке. В

этой связи большое значение приобретает входной контроль катушек. В ходе него должен быть установлен факт того, что ВТСП лента находится в сверхпроводящем состоянии при охлаждении, а рабочий ток составляет величину больше расчетной с некоторым запасом.

#### 4.3 Сопоставление экспериментальных и расчетных данных

*Теоретический расчет макетного образца.* Исходными данными для расчета являются геометрические размеры испытываемого макетного образца и входные параметры (рисунок 4.8 и Таблица 4.2).

Таблица 4.2 - Исходные данные

Параметр	Значение
Напряжение питания U, В	150
Частота вращения n, мин <sup>-1</sup>	2500
Число фаз m	3
Мощность P, кВт	12.5
Число пар полюсов p	3
Радиус расточки ярма ротора R <sub>a_r</sub> , (мм)	46
Высота ярма ротора Н <sub>уар</sub> , (мм)	8
Высота катушки обмотки возбуждения Н <sub>f</sub> , (мм)	10
Высота полюсного наконечника ротора Н <sub>p</sub> , (мм)	6.5
Величина зазора, δ (мм)	1
Высота полюсного наконечника статора Н <sub>p_st</sub> , (мм)	1
Высота зубца Н <sub>z</sub> , (мм)	4
Высота ярма статора Н <sub>уа_s</sub> , (мм)	5

Продолжение таблицы 4.2

Длина активной зоны машины, $L_s$ (мм)	220
Высота сердечника полюса ротора $H_{st}$ , (мм)	14
Ширина зубца $B_z$ , (мм)	26
Ширина сердечника полюса ротора $B_s$ , (мм)	16
Ширина полюса ротора $B_r$ , (мм)	38
Высота катушки статора $H_a$ , (мм)	10

По заданным параметрам построен эскиз, используемый для дальнейшего расчета (рисунок 4.9).

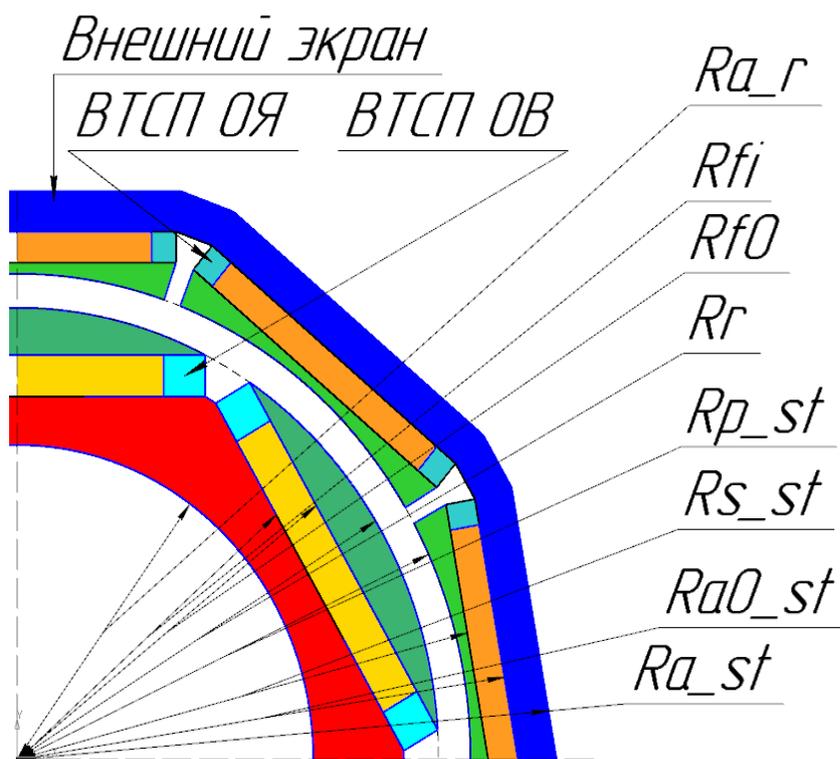


Рисунок 4.8 - Конструктивная схема

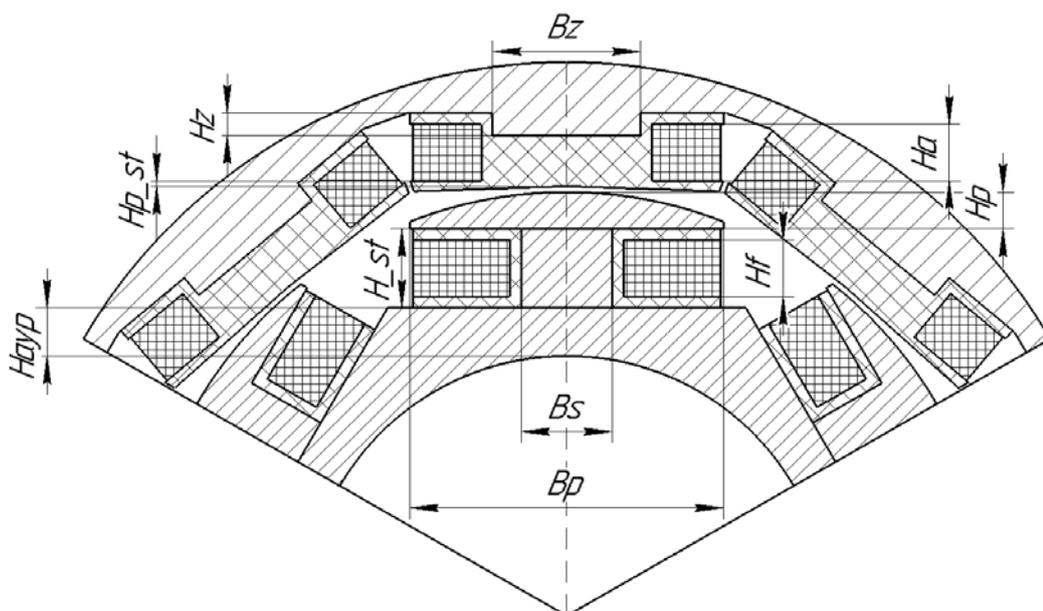


Рисунок 4.9 - Эскиз

Результат расчета по методике. Используя соотношение для определения магнитного потока и соотношения для индуктивных сопротивлений ОЯ, а также известные соотношения для определения основных параметров синхронной машины составлен аналитический расчёт двигателя с исходными данными, приведёнными в таблице 4.1.

В результате расчета определены главные основные параметры двигателя, такие как величина ЭДС холостого хода, мощность, индуктивные сопротивления, ток якоря. Для проверки насыщения материала также определены значения индукции в стержнях полюса ротора и зубцах статора (таблица 4.3)

Таблица 4.3 - Результаты аналитического расчета

Параметр	Значение
Мощность $P$ , кВт	13.6
ЭДС, $E_0$ , В	202
Индукция $B$ , Тл	
в стержне ротора	1.2
в стержне статора	0.7
Ток якоря $I$ , А	30
Индуктивные сопротивления	
$X_d$	3.64
$X_q$	3.51

*Моделирование.* Критический ток ВТСП ленты зависит от внешнего магнитного поля, в том числе и собственного. Поэтому проведено моделирование активной зоны электрической машины для оценки и уточнения рассчитанных в аналитическом расчете характеристик и проверки насыщения частей двигателя во всех участках. В силу симметрии решено произвести моделирование одного сектора машины. Моделирование решено проводить в программе AnsysMaxwell. Ansys является программным пакетом, реализующим метод конечных элементов на компьютерах. Основная область применения включает в себя компьютерное моделирование электромагнитных полей в научных и промышленных целях. Данная программа может применяться для решения задач в различных областях физики: электромагнетизм, электростатика и электродинамика, магнитостатика, для анализа стационарных и переходных процессов теплопередачи.

