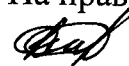


Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ
(национальный исследовательский университет)

МАИ

На правах рукописи



Дубенский Александр Андреевич

СВЕРХПРОВОДНИКОВЫЙ СИНХРОННЫЙ ГЕНЕРАТОР
С КОГТЕОБРАЗНЫМИ ПОЛЮСАМИ И ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ
ДЛЯ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

Специальность 05.09.01 – «Электромеханика и электрические аппараты»

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

д.т.н., проф. В. Т. Пенкин

Москва – 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	4
Глава 1. Анализ технических решений в области сверхпроводниковых электрических машин для систем электродвижения.....	15
1.1. Применение сверхпроводниковых материалов в электромеханических преобразователях.....	15
1.2. Характеристики токонесущих элементов на основе высокотемпературных сверхпроводников	17
1.3. Обзор сверхпроводниковых электрических машин для морского электродвижения.....	21
1.3.1. ВТСП-электродвигатели с цилиндрическим ротором для привода гребных винтов.....	21
1.3.2. Торцевые ВТСП-двигатели.....	24
1.3.3. ВТСП-генераторы	28
1.4. Кριοобеспечение сверхпроводниковых электрических машин.....	33
1.5. Анализ существующих конструктивных схем синхронных генераторов	35
1.6. Конструктивная схема сверхпроводникового синхронного генератора с комбинированным возбуждением.....	42
Выводы.....	45
Глава 2. Магнитные поля сверхпроводникового синхронного генератора с комбинированным возбуждением.....	46
Выводы.....	62
Глава 3. Конструкция и испытание маломасштабного образца генератора с комбинированным возбуждением	63
Выводы.....	67
Глава 4. Расчёт и конструкция макетного образца генератора с комбинированным возбуждением.....	68
4.1. Методика расчёта.....	68
4.2. Расчёт статора генератора.....	70

4.3. Расчёт ротора.....	77
4.4. Результаты моделирования магнитных полей.....	83
4.5. Конструкция генератора.....	84
4.6. Расчёт критического тока и сил в сверхпроводниковой обмотке возбуждения.....	87
4.7. Расчет индуктивности и запасённой энергии в сверхпроводниковой обмотке возбуждения.....	93
Выводы.....	95
Глава 5. Изготовление и испытания ВТСП-катушек обмотки возбуждения и их криостатов для макетного образца генератора.....	96
5.1. Изготовление круглых катушек обмотки возбуждения генератора из ВТСП-ленты второго поколения	96
5.2. Испытания катушек в погружном режиме охлаждения жидким азотом...98	
5.3. Характеристики катушек обмотки возбуждения в криостатах.....	100
5.4. Испытания катушек в прокачном режиме охлаждения жидким азотом..102	
Выводы.....	108
Глава 6. Испытания макетного образца генератора.....	109
6.1. Описание испытательного стенда.....	109
6.2. Результаты испытаний генератора.....	112
Выводы.....	116
Заключение.....	117
Список использованных источников.....	119

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Концепция развития систем электродвижения требует дальнейшего совершенствования существующего и создания принципиально нового электроэнергетического оборудования с улучшенными массогабаритными и энергетическими показателями. При этом повышение эффективности электрооборудования должно осуществляться с учетом возрастающих требований к энергосбережению, экологии и экономии материальных затрат. Решить указанные задачи возможно при использовании новых материалов и технологий, а также интенсивных систем охлаждения [1, 2]. Оба эти направления связаны с применением сверхпроводниковых технологий. После открытия высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) с температурой перехода выше 30 К в ведущих отечественных и зарубежных научных центрах резко возрос объем разработок нового электротехнического оборудования на основе ВТСП-материалов для применения как в стационарных установках, так и на подвижных объектах.

Электрические машины со сверхпроводящими обмотками в качестве электродвигателей и генераторов уже находят применение в промышленно-развитых странах (США, Германия, Япония, Франция, Корея, Австралия и др.). Так, известны разработки сверхпроводниковых электродвигателей для привода гребных винтов морских судов, двигатели для электромобилей, турбо- и гидрогенераторы, устройства для перемешивания металла в металлургии, экструдеры для протяжки металлических труб [1, 2].

Степень разработанности темы исследования. Разработки сверхпроводниковых электромеханических преобразователей в РФ и за рубежом ведутся с начала 60-х годов XX века. Впервые для нужд военно-морского флота в 1966 году английской фирмой «International Research Development Co.» был изготовлен сверхпроводниковый униполярный двигатель мощностью 37,5 кВт и

частотой вращения около 2000 мин^{-1} [3]. В АО «АКБ «Якорь» совместно с МАИ разработан и изготовлен бортовой авиационный синхронный генератор на основе низкотемпературных сверхпроводников (НТСП) мощностью 780 кВА. В США создан судовой сверхпроводниковый синхронный электродвигатель мощностью 36,5 МВт. В Германии разработан ВТСП-электродвигатель судового назначения мощностью 4 МВт и ВТСП-генератор мощностью 4 МВА. Разработанные конструктивные схемы обладают рядом недостатков, таких как громоздкая система криообеспечения (для НТСП-устройств), наличие вращающихся криостатов с ВТСП-обмотками и низкая частота вращения (для ВТСП-устройств). Разработанная в данной диссертации конструктивная схема лишена указанных недостатков.

Объект исследования – сверхпроводниковый синхронный генератор для систем электродвижения транспорта.

Предмет исследования – магнитные поля, электрические и механические процессы в сверхпроводниковом синхронном генераторе.

Цели и задачи работы. Целью работы является разработка и исследование сверхпроводникового синхронного генератора комбинированного возбуждения со стационарной ВТСП-обмоткой из ленты 2-го поколения.

Для решения указанной цели в работе решены следующие задачи:

- 1) анализ существующих технических решений в области создания сверхпроводниковых синхронных генераторов;
- 2) анализ современных сверхпроводящих материалов на основе ВТСП;
- 3) выбор рациональной конструктивной схемы ВТСП-генератора;
- 4) разработка конструкции синхронного ВТСП-генератора с когтеобразным ротором и комбинированным возбуждением от неподвижной обмотки из ВТСП-ленты второго поколения и постоянных магнитов на основе редкоземельных металлов (РЗМ) для систем электродвижения морских судов;

- 5) разработка методики поверочного расчета магнитной цепи ВТСП-генератора;
- 6) разработка рациональной конструкции катушек ВТСП-обмотки возбуждения генератора и рекомендаций по их проектированию.

Научная новизна заключается в следующем:

- разработана конструктивная схема синхронного генератора с когтеобразным ротором и комбинированным возбуждением, позволяющая повысить надёжность электрической машины благодаря применению стационарной ВТСП-обмотки возбуждения и цельнометаллического ротора с постоянными магнитами, защищённая патентом РФ на полезную модель;
- разработана методика поверочного расчёта магнитной цепи ВТСП-генератора;
- разработан рациональный способ изготовления катушек обмотки возбуждения генератора из ВТСП-ленты второго поколения.

Практическая значимость работы состоит в следующем:

- разработана конструкция ВТСП-генератора указанной конструктивной схемы;
- создана методика расчёта основных параметров ВТСП-генератора;
- разработан, изготовлен и испытан маломасштабный образец ВТСП-генератора;
- разработан, изготовлен и испытан макетный образец ВТСП-генератора мегаваттного уровня мощности;
- испытания созданных образцов ВТСП-генератора указанной конструктивной схемы показали преимущества предложенных конструктивных решений.

Методология и методы исследования. При решении поставленных задач в диссертационной работе использованы методы теории электротехники, электромеханики, теории магнитных цепей, а также методы математического моделирования и физический эксперимент.

Положения, выносимые на защиту:

- конструкция синхронного генератора с комбинированным возбуждением от постоянных магнитов и обмоток индуктора из ВТСП-лент второго поколения, защищенная патентом;
- методика поверочного расчета магнитной цепи ВТСП-генератора;
- результаты экспериментальных исследований маломасштабного образца ВТСП-генератора;
- макетный образец ВТСП-генератора мегаваттного уровня мощности и результаты его экспериментальных исследований.

Степень достоверности результатов определяется корректным использованием положений теории электрических цепей, теории магнитных цепей, применяемым математическим аппаратом, а также моделированием и экспериментальными данными, подтверждающим основные теоретические положения работы.

Апробация результатов. Результаты работы докладывались на следующих конференциях:

- Московской молодёжной научно-практической конференции «Инновации в авиации и космонавтике — 2012», «Инновации в авиации и космонавтике — 2014», «Инновации в авиации и космонавтике — 2015»;
- 12-й международной конференции «Авиация и космонавтика — 2013», 13-й международной конференции «Авиация и космонавтика — 2014»;
- Всероссийской научно-технической конференции «XI Научные чтения по авиации, посвященные памяти Н. Е. Жуковского»;
- III национальной конференции по прикладной сверхпроводимости НКПС-2015;
- 11-й европейской конференции по прикладной сверхпроводимости EUCAS-2015;

- XLII Международной молодёжной научной конференции «Гагаринские чтения — 2016».

Внедрение. Результаты диссертационной работы были использованы при выполнении составной части научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы по теме № 44640-03100 между АО «НИИЭМ» и МАИ в рамках государственного контракта № 12411.1400099.09.001 от 27.06.2012 г., заключенного между Министерством промышленности и торговли РФ и АО «НИИЭМ», на выполнение опытно-конструкторской работы «Разработка технологии создания высокотемпературного сверхпроводникового (ВТСП) электроэнергетического оборудования для корабельных энергетических установок», шифр «Сверхпроводимость» в рамках федеральной целевой программы № 1. Отдельные результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс кафедры № 310 МАИ.

Личный вклад автора состоит в следующем:

- разработана методика поверочного расчёта магнитной цепи сверхпроводниковых синхронных генераторов с когтеобразным ротором и комбинированным возбуждением для систем электродвижения транспортных средств, основанная на методах теории магнитных цепей;
- проведены выбор и расчёт параметров макетного образца ВТСП-генератора мегаваттного уровня мощности и моделирование его магнитных полей;
- проведена эскизная проработка конструкции ротора маломасштабного образца ВТСП-генератора и узлов макетного образца ВТСП-генератора;
- проведены экспериментальные исследования образцов ВТСП-генератора с когтеобразным ротором и комбинированным возбуждением.

По основным результатам диссертационной работы опубликованы 2 статьи в журналах, входящих в международную систему цитирования «Scopus», 3 статьи в журналах, входящих в перечень ВАК, получен патент РФ на полезную модель № 163830.

Благодарность. Автор выражает благодарность руководителям составной части научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы по теме № 44640-03100 Л. К. Ковалеву, К. Л. Ковалеву, научному руководителю В. Т. Пенкину, сотрудникам кафедры № 310 МАИ О. А. Гусарову, Д. С. Дежину, Л. А. Егошкиной, Б. С. Зечихину, Н. С. Иванову, Р. И. Ильясову, И. П. Колчановой, А. Е. Ларионову, К. А. Модестову, В. Н. Полтавцу, В. С. Семенихину, Е. Е. Тулиновой; сотрудникам АО «НИИЭМ» Н. М. Алексеевой, В. В. Бавыкину, Л. Г. Вержбицкому, И. К. Кондратюку, И. В. Кривенцову, М. Л. Кругловой, Н. Ф. Кузнецову, А. Н. Лукину, В. В. Нагаеву, Д. В. Русанову и их коллегам; сотрудникам ФГБУ «Институт физики высоких энергий Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ)» А. И. Агееву, И. В. Богданову, С. И. Зинченко, Е. М. Каштанову, С. С. Козубу, В. М. Смирнову, М. Н. Столярову, И. С. Терскому, А. Д. Харченко, В. И. Шувалову; сотруднику ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» (ГУАП) Е. Н. Андрееву, сотруднику ОАО «ВНИИКП» А. А. Носову.

Причины и основные этапы истории развития систем морского электродвижения. Необходимость применения электричества для движения морских судов вызвана следующими причинами.

Традиционные установки с прямой передачей мощности от тепловых двигателей на движители накладывают заметный отпечаток на архитектуру судна и компоновку его внутренних объёмов. Они имеют большие массу и габариты, требуют длинных валопроводов (вплоть до 40 % от длины корпуса). Возмущения со стороны движителя от волнения и других причин непосредственно передаются на двигатель, заметно ускоряя его износ. Большой интерес к созданию систем электродвижения надводных судов проявляют военные. Ни одну другую энергетическую установку нельзя сделать менее шумной, чем установку с электродвигателем [4].

Значительный вклад в общий шумовой «фон» корабля вносит гребной вал, жестко связанный через редуктор с двигателями. Для уменьшения этой составляющей применяются специальные муфты. Вибрация двигателей передается на обшивку корпуса, а она, в свою очередь, излучает колебания во внешнюю среду, что и является источником так называемого «структурного шума». Для его снижения механизмы устанавливаются на амортизаторы. В установках с полным электродвижением гребной вал никак не связан с главными двигателями, поскольку на всех ходовых режимах он вращается только электродвигателем. В «электрической» силовой установке генератор вместе с приводным двигателем можно разместить даже в надстройке, тем самым максимально удалив его и от наружной обшивки. Однако, на скоростях свыше 15-18 узлов электродвижение теряет преимущество бесшумности, поскольку основной составляющей подводного шума (на некотором удалении от корабля) становится шум от кавитации гребного винта [4].

Следующее достоинство системы электродвижения — его маневренность. С помощью электродвигателя легко менять частоту и направление вращения гребного вала, а, следовательно, и скорость и направление движения корабля. Поэтому силовые установки с электродвигателем уже давно используются на судах с повышенной маневренностью, таких как ледоколы, паромы, буксиры, плавкраны и т.п. Еще одним плюсом электродвижения может стать отказ от гребных валов [4].

Появление систем электродвижения на флоте стало возможным благодаря изобретению А. Вольты в 1799 г. источника постоянного электрического тока («вольтов столб») и Б. С. Якоби в 1836 г. двигателя постоянного тока, работающего от батареи гальванических элементов [5].

В 1838 г. Б.С. Якоби создал первый в мире электроход – катер с гребными колесами, которые приводились во вращение электродвигателем мощностью 1 л.с. с питанием от батареи гальванических элементов Вольты [5].

В 1854 г. инженеры А. Николаев и Н. Гилленшмидт разработали проект подводной лодки (ПЛ), гребной электродвигатель которой должен был получать электропитание по проводам от батареи гальванических элементов, размещенной на борту обеспечивающего судна [5].

В 1888 г. во Франции построена первая полнофункциональная подводная лодка «Жимнот» водоизмещением 31 т, где применялся электродвигатель мощностью 50 л.с. и новая аккумуляторная батарея для обеспечения надводного и подводного хода. Масса аккумуляторов составила 9,5 т, т.е. почти 30% от водоизмещения корабля, что сразу резко ограничило сферу распространения электроходов. На испытаниях, начавшихся в 1889 г., лодка показала в подводном положении скорость от 5 до 7 узлов при дальности плавания от 45 до 65 миль. В 1900 г. началось проектирование и строительство серии подводных лодок водоизмещением 270 т с аккумуляторной электроэнергетической установкой, обеспечивающей скорость подводного хода от 10 до 12 узлов и дальность надводного положения плавания при скорости 5 узлов до 175 миль [5].

Основным недостатком гребных электрических установок (ГЭУ) первых «электрических» ПЛ было то, что для зарядки батареи лодка должна была каждый раз возвращаться в базу. Кроме того, для изменения скорости подводного хода (частоты вращения винта) гребные электродвигатели требовали применения громоздких и ненадежных реостатов, что привело к изобретению винта с регулируемым шагом (ВРШ), впервые установленного на одной из первых серийных французских электрических подводных лодок («Морзе») [5].

В 1892 г. российский инженер С. К. Джевецкий (1843-1938) разработал проект миноносца водоизмещением около 550 т. В качестве двигателей надводного хода предусматривались 3 паровые турбины мощностью 2000 л.с. каждая, пар к которым поступал от котла с нефтяным отоплением. Ход в подводном положении должен был обеспечивать гребной электродвигатель с питанием от аккумуляторной батареи. Проект впервые предусматривал

подзарядку аккумуляторных батарей от гребного электродвигателя, работающего в генераторном режиме при ходе корабля [5].

Во второй половине XX века типовые схемы электродвижения стали широко применяться на ледоколах, судах ледового плавания, буровых судах, кабелеукладчиках и пассажирских судах. В порядке наработки опыта эксплуатации разработаны транспортные и рыболовные суда с ГЭУ. Но двойное преобразование химической энергии топлива в механическую, а затем в электрическую существенно ограничило область распространения ГЭУ. Их дальнейшее развитие оказалось связанным с применением в составе ядерных энергетических установок (ЯЭУ) кораблей, судов и подводных лодок [5].

В 1966 г. впервые для военно-морского флота английской фирмой «International Research Development Co» был изготовлен сверхпроводниковый униполярный двигатель мощностью 37,5 кВт и частотой вращения $33,4 \text{ сек}^{-1}$ [3, 6, 7].

Немаловажным преимуществом современных систем электродвижения стало то, что использование электрической передачи позволяет использовать в ГЭУ переменного тока с частотными преобразователями принципиально различные тепловые машины, что значительно увеличивает маневренность судна. После 1 ноября 2000 г. такие системы получили наименование «IEP» (Integrated Electric Propulsion – интегрированные системы электродвижения) [5].

Начиная с 1992 г. в качестве гребных электродвигателей (ГЭД) начали широко применяться винто-рулевые колонки (ВРК). Они характеризуются тем, что ГЭД размещен в подводной гондоле с высокими гидродинамическими свойствами. Типовые ВРК строятся либо с одним упорным, либо с двумя соосными (тяговым и упорным) винтами. В России наибольшее распространение получили финские системы «Азипод» (Azipod – azimuthing podded propulsion system) с одним упорным винтом и ГЭД мощностью от 1,5 до 4,5 МВт. Главными достоинствами ВРК являются: возможность разворота гондолы в горизонтальной плоскости на 360° , т.е. реверс направления вращения винта на полной мощности;

сверхкороткий валопровод и возможность работы винта фиксированного шага с низкой частотой вращения. ВРК позволяют существенно уменьшить уровень шума и вибрации и установить электроэнергетическое оборудование в труднодоступных для размещения груза местах, что позволяет более рационально использовать объем судна. Наиболее эффективным источником электроэнергии для ВРК является сеть переменного тока, позволяющая не только увеличить надежность и экономичность ГЭУ, но и использовать для привода винта асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором, не требующие обслуживания в эксплуатации. Для улучшения пусковых качеств асинхронного привода часто используются двухклеточные и глубокопазные роторы специального исполнения. Регулировку частоты вращения винта в системе «Azipod» осуществляют с помощью тиристорных преобразователей частоты. Применение ВРК значительно повышает маневренность корабля и позволяет даже крупным судам обходиться в портах без помощи буксиров. Кроме того, отсутствие гребных валов увеличивает полезный объем в корпусе корабля [4].

В последнее время ГЭУ стали широко применяться на круизных судах, паромов и судах внутреннего плавания, эксплуатируемых в «особых» районах. Например, балтийский паром «Тихо Браге» («Tycho Brahe»), построенный в 2001 г., с энергетической установкой из 4-х дизельных двигателей «Wartsila 6R32» с электрической передачей мощности на винт. Большой интерес к созданию систем электродвижения надводных судов проявляют на военно-морском флоте. Так в феврале 2006 г. во Франции вошел в строй первый большой, полностью «дизель-электрический», транспортно-десантный корабль «Мистраль» (Mistral L9013, дедейт 16500 т) с энергетической установкой из 4 главных дизель-генераторов переменного тока мощностью по 6,2 МВт и двумя ВРК с электродвигателями по 7 МВт [5].

В качестве перспективного направления развития электродвижения наибольший интерес представляет использование эффекта сверхпроводимости, позволяющего создать криогенные электромеханические установки (генераторы,

двигатели) с высокой удельной мощностью. Использование электрических машин сверхмалых габаритов позволит высвободить до 15-20 % полезного объёма транспортных судов дедвейтом в 5 – 10 тысяч тонн [6]. Так, к настоящему времени в США создан судовой сверхпроводниковый синхронный электродвигатель мощностью 36,5 МВт, масса которого составляет 75 т, что в три раза меньше, чем у двигателя традиционного исполнения [8, 9].

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ В ОБЛАСТИ СВЕРХПРОВОДНИКОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ДЛЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОДВИЖЕНИЯ

1.1 Применение сверхпроводниковых материалов в электромеханических преобразователях

Использование современных сверхпроводников в электромеханических преобразователях связано со следующими физическими свойствами сверхпроводников [8, 10]:

- отсутствие сопротивления протекающему электрическому постоянному току;
- диамагнетизм (эффект Мейсснера-Оксенфельда);
- способность захватывать магнитный поток при переходе в магнитном поле из резистивного состояния в сверхпроводящее, позволяющая формировать криомагниты, аналогичные постоянным магнитам, с индукцией от 3 до 12 Тл;
- гистерезисные потери при перемагничивании.

Известны разработки электрических машин с обмотками из низкотемпературных сверхпроводников (НТСП) на основе сплава $Nb-Ti$ или интерметаллического соединения Nb_3Sn при охлаждении жидким гелием, выполненные в период с 1965 по 2001 гг. как в России, так и за рубежом. Их основной недостаток — бóльшая сложность систем криостатирования и криообеспечения и более высокая стоимость хладагента, чем для ВТСП-устройств [8]. Охлаждение обмоток электрических машин жидким азотом имеет ряд преимуществ, например, невысокую стоимость жидкого азота по сравнению с гелием, простоту и малые потери при замкнутых циклах систем криостатирования,

большие мировые запасы азота (в атмосферном воздухе) [8]. Известны сверхпроводящие химические соединения (высокотемпературные сверхпроводники), работающие при температурах жидкого азота.

Применение композитных ВТСП-лент второго поколения в обмотках электрических машин позволяет увеличить плотность тока, индукцию магнитного поля, а также уменьшить электрические потери и массогабаритные показатели электрической машины при сохранении ее мощности.

В настоящее время основными для получения электрической энергии являются синхронные машины (рисунок 1.1 [11]). Поэтому исследования по созданию синхронных ВТСП-машин интенсивно ведутся в научных центрах многих стран мира. Машины большой мощности выполняются с ВТСП-обмотками или с замороженным магнитным потоком в объемные СП-элементы. Так как целью работы являлось создание СП-генератора мощностью около 1 МВА, то внимание уделялось разработкам электрических машин на основе СП-проводов.



Рисунок 1.1. Применение ВТСП-материалов в электромеханике

Сверхпроводниковые технологии перспективны для применения на флоте как гражданском, так и военном, так как сверхпроводниковые двигатели и генераторы отличаются улучшенными массоэнергетическими показателями [8]. Уровень вибраций и шумов также значительно ниже, что важно не только для

военного применения, но и для круизных лайнеров и рыболовецких судов. Отказ от механических редукторов и переход к прямому приводу гребного винта электродвигателем повышает КПД силовой установки, что также связано с отсутствием омических потерь в сверхпроводящих обмотках. Даже с учетом мощности, потребляемой оборудованием для криогенного обеспечения, КПД ВТСП-электродвигателей (см. табл. 1.1) выше, чем у традиционных. Однако основная польза от применения сверхпроводниковых технологий на флоте заключается в свободе конструирования судна. Дизельные двигатели или турбины, вращающие компактные ВТСП-генераторы, могут быть размещены без жесткой привязки к гребному валу. Вынос гребных электродвигателей в гондолы за пределы корпуса судна не только высвобождает места в кормовой части корабля, но и позволяет улучшить гидродинамику. Поворотные гондолы с гребными электродвигателями улучшают маневренность судна без применения дополнительных боковых подруливающих устройств.

1.2 Характеристики токонесущих элементов на основе высокотемпературных сверхпроводников

В настоящее время для практического применения в электромеханике используются следующие ВТСП-соединения: MgB_2 (критическая температура $T_c = 39$ К), иттриевая керамика (соединение $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$, (YBCO или Y-123), $T_c = 92...94$ К), висмутовая керамика (соединения $(Bi,Pb)_2Sr_2CaCu_2O_{10-\delta}$ (BSCCO или Bi-2212), $T_c = 85$ К и $(Bi,Pb)_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10-\delta}$ (Bi-2223), $T_c = 108$ К), таллиевая керамика $Ta-Ba-Sr-Ca-Cu-O$ (Ta-1223 и Ta-2223, $T_c \approx 130$ К), ртутная керамика $Hg-Ba-Ca-Cu-O$ ($T_c \approx 158$ К), гадолиниевая керамика (на основе $Gd-Ba-Cu-O$) [12, 13].

Для обмоток электрических машин применяются следующие токонесущие элементы на основе ВТСП.

Провода на основе MgB_2 . В настоящее время известны два основных лидера в производстве проводов из этого соединения: фирма «Hypertech» (США) и фирма «Columbus» (Италия). Производственные мощности «Hypertech» составляют 10 000 км/год при длинах единичных кусков до 6 км (в перспективе до 60 км), а «Columbus» - 5000 км/год при длине единичного куска до 20 км [12].

Токонесущие характеристики проводников обоих производителей близки: критическая плотность тока $J_c \approx (1,5...2) \cdot 10^5$ А/см² в магнитном поле 4 Тл при 4,2 К и $J_c \approx (2...3) \cdot 10^5$ А/см² в поле 1 Тл при 20 К. В зависимости от назначения конструкция проводников может быть различной. Обе фирмы производят около 10 типов проводов каждая с числом жил от 7 до 54 и объемной долей ВТСП-керамики от 8 до 22 %. Для генераторов применяют проводники круглого сечения с 24 или 30 жилами и объемной долей ВТСП-керамики 17% и 20 % [12].

Композитные ВТСП-ленты первого поколения (1G-ленты) на основе Bi-2223. Эти ленты изготавливаются по технологии «порошок в трубе» и имеют толщину от 0,1 до 0,4 мм и ширину от 2,0 до 6,0 мм. Эта же технология позволяет производить тонкие многослойные токонесущие ВТСП-элементы с большой площадью поверхности, которые перспективны для ряда электромеханических преобразователей [8, 14]. Типичная конструкция и размеры таких лент приведены на рисунке 1.2 [15].

Недостатками 1G-лент являются их высокая стоимость (из-за дороговизны серебра) и резкое уменьшение токонесущей способности в сильных магнитных полях при температурах выше 40 К. Поэтому для их использования в электротехнических устройствах необходимо применять криокулеры или жидкий неон, что лишает ВТСП своего главного преимущества – высокой критической температуры [8].

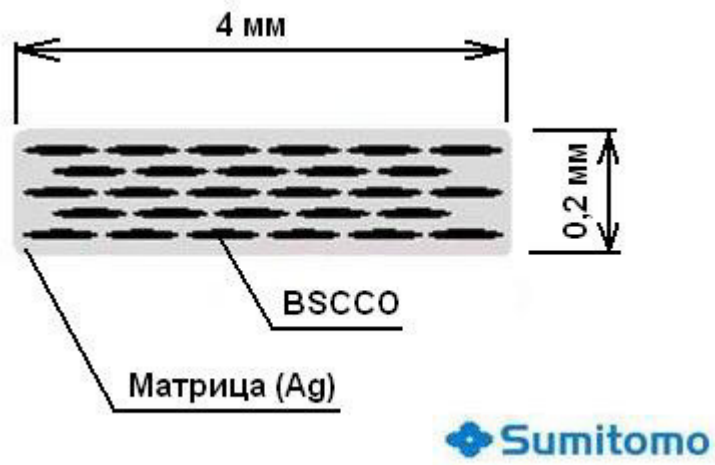


Рисунок 1.2. Типичная конструкция и размеры композитных лент ВТСП 1G фирмы «Sumitomo»

Композитные ВТСП-ленты второго поколения. Это так называемые «coated conductors» (ленты с покрытием). На гибкой подложке из никелевого сплава формируется буферный слой с кристаллической структурой, подобной структуре $Y-123$ (рисунок 1.3 [16]). На этот слой осаждается иттриевая керамика системы $Y-123$ и затем покрывается стабилизирующим металлом. В результате получается гибкая тонкая монокристаллическая СП-пленка на несущей ленте с токонесущей способностью до 3 MA/cm^2 при температуре жидкого азота. Конструктивная плотность тока, отнесенная ко всему поперечному сечению ленты, в несколько раз выше, чем в 1G-лентах. Они меньше подвержены влиянию внешнего магнитного поля и имеют значительно более высокие механические характеристики [8].

Работы по созданию промышленного производства ВТСП-лент 2-го поколения ведутся в США, Японии, Германии и др. Лента, выпущенная компанией «STI», имеет критический ток от 400 до 800 А/см при температуре 77 К, ширине ленты 4 мм [13].

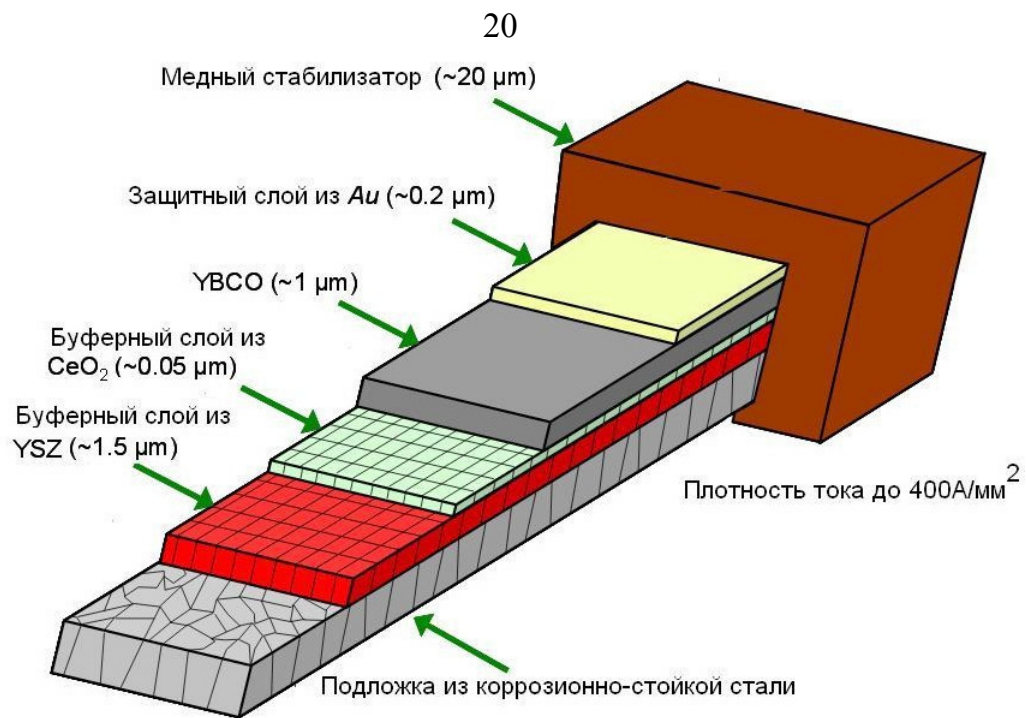


Рисунок 1.3. Структура ленты ВТСП 2-го поколения фирмы “Bruker”

ВТСП-соединения на основе $FeAs$. В феврале 2008 г. научная группа из Токийского технологического института, возглавляемая профессором Тосоно, сообщила об обнаружении сверхпроводимости в соединениях $LaFeAsO_{1-x}F_x$ при 26 К. Позднее оказалось, что это представитель нового семейства высокотемпературных сверхпроводников на основе железа, которые в литературе называют пниктидами [17].

Разрабатываются различные технологии изготовления таких проводов: «порошок в трубе» и на основе тонких пленок (аналогично лентам ВТСП-2). Постоянно открываются новые сверхпроводящие соединения на основе железа, но их критические параметры пока уступают уже известным соединениям с критической температурой до 40 К. По состоянию на 2015 г. диапазоне температур 20...30 К достигнуто превосходство над проводниками на основе MgB_2 [18].

1.3 Обзор сверхпроводниковых электрических машин для морского электродвижения

1.3.1 ВТСП-электродвигатели с цилиндрическим ротором для привода гребных винтов

Значительное внимание разработкам СП-машин для военно-морского флота уделяется в США. После успешных испытаний в 2004 г. судового ВТСП-электродвигателя мощностью 5 МВт и массой 23 т с обмоткой индуктора из 1G-ленты (рисунок 1.4 [9]) фирма «American Superconductors» (AMSC) совместно с «Northrop Grumman» разработала крупнейший в мире судовой ВТСП-электродвигатель мощностью 36,5 МВт, масса которого составила 75 т (рисунок 1.5 [8, 9], 1.6 [8]), то есть в три раза меньше массы двигателя традиционного исполнения.

Индуктор машины изготовлен на основе проводов Bi-2223 и работает при температурах около 30 К. В марте 2007 г. проект закончился успешными испытаниями двигателя на борту судна [8, 9].