Вначале строится геометрическая модель активной зоны электрической машины. Затем задаются свойства материалов, использующихся в модели (см. рисунки 4.10-4.12. В данном случае, для повышения магнитной проводимости на пути потока, в качестве магнитного материала для изготовления ротора используется сталь 30ХГСА ГОСТ 4543-71. Для ярма статора выбрана электротехническая сталь 2412. Магнитные свойства ферромагнитных материалов являются нелинейными, поэтому необходимо найти таблицы кривых намагничивания электротехнических сталей, применяемых в конструкции данной машины, в библиотеке и присвоить материалы каждого элемента. Помимо упомянутых ранее сталей заданы воздух, медь, вакуум.

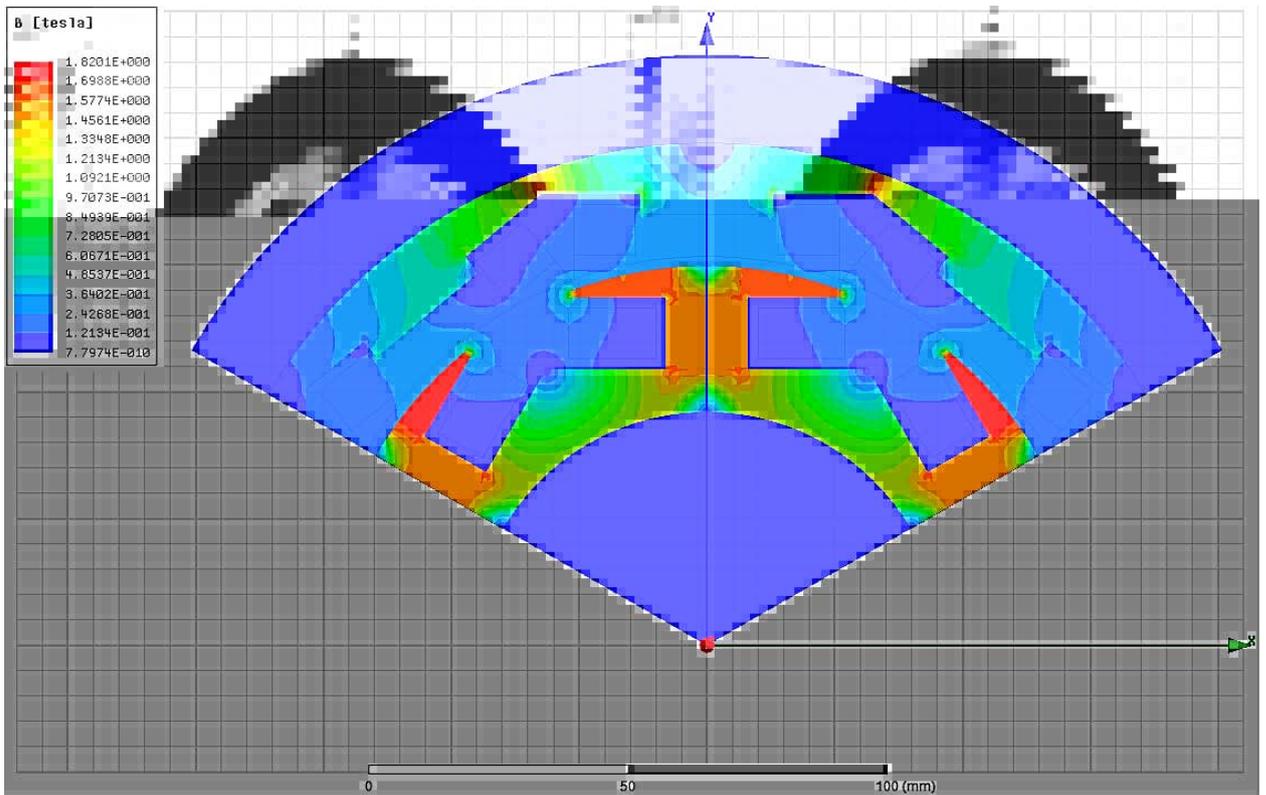


Рисунок 4.10 - Проверка насыщения материала

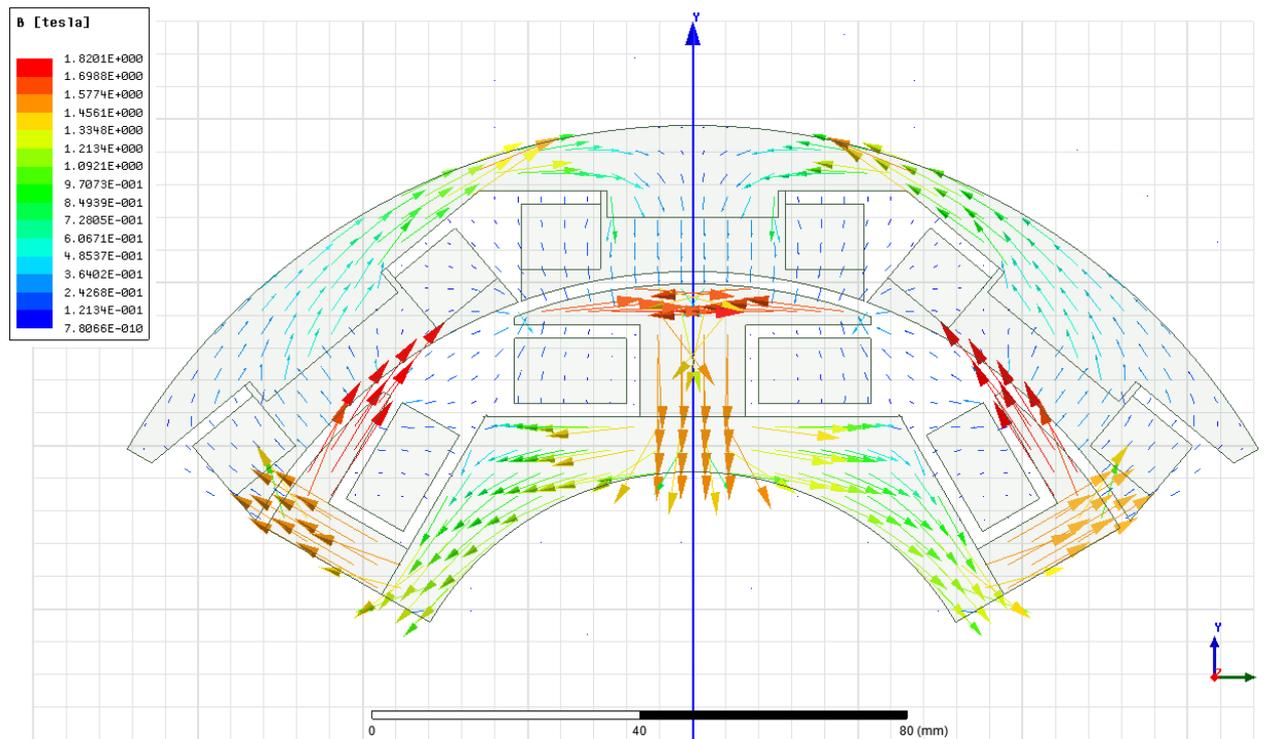


Рисунок 4.11 - Распределение силовых линий магнитного поля в активной зоне машины.

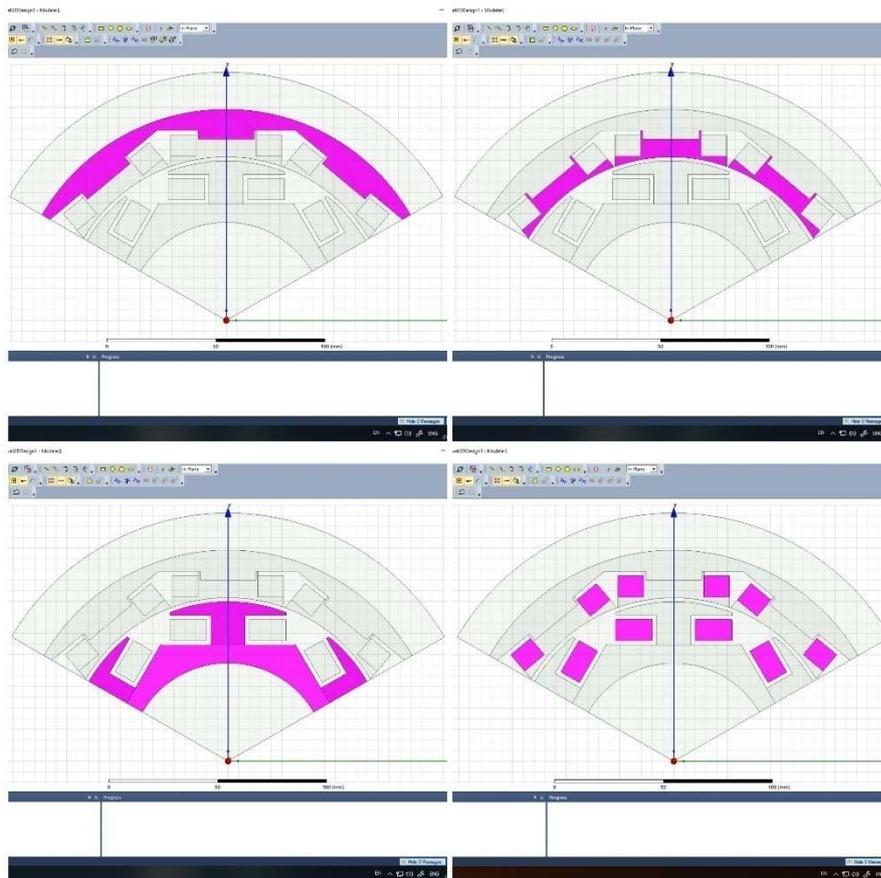


Рисунок 4.12 - Присвоение материалов

Следующий шаг – задание источников магнитного поля. В нашем случае используется проводник с задаваемым током и направлением. В качестве материала для проводников задается медь. Также задаем небольшой ток (0,01 А) в обмотке якоря, чтобы в дальнейшем стало возможно посчитать взаимоиנדуктивности обмоток (рисунок 4.13).

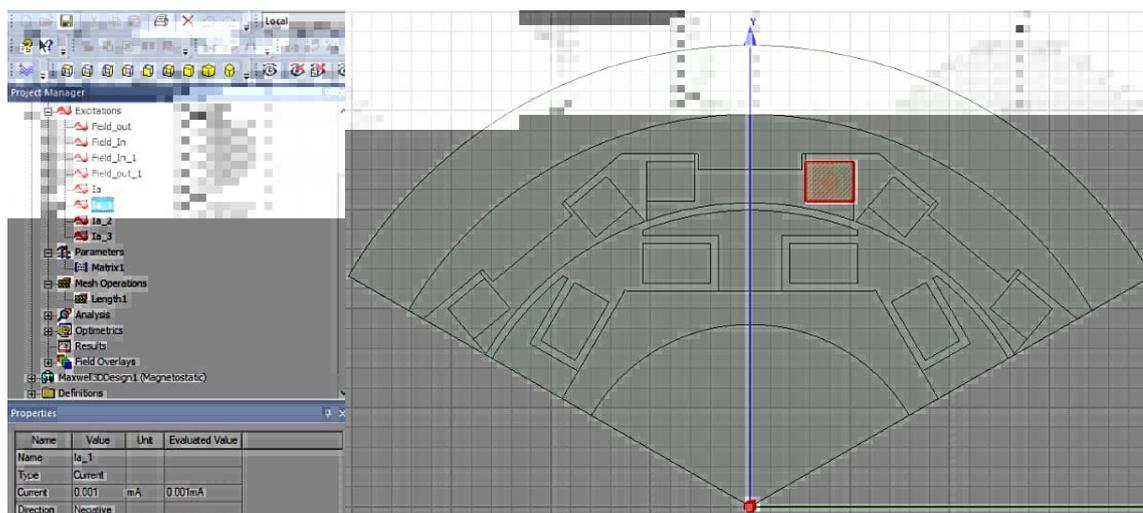


Рисунок 4.13 - Определение токопроводящего контура

Заданием, пускай, даже маленького, тока, мы даем программе понять, что это токопроводящий контур. В дальнейшем уточним количество проводников в этом контуре с помощью оператора «PostProcessed» и получим значения взаимноиндуктивностей. Затем, производится расчет магнитных полей, в результате которого получена картина распределения магнитной индукции. Также, с помощью цветовой шкалы становится возможно определить индукцию в различных частях машины и произвести сравнительный анализ с аналитическим расчетом, чтобы убедиться в правильности выборов параметров.

На основе проведенного моделирования определены значения индуктивностей и взаимноиндуктивностей катушек, с помощью чего стало возможно определить действующее значение ЭДС холостого и индуктивные сопротивления ОЯ (рисунок 4.14).