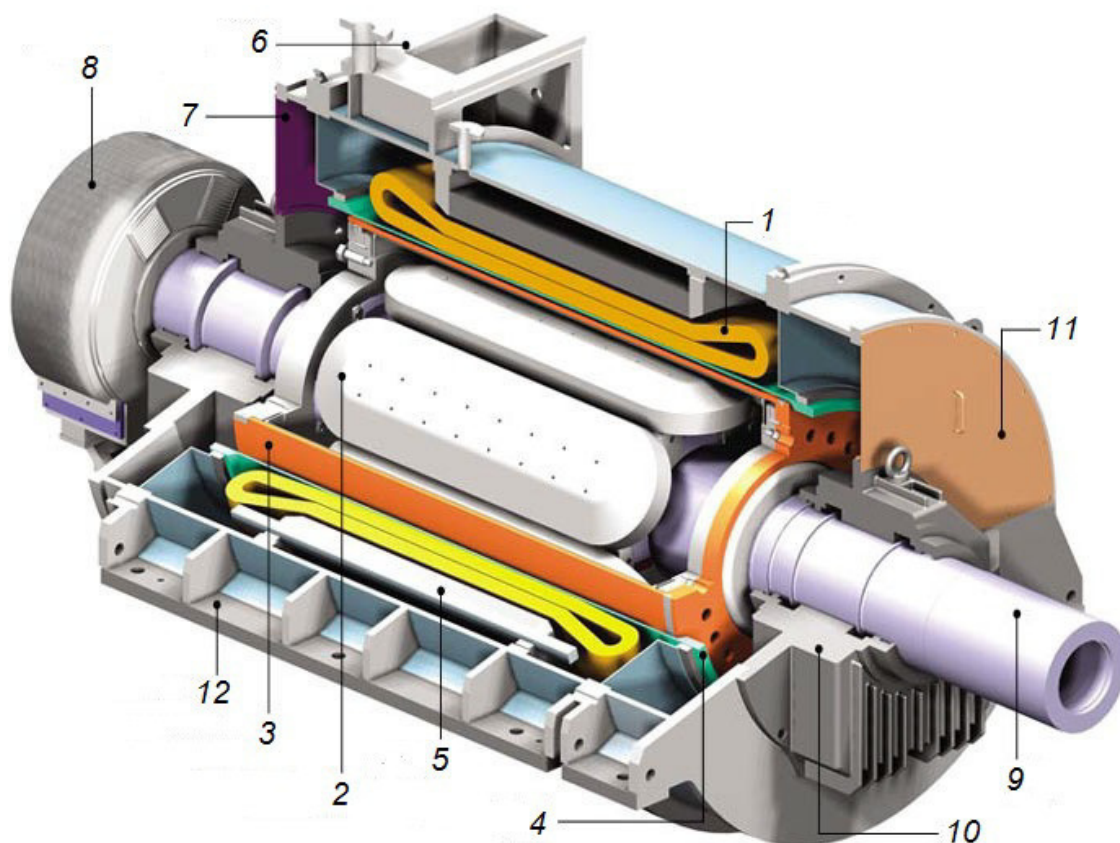


Рисунок 1.4. Судовой ВТСП-электродвигатель мощностью 5 МВт (фирма «American Superconductors», США): 1 — медная обмотка статора, 2 — ВТСП-обмотки ротора, 3 — вакуумная камера, 4 — экран, 5 — ярмо статора, 6 — коробка выводов, 7 — сосуд хладагента статора, 8 — бесконтактный возбудитель, 9 — вал, 10 — подшипник, 11 — корпус, 12 — станина.



Рисунок 1.5. Судовой ВТСП-электродвигатель мощностью 36,5 МВт («American Superconductors» и «Northrup Grumman», США)

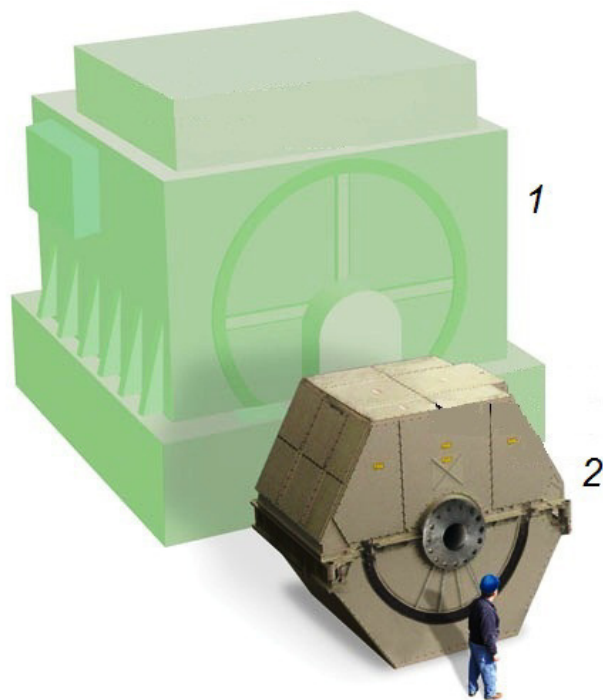
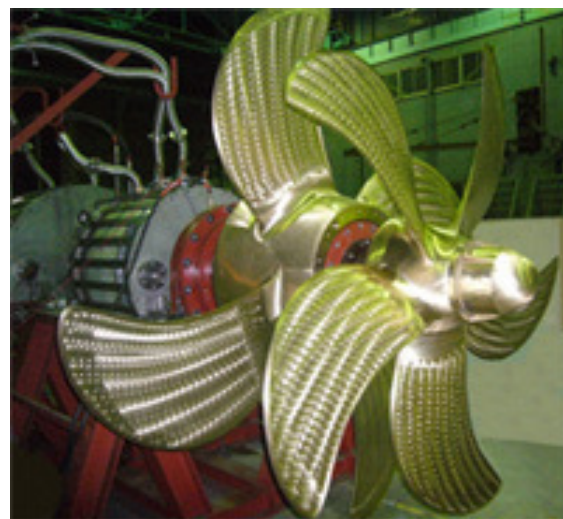


Рисунок 1.6. Сравнение традиционного судового электродвигателя (1) 36,5 МВт (масса от 180 до 250 т) и ВТСП-электродвигателя (2) 36,5 МВт (масса менее 75 т)

В Японии фирмой «Sumitomo» разработан судовой электродвигатель мощностью 365 кВт (рисунок 1.7 [19]).



а)



б)

Рисунок 1.7. ВТСП-электродвигатель мощностью 365 кВт фирмы «Sumitomo» (Япония) для морского электродвижения: а) - внешний вид; б) - двигатель со снятой оболочкой в системе из двух винтов

В Германии фирмой «Siemens» разработан ВТСП-электродвигатель судового назначения мощностью 4 МВт (рисунок 1.8 [20]).

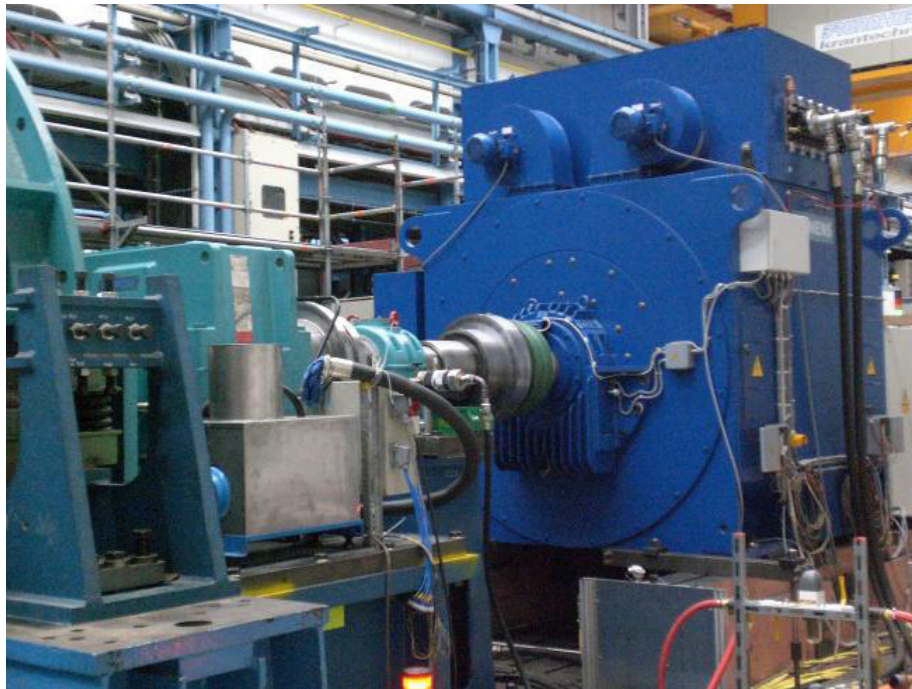


Рисунок 1.8. ВТСП-электродвигатель мощностью 4 МВт фирмы «Siemens» (Германия) для морского электродвижения

1.3.2 Торцевые ВТСП-двигатели

Наряду с электродвигателями цилиндрической конструкции для корабельных систем электродвижения перспективны торцевые ВТСП-электродвигатели [8, 14]. По принципу действия они могут быть гистерезисного или синхронного типа. Машины гистерезисного типа имеют криорезистивную или ВТСП-обмотку статора и ротор с объемными ВТСП-элементами. Машины синхронного типа имеют статор с ВТСП-обмоткой якоря и индуктор с возбуждением от постоянных магнитов или ВТСП-криомагнитов [21]. Возможна однодисковая и многодисковая конструкция ротора торцевых машин.

Конструкция дисковых бесконтактных машин имеет ряд существенных преимуществ, таких как повышенный момент и мощность на единицу объема и веса; возможность работы при малых оборотах с сохранением момента на валу; удобство встраивания, простота стыковки; повышенная перегрузочная способность; высокие регулировочные свойства; отсутствие техобслуживания, высокая надёжность, повышенный ресурс работы; увеличение жесткости конструкции; высокая степень защиты. Дисковая конструкция целесообразна при создании многополюсных низкооборотных синхронных машин. Исследования показали, что многодисковая конструкция обладает рядом достоинств по сравнению с обычными однодисковыми схемами [8].

Многодисковый гистерезисный ВТСП-двигатель с тороидальными статорными обмотками. Использование тороидальной обмотки статора в многодисковых конструкциях позволяет уменьшить индуктивное сопротивление рассеяния. Многодисковая схема позволяет увеличить объем ВТСП-керамики в активной зоне машины и, соответственно, ее мощность. Вертикальная конструкция позволяет объединить функции ротора и магнитного подшипника [8, 14].

На рисунке 1.9 [8] представлен многодисковый гистерезисный ВТСП-двигатель мощностью 1 кВт, разработанный и изготовленный в МАИ. Корпус двигателя состоит из нескольких цилиндрических колец из дюралевого сплава, стянутых стальными шпильками. Обмотки индуктора выполнены в виде тороидальных секций, уложенных в пазы кольцевого шихтованного сердечника статора. В дисковом роторе расположены плоские ВТСП-элементы из иттриевой керамики, выполненные в виде пластин.



Рисунок 1.9. Многодисковый гистерезисный ВТСП-двигатель (МАИ, РФ)

Многодисковые синхронные ВТСП-электродвигатели. Обмотка статора дисковой ВТСП-машины выполняется в виде катушек из ВТСП-ленты. Известны разработки таких машин в РФ (рисунок 1.10 [21]), Японии (рисунок 1.11 [21]) и США [21].

Активными элементами ротора таких машин могут быть объёмные ВТСП-материалы в виде пластин или дисков, являющихся криомагнитами, активируемыми магнитным полем статора. Они равномерно распределены по окружности в теле диска ротора. Их активация магнитным полем как криомагнитов возможна намагничиванием в сверхпроводящем состоянии или путем захвата внешнего поля в момент перехода из резистивного состояния.

Для магнитоэлектрического возбуждения можно также использовать постоянные высококоэрцитивные магниты (NdFeB , SmCo_5). Недостатки их применения связаны со сложной сборкой машины из-за наличия ферромагнитных материалов в её конструкции.

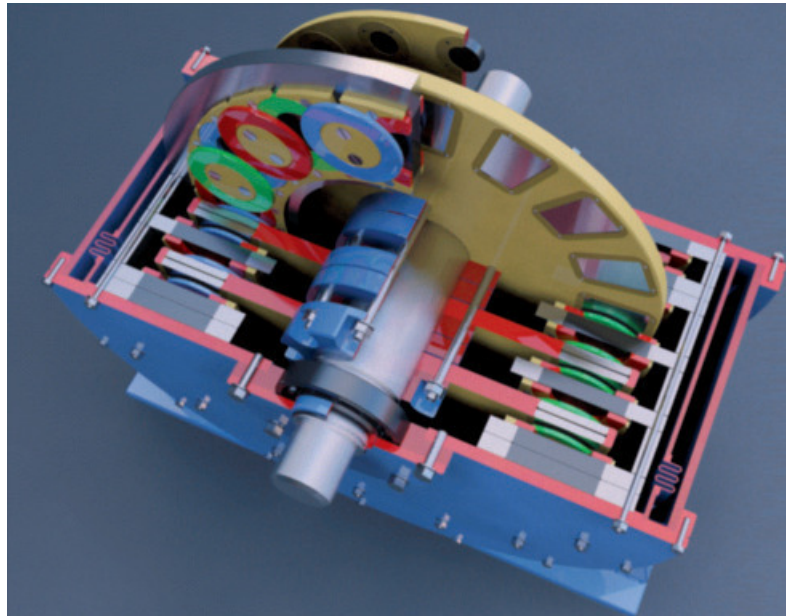


Рисунок 1.10. Модель многодискового синхронного двигателя мощностью 50 кВт (Санкт-Петербург, НИИ ИТЭЭ ГУАП)

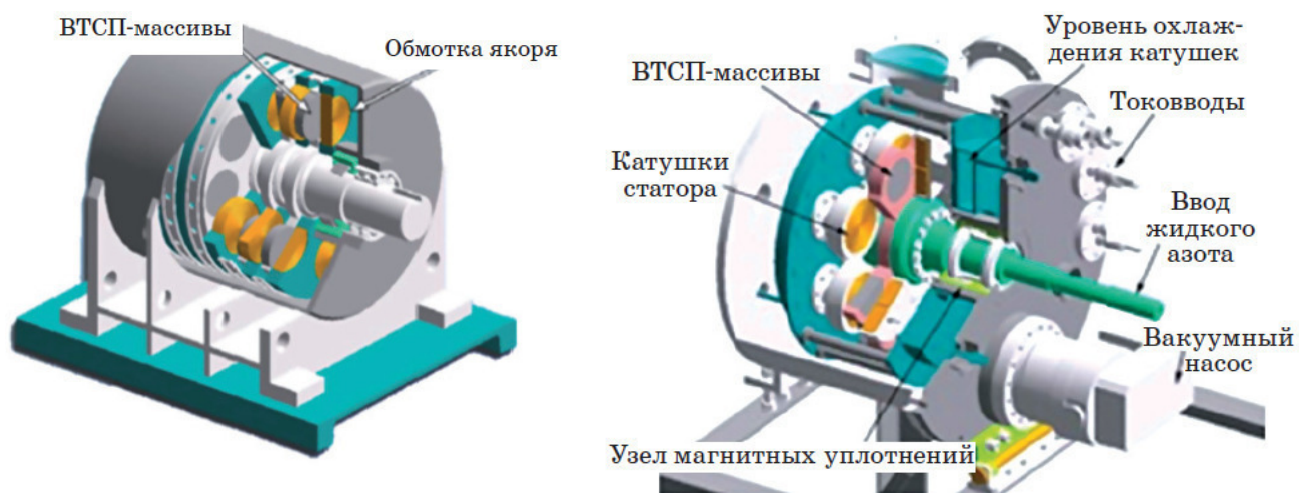


Рисунок 1.11. Дисковые машины с активацией ВТСП-криомагнитов магнитным полем обмотки якоря (фирма KINATO SEIKI Co., LTD, Япония)

1.3.3 ВТСП-генераторы

Габариты и мощность электрической машины связаны соотношением [22]:

$$D = \sqrt[3]{\frac{S}{k \cdot A \cdot B \cdot n \cdot \lambda}}, \quad (1.1)$$

где D – диаметр расточки статора (м), S – полная расчетная мощность машины (ВА), A – линейная нагрузка машины (А/м), B – магнитная индукция в зазоре (Тл), n – частота вращения ротора (мин⁻¹), λ – конструктивный коэффициент машины, k – коэффициент, учитывающий особенности обмоток и магнитной цепи.

Отсюда следует, что для уменьшения габаритов и массы машины при заданной мощности необходимо увеличивать частоту вращения вала, то есть генератор должен быть высокооборотным. Однако, ВТСП-обмотки возбуждения, находящиеся во вращающемся криостате и выполненные из современных токонесущих элементов как первого, так и второго поколения, не сохраняют сверхпроводящее состояние при высоких частотах вращения под действием центробежных сил, несмотря на пропитку, бандажирование и т. д.

Поэтому к настоящему времени число разработок ВТСП-генераторов судового назначения относительно невелико (таблица 1.1 [23, 11, 24]). Первоначально высокооборотные синхронные СП-генераторы с вращающимися обмотками возбуждения были реализованы на базе низкотемпературных сверхпроводников (НТСП). Так, в АО «АКБ «Якорь» совместно с МАИ был разработан и изготовлен бортовой авиационный синхронный НТСП-генератор мощностью 780 кВА (12000 мин⁻¹), представленный на рисунке 1.12 [8]. Но для обеспечения сверхпроводящего состояния НТСП-обмоток необходима сложная система охлаждения и вакуумная теплоизоляция, что снижает надёжность таких машин [25].

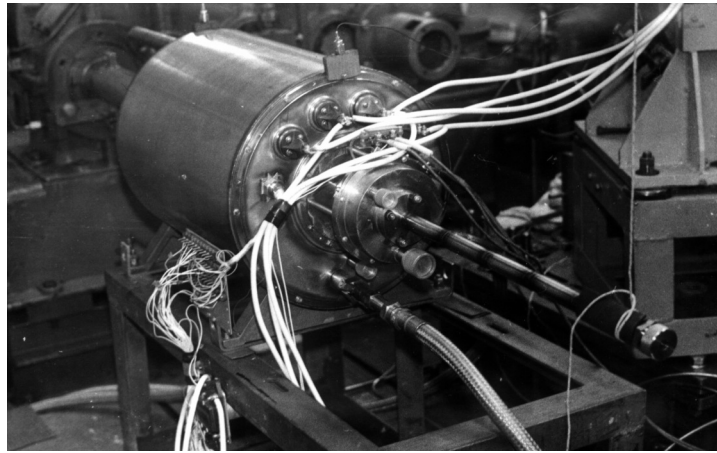


Рисунок 1.12. Бортовой синхронный НТСП-генератор мощностью 780 кВА на испытательном стенде (АО «АКБ «Якорь» совместно с МАИ)

На рисунке 1.13 представлен ВТСП-генератор фирмы «Siemens» мощностью 4 МВА при частоте вращения 3600 мин^{-1} , обмотки которого выполнены из ВТСП первого поколения. Генератор предназначен для круизных судов и больших моторных яхт [9].



Рисунок 1.13. Генератор мощностью 4 МВА с обмотками возбуждения из ВТСП 1G на испытательном стенде (фирма «Siemens», Германия)

Для создания высокооборотных ВТСП-генераторов разработчики ведут поиск конструктивных схем со стационарными обмотками. Примером такого решения является высокооборотный индукторный генератор с двухпакетной конструкцией якоря и стационарной ВТСП-обмоткой возбуждения,

расположенной между вращающимися магнитопроводящими частями ротора («General Electric», США), представленная на рисунках 1.14 и 1.15 [9].

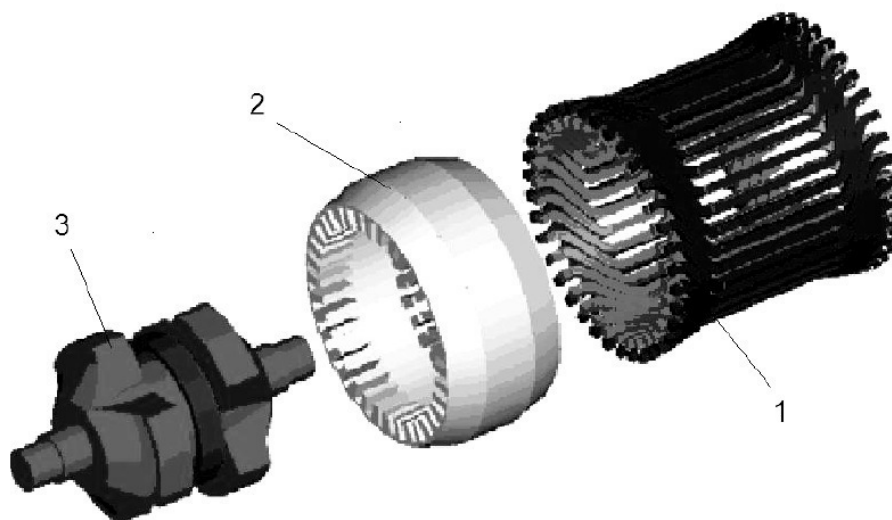


Рисунок 1.14. Конструкция индукторного генератора с неподвижной ВТСП-обмоткой возбуждения («General Electric», США): 1 — медная обмотка якоря, 2 — двухпакетный магнитопровод якоря, 3 — ротор

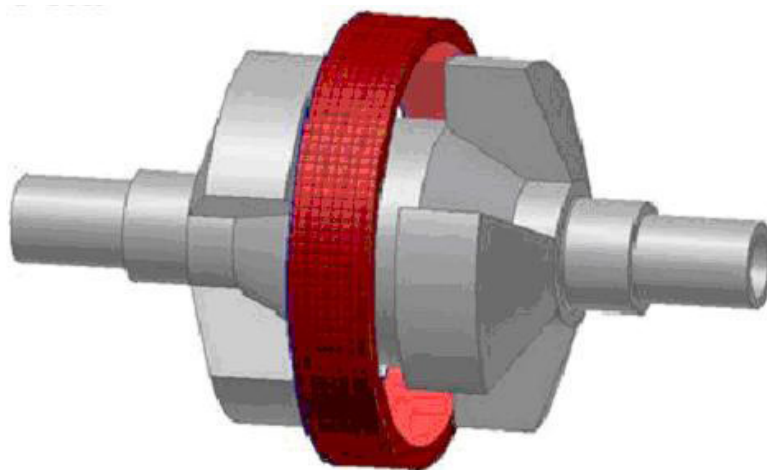


Рисунок 1.15. Ротор генератора с неподвижной ВТСП-обмоткой возбуждения («General Electric», США)

Таблица 1.1 Проекты крупных (от 100 кВА) сверхпроводниковых электрических машин (СПЭМ) с 2001 по 2017 гг.

Фирма	Страна	Год завершения	Тип изделия	Мощность, МВА	Частота вращения, мин ⁻¹	Масса, т	КПД, %	ВТСП-материал
AMSC	США	2001	Электромотор	3,8	1800	6,8	-	ВТСП-лента 1-го поколения
Siemens	Германия	2002	Генератор	0,4	1500	-	96,8	ВТСП-лента 1-го поколения
AMSC	США	2004	Судовой электродвигатель	5	230	-	-	ВТСП-лента 1-го поколения
Siemens	Германия	2004	Генератор	4	3600	7	98,7	ВТСП-лента 1-го поколения
AMSC	США	2005	СПЭМ общего назначения	8	1800	-	-	ВТСП-лента 1-го поколения
LEI	США	2006	Высокооборотный генератор	5	-	-	-	-
IHI Marine / Sumitomo Electric Industries	Япония	2007	Судовой электродвигатель	0,365	250	4,4	-	ВТСП-лента 1-го поколения
AMSC	США	2007	Судовой электродвигатель	36,5	120	менее 75	-	ВТСП-лента 1-го поколения
General Electric	США	2008	Униполярный электродвигатель	5	-	-	-	-
General Electric	США	2008	Авиационная СПЭМ	1,8	10000	-	98	ВТСП-лента 1-го поколения
Converteam / Zenergy / EON	Германия	2009	Гидрогенератор	1,25	214	-	более 98	ВТСП-лента 1-го поколения
Siemens	Германия	2010	Судовой электродвигатель	4	120	-	94,6	ВТСП-лента 1-го поколения
Converteam	Великобритания	2010	Гидрогенератор	1,25	-	-	-	-
IHI Marine / Sumitomo Electric Industries	Япония	2010	Судовой электродвигатель	2,5	-	-	-	-

Продолжение таблицы 1.1

Фирма	Страна	Год завершения	Тип изделия	Мощность, МВА	Частота вращения, мин ⁻¹	Масса, т	КПД, %	ВТСП-материал
Kawasaki	Япония	2010	Судовой электродвигатель	1	-	-	-	-
Converteam / Zenergy	Германия	2010	Ветрогенератор	8	12	-	-	ВТСП-лента 1-го поколения
DTU / Vestas	Дания	2010	Ветрогенератор	-	-	-	-	ВТСП-лента 1-го поколения
KHI	Япония	2010	СПЭМ морского назначения	1	190	-	98	ВТСП-лента 1-го поколения
KERI / Doosan	Корея	2011	Электродвигатель	5	200	-	-	ВТСП-лента 1-го поколения
Wuhan Institute	Китай	2011	СПЭМ морского назначения	1	500	-	-	ВТСП-лента 1-го поколения
AMSC / TECO Westinghouse	США	2012	Ветрогенератор	10	11	120	-	ВТСП-лента 1-го поколения
GE / Converteam	США	2012	Гидрогенератор	17	214			ВТСП-лента 1-го поколения
KHI	Япония	2012	СПЭМ морского назначения	3	160	-	98	ВТСП-лента 1-го поколения
IHI	Япония	2013	СПЭМ морского назначения	0,4	250	-	98	ВТСП-лента 1-го поколения
МАИ	РФ	2015	Двигатель для транспорта	0,2	1500	-	более 98	ВТСП-лента 2-го поколения
МАИ	РФ	2015	Ветрогенератор	1	600	-	96	ВТСП-лента 2-го поколения
МАИ	РФ	2015	Судовой электрогенератор	1	6000	-	96	ВТСП-лента 2-го поколения
Tecnalia / Acciona	Испания	2016	Опытный образец ветрогенератора	2	-	-	-	ВТСП-лента 2-го поколения
AFRL / LEI / HTS-110 / VUW	-	2017	Авиационная СПЭМ	2,5	20000	-	-	ВТСП-лента 1-го поколения

1.4 Криообеспечение сверхпроводниковых электрических машин

Криообеспечение СП-машин можно осуществить тремя способами:

- испарительное охлаждение жидкостью;
- криокулером за счёт теплопроводности;
- жидкостью в замкнутом цикле с использованием криорефрижератора.

Так как разработанный в диссертации генератор предназначен для морских систем электродвижения длительной эксплуатации, то первый способ криообеспечения нецелесообразен. Использование криокулера подразумевает наличие плотного контакта охлаждающей головки и охлаждаемого объекта (СП-обмотки), что достаточно сложно осуществить в условиях вибрации и качки.

Криорефрижератор может быть реализован с использованием циклов Гиффорда-МакМагона, Стирлинга, на импульсных трубах [26, 27]. Но эти циклы подразумевают использование поршневого компрессора возвратно-поступательного действия с ресурсом не более 20 тыс. ч. [27]. В связи с этим в последнее время большое внимание уделено криорефрижераторам, работающим по замкнутому циклу «Турбо-брайтон» [28]. Такие разработки ведутся и в России, в частности — в МАИ.

В МАИ на базе газового детандерного холодильного обратного цикла Брайтона с радиальными турбомашинами («Турбо-Брайтон») разработана, изготовлена и испытана автономная система криостатирования СКР-001 силовых ВТСП-обмоток генератора и электродвигателя, поддерживающая постоянную температуру жидкого азота в трактах криостатов обмоток ВТСП-генератора или электродвигателя при температурах 65...77 К. Холодопроизводительность системы — до 2,5 кВт при 65 К и при потребляемой электрической мощности до 25 кВт [28].

Отвод тепла в окружающую среду двухступенчатый. В первой ступени антифриз, циркулирующий в системе, отводит тепло от неона и компрессорных блоков в трех пластинчато-ребристых теплообменных аппаратах. Во второй ступени антифриз охлаждается воздухом в теплообменном аппарате с помощью вентиляторов [28].

Использование радиальных турбомашин на газодинамических подшипниках при малых габаритах и простой конструкции позволяет обеспечивать большую надежность и длительность работы криорефрижератора в сочетании с высокой термодинамической эффективностью. Неон позволяет в несколько раз сократить количество ступеней сжатия компрессора по сравнению с гелиевым контуром и значительно уменьшить стоимость компрессорного оборудования [28].

Для создания этой системы криообеспечения был разработан и изготовлен криорефрижератор КР 001 (рисунок 1.16 [28]), который использует газовый детандерный холодильный обратный цикл Брайтона с радиальными турбомашинами [28].

Особенности конструкции этого криорефрижератора [28]:

- рабочее тело в газовом контуре – неон;
- турбокомпрессоры и турбодетандер с газодинамическими подшипниками при числах оборотов от 40000 до 55000 мин⁻¹;
- охлаждение рабочего тела (неона) после компрессии происходит в компактных пластинчато-ребристых теплообменниках с помощью антифриза, а охлаждение антифриза - воздухом в теплообменном аппарате с помощью вентиляторов;
- циркуляция жидкого азота в замкнутом контуре обеспечивается оригинальным шнекоцентробежным погружным криогенным насосом АKN – 017 с номинальным значением массового расхода жидкого азота 170 г/с.

КПД электрических ВТСП-машин с учетом отбора мощности на криостатирование выше их аналогов с медными обмотками, так как КПД ВТСП-машин находится на уровне 96 % и более (см. таблицу 1.1). Так, для

электрической ВТСП-машины мощностью 1 МВт электрическая мощность системы криостатирования (при использовании системы СКР-001) равна 25 кВт, что составляет 2,5 % от мощности охлаждаемой машины [28].



Рисунок 1.16. Общий вид криорефрижератора КР 001 с холодопроизводительностью до 2,5 кВт

1.5 Анализ существующих конструктивных схем синхронных генераторов

Основным типом электрических машин, предназначенных для выработки электроэнергии переменного тока, является синхронная машина. Для создания ВТСП-генератора для транспортных систем среди существующих конструкций [29] можно выделить следующие типы синхронных генераторов (СГ): СГ традиционной конструкции с электромагнитным возбуждением (рисунок 1.17), СГ традиционной конструкции с возбуждением от постоянных магнитов (рисунок 1.18), индукторные СГ (рисунок 1.19) и СГ с когтеобразным ротором и с осевым магнитным потоком (рисунок 1.20). Путь прохождения магнитного потока в генераторе последнего типа сложен и подробнее рассматривается в главе 2, поэтому на рисунке 1.20 не показан.

Достоинства и недостатки этих типов машин приведены в таблице 1.2 [30].

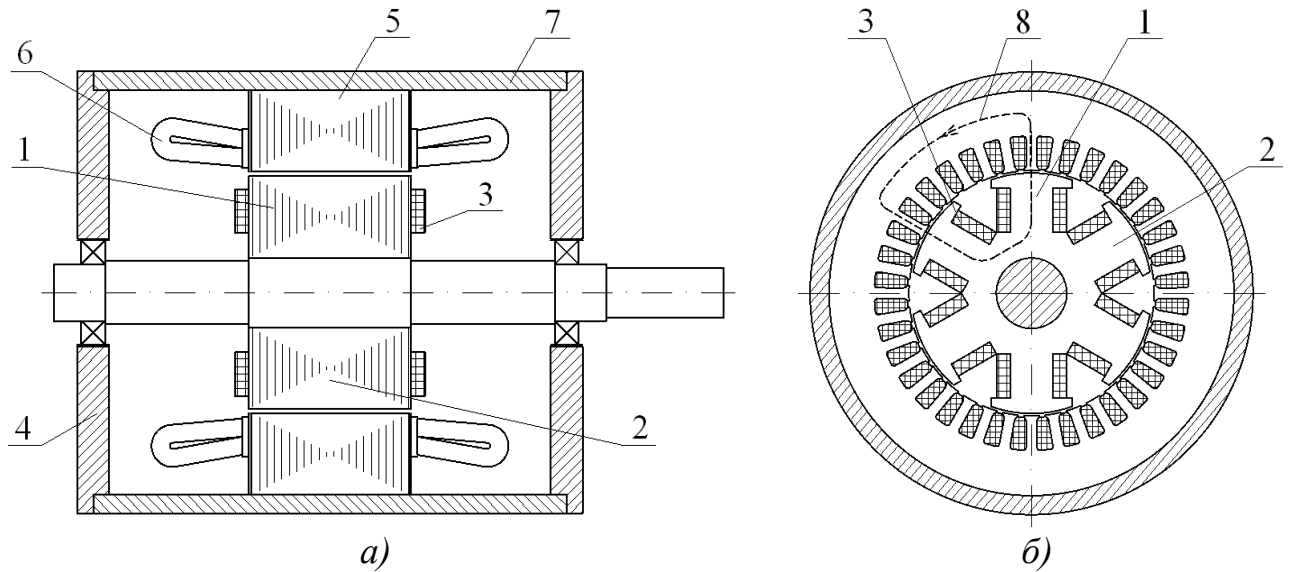


Рисунок 1.17. СГ традиционной конструкции с электромагнитным возбуждением: *а)* – продольное сечение, *б)* – центральное поперечное сечение, 1 — северный полюс, 2 — южный полюс, 3 — обмотка возбуждения, 4 — подшипниковый щит из немагнитопроводящего материала, 5 — магнитопровод статора, 6 — обмотка статора, 7 — корпус из немагнитопроводящего материала, 8 — ветвь основного магнитного потока.

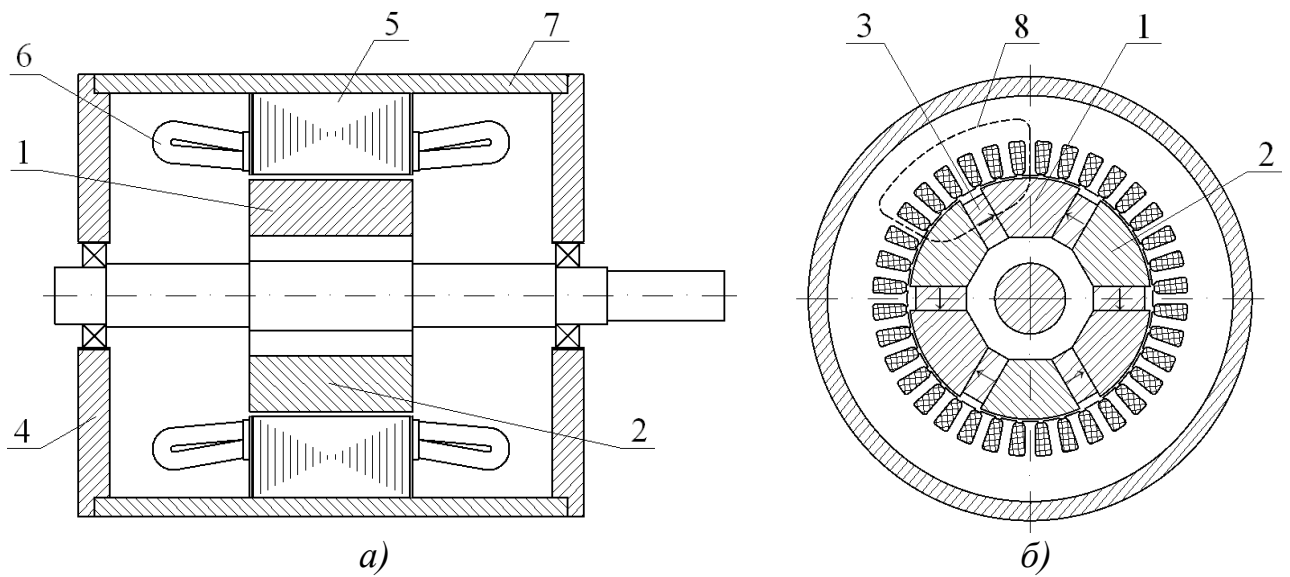


Рисунок 1.18. СГ традиционной конструкции с возбуждением от постоянных магнитов: *а)* – продольное сечение, *б)* – центральное поперечное сечение, 1 — северный полюс, 2 — южный полюс, 3 — постоянный магнит, 4 — подшипниковый щит из немагнитопроводящего материала, 5 — магнитопровод статора, 6 — обмотка статора, 7 — корпус из немагнитопроводящего материала, 8 — ветвь основного магнитного потока. Вал выполняется из немагнитопроводящего материала.

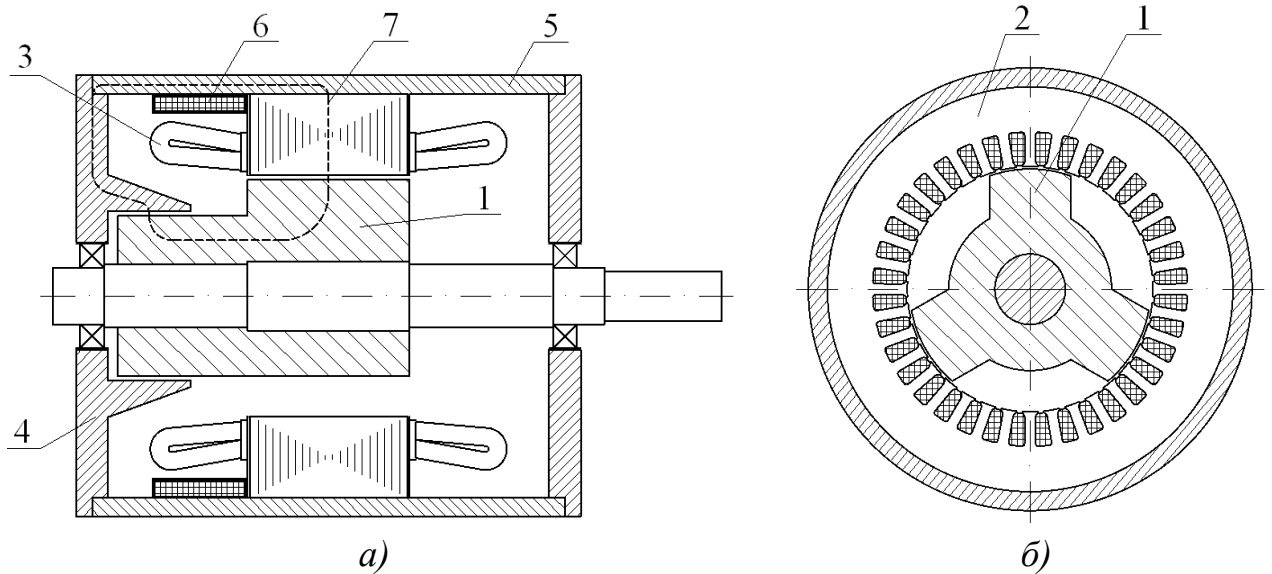


Рисунок 1.19. Индукторный СГ: *а)* – продольное сечение, *б)* – центральное поперечное сечение, 1 — цельнометаллический ротор, 2 — магнитопровод статора, 3 — обмотка статора, 4 — подшипниковый щит из магнитопроводящего материала, 5 — корпус из магнитопроводящего материала, 6 — круглая неподвижная обмотка возбуждения, 7 — ветвь основного магнитного потока.

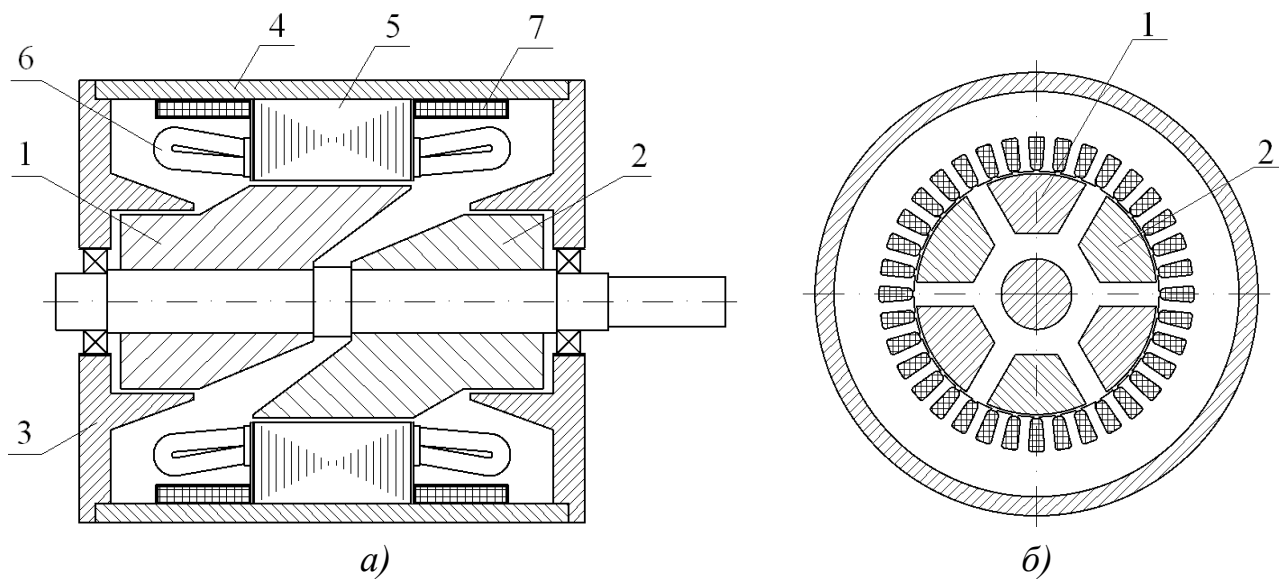


Рисунок 1.20. СГ с когтеобразным ротором и с осевым магнитным потоком: *а)* – продольное сечение, *б)* – центральное поперечное сечение, 1 — северный полюс, 2 — южный полюс, 3 — подшипниковый щит из магнитопроводящего материала, 4 — корпус из магнитопроводящего материала, 5 — магнитопровод статора, 6 — обмотка статора, 7 — круглая неподвижная обмотка возбуждения. Вал выполняется из немагнитопроводящего материала.

Таблица 1.2 Существующие типы синхронных генераторов

Тип машины	Достоинства	Недостатки
СГ традиционной конструкции с электромагнитным возбуждением	Простота конструкции	- наличие трущихся контактных поверхностей; - механические ограничения по окружной скорости до 80 м/с [29].
СГ традиционной конструкции с возбуждением от постоянных магнитов.	- отсутствие обмотки возбуждения; - возможность создания высоких значений магнитной индукции в зазоре благодаря новым высокоэнергетическим типам постоянных магнитов.	- являются нерегулируемыми из-за невозможности изменения потока возбуждения без применения специальных обмоток; - механические ограничения по окружной скорости до 50 м/с .
Индукторные СГ	- отсутствие обмоток на роторе; - высокооборотность (допустимая окружная скорость в существующих конструкциях - 150 м/с [31]).	Участие в преобразовании энергии только части магнитного потока машины (приблизительно 50%), а остальная часть потока является постоянной составляющей и загружает магнитопровод, что требует увеличения массы и габаритов машины [29].
СГ с когтеобразным ротором и с осевым магнитным потоком	- отсутствие обмоток на роторе; - жесткость конструкции ротора [29]; - высокооборотность (допустимая окружная скорость в существующих конструкциях - 350 м/с [29]).	Увеличенные поля рассеяния [29].

Обзор существующих конструкций синхронных генераторов (таблица 1.2) показывает, что перспективной является конструкция синхронного генератора с осевым магнитным потоком [32, 33], вариантом которой является синхронный генератор с когтеобразным ротором и внешнезамкнутым магнитным потоком [34]. Конструкция такого генератора приведена на рисунке 1.20, а на рисунке 1.21 - изображение шестиполусного когтеобразного ротора [34].

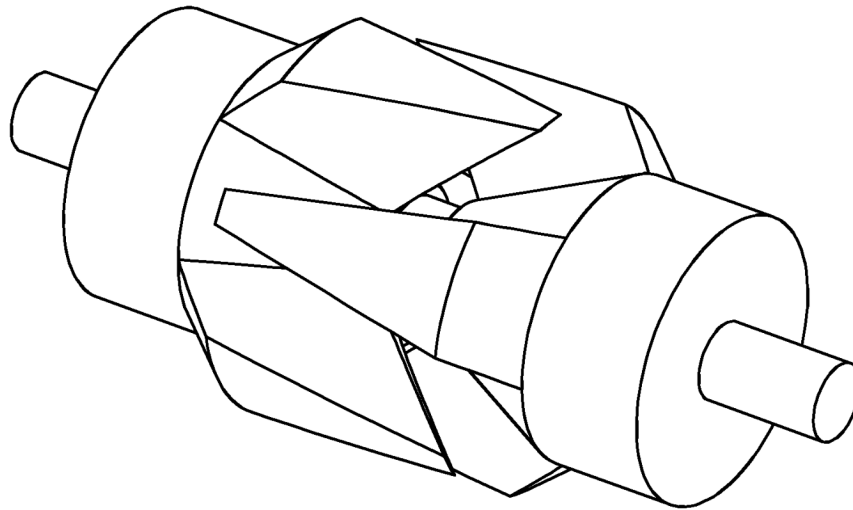


Рисунок 1.21. Общий вид шестиполюсного когтеобразного ротора

Обмотка возбуждения генератора состоит из двух круглых неподвижных катушек, расположенных возле подшипниковых щитов машины симметрично относительно пакета статора. Круглая форма катушек и их стационарное исполнение позволяет выполнить их сверхпроводниковыми из лент ВТСП 2-го поколения. Для охлаждения ВТСП-обмоток возможен вариант генератора погружного исполнения, когда вся машина помещается в общий криостат с жидким азотом или иным криоагентом (рис. 1.22 и 1.23). Такое исполнение позволяет заменить медные обмотки возбуждения на сверхпроводниковые без изменения конструкции машины. В [35] описана конструкция машины такого типа со сверхпроводниковыми катушками обмотки возбуждения, помещёнными в отдельные криостаты внутри машины. В дальнейшем при описании конструктивных схем генератора для упрощения рисунков криостаты показаны не будут. Предполагается, что катушки сверхпроводниковой обмотки возбуждения могут размещаться как в индивидуальных криостатах внутри машины, так и без них при погружном исполнении машины.

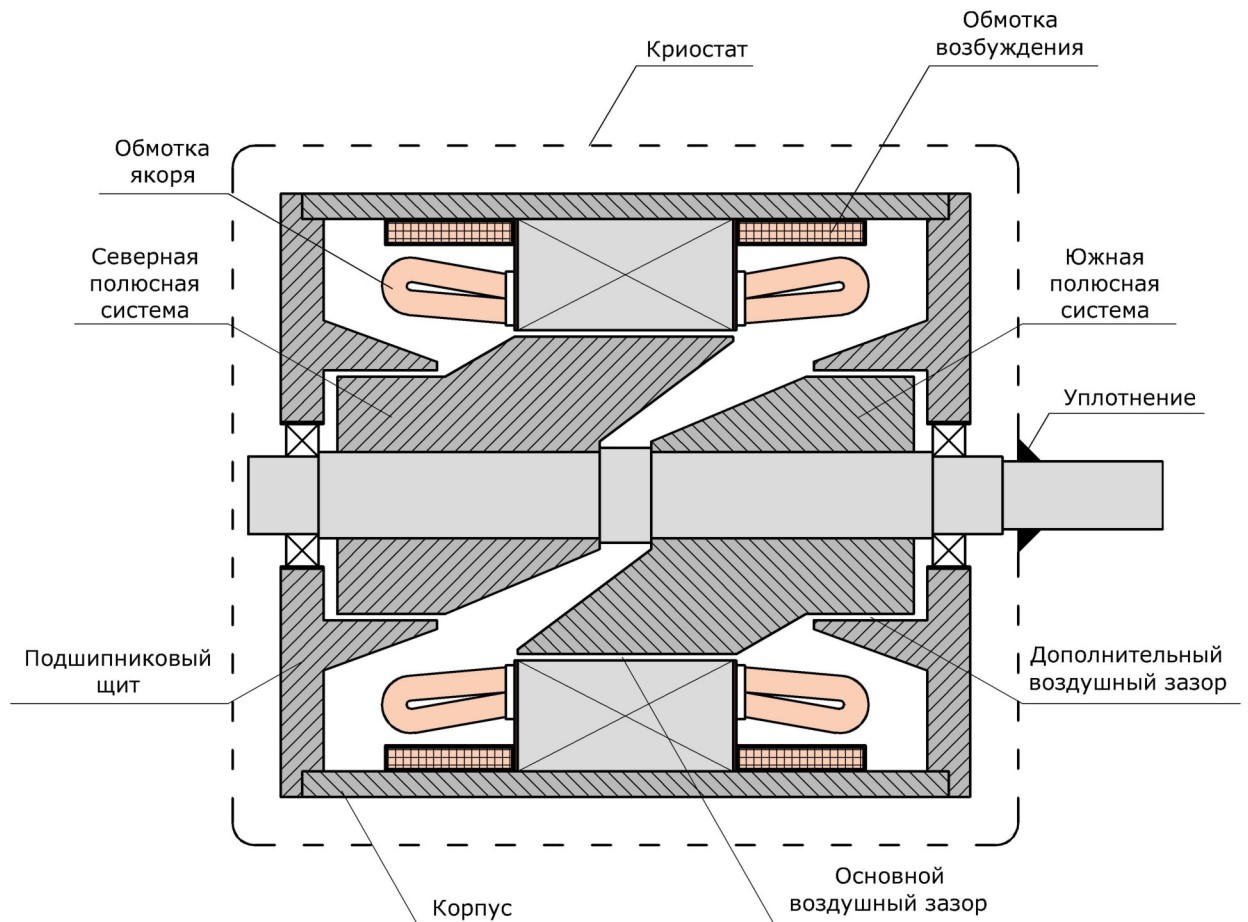


Рисунок 1.22. Конструктивная схема ВТСП-генератора с когтеобразными полюсами (продольное сечение)

Наличие ферромагнитного корпуса и цельнометаллического ферромагнитного ротора обуславливает высокую удельную массу машин с когтеобразными полюсами и внешнезамкнутым магнитным потоком. Поэтому такие машины тяжелее синхронных машин традиционной конструкции с вращающимися обмотками индуктора (рисунок 1.17) при одинаковых мощностях и частоте вращения.

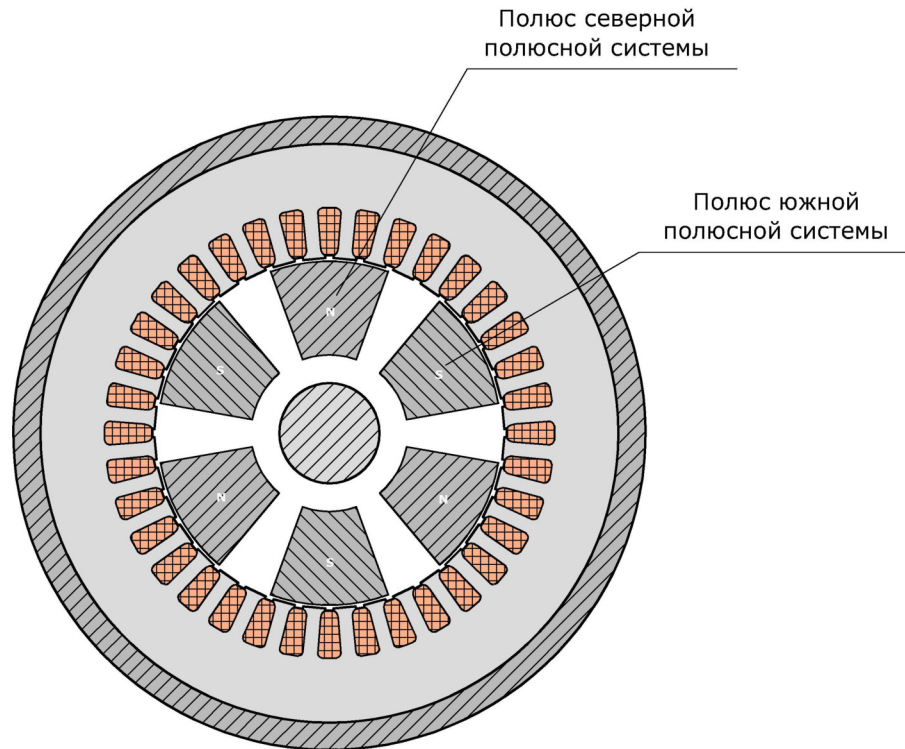


Рисунок 1.23. Конструктивная схема ВТСП генератора с когтеобразными полюсами (поперечное сечение, криостат не показан)

Синхронные генераторы с возбуждением от тангенциальных постоянных магнитов (таблица 1.2, рисунок 1.18) обладают высокими массоэнергетическими характеристиками, так как одним из их достоинств является высокое значение магнитной индукции в зазоре благодаря наличию высокоэнергетических постоянных магнитов. Высокая магнитная индукция в зазоре обеспечивает высокое значение ЭДС генератора и его выходной мощности. Недостаток такого генератора – невозможность регулирования магнитного потока возбуждения без применения специальных средств (например, обмоток, насыщающих ярмо статора) [31].

1.6 Конструктивная схема сверхпроводникового синхронного генератора с комбинированным возбуждением

Известны бесконтактные электрические машины, объединяющие в себе достоинства машин с постоянными магнитами и с электромагнитным возбуждением [36, 37]. Исходя из достоинств конструкций синхронного генератора с когтеобразными полюсами и синхронного генератора с тангенциальными магнитами, в МАИ была создана конструктивная схема синхронного ВТСП-генератора с когтеобразным ротором и комбинированным возбуждением (рисунки 1.24 и 1.25) [30]. Применение постоянных магнитов позволяет повысить ЭДС генератора и его выходную мощность (что отражено в главе 3), а также обеспечить работоспособность генератора при отсутствии тока возбуждения.

Конструктивная схема ВТСП-генератора с когтеобразным ротором и комбинированным возбуждением приведена на рисунке 1.25 [38]. В конструкцию машины входят когтеобразные полюсные системы северной (1) и южной (2) полярностей, тангенциально расположенные постоянные магниты (ПМ) (3), щиты (4) и корпус (5) из магнитомягкой стали, магнитопровод статора (6) и его обмотка (7), сверхпроводящая обмотка возбуждения (СПОВ) (8).

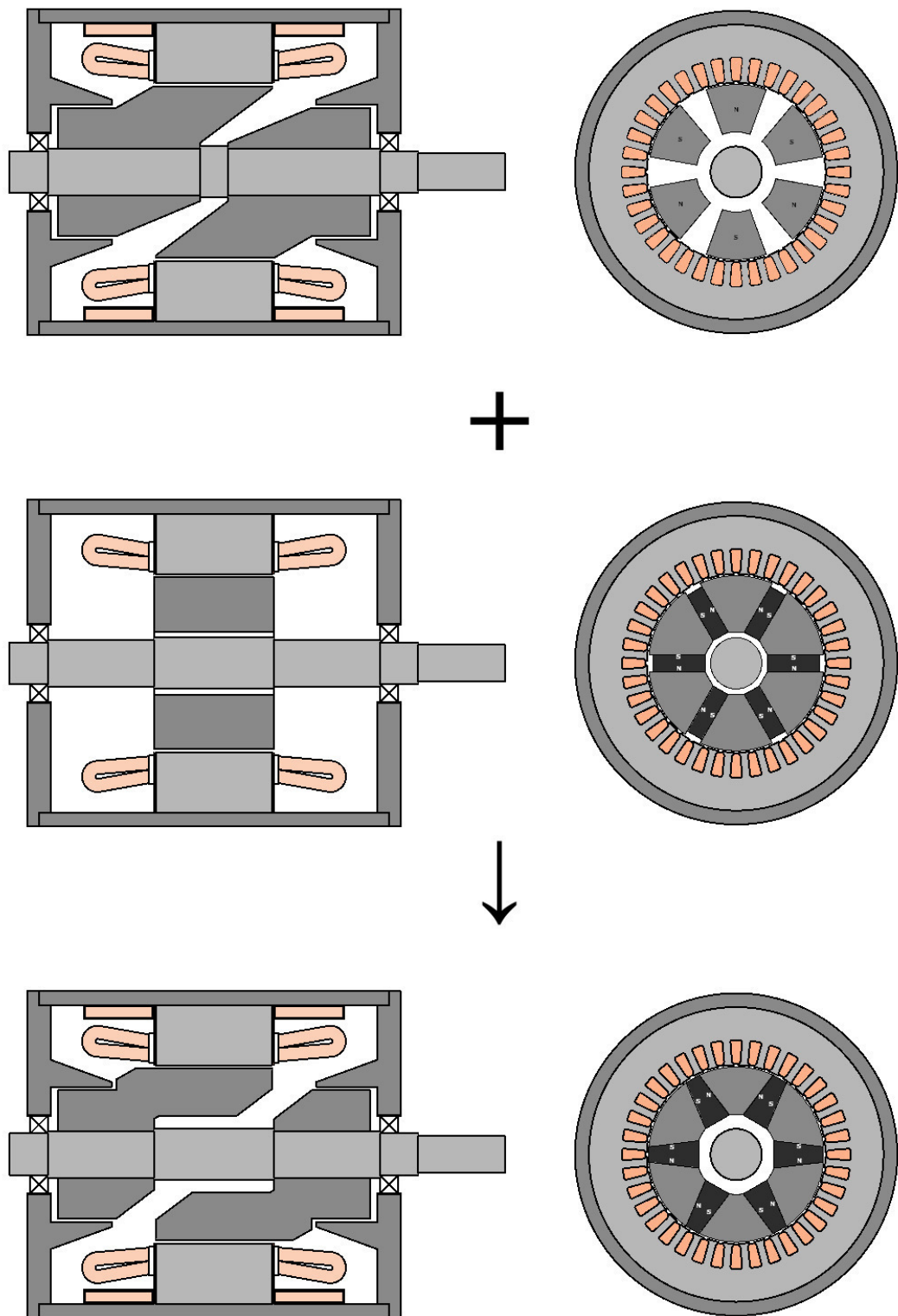


Рисунок 1.24. Создание конструктивной схемы ВТСП-генератора с когтеобразным ротором и комбинированным возбуждением

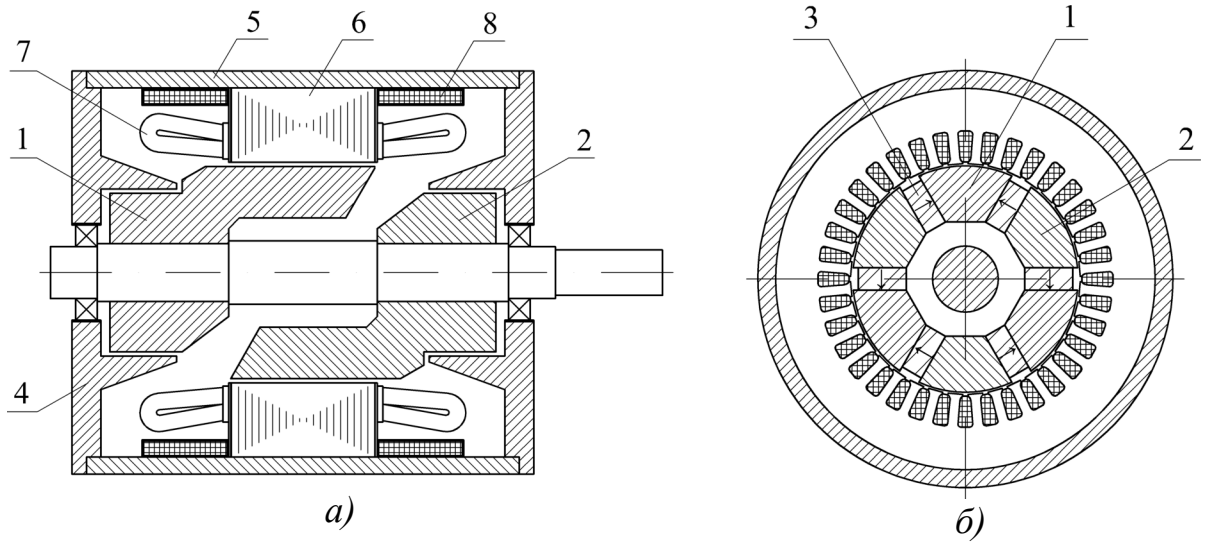


Рисунок 1.25. Конструктивная схема ВТСП-генератора с когтеобразным ротором и комбинированным возбуждением: *а)* – продольное сечение, *б)* – центральное поперечное сечение

Выводы

1. Электропривод гребных винтов с использованием электрических машин как традиционных типов, так и на основе ВТСП, позволяет исключить редуктор между первичным двигателем и гребным валом, что позволяет рационально размещать гребную установку в современной архитектуре корабля. ВТСП-электродвигатель обеспечивает высокие массоэнергетические показатели, а также низкие шум и вибрации, повышает маневренность судна.

2. Развитие технологий создания длинномерных композитных ВТСП-лент 2-го поколения на основе иттриевых керамик позволяет создавать электрические машины с системами криостатирования на основе жидкого азота, что уменьшает габариты СП-машин и существенно упрощает их конструкцию, повышает КПД и снижает их стоимостные показатели.

3. Применение ВТСП-двигателей и ВТСП-генераторов увеличивает КПД силовой установки даже с учётом энергозатрат на криостатирование сверхпроводниковых обмоток.

4. Обмотки постоянного тока из современных ВТСП-проводов 2-го поколения чувствительны к механическим нагрузкам и вибрациям, поэтому целесообразны к применению либо в тихоходных устройствах, либо должны быть стационарными.

5. Предложена конструктивная схема синхронного ВТСП-генератора с когтеобразным ротором и комбинированным возбуждением, позволяющая повысить надёжность генератора благодаря применению неподвижной ВТСП-обмотки возбуждения и цельнометаллического ротора с постоянными магнитами.

ГЛАВА 2. МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ СВЕРХПРОВОДНИКОВОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА С КОМБИНИРОВАННЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

Магнитный поток в основном воздушном зазоре создают СПОВ и тангенциально намагниченные постоянные магниты [39, 40]. В главе 3 показано, что применение постоянных магнитов на роторе совместно с обмоткой возбуждения позволяет увеличить магнитный поток в основном воздушном зазоре машины.

Расчётная модель, построенная на основе теории магнитных цепей для машины с когтеобразным ротором, СПОВ и тангенциальными ПМ показана на рисунках 2.1 и 2.2.

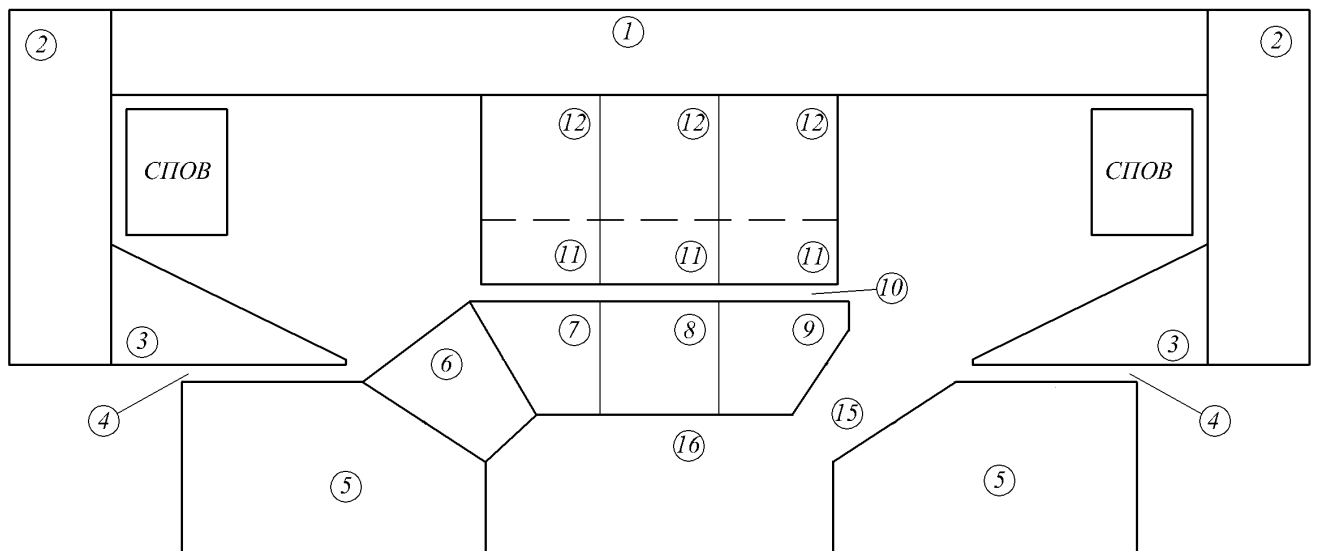


Рисунок 2.1. Расчётная модель синхронной машины с когтеобразным ротором, СПОВ и тангенциальными ПМ в продольном сечении

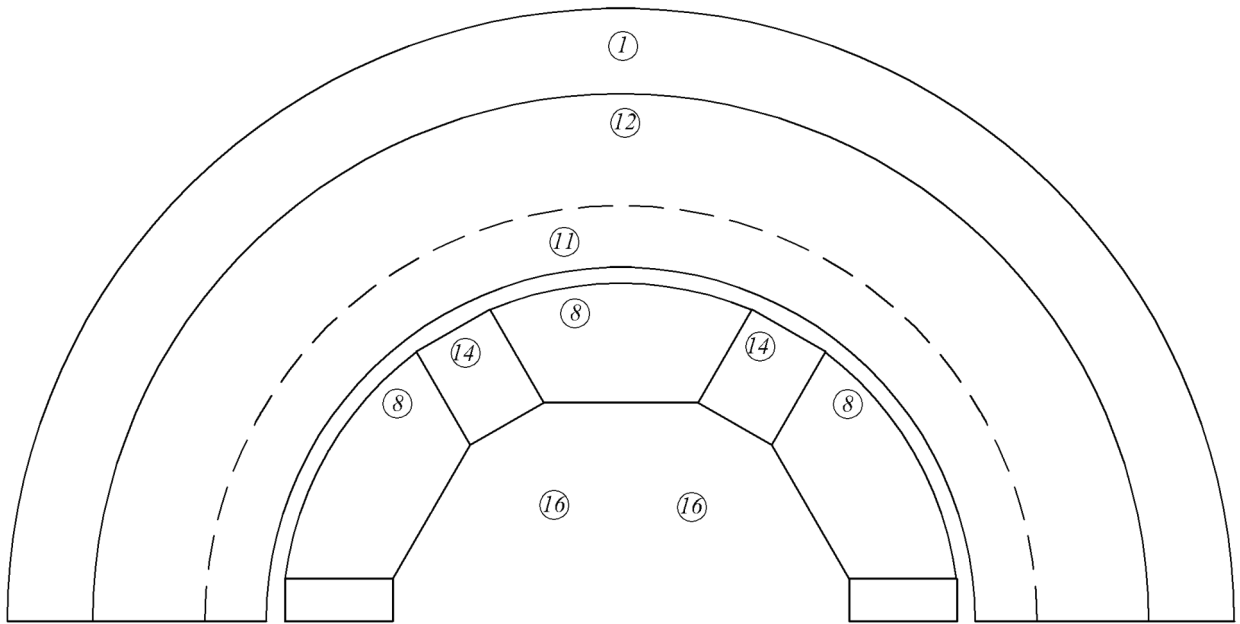


Рисунок 2.2. Расчётная модель синхронной машины с когтеобразным ротором, СПОВ и тангенциальными ПМ в центральном поперечном сечении

На рисунках 2.1 и 2.2 представлены следующие участки магнитной цепи: корпус (1), щиты (2), щитовые консоли (3), дополнительный зазор (4), полюсная втулка (5), основание полюса (6), начальная (7), средняя (8) и конечная (9) части полюса, основной зазор (10), зубцовая зона (11), ярмо статора (12), крайние (на рисунках не показаны) и средние (14) части тангенциальных ПМ, зазор «нормального» потока рассеяния (15), зазор междуполюсного потока рассеяния (16).