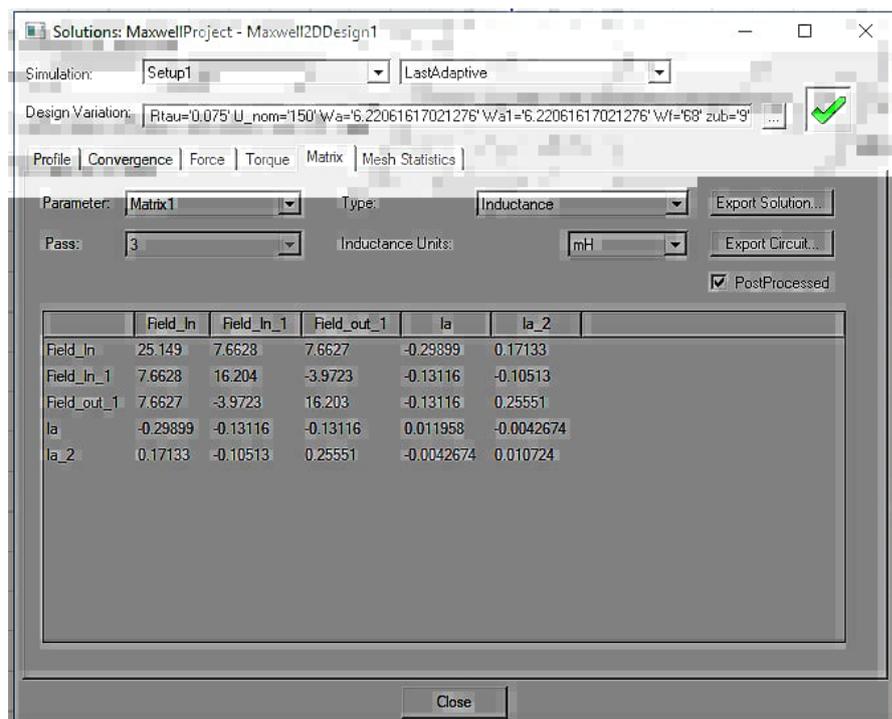


Рисунок 4.14 – Матрица индуктивностей

$$E_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot I_f \cdot M_{af} \cdot 2 \cdot p \cdot q}{\sqrt{2}}$$

где  $I_f$  – транспортный ток,  $f$  – частота,  $M_{af}$  – взаимноиндуктивность,  $p$  – число пар полюсов,  $q$  – число пазов на полюс и фазу.

$$X_a = L \cdot 2 \cdot \pi \cdot f,$$

где  $L$  – индуктивность катушки.

В итоге двумерного моделирования получены результаты, представленные в Таблица 4.4 и на рисунках 4.15-4.17.

Таблица 4.4- Результаты моделирования

Параметр	Значение
Мощность $P$ , кВт	13.8
ЭДС, $E_0$ , В	190
Индукция $B$ , Тл в стержне ротора	1.33
в стержне статора	0.5
Ток якоря $I$ , А	29
Индуктивное сопротивление $X_a$ , (Ом)	3.8

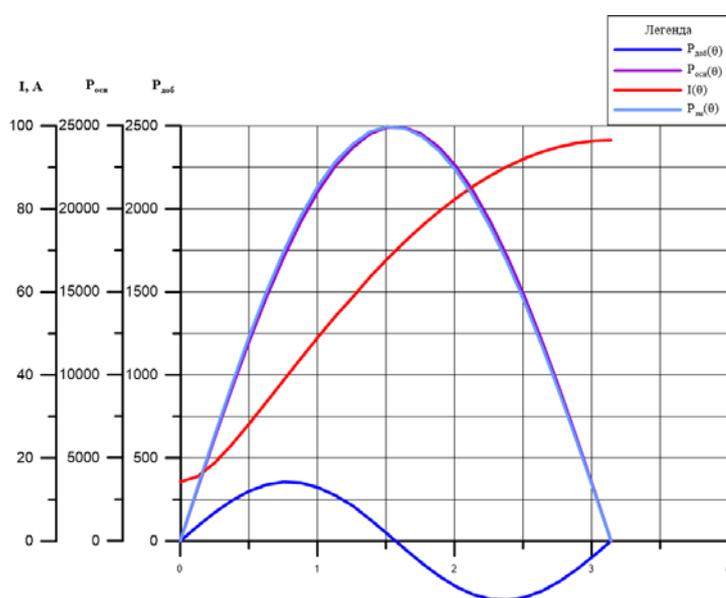


Рисунок 4.15 - Угловые характеристики

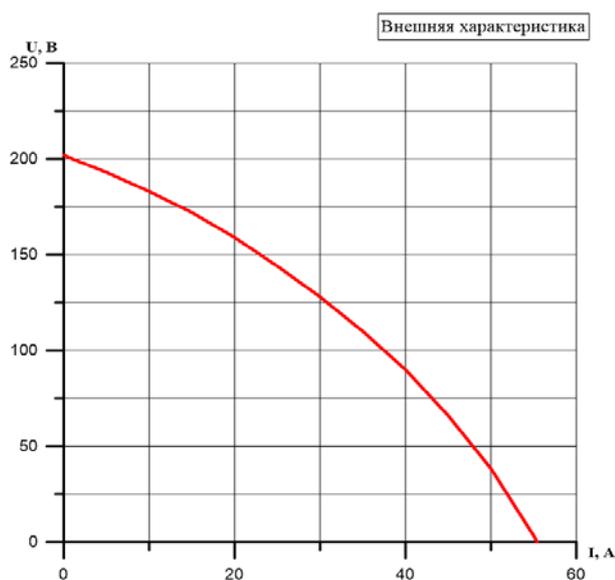


Рисунок 4.16 – Внешняя характеристика

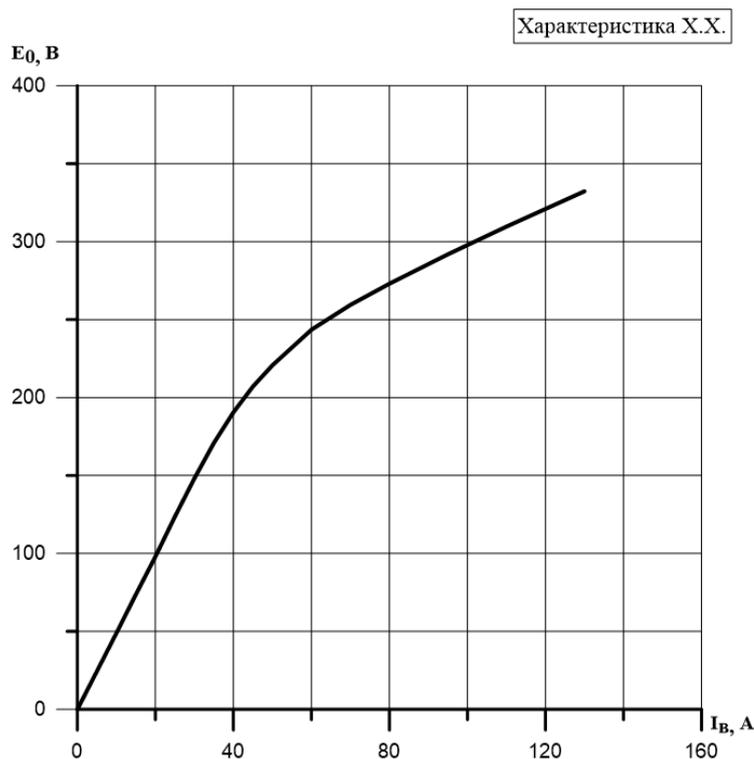


Рисунок 4.17 – Характеристика холостого хода

*Сопоставление результатов.* В заключение произведен сравнительный анализ результатов аналитического расчета и моделирования. Значения показали хорошую сходимость и подтвердили правильность выполненной работы. Результат представлен в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Сопоставление результатов

Параметр	Значение	
	Аналитический расчет	Ansys
Мощность $P_2$ , кВт	13.6	13.8
ЭДС, $E_0$ , В	202	190
Индукция $B$ , Тл		
в стержне ротора	1.2	1.33
в стержне статора	0.7	0.5
Ток якоря $I$ , А	30	29
Индуктивное сопротивление $X_d$ , (Ом)	3.64	3.8

*Экспериментальное исследование макетного образца.* В соответствии с разработанной программой и методикой испытаний проведены статические и динамические испытания.

На первом этапе определен рабочий ток ВТСП катушек ротора и статора. Для этого использован экспериментальный стенд, описанный в данном разделе и представленный на рисунке 4.1. Каждая изготовленная катушка испытана на постоянном токе и определен ее критический ток. В таблице 4.6 приведены результаты испытаний: критический ток, активное сопротивление при 300 К и индуктивность катушек ротора и статора. Здесь и далее в качестве критерия сверхпроводимости использовано значение 1 мкВ/см. Видно, что критический ток всех катушек превышает номинальное значение. Различие в значении критического тока ВТСП катушек статора связано с технологическими аспектами их изготовления и свидетельствует о необходимости усовершенствования данного процесса.

Таблица 4.6 – Результаты испытаний ВТСП катушек

Катушка	Критический ток, А	Активное сопротивление (300 К), Ом	Индуктивность, мГн
Обмотка ротора			
№ 1р	64.6	1,5	1.16
№ 2р	64.1	1,37	1.2
№ 3р	63.3	1,36	1.14
№ 4р	63.4	1,4	1.17
№ 5р	65.7	1,41	1
№ 6р	65.2	1,52	1.14
Обмотка статора			
№ 1с	80,3	1,023	667
№ 2с	64,9	1,06	650
№ 3с	65	0,946	631
№ 4с	79,9	1,034	647
№ 5с	70,9	1,053	637
№ 6с	60	1,019	566
№ 7с	76,6	0,966	624
№ 8с	81,2	0,963	524
№ 9с	75,1	0,948	688

После проведения испытаний катушек обмотки были собраны, и проведены испытания ротора и статора в сборе (рисунок 4.18). В результате установлено, что после установки на ротор критический ток катушек снизился до 44.5 А. Это связано с тем, что возросло значение магнитной индукции в области ВТСП катушек. На рисунке 4.19 приведены графики зависимости тока, напряжения и потребляемой мощности от времени. Видно, что скорость ввода тока составила 0.5 А/с. Рост мощности при вводе тока связан с наличием медных шин, соединяющих катушки, и паяных соединений. Стоит отметить, что полученное значение критического тока хорошо согласуется с данными, предоставленными изготовителем ленты. После завершения испытаний ротора проведена его балансировка. Данная процедура могла вызвать снижение критического тока, однако этого не произошло. Критический ток ВТСП обмотки ротора после балансировки не изменился.

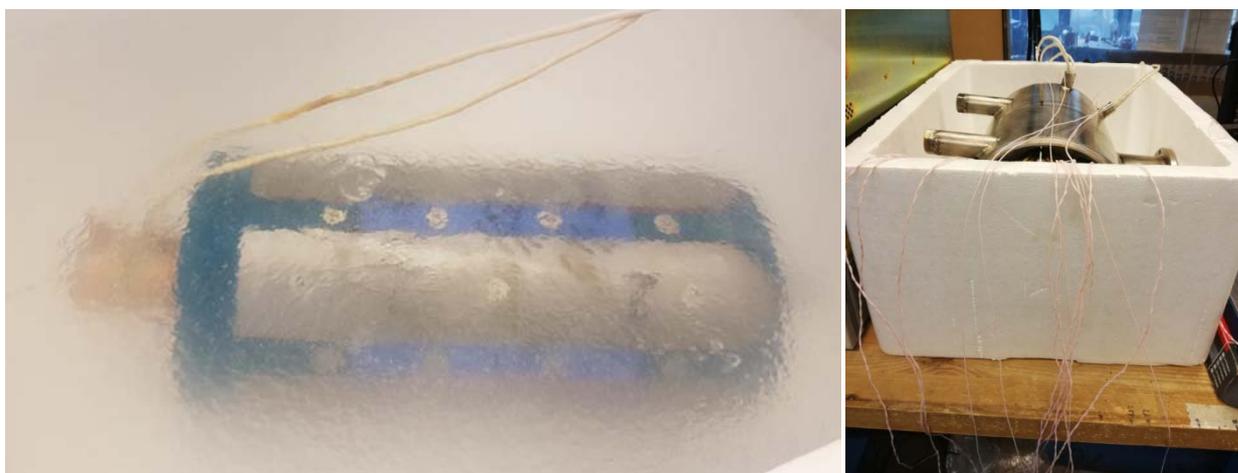


Рисунок 4.18 – Ротор и статор, подготовленные к испытаниям

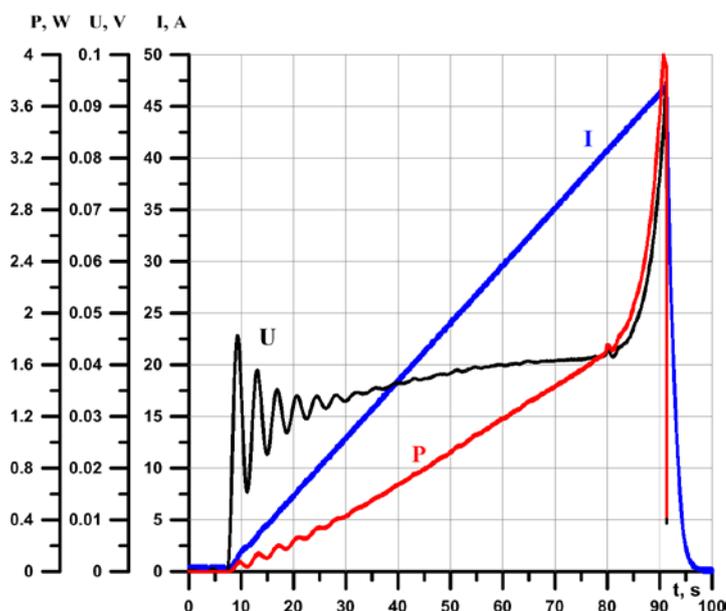


Рисунок 4.19 – Результаты испытания ВТСП обмотки ротора

Результатом испытаний обмотки статора стало значение критического тока каждой фазы. Для получения этого значения каждая фаза подключалась к источнику постоянного тока и проводились испытания. Критический ток составил: 65 А для фазы А, 60 А для фазы В, 62 А для фазы С. Снижение критического тока фаз по сравнению с отдельными катушками связано также с увеличением магнитной индукции в области катушек. Различие в критическом токе фаз вызвано тем, что катушки, имеющие большее сопротивление и меньший ток объединены в одну фазу. Это даст возможность в ходе испытаний машины определить, как влияют эти параметры на рабочие характеристики обмотки при работе ее в переменных магнитных полях при питании переменным током.

Обмотки ротора и статора испытаны, их критический ток превышает номинальное значение, принятое при расчете машины, что свидетельствует о возможности сборки машины и установки на автономные испытания. На рисунке 4.20 показана машина на испытательном стенде. Результаты испытаний включают в себя: характеристику холостого хода, внешнюю характеристику в генераторном режиме, форму кривой ЭДС холостого хода. Данные зависимости приведены на рисунке 4.21.