Из анализа магнитной цепи следует, что в машине можно выделить следующие магнитные потоки: *рабочий*, проходящий через основной воздушный зазор машины, и *потоки рассеяния*, не проходящие через основной зазор [29, 34]. Детальный анализ конструкции машины показывает, что в общем случае составляющими рабочего потока Φ_δ являются (рисунок 2.3): поток от СПОВ Φ_Π и поток от крайних и средней частей тангенциальных ПМ $\Phi_{\text{ТМк}}$ и $\Phi_{\text{ТМс}}$. Деление полюса и магнитов на три части необходимо для детального учета насыщения частей полюса, так как значения магнитной индукции в них оказываются различными. Поэтому рабочий поток Φ_δ состоит из составляющих $\Phi_{\delta 1}$, $\Phi_{\delta 2}$, $\Phi_{\delta 3}$. В обозначениях магнитных потоков малый индекс «к» обозначает поток в крайних

частях элементов магнитной цепи (полюса, магнита, ярма или корпуса), малый индекс «с» – поток в средних частях этих же элементов. Разбиение полюса три части для упрощения производится таким образом, чтобы осевые длины (и, соответственно, магнитные сопротивления) крайних и средних участков основного зазора, ярма и зубцовой зоны были равны между собой. Поток $\Phi_{\sigma P_K}$, $\Phi_{\sigma P_C}$ и $\Phi_{\sigma H}$ являются потоками рассеяния полюса.

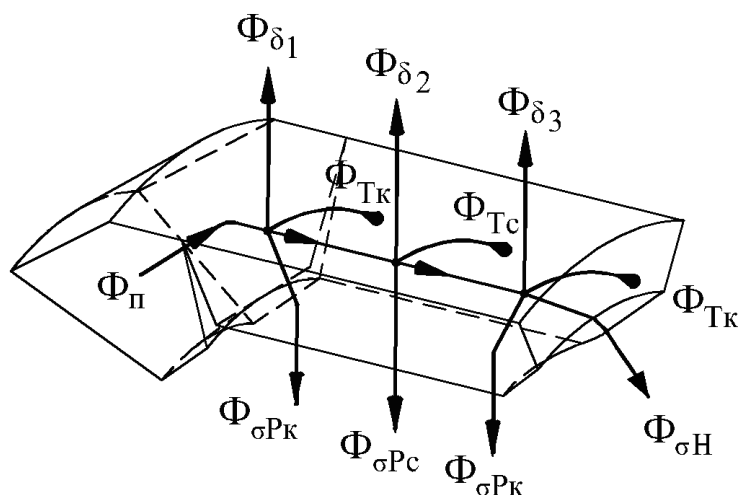
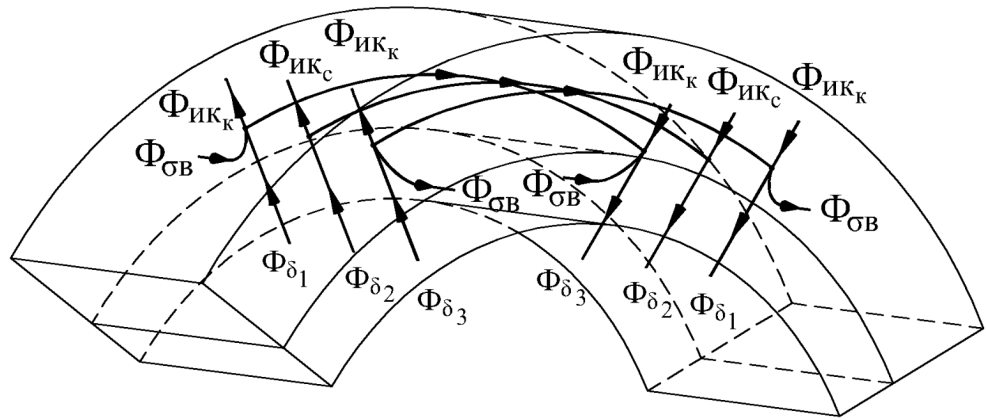


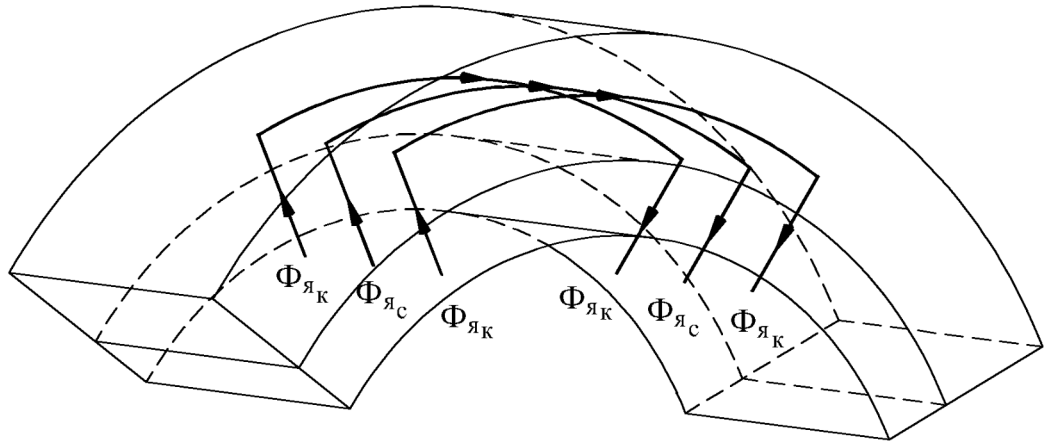
Рисунок 2.3. Распределение магнитных потоков в полюсе

После прохождения основного зазора рабочий магнитный поток Φ_{δ} делится на следующие составляющие (рисунки 2.4, 2.5): *основной* $\Phi_{я}$, состоящий из потоков $\Phi_{я_K}$, $\Phi_{я_C}$ и проходящий от когтеобразного полюса через воздушный зазор, зубцовую зону и ярмо статора в азимутальном направлении на величину полюсного деления, а затем через зубцовую зону и воздушный зазор к когтеобразному полюсу противоположной полярности; *индукторный* $\Phi_{ин}$, состоящий из потоков $\Phi_{ин_1}$, $\Phi_{ин_2}$, $\Phi_{ин_3}$ и проходящий от когтеобразного полюса через воздушный зазор, зубцовую зону, ярмо в радиальном направлении в корпус, а затем по корпусу в осевом направлении, через щиты и дополнительный зазор – в сборное кольцо полюсной системы этой же полярности (по аналогии с рабочим потоком индукторной машины); *корпусный* $\Phi_{я_K}$, состоящий из потоков $\Phi_{я_K_K}$, $\Phi_{я_K_C}$ и проходящий через основной зазор, ярмо в радиальном направлении и через

корпус в азимутальном направлении на величину полюсного деления, затем через ярмо статора радиально, зубцовую зону, основной зазор – в полюс противоположной полярности.



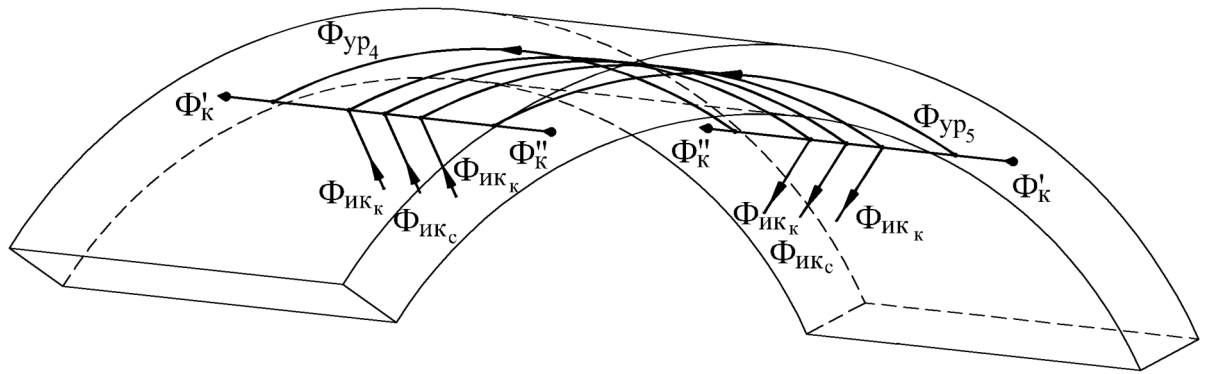
а)



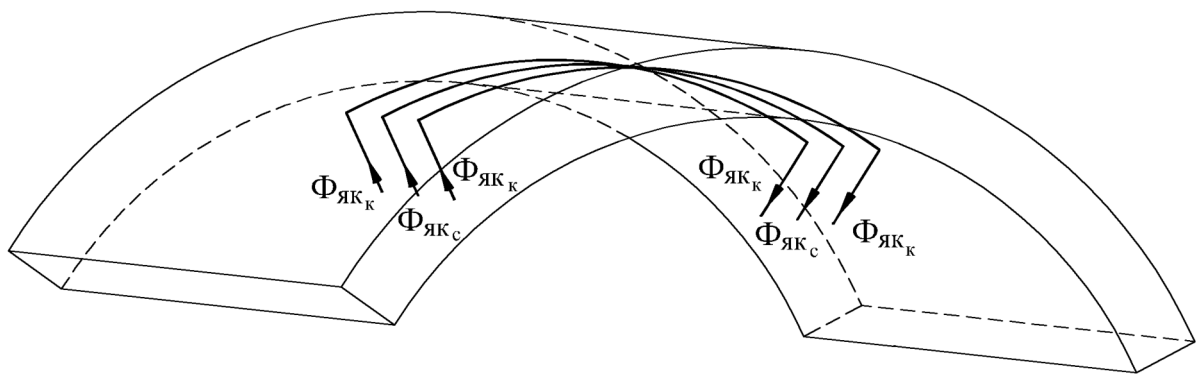
б)

Рисунок 2.4. Распределение магнитных потоков в статоре: а) – полная картина потоков, б) – распределение основного рабочего потока

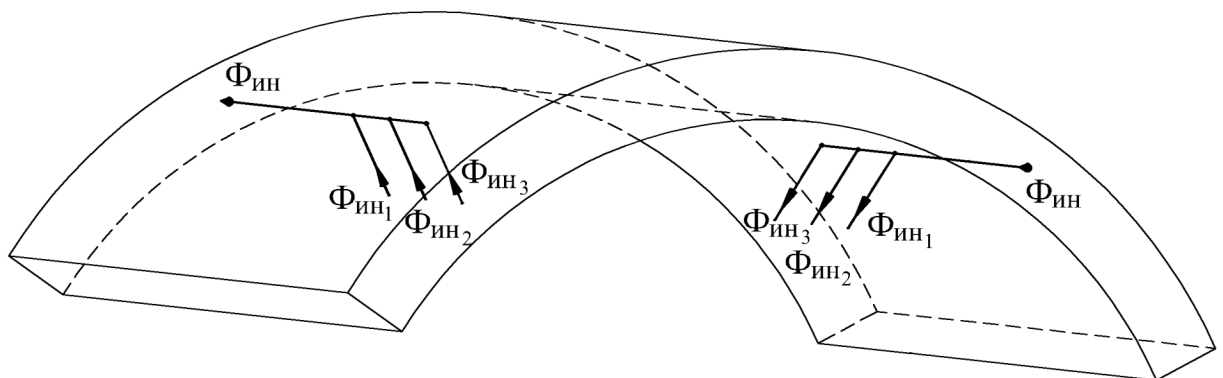
В последнем случае корпус выполняет функцию ярма статора, что возможно в случае насыщения последнего. Индукторный и корпусный потоки являются составляющими *индукторно-корпусного* потока $\Phi_{ИК}$ ($\Phi_{ИК_К}$, $\Phi_{ИК_С}$). По корпусу проходит также *осевой* магнитный поток, обозначенный как $\Phi'_К$ и $\Phi''_К$.



а)



б)



в)

Рисунок 2.5. Распределение магнитных потоков в корпусе:

а) – полная картина потоков, б) – распределение корпусного магнитного потока, в) – распределение индукторного магнитного потока

Поток от СПОВ попадает в полюс через полюсную втулку (рисунок 2.6) и щиты (рисунок 2.7), в которых присутствуют осевой поток ($\Phi'_к$ и $\Phi''_к$) и поток, входящий в полюсную втулку через дополнительный зазор ($\Phi'_{пв}$ и $\Phi''_{пв}$).

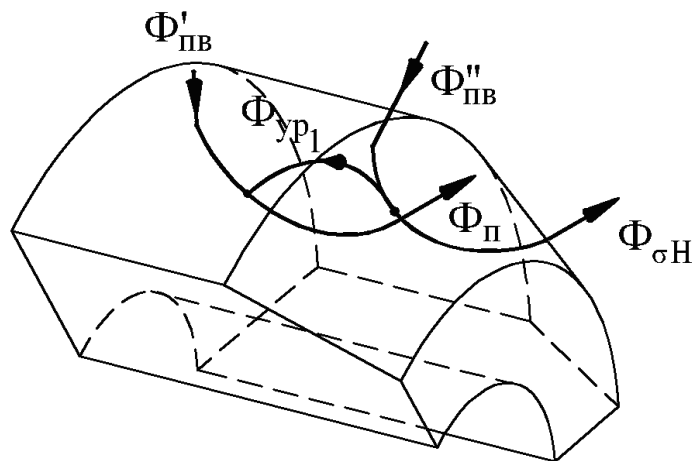


Рисунок 2.6. Распределение магнитных потоков в полюсной втулке

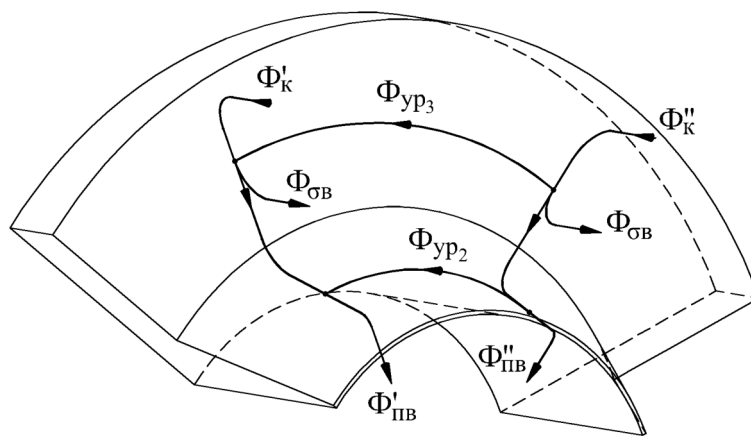


Рисунок 2.7. Распределение магнитных потоков в щите

Одним из потоков рассеяния является поток рассеяния обмотки возбуждения $\Phi_{\sigma в}$ (рисунок 2.4 и рисунок 2.7). Рассматривая потоки от СПОВ и ПМ в отдельности, можно увидеть, что потоками рассеяния для СПОВ будут являться также потоки, проходящие через ПМ в направлении, обратном направлению потоков $\Phi_{тм}$ на рис. 4 и $\Phi_{\sigma н}$ на рисунке 2.10, а потоками рассеяния для ПМ будут являться потоки, проходящие по основанию полюса, полюсной втулке, дополнительному зазору и внешнему магнитопроводу машины (щитам и корпусу) в направлении, обратном направлению потока $\Phi_{п}$. При совместной работе ПМ и СПОВ поток рассеяния ПМ уменьшает результирующий магнитный поток во внешнем магнитопроводе и препятствует его насыщению. Поэтому

применение ПМ на роторе позволяет выполнить корпус и щиты меньшего сечения, чем это требовалось бы при отсутствии ПМ.

Из рисунков 2.4 – 2.7 видно, что во внешнем магнитопроводе машины образуются две параллельные ветви магнитных потоков – каждая образована своим полюсом и отстоит от другой ветви в пространстве на угловую величину, соответствующую одному полюсному делению. При этом видно, что рабочий магнитный поток проходит не по одной ветви, а имеет пространственный характер [29, 34]: начинается в одной плоскости ($\Phi'_k, \Phi'_{пв}$), а заканчивается – в другой ($\Phi''_k, \Phi''_{пв}$), отстоящей от первой на расстоянии полюсного деления (рисунок 2.7). Для замыкания магнитного потока вводятся уравнивающие потоки в элементах магнитной цепи, охватывающих в азимутальном направлении полюсное деление ($\Phi_{ур1}$ в полюсной втулке, $\Phi_{ур2}$ в щитовой консоли, $\Phi_{ур3}$ в щитах, $\Phi_{ур4}$ и $\Phi_{ур5}$ в корпусе).

При составлении схемы замещения магнитной цепи вводится допущение о том, что распределение магнитной индукции в каждом элементе магнитной цепи имеет равномерный характер. В соответствии с приведенной выше картиной потоков составляется схема замещения магнитной цепи (МЦ) для режима холостого хода машины, представленная на рисунке 2.8. Параметры схемы замещения приведены в таблице 2.1.

Схема замещения магнитной цепи упрощается, если значения индукторных и корпусных потоков невелики по отношению к рабочему потоку и ими можно пренебречь. Распределение магнитных потоков для этого случая представлено на рисунке 2.9 [39] в продольном (*a*) и центральном поперечном (*б*) сечениях.

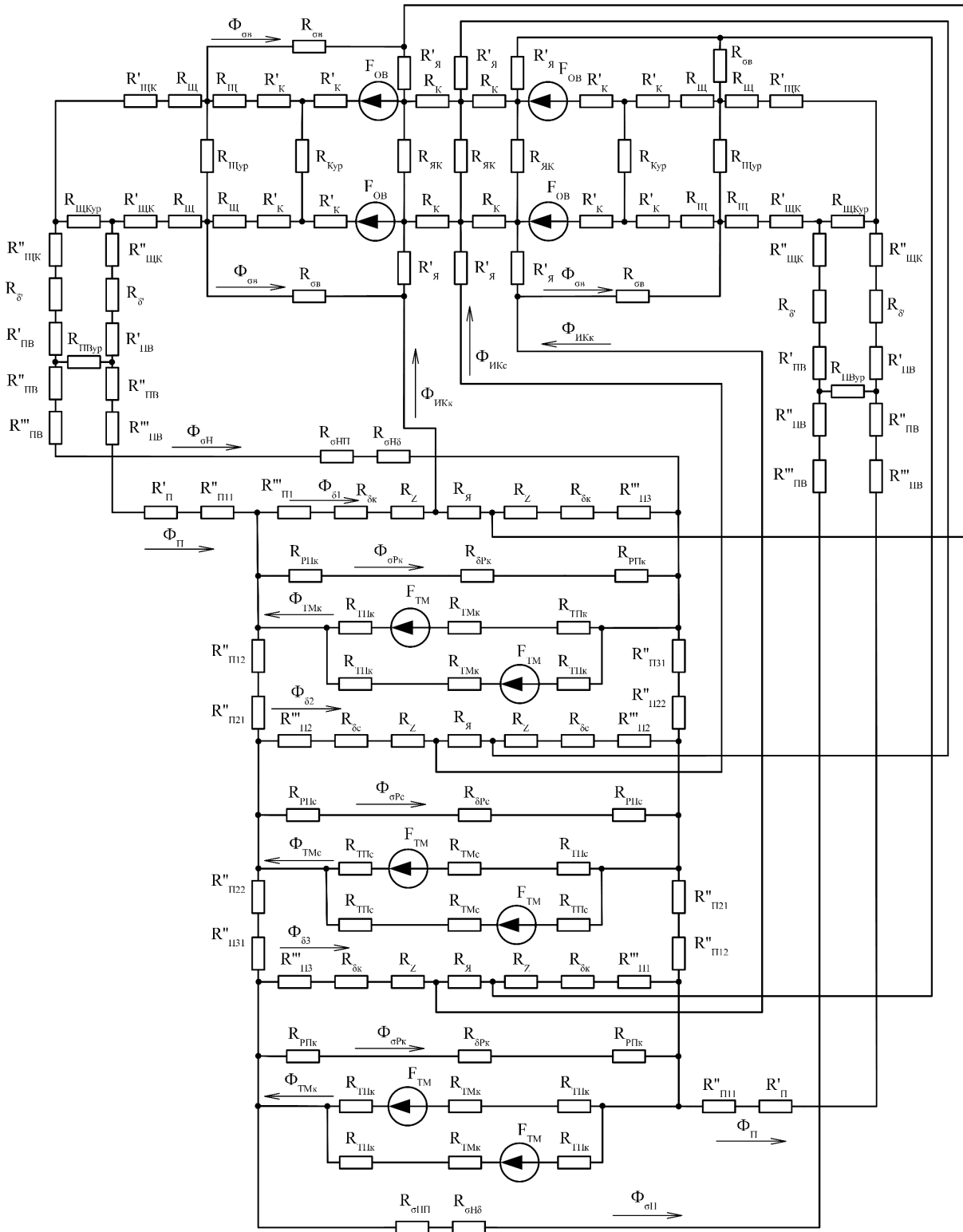
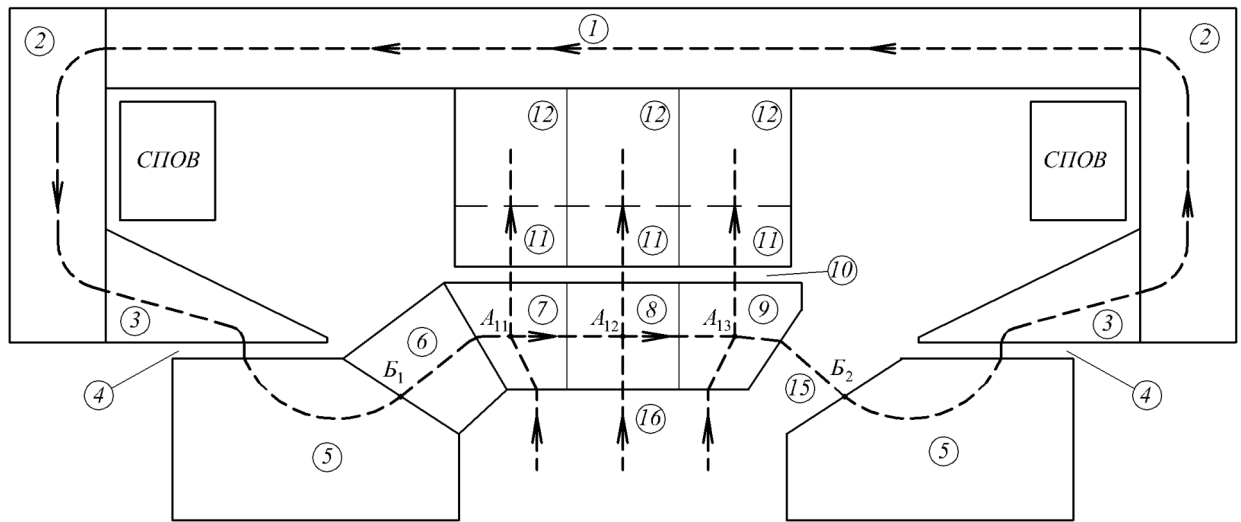


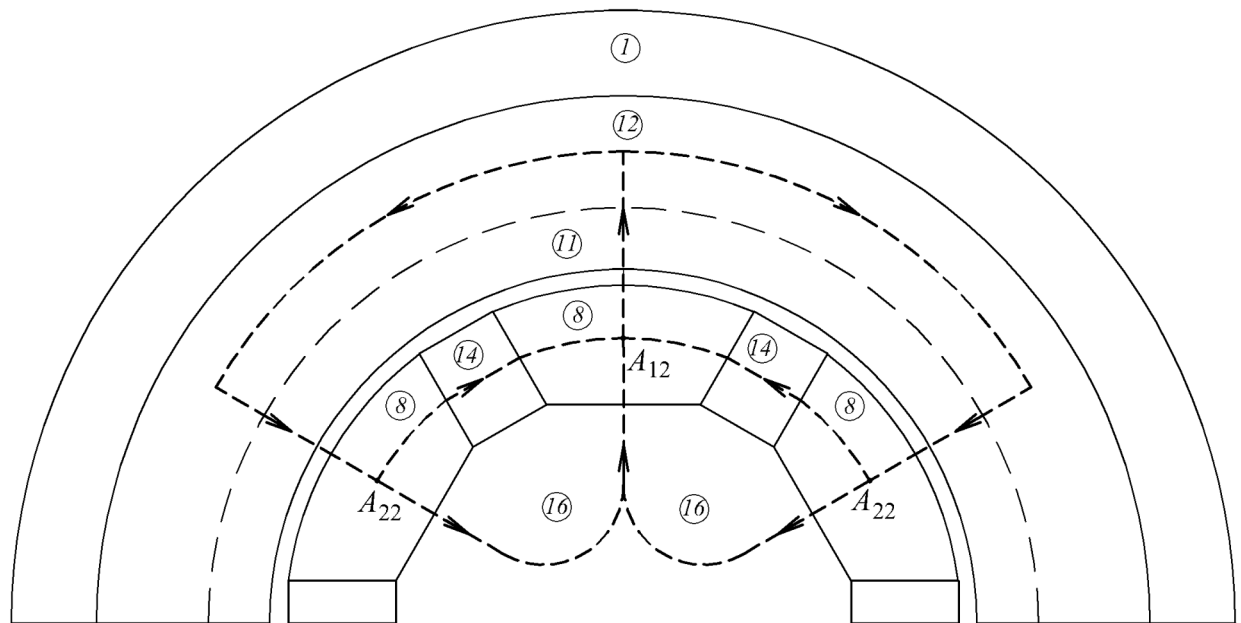
Рисунок 2.8. Полная схема замещения магнитной цепи машины

Таблица 2.1. Параметры схемы замещения

Обозначение	Параметр
$F_{ОВ}$	МДС одной катушки обмотки возбуждения
$F_{ТМ}$	МДС тангенциально намагниченного постоянного магнита
$F_{ТцМ}$	МДС торцевого ПМ
$R_{Щ}$	Магнитное сопротивление (МС) щита
$R'_{ЩК}, R''_{ЩК}$	МС участков щитовой консоли
$R_{\delta'}$	МС дополнительного воздушного зазора
R_K, R'_K	МС частей корпуса
$R'_{ПВ}, R''_{ПВ}, R'''_{ПВ}$	МС полюсной втулки
$R'_П$	МС основания полюса
$R''_{П1}, R''_{П2}, R'''_{П1}$	МС участков полюса в первом поперечном сечении
$R''_{П2}, R''_{П22}, R'''_{П2}$	МС участков полюса во втором поперечном сечении
$R''_{П3}, R'''_{П3}$	МС участков полюса в третьем поперечном сечении
$R_{\delta_K}, R_{\delta_C}$	МС крайних и средних участков основного зазора
R_Z	МС крайних и средних участков зубцовой зоны
R_Y, R'_Y	МС участков ярма статора
$R_{ЯК}$	МС корпуса для корпусного потока
$R_{ТПК}, R_{ТПC}$	МС крайних и средних участков полюса для тангенциального потока
$R_{ТМК}, R_{ТМС}$	МС крайних и средних участков тангенциально намагниченного ПМ
$R_{\delta PK}, R_{\delta PC}$	МС воздушного зазора потока рассеяния полюсов
$R_{ТцП}$	МС полюсной системы для потока торцевых ПМ
$R_{ТцМ}$	МС торцевых ПМ
$R_{Кур}$	МС для уравнивающего потока в корпусе
$R_{Щур}$	МС для уравнивающего потока в щите
$R_{ЩКур}$	МС для уравнивающего потока в щитовой консоли
$R_{ПВур}$	МС для уравнивающего потока в полюсной втулке
$R_{\sigma B}$	МС рассеяния обмотки возбуждения
$\Phi_{ОВ}$	Магнитный поток обмотки возбуждения
Φ_P	Магнитный поток в основании полюса
$\Phi_{\delta i}$	Рабочий магнитный поток в i -сечении
$\Phi_{\sigma PK}, \Phi_{\sigma PC}$	Магнитный поток рассеяния полюса
$\Phi_{ТМК}, \Phi_{ТМС}$	Магнитный поток крайних и средней частей тангенциальных ПМ
$\Phi_{\sigma H}$	Магнитный поток «нормального» рассеяния полюса



а)



б)

Рисунок 2.9. Упрощенная картина магнитных потоков: а) – продольное сечение, б) – центральное поперечное сечение

Из рисунка 2.9 видно, что магнитные потоки проходят по следующим участкам магнитной цепи: по корпусу (1), по щитам (2), по щитовым консолям (3), по дополнительному зазору (4), по полюсной втулке (5), основанию полюса (6), начальной (7), средней (8) и конечной (9) частям полюса, основному зазору (10), зубцовой зоне (11), ярму статора (12), крайним (на рисунке не показаны) и

средней (14) частям тангенциальных ПМ, воздушному зазору нормального потока рассеяния (15), воздушному зазору потоков рассеяния полюсов (16).

Распределению магнитных потоков на рисунке 2.9 соответствует схема замещения магнитной цепи, представленная на рисунке 2.10. Магнитные сопротивления (МС) вычисляются в соответствии с общей формулой [22]:

$$R_{k_i}(\mu_k) = \frac{l_{k_i}}{\mu_0 \mu_k S_{k_i}}, \quad (2.1)$$

где $R_{k_i}(\mu_k)$ – магнитное сопротивление k -участка магнитной цепи для i -потока, А/Вб; l_{k_i} – длина магнитной силовой линии в k -участке магнитной цепи от i -потока, м; S_{k_i} – площадь поперечного сечения k -участка магнитной цепи для i -потока, м²; μ_k – относительная магнитная проницаемость k -участка, отн. ед.; μ_0 – магнитная проницаемость вакуума, Гн/м.

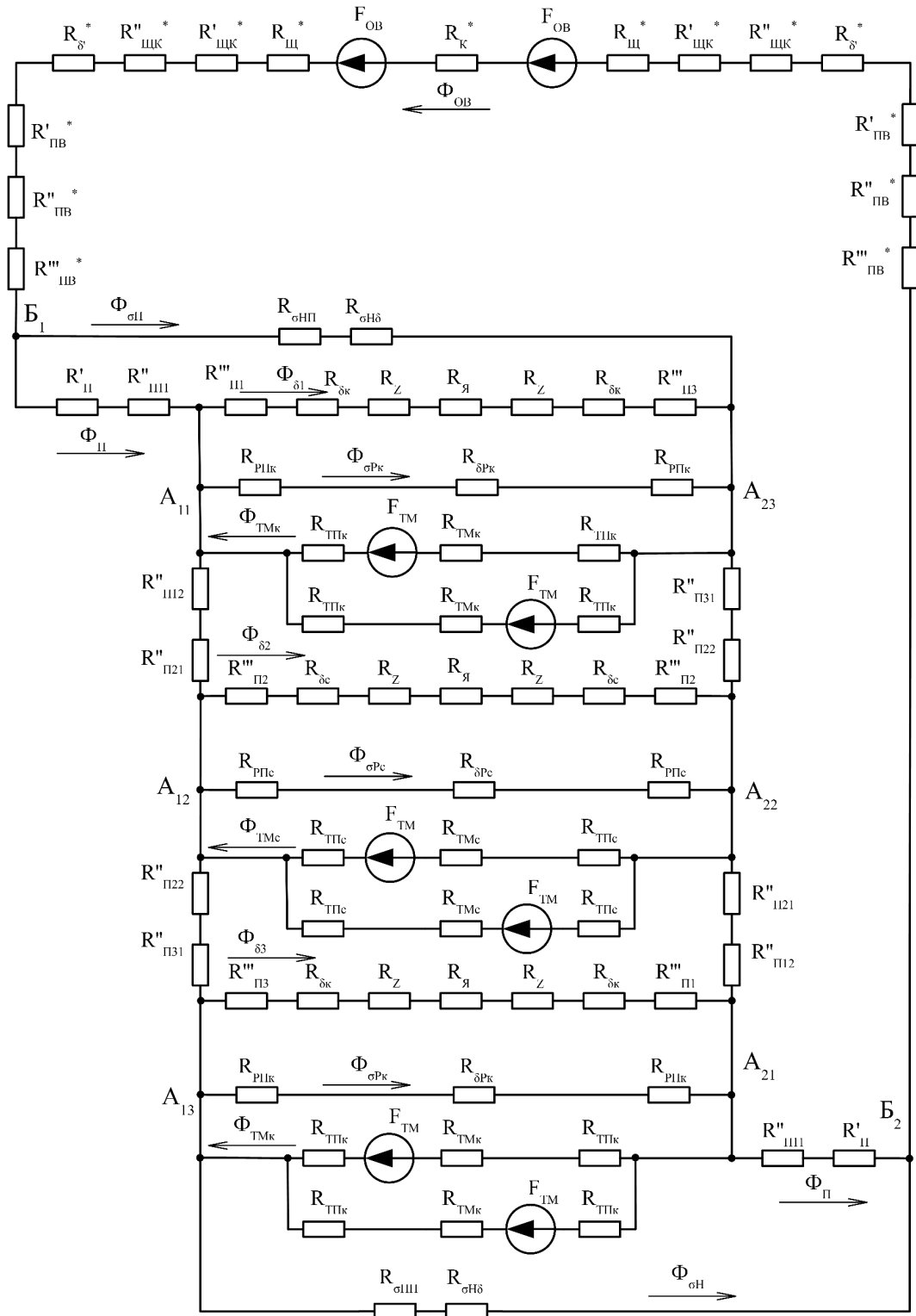


Рисунок 2.10. Упрощенная схема замещения магнитной цепи машины

Упрощенная схема замещения содержит восемь узлов (A_{11} , A_{12} , A_{13} , A_{21} , A_{22} , A_{23} , B_1 , B_2). Расчет по схеме замещения был проведен методом узловых потенциалов [41]. Поскольку некоторые участки магнитной цепи могут быть насыщенными, расчёт проводился известным методом итераций с уточнением значений магнитной проницаемости отдельных участков по значению магнитной индукции и известной кривой намагничивания участков. Блок-схема такого алгоритма итерационного расчета приведена на рисунке 2.11.

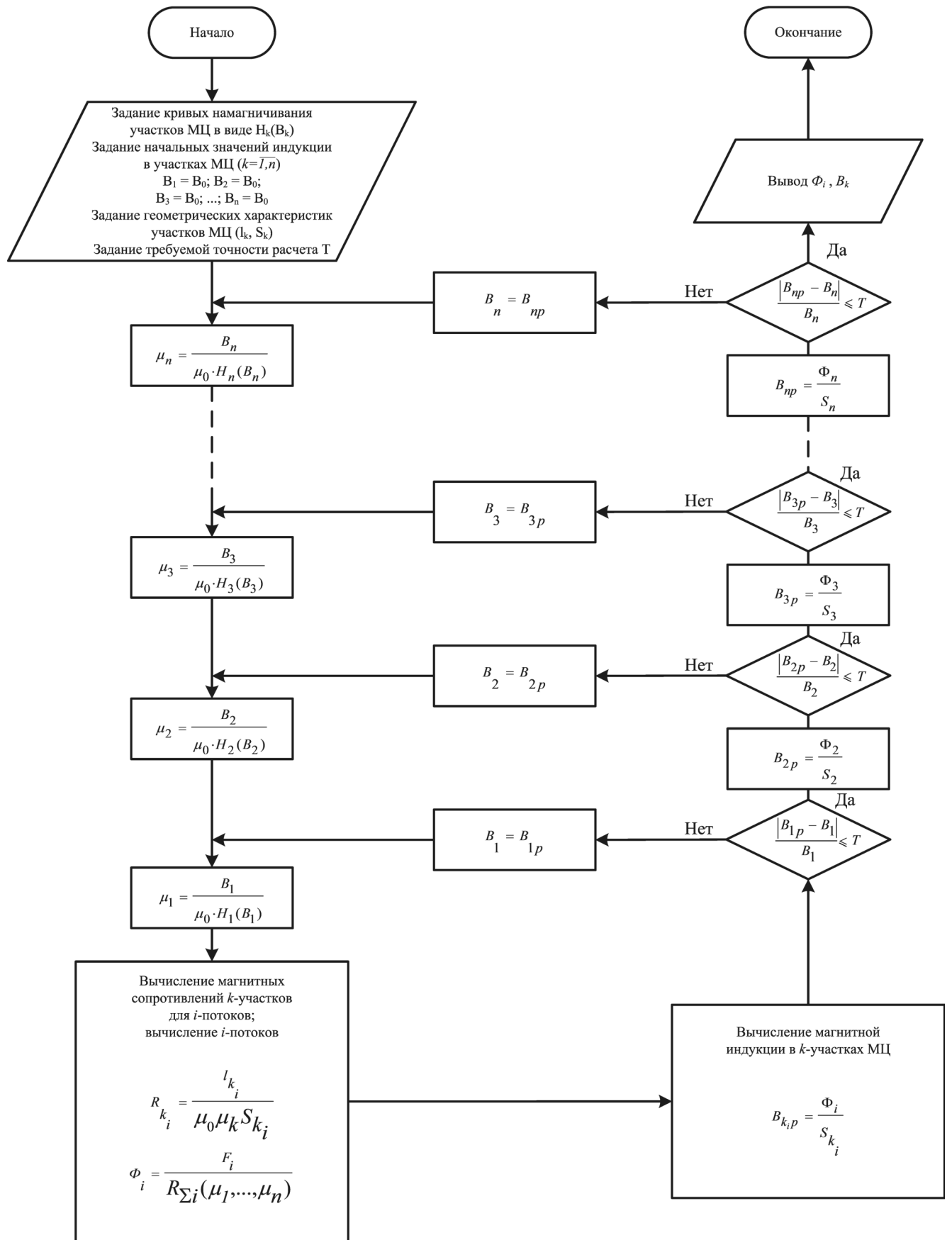


Рисунок 2.11. Блок-схема алгоритма итерационного расчёта магнитных потоков

При вычислениях полагалось, что МС, обозначенные звездочкой (*) на рисунке 2.10, связаны с МС на рисунке 2.8 соотношением:

$$R_{k_i} = 2 R_{k_i}^* . \quad (2.2)$$

Вводя для схемы на рис. 2.7 следующие обозначения:

$$R_{3к} = R_{я} + R_{П1}''' + 2 R_{\delta к} + 2 R_Z + R_{П3}''' , \quad (2.3)$$

$$R_{3с} = R_{я} + 2 (R_{П2}''' + R_{\delta с} + R_Z) , \quad (2.4)$$

составляя систему уравнений в соответствии с методом узловых потенциалов [41], принимая потенциал B_I равным нулю и решая получившуюся систему уравнений относительно потенциалов $A_{11}, A_{12}, A_{13}, A_{21}, A_{22}, A_{23}, B_2$ методом Крамера [42], были получены значения основных рабочих магнитных потоков:

$$\Phi_{\delta_1} = \frac{A_{11} - A_{23}}{R_{3к}} \quad (2.5)$$

$$\Phi_{\delta_2} = \frac{A_{12} - A_{22}}{R_{3с}} \quad (2.6)$$

$$\Phi_{\delta_3} = \frac{A_{13} - A_{21}}{R_{3к}} \quad (2.7)$$

Таким же образом находились значения остальных потоков. После вычисления магнитных потоков по известным площадям поперечных сечений участков магнитной цепи, предполагая равномерное распределение магнитного поля внутри каждого участка, производился вычисление расчётных значений магнитной индукции $B_{k_i p}$ в каждом k -элементе магнитной цепи от i -потока, Тл:

$$B_{k_i p} = \frac{\Phi_i}{S_{k_i}} , \quad (2.8)$$

где Φ_i – магнитный поток, Вб; S_{k_i} – площадь поперечного сечения пути i -потока в k -элементе, м². Затем расчёт повторялся согласно алгоритму (рисунок 2.11) до тех пор, пока не будет достигнута необходимая точность величин магнитной индукции T (её значение принималось равным от 0,01 до 0,2).

По этой методике был проведён расчёт магнитной цепи маломасштабного образца генератора и получена расчётная характеристика холостого хода.

Сравнение экспериментальной и расчётной характеристик приведено на рисунке 2.12.

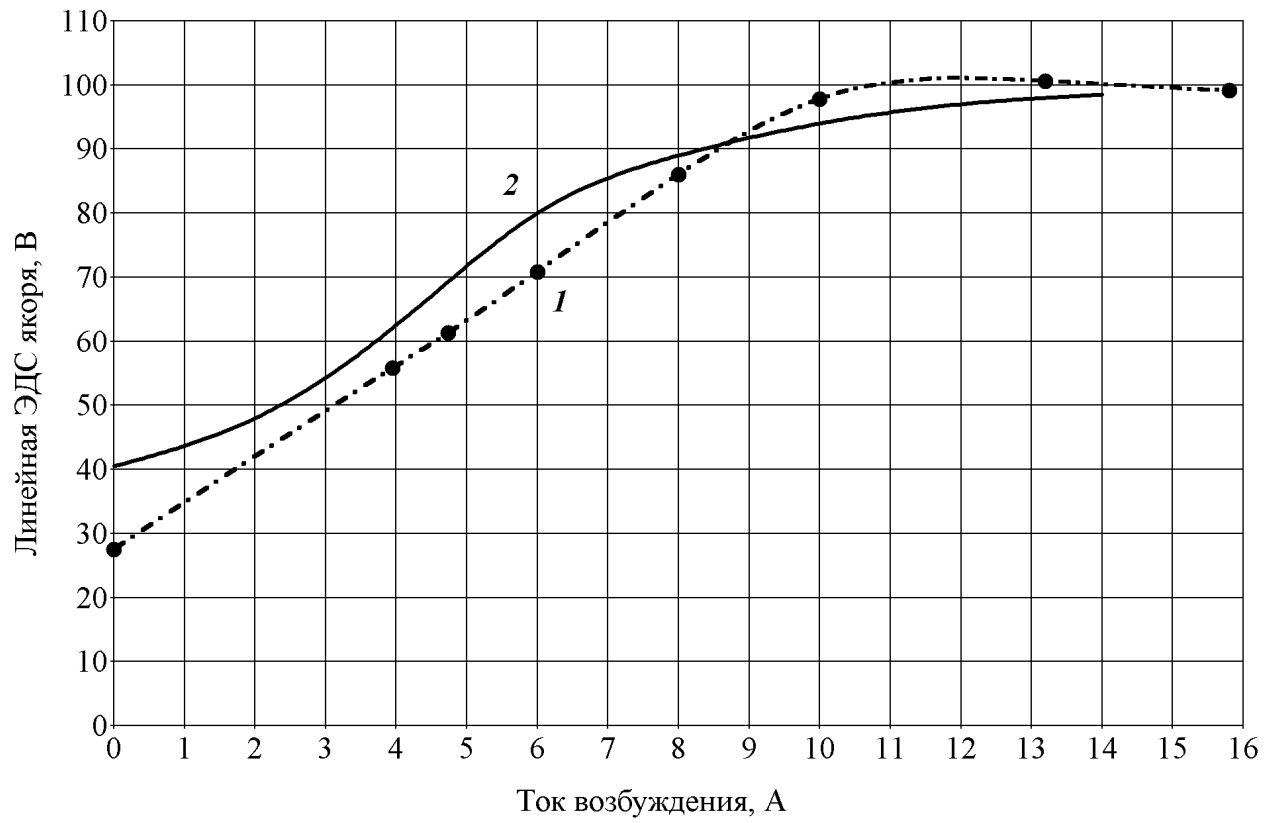


Рисунок 2.12. Характеристики холостого хода маломасштабного образца генератора: 1 — расчётная, 2 — экспериментальная

Выводы

1. Проведён анализ распределения трёхмерных магнитных потоков в сверхпроводниковом синхронном генераторе с когтеобразным ротором и комбинированным возбуждением.
2. На основе проведенного анализа предложена методика итерационного расчета параметров магнитной цепи сверхпроводниковых синхронных генераторов для систем электродвижения транспортных средств, основанная на методах теории магнитных цепей.
3. Предложенная методика может быть использована для поверочного и проектировочного расчетов параметров магнитной цепи сверхпроводниковых синхронных машин с когтеобразными полюсами и постоянными магнитами в роторе.

ГЛАВА 3. КОНСТРУКЦИЯ И ИСПЫТАНИЕ МАЛОМАСШТАБНОГО ОБРАЗЦА ГЕНЕРАТОРА С КОМБИНИРОВАННЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

С целью проверки характеристик выбранной конструктивной схемы был разработан и изготовлен ротор для существующего генератора с осевым возбуждением мощностью около 20 кВА, выполненного по конструктивной схеме, изображенной на рисунке 1.20. Конструктивная схема маломасштабного образца генератора с вновь изготовленным ротором изображена на рисунке 3.1 [43, 44].

В конструкцию машины входят когтеобразные полюсные системы северной (1) и южной (2) полярностей, тангенциально намагниченные постоянные магниты (3), щиты (4) и корпус (5) из магнитомягкой стали, магнитопровод статора (6) и его обмотка (7), сверхпроводниковая обмотка возбуждения (8), радиально намагниченные ПМ (9). Вал ротора выполнен из немагнитной стали.

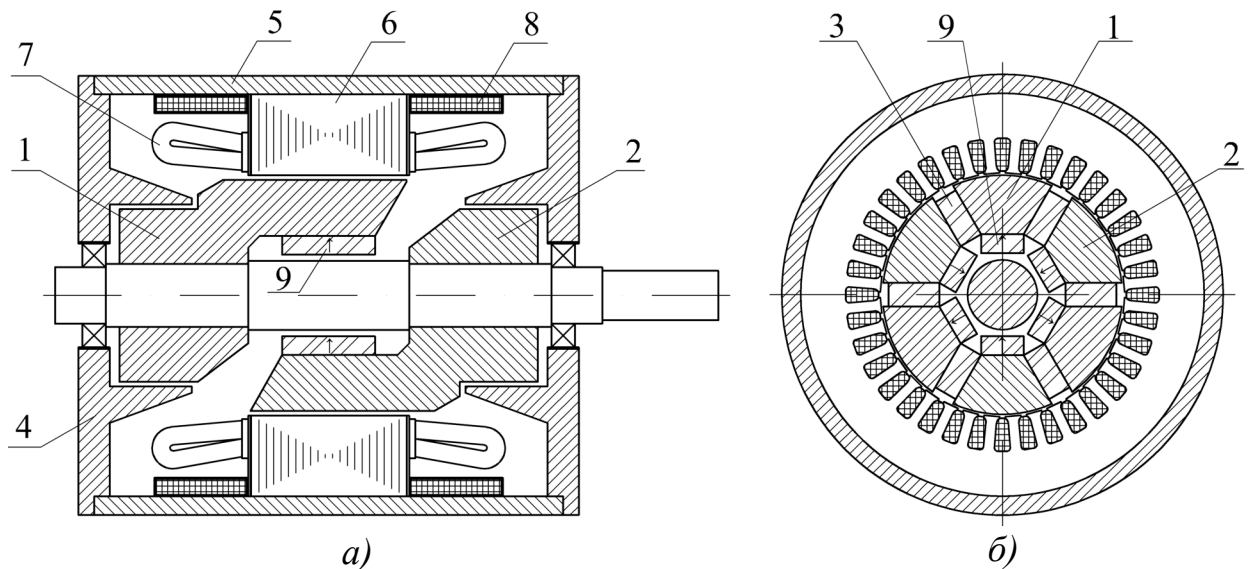
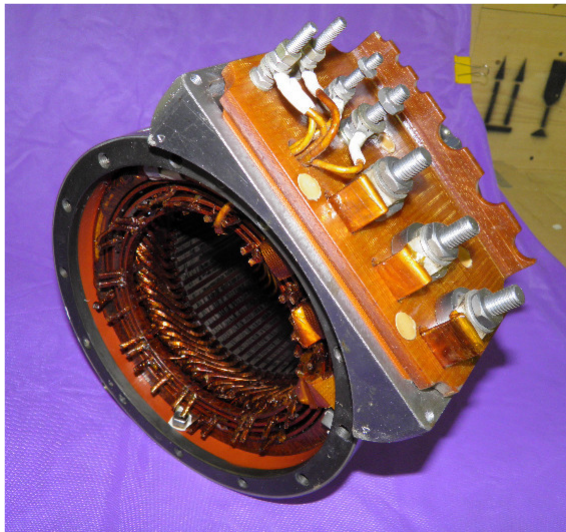


Рисунок 3.1. Конструкция экспериментального маломасштабного образца синхронного ВСТП-генератора мощностью около 20 кВА: а) – продольное сечение, б) – центральное поперечное сечение

Внешний вид статора генератора изображен на рисунке 3.2, а), ротора — на рисунке 3.2, б) [43].



а)



б)

Рисунок 3.2. Экспериментальный маломасштабный образец синхронного ВСТП-генератора мощностью около 20 кВА: а) – статор, б) – ротор

Основные параметры генератора приведены в таблице 3.1. Номинальная частота вращения существующего генератора с когтеобразным ротором — 15000 мин^{-1} . Максимально возможная частота вращения спроектированного ротора — 9000 мин^{-1} . Поэтому в таблице 3.1 приведены значения для двух вариантов частоты вращения: для 15000 мин^{-1} (первое значение) и для 9000 мин^{-1} (второе значение), разделенные косой чертой (« / »).

Таблица 3.1 Основные параметры маломасштабного образца генератора

Мощность полная, кВА	21,4 / 12,8	Коэффициент использования, кДж/м^3	5,543
Напряжение линейное, В	99 / 59	Линейная нагрузка, А/м	22000
Ток статора, А	125	Индукция в зазоре, Тл	0,51
Число фаз	3	Диаметр расточки статора, мм	130
Частота тока, Гц	750 / 450	Длина пакета статора, мм	63
Коэффициент мощности расчетный	0,95	Относительная длина	0,513
КПД расчетный	0,92	Полюсное деление, м	0,068

Продолжение таблицы 3.1

<i>Число пар полюсов</i>	<i>3</i>	<i>Окружная скорость ротора, м/с</i>	<i>100 / 60</i>
<i>Частота вращения ротора, мин⁻¹</i>	<i>15000 / 9000</i>	<i>Величина основного зазора, мм</i>	<i>1,5</i>
<i>Коэффициент полюсного перекрытия</i>	<i>0,549</i>	<i>Величина дополнительного зазора, мм</i>	<i>0,3</i>

Для определения характеристик генератора МАИ совместно с АО «НИИЭМ» были проведены испытания генератора с когтеобразным ротором (по конструктивной схеме, изображённой на рисунке 1.20) и с ротором, содержащим постоянные магниты (по конструктивной схеме, изображенной на рисунке 3.1). Испытания генератора с когтеобразным ротором проводились при номинальной частоте вращения генератора 15000 мин⁻¹, а генератора с когтеобразным ротором и ПМ — при частоте 9000 мин⁻¹ [43, 44].

На рисунке 3.3 представлены характеристики холостого хода генератора [45]: 1 – с когтеобразным ротором без ПМ (пересчитана по величине ЭДС с 15000 мин⁻¹ на 9000 мин⁻¹), 2 – с когтеобразным ротором и ПМ. Из рисунка 3.3 видно, что размещение постоянных магнитов в роторе привело к увеличению ЭДС машины на 29 % (при токе возбуждения 9 А и при одинаковой частоте вращения ротора), и в 4 раза при отсутствии тока возбуждения (в генераторе с когтеобразным ротором ЭДС наводилась из-за остаточной намагниченности ротора).

На рисунке 3.4 представлены внешние характеристики генератора при активной нагрузке: [45] 1 – с когтеобразным ротором без ПМ при токе возбуждения 25 А (пересчитана по величине ЭДС с 15000 мин⁻¹ на 9000 мин⁻¹), 2 – с когтеобразным ротором и ПМ при токе возбуждения 6 А. Из рисунка 3.4 видно, что внешняя характеристика генератора с вновь спроектированным ротором менее жёсткая, чем генератора с когтеобразным ротором без ПМ. Это

связано с тем, что для получения той же величины напряжения на нагрузке (учитывая пересчет напряжения с 15000 мин^{-1} на 9000 мин^{-1}) требуется меньший ток возбуждения генератора, имеющего постоянные магниты в роторе, следовательно, магнитная цепь генератора менее насыщена.

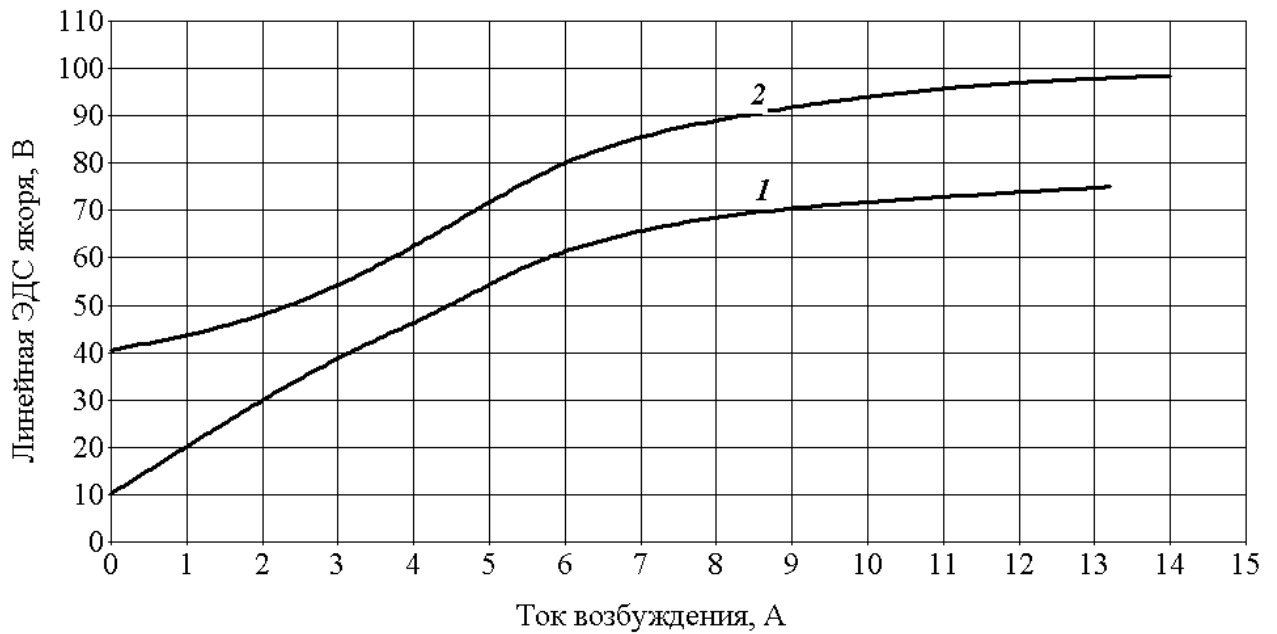


Рисунок 3.3. Характеристики холостого хода генератора: 1 — с когтеобразным ротором без ПМ (пересчитана по величине ЭДС с 15000 мин^{-1} на 9000 мин^{-1}), 2 — с когтеобразным ротором и ПМ

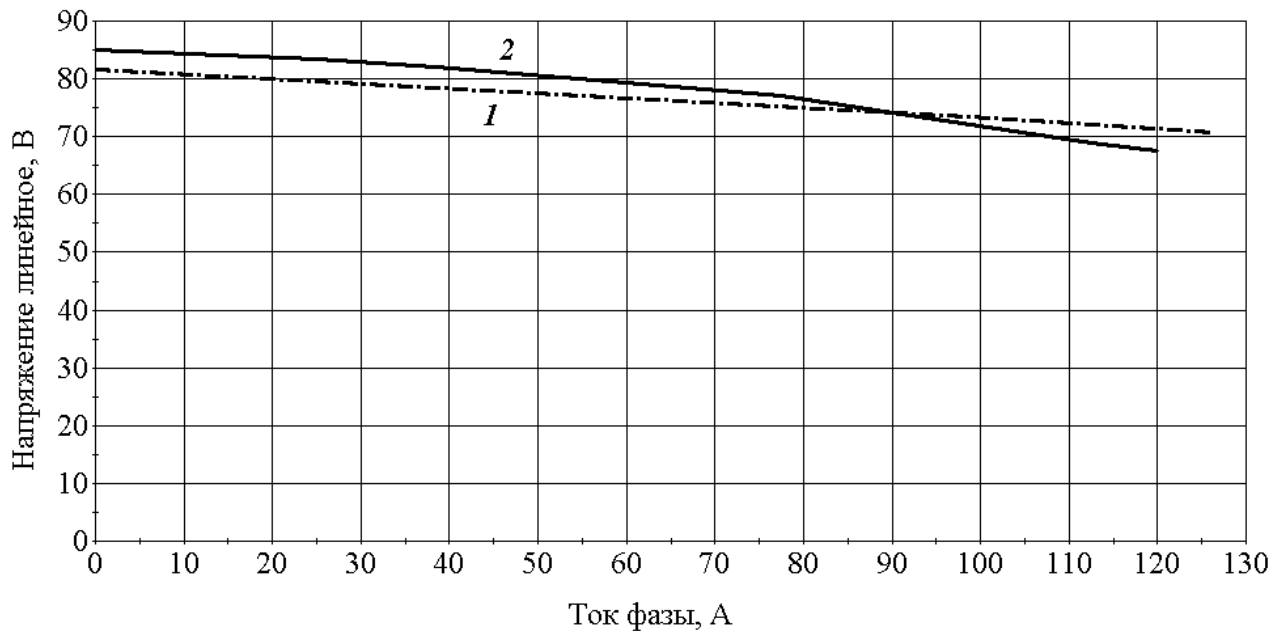


Рисунок 3.4. Внешние характеристики генератора при активной нагрузке: 1 — с когтеобразным ротором без ПМ (пересчитана по величине ЭДС с 15000 мин^{-1} на 9000 мин^{-1}), 2 — с когтеобразным ротором и ПМ

Выводы

1. Размещение постоянных магнитов в роторе привело к увеличению магнитного потока в основном воздушном зазоре машины на 29 %, что видно по увеличению ЭДС. Это приводит к увеличению мощности машины (при той же токовой нагрузке статора).

2. Внешняя характеристика генератора с ротором, содержащим постоянные магниты, менее жесткая, чем с ротором без ПМ, что связано с разгрузкой магнитной цепи от потоков рассеяния постоянных магнитов, проходящих по внешнему магнитопроводу генератора.

3. Полученные экспериментальные данные показали, что разработанный генератор превосходит по своим параметрам существующие генераторы с когтеобразным ротором.

4. Установка постоянных магнитов в ротор привела к снижению допустимой частоты вращения (с 15000 мин⁻¹ до 9000 мин⁻¹), поэтому при проектировании генератора мощностью 1 МВА конструкция ротора с постоянными магнитами была изменена.

ГЛАВА 4. РАСЧЁТ И КОНСТРУКЦИЯ МАКЕТНОГО ОБРАЗЦА ГЕНЕРАТОРА С КОМБИНИРОВАННЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

4.1 Методика расчёта

Расчёт и конструирование генератора содержит следующие этапы:

1) расчёт статора, который проводится по известным методикам проектирования статоров синхронных машин [46, 47, 48]. На этом этапе определяются главные размеры, число пазов, рассчитываются обмотка и ориентировочный КПД генератора. Важный выходной параметр — величина требуемого магнитного потока, которая необходима на последующих этапах;

2) расчёт внешнего магнитопровода проводится по известному опыту создания бесконтактных синхронных машин с аксиальным возбуждением [29, 34]. На этом этапе определяются площади поперечного сечения (по отношению к проходящему магнитному потоку) корпуса и других магнитопроводящих элементов. Первоначально в качестве исходного параметра для их оценки использована величина требуемого магнитного потока, полученная на предыдущем этапе. Величины площадей были определены с помощью теории магнитных цепей. По полученным значениям разработан предварительный эскиз внешнего магнитопровода генератора;

3) проектирование когтеобразного ротора с постоянными магнитами проводится по известным методикам проектирования роторов бесконтактных синхронных машин с аксиальным возбуждением [29, 34]. По этим методикам выбираются основные геометрические параметры ротора, далее определяются геометрические параметры размещаемых в роторе постоянных магнитов. Создаётся трёхмерная геометрическая модель когтеобразного ротора с

постоянными магнитами и проводится компьютерное трёхмерное моделирование напряжённо-деформированного состояния ротора, в результате которого определяются величины механических напряжений и деформации элементов ротора при его вращении. По результатам механического моделирования конструкция ротора дорабатывается, затем создаётся новая геометрическая модель ротора и моделирование повторяется.

4) разработка трёхмерных геометрических моделей статора и внешнего магнитопровода, их совмещение с геометрической моделью ротора и компьютерное трёхмерное моделирование магнитных полей. Цель этого этапа проектирования — определение необходимой МДС СПОВ для обеспечения требуемой величины магнитного потока в основном воздушном зазоре. В результате моделирования определяются величины индукции магнитного поля в элементах внешнего магнитопровода. По этим значениям изменяются площади поперечного сечения элементов внешнего магнитопровода так, чтобы магнитная индукция в каждом элементе была близка к границе линейного участка и участка насыщения на кривой намагничивания материала магнитопровода (если такое изменение площадей было возможным по условиям механической прочности). Затем создаётся новая геометрическая модель внешнего магнитопровода с учетом этих изменений, и повторяется моделирование магнитных полей. Необходимость изменения геометрической модели внешнего магнитопровода вызвана тем, что по внешнему магнитопроводу проходят магнитный поток от обмотки возбуждения и магнитный поток рассеяния постоянных магнитов ротора. Величина магнитного потока, проходящего по внешнему магнитопроводу, отличается от величины требуемого магнитного потока, полученной на первом этапе, из-за наличия постоянных магнитов (см. главу 2).

5) тепловой расчёт статора для определения требуемого расхода хладагента — воды;

6) проектирование и тепловой расчёт СПОВ с целью определения расхода хладагента — жидкого азота. Уточняются геометрические параметры

внешнего магнитопровода для размещения спроектированных криостатов со СПОВ и обеспечения требуемого охлаждения СПОВ и статора.

Далее приводятся результаты некоторых этапов расчёта и конструирования.

4.2 Расчёт статора генератора

Исходные данные для расчёта приведены в таблице 4.1. Расчёт статора, выполненный по методикам, изложенным в [46, 47, 48], приведён в таблицах 4.2 — 4.5.