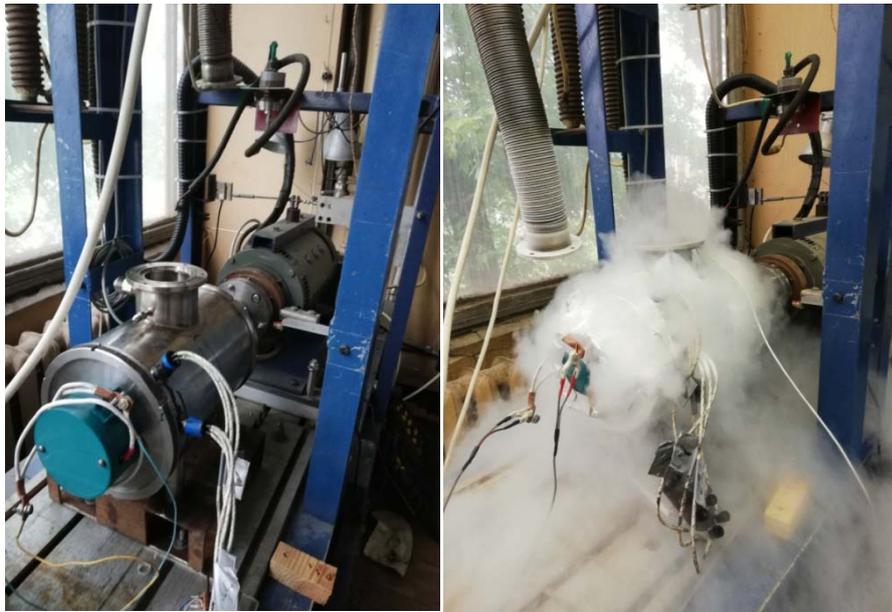


Рисунок 4.20 – Полностью ВТСП электрическая машина на испытательном стенде

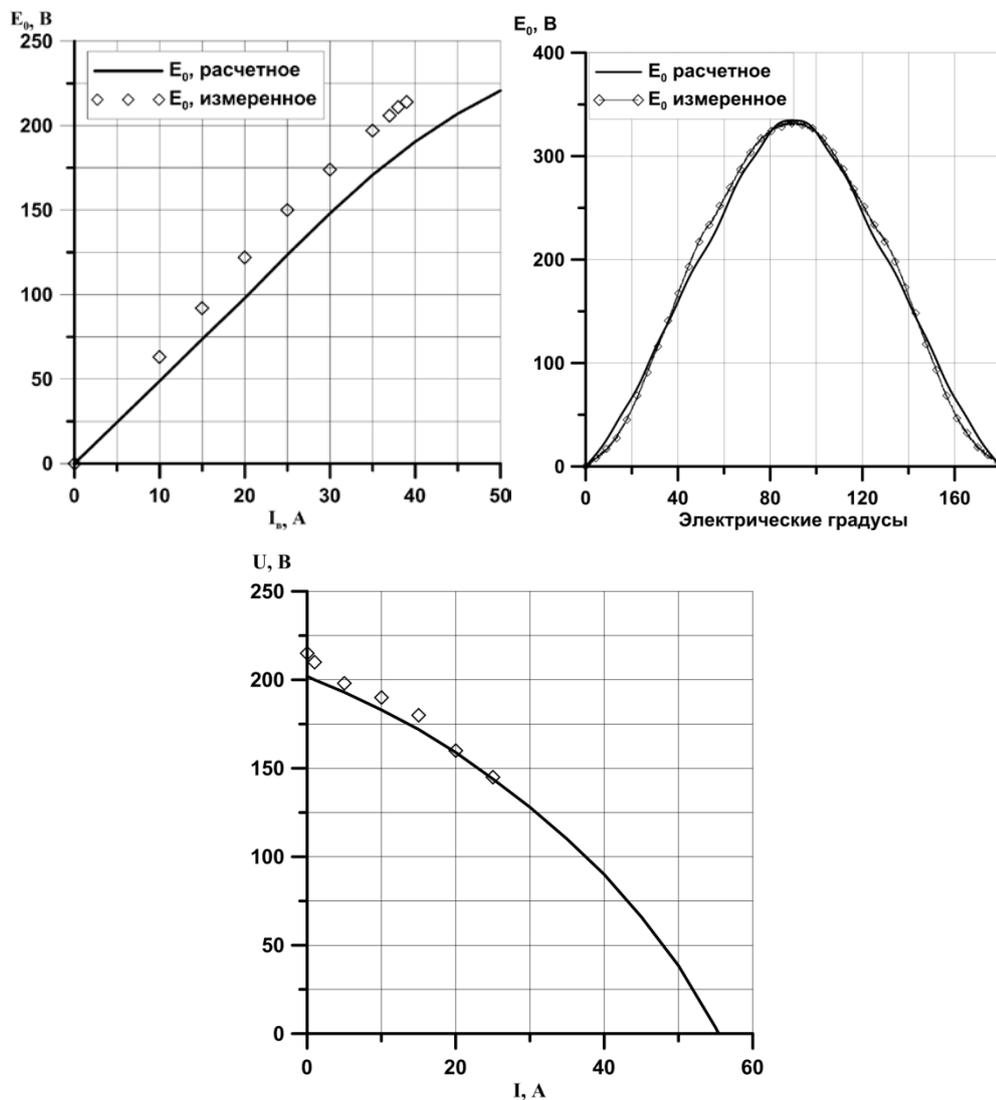


Рисунок 4.21 – Результаты испытаний полностью ВТСП электрической машины на холостом ходу

Характеристика холостого хода снята для тока возбуждения не превышающего номинальное значение 40А. Видно, что полученное значение ЭДС ХХ несколько выше, чем расчетное, что может быть связано с тем, что ферромагнитные участки оказались менее насыщенными, чем предполагалось в расчетах. Также видно, что при токе 40А характеристика начинает загибаться. Это свидетельствует о том, что магнитная система близка к насыщению и увеличение тока возбуждения более 50 А будет нерациональным, что также следует и из расчетов.

Кривая распределения ЭДС в воздушном зазоре близка к синусоидальной, что обусловлено отсутствием ферромагнитных зубцов на статоре, и также хорошо согласуется с расчетными данными.

При снятии внешней характеристики ток якоря увеличивался до значения 25 А. Работа ВТСП обмотки в переменном магнитном поле при протекании по ней переменного тока требует дополнительного исследования для установления предельных значений тока и частоты. Видно также, что полученные результаты хорошо согласуются с расчетными значениями.

Выводы по главе:

1. Приведено описание испытательного стенда для исследования ЭМП для БЭС/ПЭС.
2. Описана конструкция макетного образца полностью ВТСП электрической машины.
3. Получены результаты экспериментальных исследований макетного образца полностью ВТСП электрической машины, хорошо совпадающие с теоретическими данными. Это означает, что разработанная методика расчета подобных машин может быть использована при их проектировании и позволяет определить основные параметры машин с высокой точностью.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе получены следующие результаты:

1. Обзор данных по преимуществам более/полностью электрифицированных самолетов и ПЭС показывает, что при их создании возможно снижение полной взлетной массы, эксплуатационных расходов, времени технического обслуживания, а также увеличение топливной эффективности.

2. В настоящее время концепция ПЭС реализована только для малых летательных аппаратов, т.к. удельная энергия аккумуляторных батарей не позволяет реализовать мощные их силовые установки.

3. Обзор публикаций, посвященных созданию электрических машин для БЭС/ПЭС, показал, что в настоящее время коммерчески доступны электрические двигатели и генераторы с удельной мощностью не выше 5 кВт/кг при частоте вращения  $2500 \text{ мин}^{-1}$ .

4. Установлено, что созданные на сегодняшний день ВТСП электрические машины обладают удельной мощностью более 8 кВт/кг при высокой частоте вращения и охлаждении жидким азотом. Также отмечено, что созданием ВТСП двигателей и генераторов занимаются ведущие научные центры по всему миру.

5. Рассмотрены критические параметры ВТСП лент ведущих мировых производителей. На основе анализа характера полевой зависимости критического тока при различных температурах выбраны наиболее рациональные ВТСП ленты для использования в составе ВТСП электрических машин. При температуре жидкого азота (65К-77К) наиболее рациональным является использование ВТСП лент производства AMSC. При температуре жидкого водорода (20К) – лент производства Fujikura.

6. Рассмотрены картины распределения магнитного поля в активной зоне машины при наличии и отсутствии стальных сердечников полюсов. Показано, что установка магнитных сердечников делает распределение магнитной индукции в области ВТСП катушек неравномерным и увеличивает ее локальные значения.

Снизить влияние магнитного поля возбуждения на рабочий ток ВТСП катушек можно, увеличив немагнитные зазоры.

7. Проектирование ВТСП электрических машин без учета зависимости их удельной мощности от критических параметров сверхпроводников приводит к неверным результатам расчета, а также перерасходу дорогостоящей ленты.

8. На основе решений двумерных электродинамических задач получены аналитические соотношения для расчета двумерных магнитных полей в активной зоне ЭМП с ПМ.

9. Показано, что при увеличении числа пар полюсов, ЭДС холостого хода  $E_0$  убывает пропорционально  $\sim 1/p$ , а главное индуктивное сопротивление  $X_a$  пропорционально  $1/p^2$ .

10. Построенные аналитические решения двумерных электродинамических задач для определения магнитных полей и выходных параметров ЭМП с ПМ позволяют проводить количественные оценки выходных характеристик синхронной машины с учетом количества пар полюсов, размеров постоянных магнитов и режима работы ЭМП. И могут быть использованы при выборе предварительных размеров ЭМП с ПМ на этапе их эскизного проектирования.

11. Получено аналитическое решение задачи о распределении двумерных магнитных полей в активной зоне синхронной электрической машины с ВТСП ОВ и ОЯ и ферромагнитопроводом. Полученное аналитическое решение учитывает геометрию активной зоны машины, число пар полюсов, число фаз и параметры ВТСП обмоток.

12. На основе полученных решений о распределении магнитных полей найдены аналитические выражения для расчета основных параметров полностью ВТСП ОВ и ОЯ при наличии ферромагнитопровода в активной зоне машины.

13. На основе полученных аналитических решений выполнен пример расчета синхронного двигателя с ВТСП ОВ и ОЯ мощностью 12,5 кВт. Показано, что данная машина может обладать удельной мощностью более 10 кВт/кг при охлаждении жидким азотом.

14. Приведенная в данном разделе методика расчета основных параметров и главных размеров ВТСП ЭМП является первым этапом проектирования полностью ВТСП машин, т.к. аналитическая запись выражений для определения основных параметров электрической машины позволяет проводить их частичную оптимизацию, которая не требует существенных вычислительных мощностей.

15. Приведено описание испытательного стенда для исследования ЭМП для БЭС/ПЭС.

16. Описана конструкция макетного образца полностью ВТСП электрической машины.

17. Получены результаты экспериментальных исследований макетного образца полностью ВТСП электрической машины, хорошо совпадающие с теоретическими данными. Это означает, что разработанная методика расчета подобных машин может быть использована при их проектировании и позволяет определить основные параметры машин с высокой точностью.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тулинова Е.Е., Ковалев К.Л., Иванов Н.С., Ларионов А.Е. Обзор разработок полностью электрических самолётов. *Электричество*, 2016, №4, с. 15-25.
2. <http://board.sintezgaz.org.ua/elektrosamolet-yuneec-e430.html> (дата обращения 24.11.2015)
3. <http://www.dailytechinfo.org/space/365-antares-dlr-h2-pervyj-samolet-na-vodorodnyh.html> (дата обращения 24.11.2015)
4. <http://biznes-week.ru/565-taurus-g4-samyu-moschnyy-v-mire-elektricheskiy-samolet.html> (дата обращения 24.11.2015)
5. <http://www.dailytechinfo.org/space/3827-samolet-long-esa-stanovitsya-samym-bystrym-v-mire-elektricheskim-samoletom.html> (дата обращения 26.11.2015)
6. Первый полет самолета Solar Impulse. [photo-day.ru/pervyj-polet-samoleta-solar-impulse/](http://photo-day.ru/pervyj-polet-samoleta-solar-impulse/) (дата обращения 26.11.2015)
7. <http://geektimes.ru/post/241380/> (дата обращения 26.11.2015)
8. <http://www.dailytechinfo.org/space/5859-polnostyu-elektricheskiy-samolet-airbus-e-fan-vpervye-podnimaetsya-v-vozduh.html> (дата обращения 26.11.2015)
9. <https://naked-science.ru/article/tech/e-fan-electric-plane-makes-first-public-flight> (дата обращения 10.12.2015)
10. <http://zele.ru/novosti/avia-i-oruzhie/jobu-s2-9388/> (дата обращения 10.12.2015)
11. <http://topwar.ru/71521-nasa-ispytyvaet-neobychnoe-elektrokrylo-s-18-yu-dvigatelyami.html> (дата обращения 10.12.2015)
12. <http://ria.ru/science/20150322/1053862941.html#ixzz3fDkleouT> (дата обращения 10.12.2015)
13. The Lilium Jet. The world's first electric vertical take-off and landing jet. <https://lilium.com/> (дата обращения 10.12.2015)
14. <http://ecofriendly.ru/chistoe-nebo-s-elektrosamoletom-electra-one> (дата обращения 10.12.2015)

15. <http://www.novate.ru/blogs/130412/20516/> (дата обращения 10.12.2015)
16. Полностью электрический самолет АВФ-32НС. <http://naukasoft.ru/deyatelnost/polnostju-ehlektricheskii-samolet-avf-32ns/> (дата обращения 10.12.2015)
17. B-737-200 GE reveals major achievements in hybrid electric propulsion. <https://www.flightglobal.com/news/articles/ge-reveals-major-achievements-in-hybrid-electric-pro-440602/> (дата обращения 16.10.2018)
18. NASA's new X-plane and the future of electric aircraft. <https://techcrunch.com/2016/06/17/nasas-new-x-plane-and-the-future-of-electric-aircraft/> (дата обращения 16.10.2018)
19. Eviation Plans 2018 first Flight For Alice Electric Business Aircraft. <https://aviationvoice.com/eviation-plans-2018-first-flight-for-alice-electric-business-aircraft-2-201707041035/> (дата обращения 16.10.2018)
20. The E-Thrust concept with Rolls Royce. <http://company.airbus.com/responsibility/airbus-e-fan-the-future-of-electric-aircraft/technology-tutorial/E-Thrust.html> (дата обращения 16.10.2018)
21. The Ce-Liner: potentially emission-free operation in commercial air travel. <https://www.bauhaus-luftfahrt.net/en/topthema/ce-liner/> (дата обращения 16.10.2018)
22. Zunum Aero on how it will transform U.S. air travel with electric planes and regional airports by 2022. <https://venturebeat.com/2017/10/05/zunum-aero-outlines-how-it-will-transform-u-s-air-travel-with-electric-planes-and-regional-airports/> (дата обращения 16.10.2018)
23. <http://www.tipon.ru/index.php/outdoor/job/17384-futuristicheski-elektrosamolet-voltar> (дата обращения 21.05.2017)
24. НИЦ «Институт имени Н.Е. Жуковского» представит на МАКС-2017 макет демонстратора гибридно-электрической силовой установки для перспективного электрического самолета. <http://nrczh.ru/press/news/?ID=544> (дата обращения 16.10.2018)