Таблица 4.1. Исходные данные

Параметр, размерность	Обозначение	Величина
Номинальная мощность полная, ВА	S	990 000
Номинальное фазное напряжение, В	U_{ϕ}	690
Число фаз	m	3
Номинальная частота вращения, мин ⁻¹	n	6000
Число пар полюсов	p	3
Линейная токовая нагрузка, А/м	A	64 000
Магнитная индукция в зазоре, Тл	B_{δ}	0,785
Коэффициент полюсного перекрытия, о.е.	α	0,549
Обмоточный коэффициент основной гармоники, о.е.	K_o	0,925
Относительная длина, о.е.	λ	0,5
Относительное значение синхронного индуктивного сопротивления по продольной оси, о.е. (предварительное)	X_d^*	1,1
Число пазов на полюс и фазу	q	4
Максимально допустимая индукция в зубцах, Тл	B_{Zmax}	1,6
Максимально допустимая индукция в ярме, Тл	$B_{я}$	1,42
Коэффициент заполнения сталью, о.е.	$K_{зс}$	0,93

Продолжение таблицы 4.1

Параметр, размерность	Обозначение	Величина
Высота усика статора, м	h_{yc}	0,001
Высота клина, м	$h_{кл}$	0,003
Толщина пазовой изоляции, м	$\delta_{пи}$	$0,2 \cdot 10^{-3}$
Толщина обмоточной изоляции суммарная, м	$\delta_{ои}$	$0,25 \cdot 10^{-3}$
Толщина межслойной прокладки, м	$\delta_{пр}$	$0,2 \cdot 10^{-3}$
Число параллельных ветвей	a_1	6
Допустимая плотность тока в обмотке якоря, А/мм ²	$j_{я}$	4,15
Значение коэффициента зазора	k_{δ}	1,1
Значение коэффициента насыщения магнитной цепи	k_{μ}	1,1

Таблица 4.2 Расчет главных размеров и обмотки якоря

Параметр, размерность	Расчетная формула или обозначение	Значение
Относительное значение ЭДС при нагрузке (предварительное)	E^*	1,07
Расчетная электромагнитная мощность, ВА	$S_p = S_H \cdot E^*$	1 062 000
Номинальный ток фазы, А	$I_H = \frac{S_H}{m \cdot U_{\phi}}$	478,3
Расчетный коэффициент полюсного перекрытия	$\alpha_i = 0,185 + 0,8\alpha$	0,624
Коэффициент формы ЭДС	$K_b = 1,48 - 0,58\alpha$	1,162
Частота тока, Гц	$f = \frac{pn}{60}$	300
Коэффициент использования генератора, Дж/м ³	$\sigma_H = \frac{\pi^2}{60} \alpha_i K_o K_b A B_{\delta}$	5543
Диаметр расточки статора, м	$D = 3 \sqrt{\frac{S_p}{\sigma_H n \lambda}}$	0,4
Активная длина, м	$l = \lambda D$	0,2
Полюсное деление, м	$\tau = \frac{\pi D}{2p}$	0,209

Продолжение таблицы 4.2

Параметр, размерность	Расчетная формула или обозначение	Значение
Величина воздушного зазора, м	$\delta = \frac{0,45 \cdot (\alpha\pi + \sin(\alpha\pi)) K_o A \tau \mu_0}{4 \sin\left(\frac{\alpha\pi}{2}\right) \cdot X_d^* k_\mu B_\delta k_\delta}$	0,006
Диаметр ротора, м	$D_p = D - 2\delta$	0,388
Окружная скорость ротора, м/с	$V = \frac{\pi D_p n}{60}$	121,894
Число витков фазы	$w_\phi = \frac{A \pi D}{2 m I_H}$	28
Число пазов статора	$Z = 2 p m q$	72
Зубцовое деление, м	$t_z = \frac{\pi D}{Z}$	0,017
Предварительная ширина зубца в минимальном сечении, м	$b_{z_{\min}} = \frac{B_\delta t_z}{B_{z_{\max}} K_{3c}}$	$9,208 \cdot 10^{-3}$
Предварительная ширина паза, м	$b_\Pi = \frac{\pi(D + 2h_{yc} + 2h_{кл})}{Z} - b_{z_{\min}}$	$8,595 \cdot 10^{-3}$
Предварительная ширина паза под обмотку, м	$b'_\Pi = b_\Pi - 2(\delta_{\Pi\Pi} + \delta_{\Pi\text{он}})$	$7,695 \cdot 10^{-3}$
Число эффективных проводов в слое	$N_\Pi = \frac{w_\phi}{q}$	7
Число параллельных проводов по ширине паза	n_1	1
Число параллельных проводов по высоте паза	n_2	1
Число элементарных проводов в пазу	$N = 2 N_\Pi n_1 n_2$	14
Предварительное сечение элементарного провода, мм ² , не менее	$q_{я_{эл}} = \frac{I_H}{j_a a_1 n_1 n_2}$	19,2
Ширина элементарного провода по ТУ 16.К71.202-93, мм	a	2,8
Высота элементарного провода по ТУ 16.К71.202-93, мм	b	7,1
Высота изолированного элементарного провода по ТУ 16.К71.202-93, мм	$a_{из}$	3,11
Ширина изолированного элементарного провода по ТУ 16.К71.202-93, мм	$b_{из}$	7,45

Продолжение таблицы 4.2

Параметр, размерность	Расчетная формула или обозначение	Значение
Расчетное сечение выбранного элементарного провода по ГОСТ 434-78, мм ²	$q_{я_{ут}}$	19,33
Плотность тока обмотки якоря, А/мм ²	$j_{я_{ут}} = \frac{I_H}{a_1 n_1 n_2 q_{я_{ут}}}$	4,124
Действительное число элементарных проводов по ширине паза	N_b	1
Действительное число элементарных проводов по высоте паза	$N_h = \frac{N}{N_b}$	14
Действительная ширина паза, м	$b_{п_{ут}} = N_b b_{из} \cdot 10^{-3} + 2(\delta_{пи} + \delta_{ои}) + 0,3 \cdot 10^{-3}$	$9 \cdot 10^{-3}$
Действительная минимальная ширина зубца, м	$b_{z_{мин_{ут}}} = t_z - b_{п_{ут}}$	$8,453 \cdot 10^{-3}$
Действительное число витков фазы	$w_{ф_{ут}} = \frac{Nq}{2}$	28
Действительное значение линейной токовой нагрузки, А/м	$A_{ут} = \frac{2mw_{ф_{ут}} I_H}{\pi D}$	63 940
Действительное значение относительной длины, о.е.	$\lambda_{ут} = \lambda \frac{A}{A_{ут}}$	0,5
Действительное значение активной длины, м	$l_{ут} = \lambda_{ут} D$	0,2
Требуемое значение магнитного потока в зазоре, Вб	$\Phi = \frac{E U_{\Phi}}{4K_b K_o f w_{ф_{ут}}}$	0,021
Действительное значение магнитной индукции в зазоре, Тл	$B_{\delta} = \frac{\Phi}{l_{ут} \alpha_i \tau}$	0,784
Действительное значение высоты паза, м	$h_{п_{ут}} = N_h a_{из} \cdot 10^{-3} + h_{yc} + h_{кл} + 4\delta_{ои} + 3\delta_{пи} + 3\delta_{пр} + 0,3 \cdot 10^{-3}$	$51 \cdot 10^{-3}$
Действительное значение максимальной индукции в зубце, Тл	$B_{z_{max}} = \frac{B_{\delta} \tau_z}{b_{z_{мин_{ут}}}}$	1,618
Высота спинки статора, м	$h_{я} = \frac{\Phi}{2l_{ут} B_{я} K_{3c}}$	$38,8 \cdot 10^{-3}$
Наружный диаметр статора, м	$D_H = D + 2h_{п_{ут}} + 2h_{я}$	0,58

Таблица 4.3 Расчет параметров обмотки якоря

Параметр, размерность	Расчетная формула или обозначение	Значение
Относительный шаг обмотки	y^*	$\frac{10}{12}$
Число пазов на полюсном делении	$\tau_z = \frac{Z}{2p}$	12
Шаг секции по пазам	$y_z^* = y \tau_z$	10
Расстояние между медью проводов соседних катушек, м	b_c	0,0036
Относительное расстояние между осями соседних секционных сторон в отогнутых участках	$m_c = \frac{b_c + b \cdot 10^{-3}}{t_z}$	0,613
Коэффициент лобовых частей	$K_{л} = \frac{1}{\sqrt{1 - m_c^2}}$	1,266
Коэффициент вылета лобовых частей	$K_{выл} = 0,5 K_{л} m_c$	0,388
Средняя длина лобовой части, м	$l_{л} = K_{л} \pi \frac{D + h_{п}^*}{2p} y + h_{п} + 0,02$	0,31
Вылет лобовой части, м	$l_{выл} = K_{выл} \pi \frac{D + h_{п}^*}{2p} y + 0,5 h_{п} + 0,01$	0,112
Средняя длина витка, м	$l_{ср} = 2(l + l_{л})$	1,0
Активное сопротивление фазы при 20°C, Ом	$R_{я} = \frac{w_{\phi} l_{ср}}{57 q_{я_{yt}} a_1 n_1 n_2}$	$4,321 \cdot 10^{-3}$
Активное сопротивление фазы при температуре 250°C, Ом	$R_{я_t} = R_{я} (1 + 0,004 \cdot 250)$	$8,642 \cdot 10^{-3}$
Активное сопротивление пазовой части обмотки якоря на фазу при 20°C, Ом	$R_{яп} = \frac{w_{\phi} l}{57 q_{я_{yt}} a_1 n_1 n_2}$	$1,694 \cdot 10^{-3}$
Активное сопротивление пазовой части обмотки якоря на фазу при 250°C, Ом	$R_{яп_t} = R_{яп} (1 + 0,004 \cdot 250)$	$3,388 \cdot 10^{-3}$
Активное сопротивление лобовой части обмотки якоря на фазу при 20°C, Ом	$R_{ял} = \frac{w_{\phi} l_{л}}{57 q_{я_{yt}} a_1 n_1 n_2}$	$2,627 \cdot 10^{-3}$
Активное сопротивление лобовой части обмотки якоря на фазу при 250°C, Ом	$R_{ял_t} = R_{ял} (1 + 0,004 \cdot 250)$	$5,253 \cdot 10^{-3}$
Относительное значение активного сопротивления фазы	$R_{я_t}^* = R_{я_t} \frac{I_{н}}{U_{\phi}}$	$5,99 \cdot 10^{-3}$

Продолжение таблицы 4.3

Параметр, размерность	Расчетная формула	Значение
Магнитная проводимость рассеяния паза, о.е.	$\lambda_{\Pi} = \frac{h_{\Pi_{YT}} - h_{\text{кл}} - h_{\text{yc}} - 2(\delta_{\text{пи}} + \delta_{\text{ои}})}{3b_{\Pi_{YT}}} \cdot \frac{7 + 9y^*}{16} +$ $+ \left(\frac{\delta_{\text{пи}} + \delta_{\text{ои}}}{b_{\Pi_{YT}}} + \frac{h_{\text{кл}}}{b_{\Pi_{YT}}} + \frac{h_{\text{yc}}}{b_{\Pi_{YT}}} \right) \cdot \frac{1 + 3y^*}{4}$	1,98
Магнитная проводимость рассеяния по коронкам зубцов, о.е.	$\lambda_{\text{к}} = \frac{\alpha}{\frac{b_{\Pi_{YT}}}{\delta} + 0,8}$	0,239
Магнитная проводимость рассеяния лобовых частей, о.е.	$\lambda_{\text{л}} = 0,344(l_{\text{л}} - 0,64y\tau) \frac{q}{l_{\text{YT}}}$	1,325
Суммарная магнитная проводимость рассеяния обмотки якоря, о.е.	$\lambda_{\Sigma} = \lambda_{\Pi} + \lambda_{\text{к}} + \lambda_{\text{л}}$	3,544
Индуктивное сопротивление фазы обмотки якоря, Ом	$X_s = 63 \left(\frac{w_{\Phi}}{100} \right)^2 \cdot \frac{f}{400} \cdot \frac{1}{pq} \lambda_{\Sigma}$	0,219
Относительное значение инд. сопротивления фазы	$X_s^* = X_s \frac{I_{\text{н}}}{U_{\Phi}}$	0,152
Относительное значение ЭДС при нагрузке (уточненное)	$E^* = \sqrt{(\cos \varphi + R_{\text{я}_t})^2 + (\sin \varphi + X_s^*)^2}$	1,102
Коэффициент распределения обмотки якоря	$K_p = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2m}\right)}{q \sin\left(\frac{\pi}{2mq}\right)}$	0,958
Коэффициент укорочения обмотки якоря	$K_y = \sin\left(\frac{\pi}{2} y^*\right)$	0,966
Обмоточный коэффициент основной гармоники	$K_o = K_p K_y$	0,925

Таблица 4.4

Расчет массы активных элементов

Параметр, размерность	Расчетная формула	Значение
Масса зубцов статора, кг	$m_z = [\pi(D + h_{\Pi_{YT}})h_{\Pi_{YT}} - (h_{\Pi_{YT}} - h_{\text{yc}})b_{\Pi_{YT}}Z] \cdot l_{\text{YT}} \cdot K_{\text{зс}} \cdot 7650$	56,716
Масса ярма, кг	$m_{\text{я}} = \pi(D + 2h_{n_{\text{YT}}} + h_{\text{я}}) \cdot h_{\text{я}} l_{\text{YT}} K_{\text{зс}} \cdot 7650$	93,761
Масса обмотки якоря, кг	$m_{\text{оя}} = w_{\Phi} m l_{\text{cp}} q_{\text{я}_{\text{YT}}} N_b N_h \cdot 8900 \cdot 1,05 \cdot 10^{-6}$	216,716

Таблица 4.5

Расчет потерь и КПД

Параметр, размерность	Расчетная формула или обозначение	Значение
Потери в обмотке якоря, Вт	$P_{оя} = m I_{\text{н}}^2 R_{я_t}$	5 930
Потери в пазовой части обмотки якоря, Вт	$P_{по\text{я}} = m I_{\text{н}}^2 R_{яп_t}$	2 325
Потери в лобовой части обмотки якоря, Вт	$P_{ло\text{я}} = m I_{\text{н}}^2 R_{ял_t}$	3 605
Удельные потери в стали марки 2421, Вт/кг (ГОСТ 21427.2-83) при частоте, Гц и индукции, Тл	P_0 f_0 B_0	19,5 400 1
Коэффициент увеличения потерь из-за мех. обработки в зубцах	$K_{\text{тз}}$	2
Коэффициент увеличения потерь из-за мех. обработки в ярме	$K_{\text{тя}}$	1,4
Потери в зубцах, Вт	$P_z = P_0 \left(\frac{f}{f_0} \right)^{1,4} \left(\frac{B_{z\text{max}}}{B_0} \right)^2 m_z K_{\text{тз}}$	4 377
Потери в ярме, Вт	$P_{\text{я}} = P_0 \left(\frac{f}{f_0} \right)^{1,4} \left(\frac{B_{\text{я}}}{B_0} \right)^2 m_{\text{я}} K_{\text{тя}}$	3 902
Суммарные потери в стали, Вт	$P_{\text{ст}} = P_z + P_{\text{я}}$	8 280
Коэффициент поверхностных потерь в полюсе	$k_{\text{п}}$	23,3
Поверхностные потери в полюсах ротора, Вт	$P_{\text{пн}} = 2 p \alpha \tau \cdot l_{\text{yt}} k_{\text{п}} \left(\frac{Z \cdot n}{10000} \right)^{1,5} \cdot (0,1 k_{\delta} B_{\delta} t_Z \cdot 10^3)^2$	2 072
Механические и вентиляционные потери, Вт	$P_{\text{мех}} = 57,3 (D_p \cdot 10^2)^4 \cdot l_{\text{yt}} \cdot 10^2 \cdot \left(\frac{f}{50p} \right)^3 \cdot 10^{-7}$	2 080
Добавочные потери в полюсах при нагрузке, Вт	$P_{\text{доб}} = 4,16 \cdot 22,7 \cdot \frac{1+3y}{4} \cdot \left(\frac{t_z}{\delta} \right)^2 \cdot \left(\frac{A \cdot \tau}{1000} \right)^2 \cdot \frac{0,3 \cdot 2p \cdot \alpha \cdot \tau \cdot l_{\text{yt}}}{\sqrt{m \cdot q}} \cdot \left(\frac{f}{400} \right)^{1,5}$	1404
Суммарные потери, Вт	$P_{\Sigma} = P_{оя} + P_z + P_{\text{я}} + P_{\text{пн}} + P_{\text{мех}}$	18 360
КПД генератора расчетный	$\eta = \frac{P_{\text{н}}}{P_{\text{н}} + P_{\Sigma}}$	0,977

4.3 Расчёт ротора

Для оценки механической прочности когтеобразного ротора, содержащего постоянные магниты, было проведено трёхмерное моделирование напряжённо-деформированного состояния ротора с использованием пакета прикладных программ (ППП) «Ansys Mechanical» [49].

Для макетного образца генератора первоначально был разработан ротор и создана его трёхмерная геометрическая модель в соответствии с конструктивной схемой, представленной на рисунке 1.25. Общий вид модели приведён на рисунке 4.1.

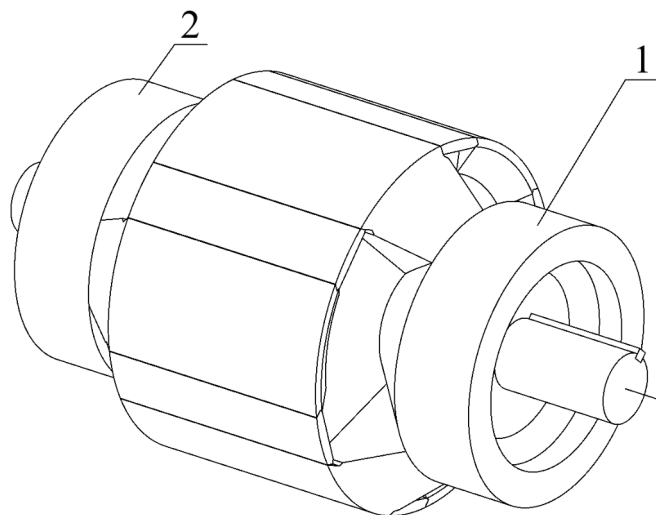


Рисунок 4.1. Общий вид первоначальной геометрической модели ротора:
1 — северная полюсная система, 2 — южная полюсная система

При моделировании вводились следующие допущения:

- 1) модель является осесимметричной, и решение задачи возможно для сектора, равного $1/3$ полной окружности ротора, с соответствующими граничными условиями без потери точности;
- 2) для сокращения времени расчёта постоянные магниты в модели заменяются эквивалентной центробежной силой, распределённой по поверхности

междуполюсных клиньев, удерживающих постоянные магниты. Величина этой силы определяется по формуле 4.1:

$$F = ma_{ц} , H, \quad (4.1)$$

где m – масса ПМ, $a_{ц}$ - центростремительное ускорение, определяемое по формуле 4.2:

$$a_{ц} = \omega^2 R , м/с^2. \quad (4.2)$$

Здесь R – радиус вращения центра масс постоянного магнита, ω – угловая частота вращения;

- 3) в расчёте не учитываются силы магнитного тяжения;
- 4) силы, действующие на элементы конструкции ротора, являются постоянными во времени.

Результаты моделирования показали, что такая конструкция ротора неработоспособна при данных габаритах и частоте вращения ротора из-за больших значений механических напряжений и деформаций. Для повышения прочности и жёсткости конструкции полюсной системы принято решение выполнить полюсные системы ротора в соответствии с конструктивной схемой на рисунке 1.20, разместив тангенциально намагниченные постоянные магниты между полюсами. Общий вид модели полюсной системы приведен на рисунке 4.2.

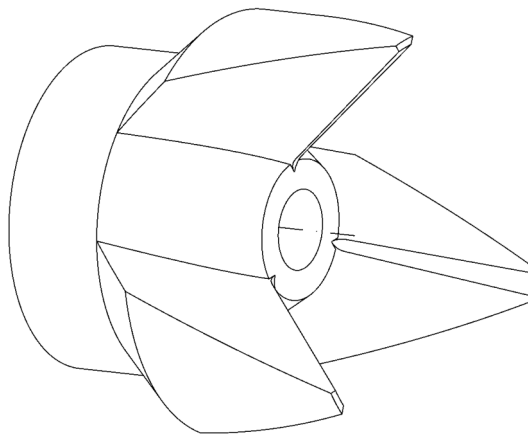


Рисунок 4.2. Модель полюсной системы ротора

На рисунке 4.3 приведены результаты моделирования вращающейся полюсной системы без постоянных магнитов – картина распределения

механических напряжений. Видно, что напряжения не превышают значения 400 МПа и являются допустимыми для материала полюсной системы. Напряжения в острых кромках полюса (около 600 МПа) обусловлены размерами конечных элементов и могут не учитываться.

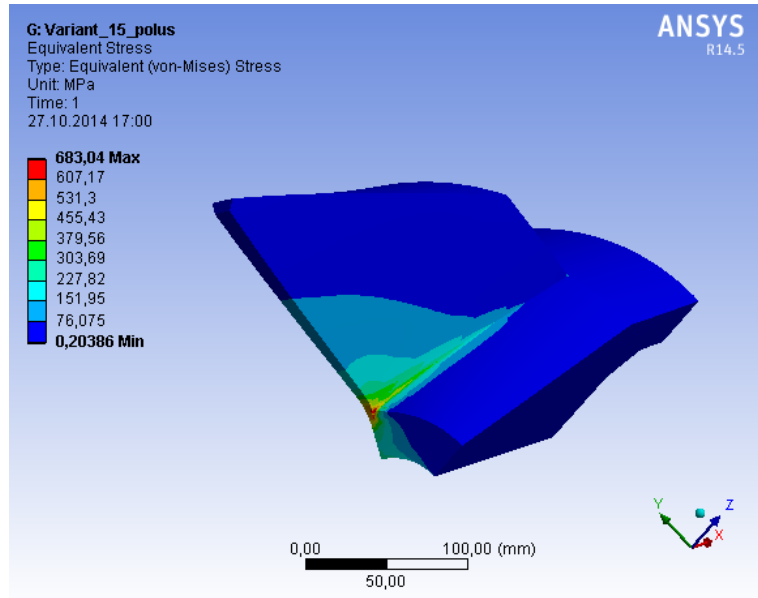


Рисунок 4.3. Картина распределения механических напряжений

Общий вид модели полюсных систем с постоянными магнитами приведен на рисунке 4.4.

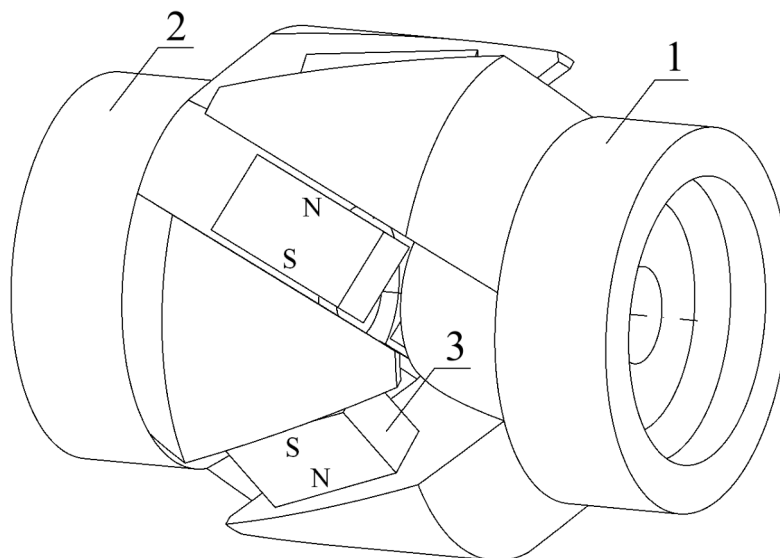


Рисунок 4.4. Модель полюсных систем с постоянными магнитами: 1 — северная полюсная система, 2 — южная полюсная система, 3 — постоянный магнит

Расчетная модель сектора ротора (1/6 часть) в ППП «Ansys Mechanical» представлена на рисунке 4.5.

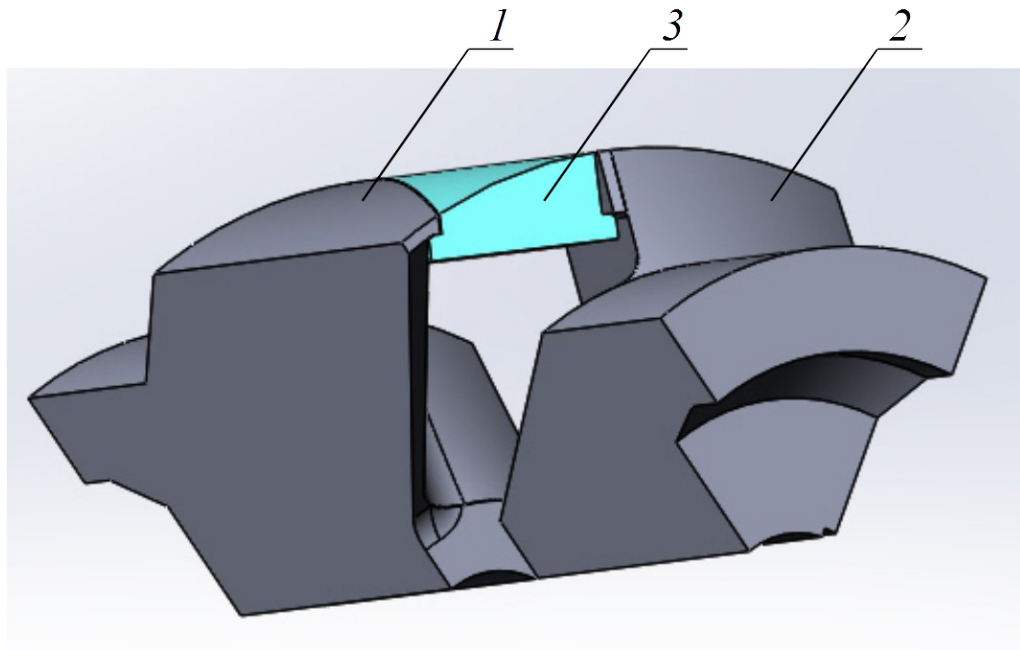


Рисунок 4.5. Расчетная модель сектора ротора в ППП «Ansys Mechanical»: 1, 2 — полюсные системы, 3 — междупольный клин, удерживающий постоянный магнит

В таблице 4.6 приведены механические и физические характеристики материалов, используемых для изготовления деталей ротора [50, 51].

Таблица 4.6 Характеристики используемых материалов

	Магнитопроводящая сталь (полюсные системы)	Титановый сплав (междупольный клин)
Плотность, кг/м ³	7850	4520
Модуль упругости, Па:	$2,27 \cdot 10^{11}$	$1,15 \cdot 10^{11}$
Коэффициент Пуассона	0,35	0,33
Коэффициент линейного расширения при нагреве до температуры 100 °С	$11 \cdot 10^{-6}$	$8 \cdot 10^{-6}$
Предел текучести, МПа:	850	700

Механический расчёт выполнен для номинальной частоты вращения 6000 мин⁻¹.

На рисунке 4.6 представлена картина деформированного состояния ротора, полученная в ходе решения задачи методом конечных элементов в ППП «Ansys Mechanical» для частоты вращения 6000 мин⁻¹. Видно, что наибольшие деформации (0,16 мм) получает край полюса и прилегающие к нему части междуполюсного клина, удерживающего ПМ.

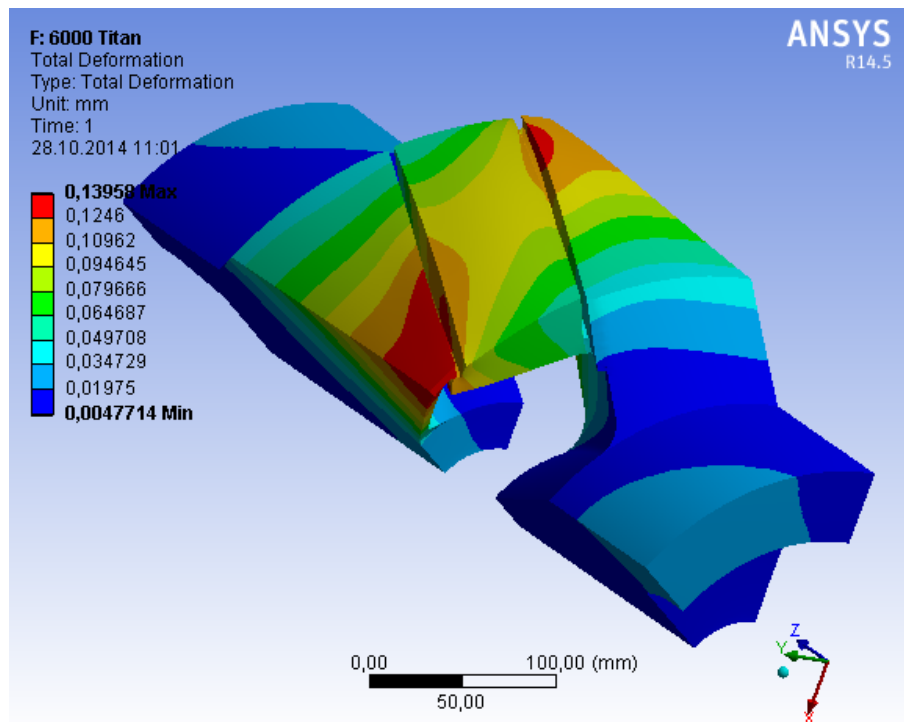
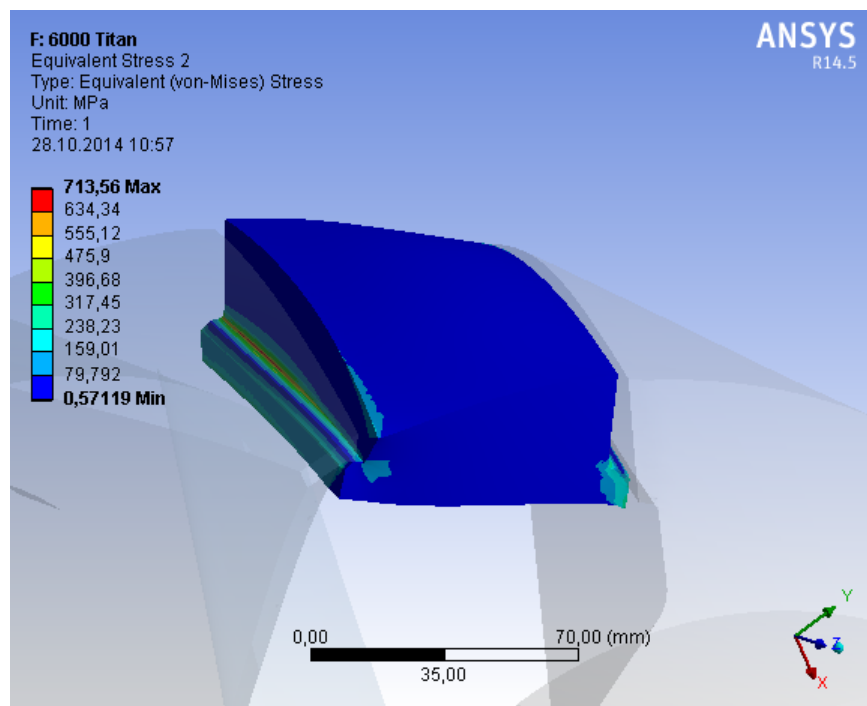
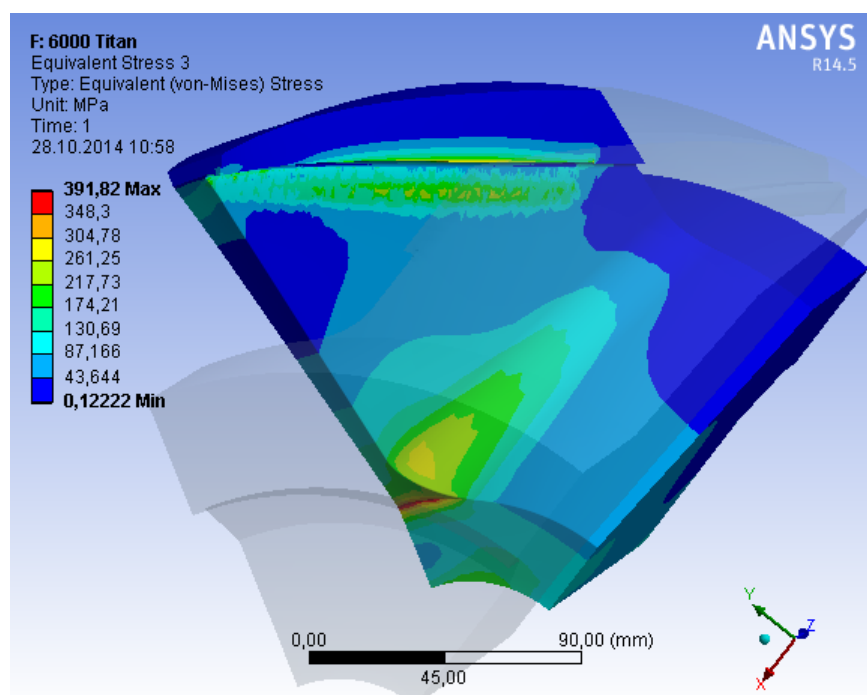


Рисунок 4.6. Деформации модели ротора

На рисунке 4.7 приведены распределения механических напряжений в полюсе и клине, удерживающем ПМ. Из рисунка 4.7, *а* видно, что наибольшие напряжения клина не превышают 450 МПа. Напряжения в острых краях клина и полюса могут не учитываться, так как их высокие значения обусловлены размерами конечных элементов. На рисунке 4.7, *б* показана картина распределения напряжений в полюсе при частоте вращения ротора 6000 мин⁻¹. Видно, что максимальные значения напряжений не превосходят 400 МПа и являются допустимыми (в соответствии с таблицей 4.6).



a)



б)

Рисунок 4.7. Механические напряжения в модели ротора:
 а) – в клине, удерживающем ПМ; б) – в полюсе

4.4 Результаты моделирования магнитных полей

Моделирование магнитных полей проводилось в программе “JMAG”. При моделировании полагалось, что части генератора выполнены из следующих материалов, входящих в библиотеку программы “JMAG”: ротор и элементы внешнего магнитопровода — из стали марки S45C, статор — из стали марки 35CS300. При моделировании также полагалось, что постоянные магниты выполнены из сплава самарий-кобальт (тип магнитов KC25ДЦ-225 по ГОСТ 21559-76 [52]), имеющего при расчетной температуре ротора 220 °С коэрцитивную силу 714400 А/м и остаточную индукцию 0,9964 Тл [52].

В результате трёхмерного моделирования было определено, что для создания требуемого магнитного потока в основном воздушном зазоре (0,021 Вб) в режиме холостого хода генератора требуется суммарная МДС двух катушек СПОВ, равная 34 кА.

На рисунке 4.8 представлен результат моделирования магнитных полей от постоянных магнитов и СПОВ - распределение магнитной индукции в когтеобразном роторе (остальные элементы генератора не показаны) при значении МДС СПОВ, равном 34 кА.

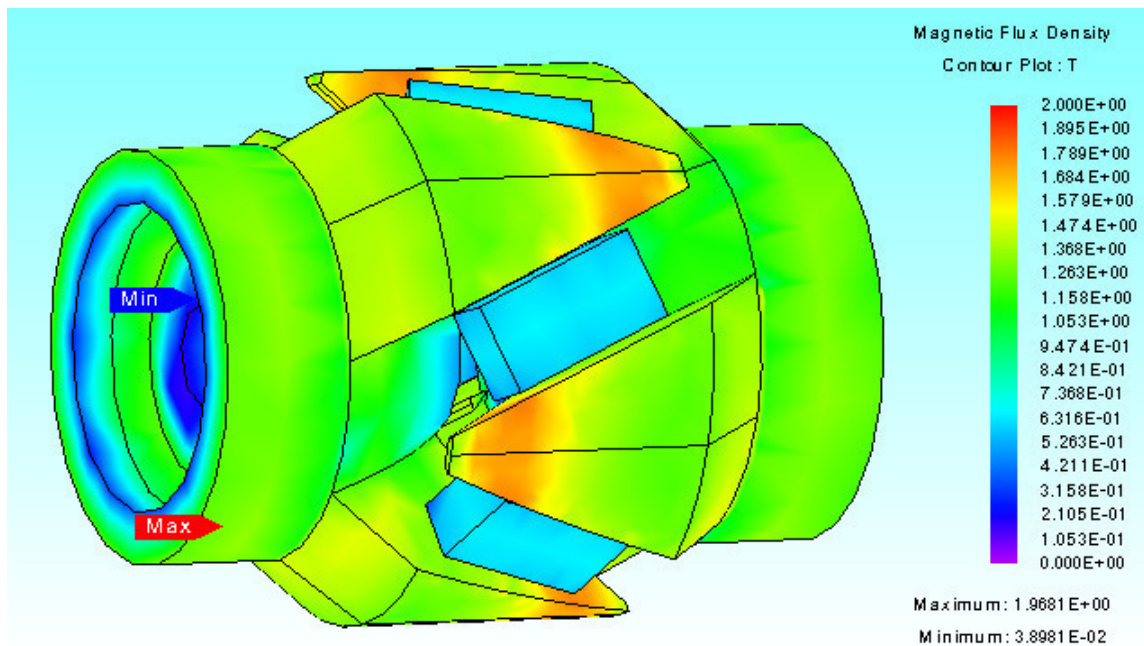


Рисунок 4.8. Распределение магнитной индукции в когтеобразном роторе, полученное в программе “JMAG”

4.5 Конструкция генератора

Конструкция генератора изображена на рисунке 4.9. Процесс заведения ротора с постоянными магнитами в активную зону статора является технологически сложным из-за «прилипания» поверхности намагниченного ротора к расточке статора. Поэтому подшипниковые щиты машины выполнены составными из немагнитопроводящей (3) и магнитопроводящей (4) частей.

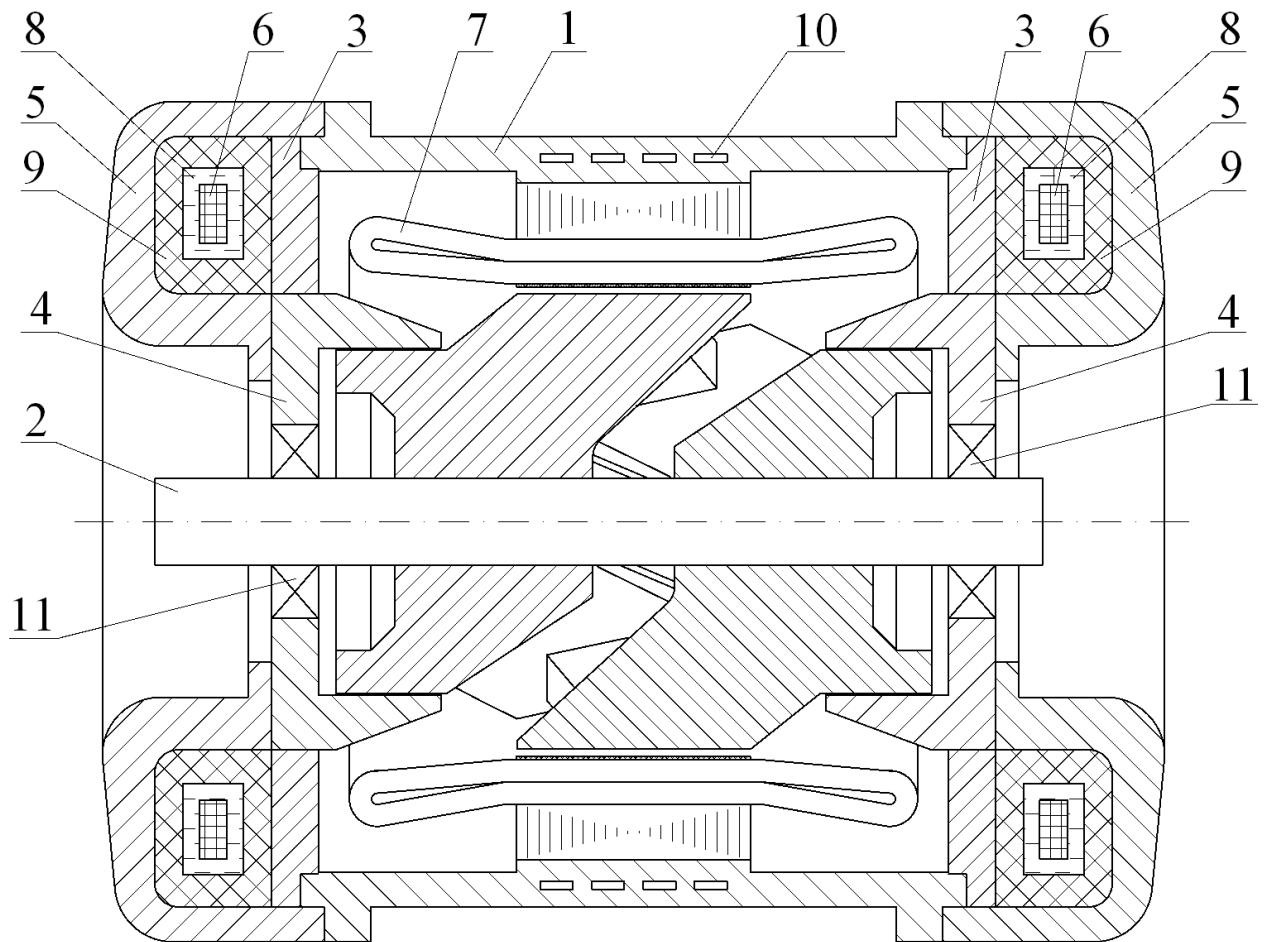


Рисунок 4.9. Конструкция генератора: 1 – корпус со статором, 2 – ротор, 3 – немагнитная часть подшипникового щита, 4 – магнитопроводящая часть подшипникового щита, 5 – магнитопроводящие крышки, 6 – катушка СПОВ, 7 – медная обмотка статора, 8 – жидкий азот, 9 – теплоизоляция СПОВ, 10 – каналы охлаждения статора, 11 – подшипники.

Данная конструкция позволяет производить установку СПОВ, а также необходимые технологические операции при их испытании без выведения ротора из активной зоны статора. Немагнитная часть 3 предназначена только для механического удержания ротора от осевых и радиальных перемещений, а магнитный поток СПОВ проходит по магнитопроводящей крышке 5 и магнитной части щита 4 (рисунок 4.10).

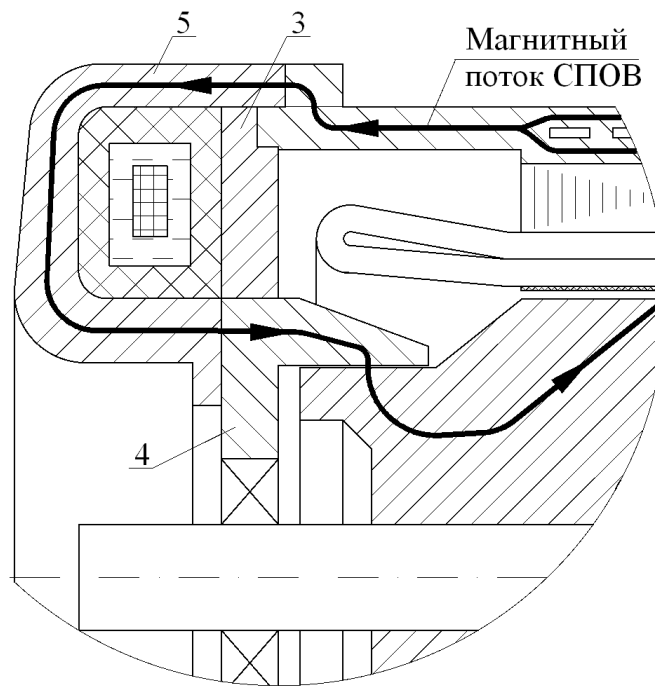


Рисунок 4.10. Путь магнитного потока СПОВ

Основные параметры генератора приведены в таблице 4.7.

Таблица 4.7 Основные параметры макетного образца генератора

Мощность полная, МВА	0,99	Относительная длина	0,5
Напряжение фазное, В	690	Линейная нагрузка, А/м	64000
Ток статора, А	478,3	Индукция в зазоре, Тл	0,785
Число фаз	3	Диаметр расточки статора, мм	400
Частота тока, Гц	300	Длина пакета статора, мм	200
Коэффициент мощности расчетный	0,8	Коэффициент использования, кДж/м ³	5,543
КПД расчетный	0,977	Полюсное деление, м	0,209
Число пар полюсов	3	Окружная скорость ротора, м/с	121,8
Частота вращения ротора, мин ⁻¹	6000	Величина основного зазора, мм	6
Коэффициент полюсного перекрытия	0,549	Величина дополнительного зазора, мм	1,5

4.6 Расчёт критического тока и сил в сверхпроводниковой обмотке возбуждения

Для проектирования криостатов СПОВ и их крепления были проведены электромагнитное моделирование и расчёт действующих электромагнитных сил при испытаниях катушек и при их работе в магнитной цепи машины, а также расчёт предполагаемого значения критического тока СПОВ.

Определение критического тока СПОВ при работе в магнитной цепи генератора. Для определения критического тока СПОВ была создана и рассчитана в программе трёхмерного моделирования магнитных полей “JМAG” электромагнитная модель СПОВ, помещённой в магнитную цепь генератора.

На рисунке 4.11 показано распределение векторов магнитной индукции в области одной из катушек СПОВ (остальные элементы генератора не показаны). Для упрощения расчётов распределение векторов индукции магнитного поля можно разбить на две составляющие: осевую и радиальную.

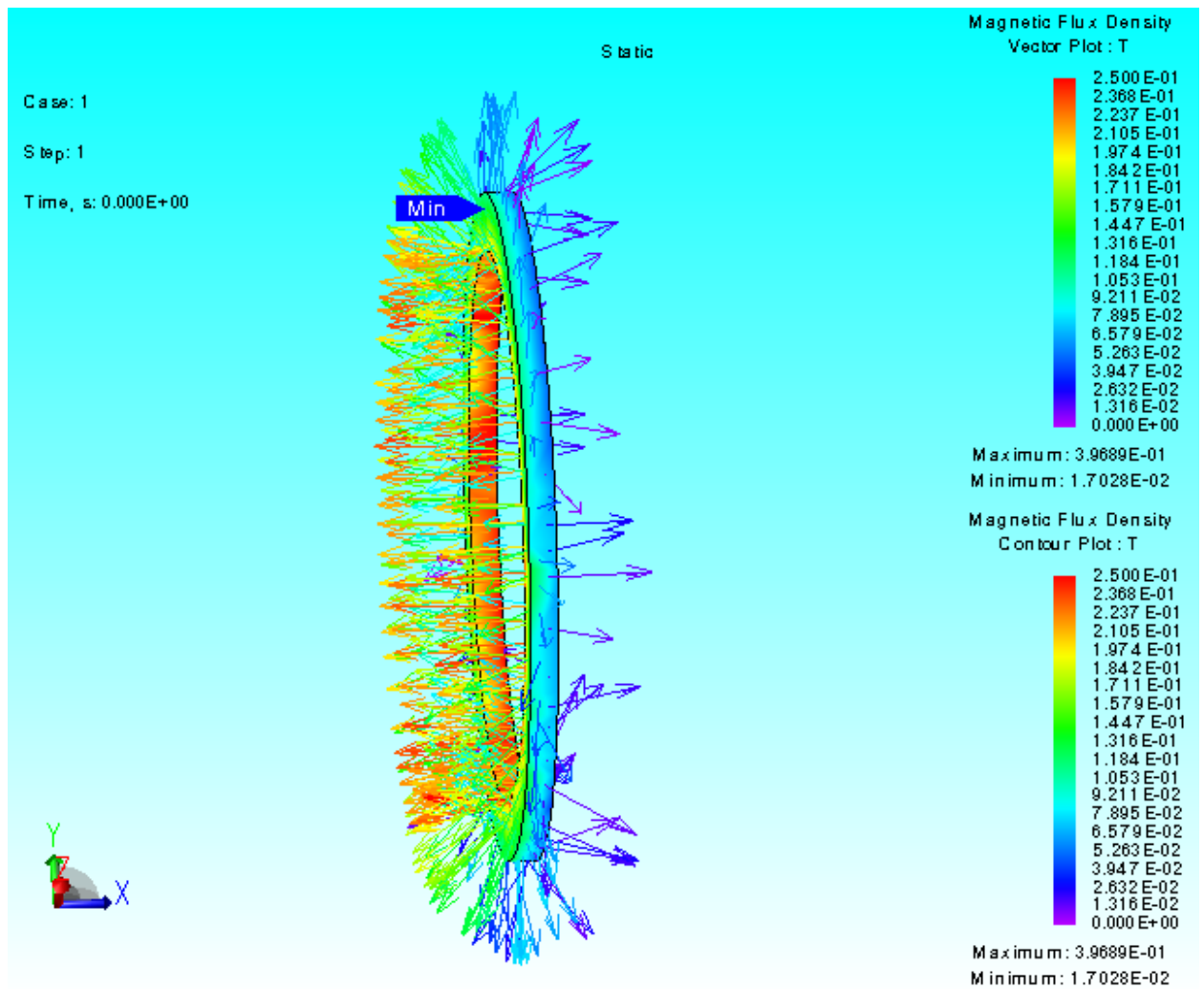


Рисунок 4.11. Распределение векторов магнитной индукции в области одной из катушек СПОВ при токе возбуждения 115 А

Для определения критического тока использовались характеристики ВТСП-ленты, использовавшейся при изготовлении СПОВ. Критический ток при этом определялся по методу итераций следующим образом. При токе возбуждения 100 А радиальная составляющая индукции магнитного поля составила $B_r = 0,06$ Тл, а осевая $B_o = 0,19$ Тл. В соответствии с характеристиками ВТСП-ленты критический ток при данном уровне магнитных полей составляет 132 А, то есть значение тока возбуждения может быть увеличено. При токе возбуждения 115 А радиальная составляющая индукции магнитного поля составила $B_r = 0,08$ Тл, а осевая $B_o = 0,25$ Тл. В соответствии с характеристиками ВТСП-ленты критический ток при данном уровне магнитных полей составляет 115 А. Таким образом, расчетный критический ток СПОВ $I_{kp} = 115$ А.

Определение сил, действующих на катушку СПОВ при её работе в магнитной генератора в режиме холостого хода. При токе СПОВ 115 А в режиме холостого хода генератора в соответствии с рисунком 4.11 среднее значение осевой составляющей при расчётах выбрано равным $B_o = 0,25$ Тл, а среднее значение радиальной составляющей $B_r = 0,08$ Тл.

Так как требуемая МДС холостого хода, полученная в результате моделирования, равна 34 кА, то расчетное число витков каждой катушки СПОВ принято равным $w = 330$ витков. В этом случае расчётный ток возбуждения холостого хода равен 52 А. С учётом действия реакции якоря при номинальной нагрузке предполагаемый номинальный ток возбуждения принят равным 75 А. Это значение не превосходит критический ток СПОВ и оставляет запас по току возбуждения для регулирования магнитного потока при возможных перегрузках.

При расчёте сил каждая катушка обмотки возбуждения заменялась эквивалентным одновитковым кольцом-шиной, по которому протекает ток, определяемый по формуле 4.1:

$$I = I_{кр} w, \text{ А.} \quad (4.1)$$

По формуле 4.1 $I = 115 \cdot 330 = 38000$ А.

Длина средней окружности кольца-шины принята равной $l_{cp} = 1,65$ м.

Сила, действующая на кольцо-шину, разлагалась на две составляющие: осевую и радиальную. Осевая составляющая силы возникает от радиальной составляющей вектора магнитной индукции (рисунок 4.12, а) и вычислялась согласно закону Ампера по формуле 4.2:

$$F_o = I B_r l_{cp}, \text{ Н.} \quad (4.2)$$

По формуле 4.2 $F_o = 38000 \cdot 0,08 \cdot 1,65 = 5016$ Н.

Радиальная составляющая силы возникает от осевой составляющей вектора магнитной индукции (рисунок 4.12, б). Её значение на единицу длины поверхности среднего витка вычислялось по формуле 4.3:

$$F_r = I B_o, \text{ Н/м.} \quad (4.3)$$

По формуле 4.3 $F_r = 38000 \cdot 0,25 = 9500 \text{ Н/м}$.

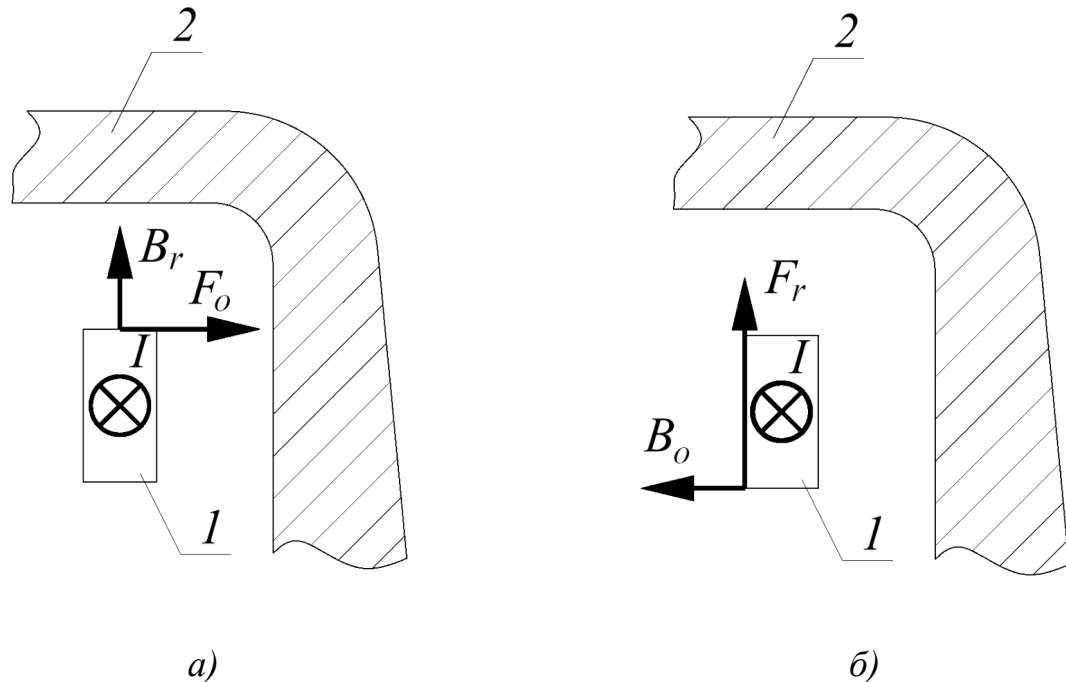


Рисунок 4.12. Направления магнитной индукции и сил, действующих на эквивалентное кольцо-шину:

I — эквивалентное кольцо-шина, 2 — магнитопроводящая крышка

Определение сил, действующих на внешний бандаж СПОВ при испытаниях вне магнитной цепи генератора. Итерационным методом расчетов определено, что при испытаниях на воздухе критический ток составляет около 100 А. Это значение тока принято за расчетное при вычислении сил. При расчете сил каждая катушка СПОВ заменялась эквивалентным одновитковым кольцом-шиной, по которому протекает ток, определяемый по формуле 4.1: $I = 100 \cdot 330 = 33 \text{ кА}$.

Подробное распределение векторов магнитной индукции в теле эквивалентного кольца-шины и его окрестности было получено с помощью программы расчёта двумерных магнитных полей “QuickField” и приведено на рисунке 4.13.

На основе распределения магнитного поля, изображенного на рисунке 4.13, составлялась расчётная схема магнитных полей и сил, приведенная на рисунке 4.14.

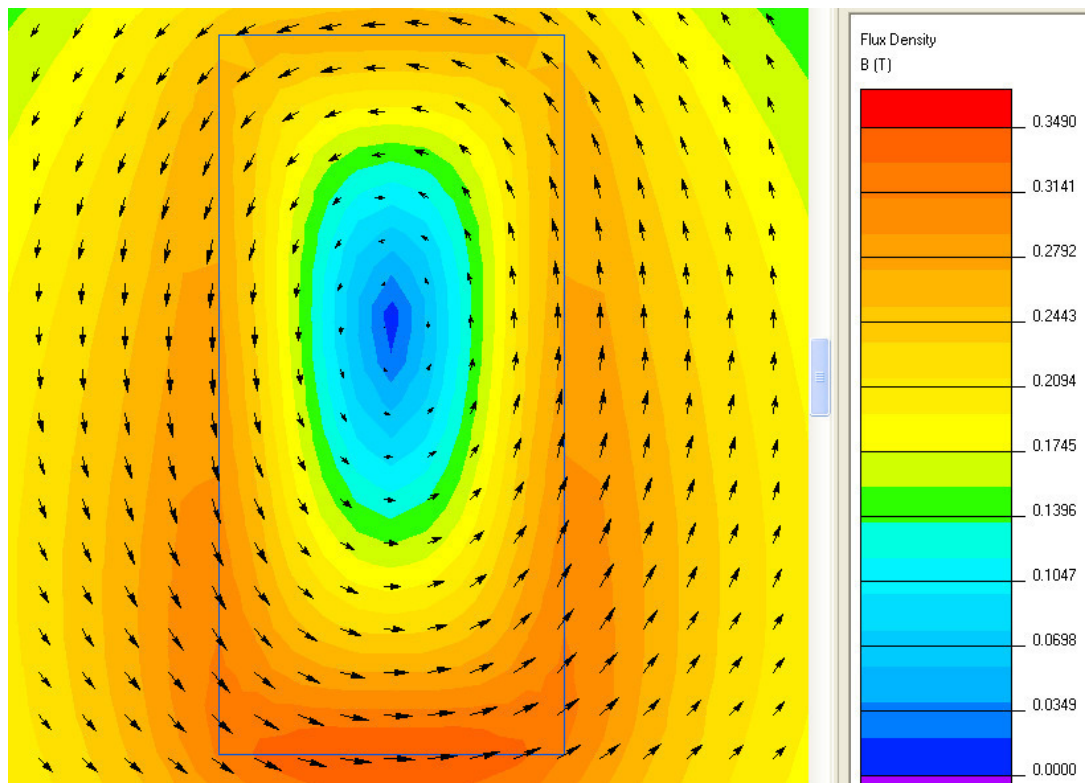


Рисунок 4.13. Двухмерное распределение магнитной индукции в теле эквивалентного кольца-шины и его окрестности при испытаниях на воздухе

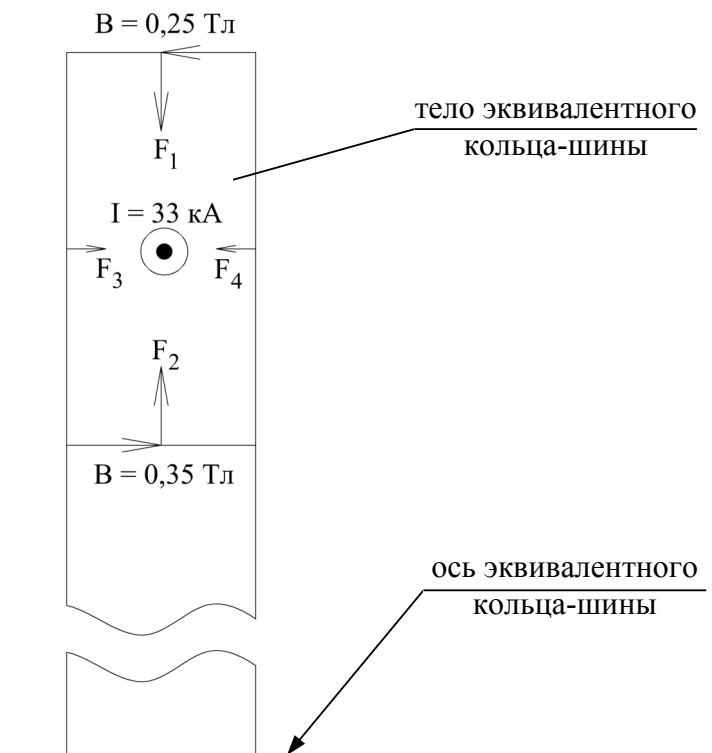


Рисунок 4.14. Расчётная схема магнитной индукции и сил, действующих на эквивалентное кольцо-шину

В соответствии с формулой 4.3 значение силы F_1 на метр длины внешнего витка катушки: $F_1 = 33000 \cdot 0,25 = 8250$ Н/м, а значение силы F_2 на метр длины внутреннего витка: $F_2 = 33000 \cdot 0,35 = 11600$ Н/м.

Так как распределение магнитных полей по боковым поверхностям катушки одинаково, то силы F_3 и F_4 равны по модулю, но противоположны по направлению и уравниваются, поэтому они не вычислялись.

Полагая, что длины внутреннего и внешнего витков отличаются на величину, не вносящую значительных погрешностей в расчёт, разрывная сила, действующая на внешний бандаж СПОВ, может быть вычислена по формуле 4.4:

$$F_6 = F_2 - F_1, \text{ Н/м.} \quad (4.4)$$

В соответствии с формулой 4.3 $F_6 = 11600 - 8250 = 3350$ Н/м.

Расчёт сил, действующих между двумя катушками СПОВ при их совместном испытании вне магнитной цепи генератора. Двухмерное распределение магнитного поля при совместном испытании двух катушек СПОВ вне магнитной цепи генератора при токе 115 А и расстоянии между их центрами 0,72 м, полученное в программе “QuickField”, приведено на рисунке 4.15.

В этой программе вычислено, что величина осевой составляющей сил, действующих на катушки при таком испытании, не превышает 10 Н.

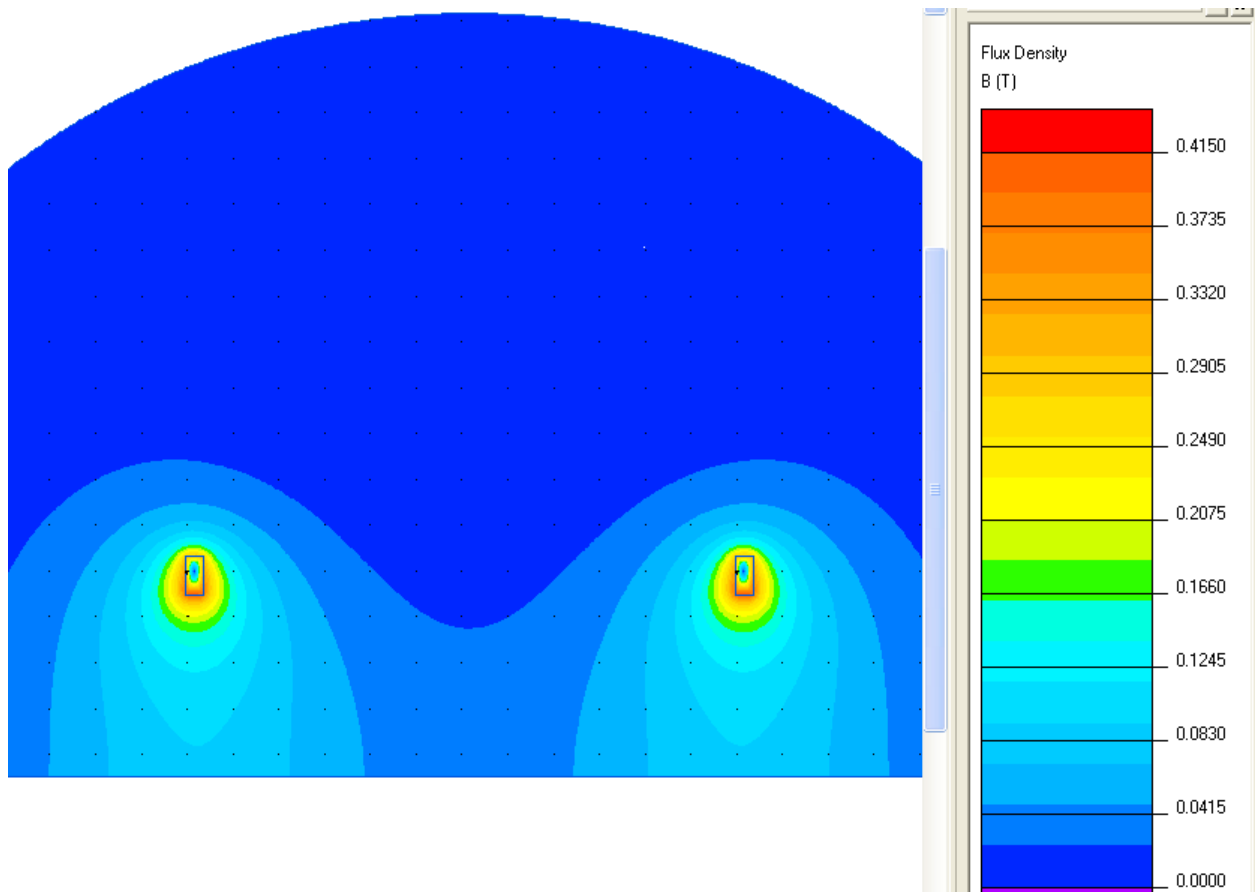


Рисунок 4.15. Двухмерное распределение магнитного поля при совместном испытании двух катушек СПОВ вне магнитной цепи генератора

4.7 Расчёт индуктивности и запасённой энергии в сверхпроводниковой обмотке возбуждения

Расчёт индуктивности каждой катушки СПОВ производился по формуле (4.5):

$$L = \Psi / I, \text{ Гн.} \quad (4.5)$$

где Ψ – потокосцепление, Вб; I – ток в катушке, А. Расчетным током выбрано значение $I_{кр} = 115 \text{ А}$.

Потокосцепление вычислялось по формуле (4.6):

$$\Psi = \Phi \cdot w, \text{ Вб.} \quad (4.6)$$

где Φ – магнитный поток, создаваемый каждой катушкой, Вб, w – число витков катушки.

Значение магнитного потока являлось результатом расчёта модели СПОВ в программе “JMAG”.

Энергия, запасенная в каждой катушке, вычислялась по формуле (4.7):

$$W = L \cdot I^2 / 2, \text{ Дж.} \quad (4.7)$$

Расчёт индуктивности и запасённой энергии при работе СПОВ в магнитной цепи генератора. При работе СПОВ в магнитной цепи генератора магнитный поток, создаваемый каждой катушкой и рассчитанный в программе “JMAG”, равен 0,135 Вб. Тогда по формуле (4.6) потокосцепление $\Psi = 0,135 \cdot 330 = 44,6$ Вб, а по формуле (4.5) индуктивность $L = 44,6 / 115 = 0,388$ Гн. В соответствии с формулой (4.7) энергия, запасённая в каждой катушке, равна $W = 0,43 \cdot 115^2 / 2 = 2570$ Дж.

Расчёт индуктивности и запасённой энергии при испытаниях вне магнитной цепи генератора. При испытаниях СПОВ вне магнитной цепи генератора магнитный поток, создаваемый каждой катушкой и рассчитанный в программе “JMAG”, равен 0,055 Вб. Тогда по формуле (4.6) потокосцепление $\Psi = 0,055 \cdot 330 = 18,1$ Вб, а по формуле (4.5) индуктивность $L = 18,1 / 115 = 0,157$ Гн. В соответствии с формулой (4.7) энергия, запасённая в каждой катушке, равна $W = 0,157 \cdot 115^2 / 2 = 1040$ Дж.