25. P J Masson, G V Brown, D S Soban and C A Luongo «HTS machines as enabling technology for all-electric airborne vehicles» Superconductor Science and Technology, 20 (2007), p. 748–756
26. <http://www.launchpnt.com/portfolio/aerospace/propulsion-by-wire-technology> (дата обращения 16.10.2018)
27. <http://w3.siemens.co.uk/drives/uk/en/electric-motor/Pages/Default.aspx#> (дата обращения 16.10.2018)
28. [https://www.siemens.com/press/en/feature/2015/corporate/2015-03-electromotor.php?content\[\]=Corp#event-toc-3](https://www.siemens.com/press/en/feature/2015/corporate/2015-03-electromotor.php?content[]=Corp#event-toc-3) (дата обращения 16.10.2018)
29. <http://www.yasamotors.com/products/yasa-750/>
30. [http://emrax.com/wp-content/uploads/2017/10/user\\_manual\\_for\\_emrax\\_motors.pdf](http://emrax.com/wp-content/uploads/2017/10/user_manual_for_emrax_motors.pdf) (дата обращения 16.10.2018)
31. <https://politros.com/economy/64767> (дата обращения 16.10.2018)
32. Высоцкий В.С., Сытников В.Е., Илюшин К.В., Ковалев Л.К., Ковалев К.Л., Егошкина Л.А. Сверхпроводимость в электромеханике и электроэнергетике Электричество, № 7, 2005, стр. 31-40
33. Ковалев Л.К., Илюшкин К.В., Ковалев К.Л. и др. Новые типы сверхпроводниковых электрических машин. - Сверхпроводимость: исследования и разработки, 2002, №11
34. [http://www.wtec.org/loyola/scra/02\\_05.htm](http://www.wtec.org/loyola/scra/02_05.htm) (дата обращения 16.10.2018)
35. Ковалев Константин Львович. Методы расчета электрических машин с массивными высокотемпературными сверхпроводниками : Дис. ... д-ра техн. наук: 05.09.01 Москва, 2005 340 с. РГБ ОД, 71:06-5/71
36. <https://moluch.ru/archive/132/36765/> (дата обращения 16.10.2018)
37. D S Dezhin, K L Kovalev, L G Verzhbitskiy, S S Kozub and V P Firsov Design and Testing of 200 kW Synchronous Motor with 2G HTS Field Coils IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 87 (2017) 032007

38. K L Kovalev , V N Poltavets , R I Ilyasov , L G Verzhbitsky , S S Kozub 1 MVA HTS-2G Generator for Wind Turbines IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 87 (2017) 032018
39. P.J. Masson, G.V. Brawn, D.S. Soban, C.A. Luango. HTS Machines As Enabling Technology for All-Electric Airborh Vehicles NASA Glenn Research Center. 26.04.2007
40. P.J. Masson, J.E. Pienkov, C.A. Luango. Nest Generation More-Electric flircraft: A Potential Application for HTS Superconductors// Supercond Sci. Technjlgjy, 20 (2007) p 748- 756
41. Сверхпроводники для электроэнергетики. – РИЦ «Курчатовский институт». Информационный бюллетень. Том 5 выпуск 3 . июнь 2008г.
42. <http://www.energyland.info/analitic-show-9615> (дата обращения 16.10.2018)
43. <https://nplus1.ru/news/2017/08/26/core> (дата обращения 16.10.2018)
44. <https://nplus1.ru/news/2017/07/19/superconductivity> (дата обращения 16.10.2018)
45. Z. Junet al., “The study and test for 1MW high temperature superconducting motor,” Proc. of the Applied Superconductivity Conference, paper 4LB-03, 2012
46. A. Kimet al., “Performance analysis of a 10-kW superconducting synchronous generator,” IEEE Trans. Applied Superconductivity, vol. 25, no. 3, Article # 5202004, June 2015
47. Ковалев Л.К., Ковалев К.Л., Конеев С.М.-А., Пенкин В.Т., Полтавец В.Н., Ильясов Р.И., Дежин Д.С. Электрические машины и устройства на основе массивных высокотемпературных сверхпроводников. – М.: Физматлит, 2010 – 396 с.
48. Kovalev, K.L., Verzhbitsky, L.G., Kozub, S.S., Penkin, V.T., Larionov, A.E., Modestov, K.A., Ivanov, N.S., Tulinova, E.E., Dubensky, A.A. Brushless superconducting synchronous generator with claw-shaped poles and permanent

magnets. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Volume 26, Issue 3, April 2016, Article number 7405291, DOI: 10.1109/TASC.2016.2528995

49. Dezhin, D., Ivanov, N., Kovalev, K., Kobzeva, I., Semenihih, V.. System Approach of Usability of HTS Electrical Machines in Future Electric Aircraft. IEEE Transactions on Applied Superconductivity Volume 28, Issue 4, June 2018

50. <http://htsdb.ecs.vuw.ac.nz/> (дата обращения 16.10.2018)

51. Бут Д. А., «Основы электромеханики», Москва, изд-во МАИ, 1996, 468с.

52. Курбатов П.А., Аринчин С.А. Численный расчет электромагнитных полей. – М.: Энергоатомиздат, 1984 – 168 с.

53. Бухгольц Г. Расчет электрических и магнитных полей. – М.: ИЛ, 1961. – 712 с.

54. Ковалев Л.К., Ковалев К.Л., Тулинова Е.Е., Иванов Н.С. Многополюсные синхронные генераторы с постоянными магнитами для ветроэнергетических установок. Электричество. 2013, №8, с.2-8.

55. Иванов-Смоленский А.В. Электромагнитные силы и преобразование энергии в электрических машинах. – М.: Высшая школа, 1989. – 312 с.

56. Постников, И.М. Проектирование электрических машин/И.М.Постников. Киев: Гос. изд-во технической литературы УССР, 1952. 736 с.

57. Говорков В.А. Электрические и магнитные поля. Энергия, 3-е издание. 1968.

58. Ларионов С.А. Реактивные электродвигатели с объемными высокотемпературными сверхпроводниковыми элементами на роторе. Диссертация на соискание к.т.н., 2004 г.

59. П.И. Романовский Ряды Фурье М.: Физматгиз, 1961. — 304 с.