Выводы

1. Построена методика расчёта и выбора параметров сверхпроводникового синхронного генератора с когтеобразным ротором и комбинированным возбуждением.
2. Проведён электромагнитный расчёт макетного образца генератора и моделирование его магнитных полей.
3. Разработана конструкция когтеобразного ротора с постоянными магнитами и проведено его трёхмерное механическое моделирование в ППП «ANSYS», показавшее работоспособность предложенной конструкции.
4. На основе расчётов проведена конструктивная проработка макетного образца генератора мегаваттного уровня мощности.
5. Проведён расчет критического тока, электромагнитных сил, индуктивности и запасённой энергии в ВТСП-обмотках возбуждения.

ГЛАВА 5. ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ИСПЫТАНИЯ ВТСП-КАТУШЕК ОБМОТКИ ВОЗБУЖДЕНИЯ И ИХ КРИОСТАТОВ ДЛЯ МАКЕТНОГО ОБРАЗЦА ГЕНЕРАТОРА

5.1 Изготовление круглых катушек обмотки возбуждения генератора из ВТСП-ленты второго поколения

Институтом физики высоких энергий Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (далее – ИФВЭ) был разработан рациональный способ изготовления круглых катушек из неизолированной ВТСП-ленты второго поколения. В сотрудничестве с МАИ коллективом ИФВЭ были разработаны, изготовлены и испытаны при температуре жидкого азота две круглые катушки обмотки возбуждения из ВТСП-ленты второго поколения в собственных криостатах. На рисунке 5.1 показано размещение криостата с одной из катушек в корпусе генератора [53].

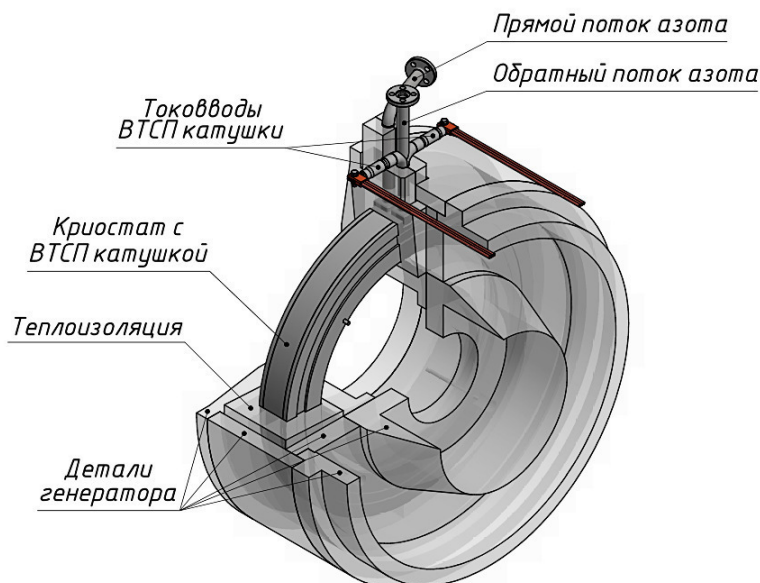


Рисунок 5.1. Криостат с ВТСП-катушкой в корпусе генератора

Каждая круглая катушка обмотки возбуждения генератора состоит из двух слоев, намотанных на каркас, содержащий внутреннюю обечайку и один из фланцев криостата [53].

Для изготовления катушек сотрудниками ИФВЭ [53] разработана технология изолирования ВТСП-ленты. По этой технологии ВТСП-лента была покрыта полиимидной плёнкой толщиной 13 мкм с перекрытием в 50 % ширины плёнки, то есть толщина изоляции на сторону составила 26 мкм. Общая длина изолированной ВТСП-ленты составила около 1 км [53].

Рисунок 5.2 [53] иллюстрирует намотку катушки обмотки возбуждения генератора. Бобина с ВТСП-лентой установлена на отдающий механизм с натяжным устройством намоточной машины. В процессе намотки первого и второго слоев периодически напряжением 500 В проверялось отсутствие замыканий на каркас.



Рисунок 5.2. Намотка круглой катушки

После намотки на каждый слой установлены пластины из стеклотекстолита и изоляция из полиимидной плёнки. Затем на наружную поверхность катушки установлена обечайка из коррозионно-стойкой стали и выполнено бандажирование катушки путём намотки на обечайку стальной проволоки.

После бандажирования на наружную поверхность катушки установлено кольцо из коррозионно-стойкой стали и проведены проверка напряжением 500 В отсутствия замыканий ВТСП-ленты на каркас и контроль межвитковых замыканий измерением сопротивления катушки.

5.2 Испытания катушек в погружном режиме охлаждения жидким азотом

С целью определения качества изготовления катушек они были испытаны в погружном режиме охлаждения в среде жидкого азота до их установки в криостаты. При испытаниях измерялся критический ток. В течение часа проводилось захолаживание каждой катушки до температуры кипения жидкого азота (рисунок 5.3 [53]), при которой катушка выдерживалась не менее 20 минут, после чего в неё вводился ток.

В таблице 5.1 приведены характеристики ленты, из которой были изготовлены катушки [53].

Таблица 5.1

Характеристики ленты ВТСП-2

Параметр	Значение
Подложка	Hastelloy C276 (немагнитная)
Минимальный критический ток (77 К, собственное поле), А	300
Ширина, мм	12
Толщина покрытий, мкм: - Серебро - Медь	1,5 90
Общая толщина, мкм	150

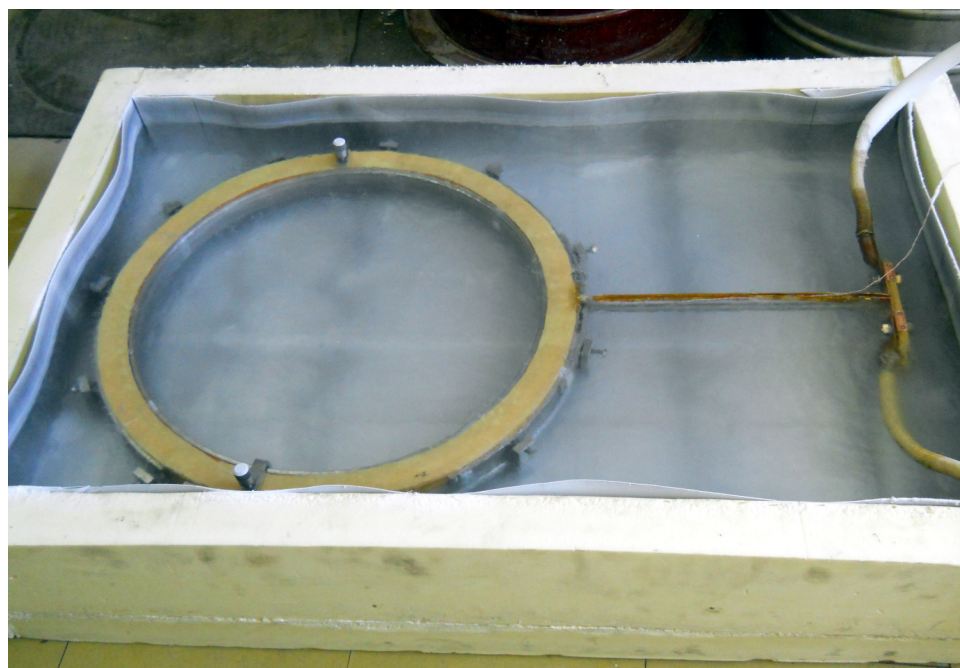


Рисунок 5.3. Испытания катушки в среде жидкого азота

В результате испытаний были определены значения критического тока, которые приведены в таблице 5.2.

Таблица 5.2

Результаты испытаний катушек

	Критический ток, А, при значениях падения напряжения на ВТСП-ленте на единицу длины		
	0,1 мкВ/см	1 мкВ/см	10 мкВ/см
Катушка № 1	112	122	126
Катушка № 2	112	128	139

5.3 Характеристики катушек обмотки возбуждения в криостатах

После успешных испытаний катушки в среде жидкого азота был окончательно собран корпус криостата: установлены остальные детали криостата, приварены патрубки входа и выхода азота, установлены токовводы и предварительно откалиброванные платиновые термометры.

По завершении сборки криостата проведены его испытания на герметичность при комнатной температуре и после захлаживания жидким азотом. После завершения проверки герметичности криостата на него установлена пенополиуретановая изоляция (рисунок 5.4).

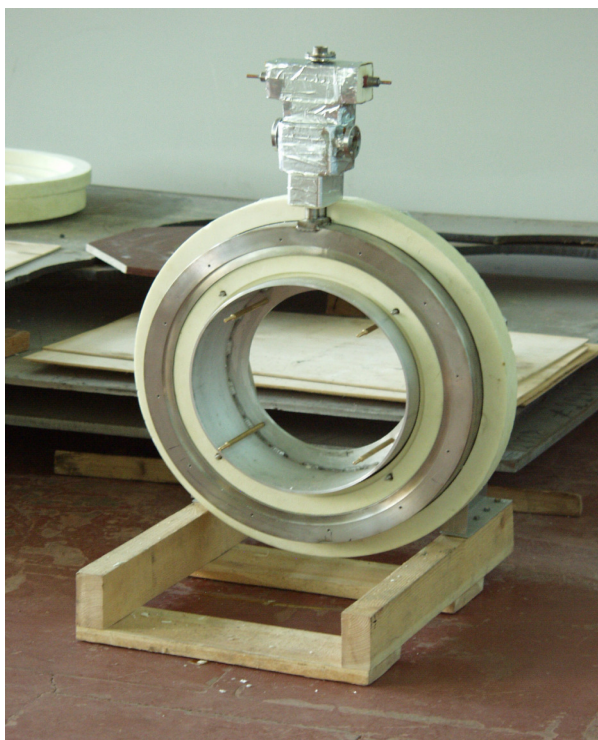


Рисунок 5.4. Криостат с частично установленной тепловой изоляцией

Основные характеристики катушек возбуждения и криостатов приведены в таблицах 5.3 и 5.4 [53].

Таблица 5.3 Характеристики круглой катушки № 1

Параметр	Значение	Примечание
Количество слоев в обмотке	2	
Общее число витков	306	
Толщина и материал электрической изоляции ленты на сторону, мкм	26	полиимидная пленка
Пороговое значение устойчивой работы обмотки, А	116	
Режим охлаждения		прокачной жидким азотом
Перепад давления азота между входом и выходом криостата, МПа	0,02	
Сопротивление обмотки, Ом	9,81	
Сопротивление изоляции, ГОм	более 100	$U_{исп} = 500 \text{ В}$
Температура при измерении сопротивлений, °С	23,1	
Индуктивность, мГн	106	
Толщина и материал тепловой изоляции криостата, мм	39	пенополиуретан
Габариты криостата, мм		
высота	932	
наружный диаметр	660	
толщина	144	
Масса криостата с обмоткой, кг	28	

Таблица 5.4 Характеристики круглой катушки № 2

Параметр	Значение	Примечание
Количество слоев в обмотке	2	
Общее число витков	306	
Толщина и материал электрической изоляции ленты на сторону, мкм	26	полиимидная пленка
Пороговое значение устойчивой работы обмотки, А	124	
Режим охлаждения		прокачной жидким азотом
Перепад давления азота между входом и выходом криостата, МПа	0,02	
Сопротивление обмотки, Ом	8,87	
Температура при измерении сопротивлений, °С	19,0	

Продолжение таблицы 5.4

Параметр	Значение	Примечание
Сопротивление изоляции, ГОм	более 100	$U_{\text{исп}} = 500 \text{ В}$
Индуктивность, мГн	107	
Толщина и материал тепловой изоляции криостата, мм	39	пенополиуретан
Габариты криостата, мм		
высота	932	
наружный диаметр	660	
толщина	144	
Масса криостата с обмоткой, кг	28	

5.4 Испытания катушек в прокачном режиме охлаждения жидким азотом

После окончательной сборки криостатов обмотки возбуждения и установки на них тепловой изоляции были проведены испытания катушек в прокачном режиме охлаждения.

На рисунке 5.5 представлена схема разработанного в ИФВЭ стенда для испытаний. В стенде использован криостат КР300, предназначенный для работы с жидким гелием. Для снижения теплопритоков из окружающей среды он имеет многослойную экрано-вакуумную изоляцию с экраном, охлаждаемым жидким азотом, и пенопластовую изоляцию крышки толщиной 300 мм.

Коллективом ИФВЭ рассчитан требуемый расход жидкого азота для охлаждения катушки в режиме криостатирования.

При использовании криостата КР300 в качестве емкости для жидкого азота расчётные теплопритоки из окружающей среды составляют около 5 Вт без охлаждения экрана жидким азотом и 1 Вт при охлаждении экрана жидким азотом. Расход азота через криостат с обмоткой регулировался давлением за счёт испарения жидкого азота электронагревателем ЭН.

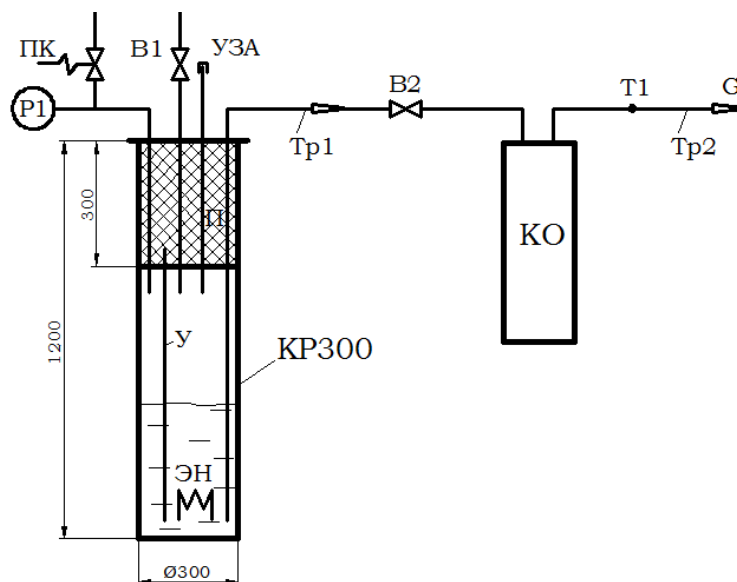


Рисунок 5.5. Схема стенда для прокачных испытаний круглых катушек:

КР300 – криостат с жидким азотом; П – изоляция крышки КР300;

B1, B2 – ручные вентили; УЗА – узел заливки жидкого азота;

Tr1 – трубопровод жидкого азота; Tr2 – трубопровод сброса азота в атмосферу;

P1 – манометр; ПК – предохранительный клапан; У – уровнемер жидкого азота;

T1 – термодатчик; ЭН – электрический испаритель жидкого азота;

КО – круглая катушка с криостатом; G – массовый расход азота

В режиме криостатирования катушки при температуре 78 К расход азота должен за счёт испарения жидкой фракции снимать теплопритоки к трубопроводу Tr1, вентилю B2 и к криостату катушки. Трубопровод Tr1 диаметром 12 мм и длиной 3 м покрыт теплоизоляцией толщиной 30 мм с удельной теплопроводностью $\lambda = 0,028$ Вт/(м·К). Расчётные значения теплопритоков к трубопроводу Tr1 $Q_{\text{Tr1}} = 57$ Вт, к вентилю B1 $Q_{\text{B1}} = 3$ Вт.

Криостат обмотки изолирован пенополиуретаном, имеющим удельную теплопроводность $\lambda = 0,04$ Вт/(м·К). Расчётная величина теплопритока к этому криостату $Q_{\text{КО}} = 130$ Вт. Суммарный теплоприток в режиме криостатирования $Q_{\text{КР}} = 190$ Вт. Рабочее давление в криостате выбрано $p_{\text{КР300}} = 1,2$ бар. При этом давлении теплота испарения азота $r = 196$ Дж/г.

Расход жидкого азота в режиме криостатирования определялся по формуле:

$$G_{\text{кр}} = Q_{\text{КР}} / r, \text{ г/с}; \quad (5.1)$$

$G_{\text{кр}} = 190 / 196 \approx 1$ г/с = 3,6 кг/ч = 4,5 л/ч для одного криостата катушки, при условии, что на выходе из этого криостата азот будет в состоянии сухого

насыщенного пара. Для более надёжного охлаждения катушки расчётное значение $G_{кр}$ увеличено на 10%, т.е. $G_{кр}=1,1 \text{ г/с} = 4 \text{ кг/ч} = 5 \text{ л/ч}$.

На рисунке 5.6 представлена ВТСП-обмотка в криостате при испытаниях в прокачном режиме охлаждения [53].

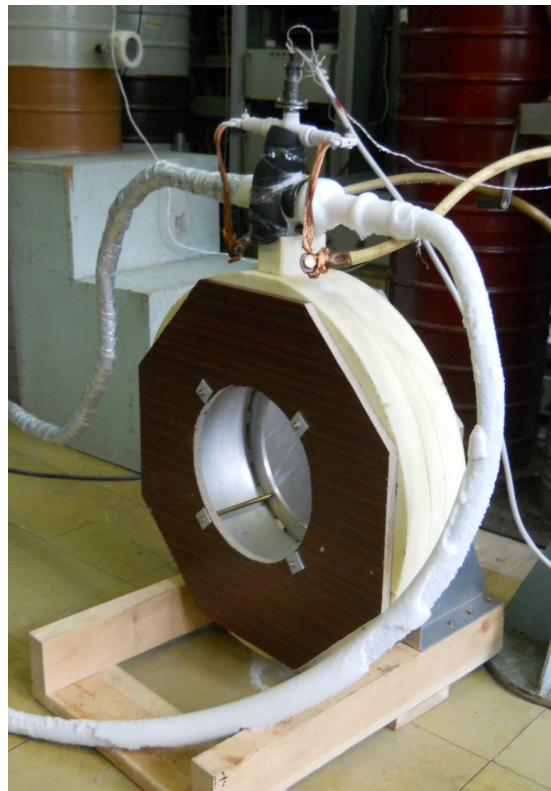


Рисунок 5.6. Испытания катушки в криостате в прокачном режиме

Захолаживание катушек на стенде проводилось в следующем порядке. Открывался вентиль В1, вентиль В2 закрывался, и жидкий азот заливался в криостат и в ванну экрано-вакуумной изоляции. Затем при закрытом узле УЗА и закрытых вентилях В1 и В2 нагревателем ЭН давление в криостате КР300 поднималось до 0,12 МПа. После подъёма давления мощность в нагревателе снижалась, и регулированием вентиля В2 в криостате КР300 поддерживалось постоянное давление 0,12 МПа, а перепад давления на криостате с катушкой составлял 0,02 МПа.

После окончания захолаживания начинался процесс криостатирования. Отключался нагреватель ЭН, и регулированием вентиля В2 в криостате поддерживалось постоянное давление 0,12 МПа. Вытеснение жидкого азота из

криостата и его прокачка через катушку происходило за счёт теплопритоков из окружающей среды. При необходимости включался нагреватель ЭН, с помощью которого поддерживалось требуемое давление в криостате.

Полученные при испытаниях значения тока для катушек при погружном (без криостата) и прокачном (в криостате) охлаждении приведены в таблице 5.5 [53]. Представленные значения получены при вводе тока со скоростью 0,5 А/с.

Таблица 5.5 Результаты испытаний катушек

Параметры катушки	Критический ток, А			Индуктивность, мГн
	0,1 мкВ/см	1 мкВ/см	10 мкВ/см	
№1 без криостата	112	122	126	104
№1 в криостате	100	116	123	106
№2 без криостата	112	128	139	105
№2 в криостате	110	126	137	107

Таблица показывает, что критическое значение тока катушек при погружном охлаждении («без криостата») несколько выше, чем при прокачном («в криостате»). Это связано с несколько бóльшим значением давления азота в криостате, вследствие чего его температура кипения поднялась с 77,4 К в ванне до 78 К в криостате. Результаты измерений также показали, что появление нормальной зоны в ВТСП-ленте наблюдается при токе выше 100 А, однако до определенного значения тока она находится в тепловом равновесии с охлаждающей криогенной средой. При прокачном охлаждении коллективом ИФВЭ проведено исследование порогового значения тока, при котором нарушается тепловое равновесие нормальной зоны с охлаждающим азотом и начинается её резкий рост в катушке.

Для определения порогового значения ток вводился в катушку до определенной величины, при которой делалась выдержка не менее 4 минут. Далее устанавливалось следующее (большее) значение тока и снова делалась выдержка. Процедура повторялась, пока не происходил переход катушки в нормальное состояние. Так, в катушку № 1 последовательно вводился ток 100; 105; 110; 114; 116 и 118 А. На рисунке 5.7 приведена временная зависимость напряжения на катушке для трёх последних токов из этого ряда. Переход в нормальное состояние произошёл при токе 118 А. Связанный с ним рост сопротивления происходил достаточно быстро, и напряжение на обмотке достигло максимального выходного напряжения источника питания 5 В за 7 с. Это показано на рисунке 5.8, где показан начальный участок временной зависимости напряжения катушки № 1 при различных уровнях тока.

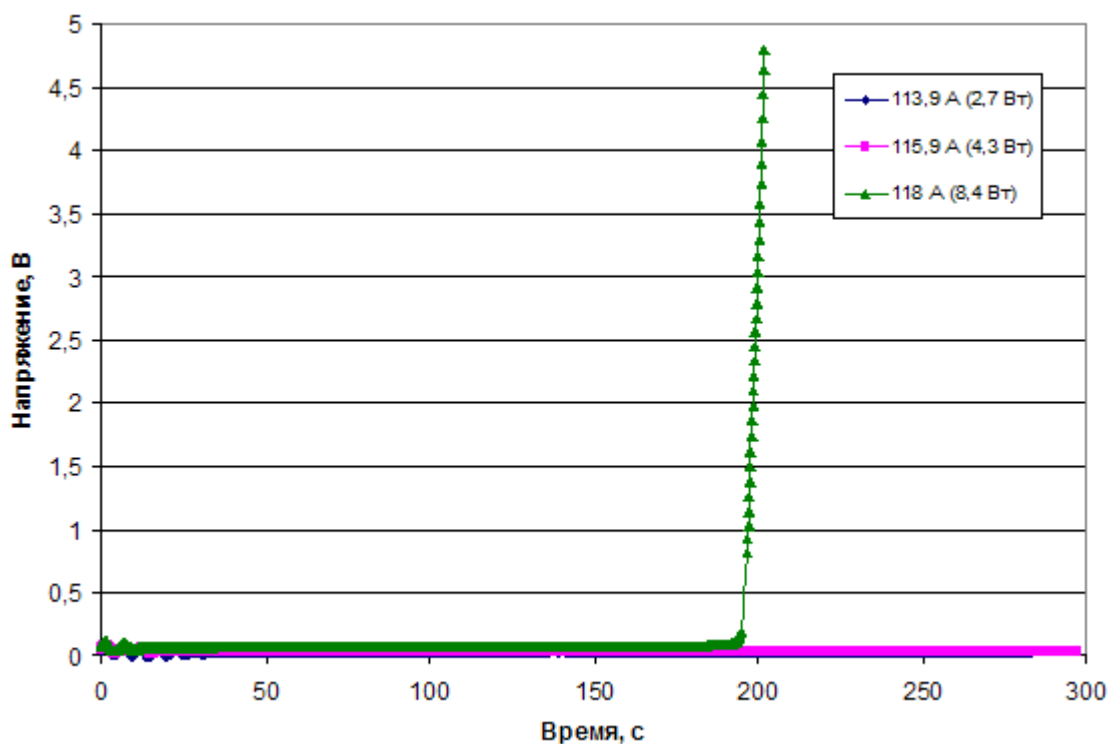


Рисунок 5.7. Напряжение на катушке № 1 при различных уровнях тока

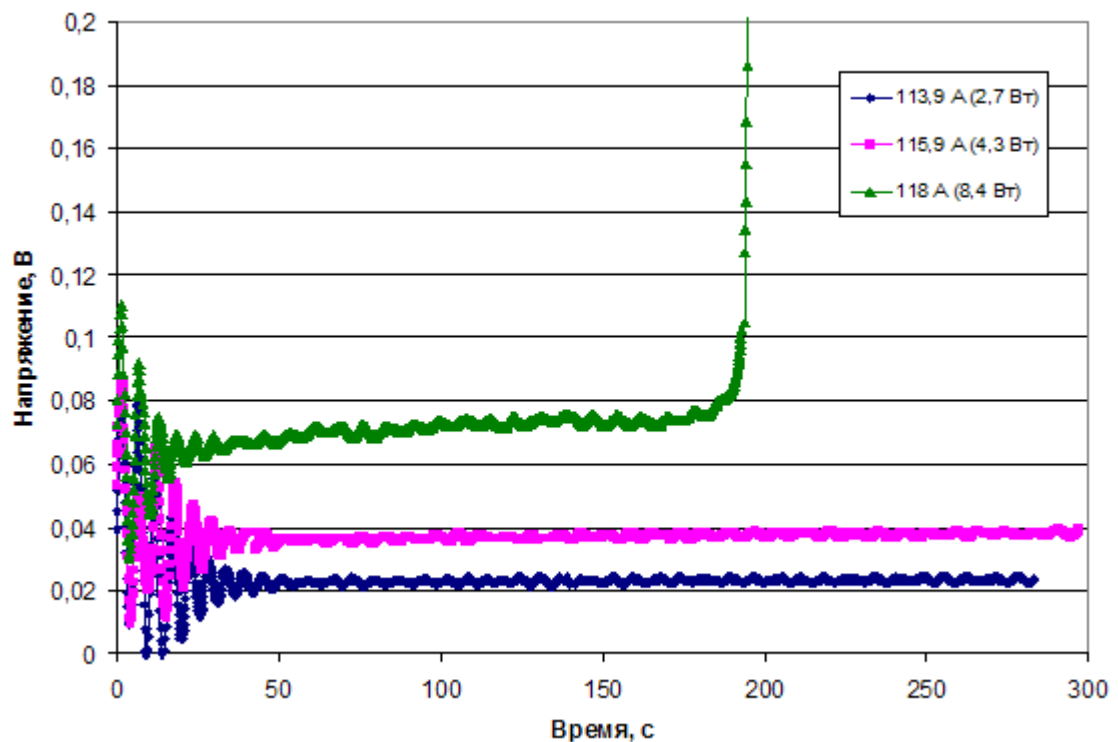


Рисунок 5.8. Начальный участок временной зависимости напряжения катушки № 1 при различных уровнях тока

Из рисунка 5.8 видно, что резкий рост нормальной зоны катушки произошел через 3 минуты 12 секунд после того, как был установлен ток величиной 118 А. Усредненная за это время мощность тепловыделений в катушке составила 8,4 Вт. При токе 116 А и выделяемой в катушке мощности тепловыделений 4,3 Вт за 5 минут перехода не произошло, однако можно заметить, что в течение этого времени напряжение на катушке медленно увеличивалось, что, возможно, привело бы к переходу обмотки в нормальное состояние спустя некоторое время. Таким образом, для катушки № 1 можно принять величину 116 А за максимальное значение тока. Таким же методом было установлено, что за максимальное значение тока катушки № 2 можно принять величину 124 А.

Выводы

1. Разработан рациональный способ изготовления круглых катушек из ВТСП-ленты второго поколения.
2. Изготовлены и испытаны две сверхпроводниковые катушки обмотки возбуждения с криостатами для макетного образца ВТСП-генератора.
3. Критическое значение тока, являющееся границей устойчивой работы катушек при прокачном режиме охлаждения, составило 116 А для катушки № 1 и 124 А для катушки № 2, что соответствует критическому току короткого образца в соответствующем магнитном поле. Граница устойчивой работы изготовленных катушек несколько превышает расчётное максимальное значение рабочего тока, равное 115 А.

ГЛАВА 6. ИСПЫТАНИЯ МАКЕТНОГО ОБРАЗЦА ГЕНЕРАТОРА

6.1 Описание испытательного стенда

Для испытаний генератора на участке испытаний электрических машин АО «НИИЭМ» был создан испытательный стенд, содержащий следующее оборудование:

- система силового электропитания приводного двигателя для испытаний генератора;
- нагрузочное устройство;
- система автоматизированного контроля и регистрации параметров;
- система криогенного обеспечения.

Система электропитания. Для привода испытуемого генератора используются асинхронные двигатели, питание которых осуществляется от трёхфазного статического частотного преобразователя с водяным охлаждением, внешний вид которого показан на рисунке 6.1. Микропроцессорное управление по частоте и амплитуде синусоидального напряжения осуществляется методом широтно-импульсной модуляции. Поддержание заданной частоты вращения двигателей осуществляется автоматически.



Рисунок 6.1. Тиристорный преобразователь с водяным охлаждением для питания привода генератора

Система автоматизированного контроля и регистрации параметров.

Для экспериментальных исследований разработан специализированный автоматизированный измерительный комплекс, состоящий из системы датчиков, усилителей и преобразователей сигнала, платы аналого-цифрового преобразователя, компьютера со специальным программным обеспечением. Измерительный комплекс позволяет осуществлять регистрацию, сбор, визуализацию и сохранение измеренных параметров ВТСП-генератора в режиме реального времени.

Система криогенного обеспечения. Криогенная система ожижения азота содержит генератор жидкого азота, мембранный фильтр, повышающий концентрацию азота перед ожижением до 99%, и сосуды для хранения полученной криогенной жидкости. Общий вид установки приведен на рисунке 6.2.



Рисунок 6.2. Криогенная установка

В качестве приводного двигателя для испытаний генератора используются два асинхронных электродвигателя, валы которых механически соединены с валом испытуемого генератора. Общий вид генератора и приводных двигателей на испытательном стенде приведён на рисунке 6.3.

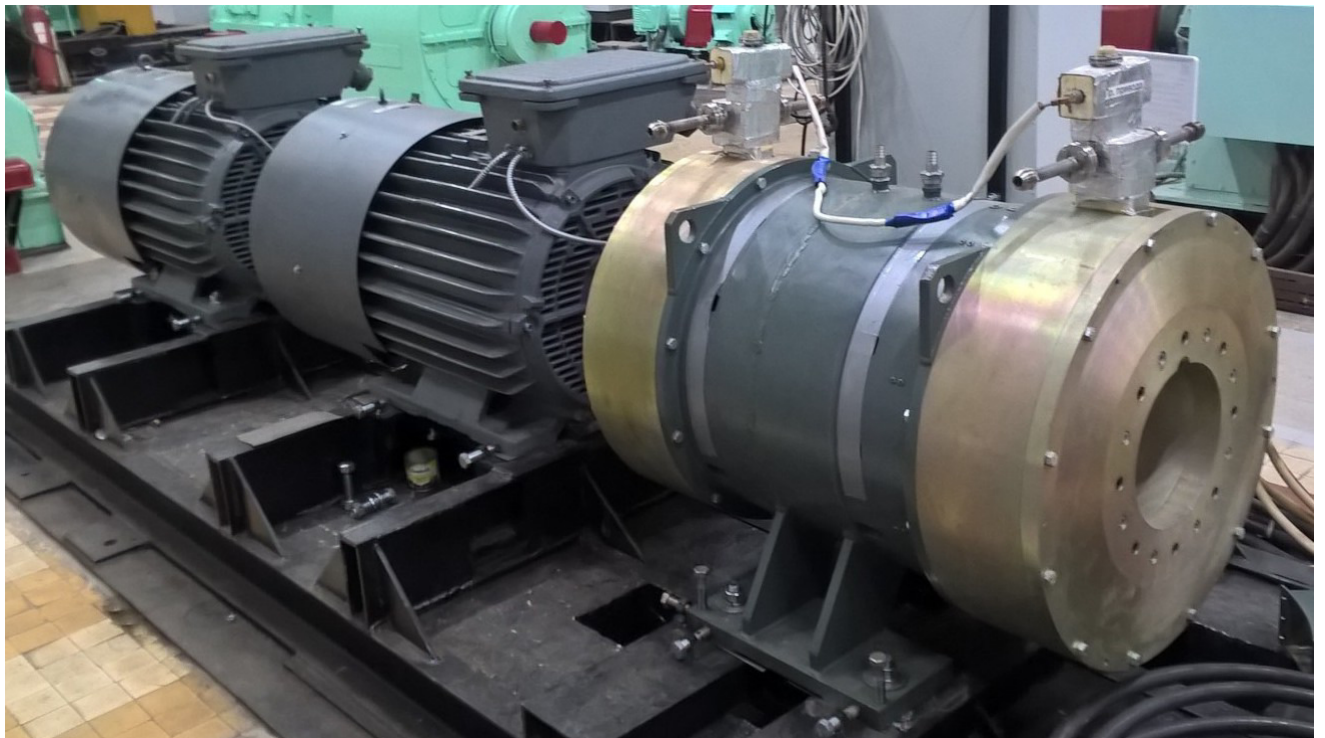


Рисунок 6.3. Приводные двигатели (слева) и испытуемый генератор (справа) на испытательном стенде

6.2 Результаты испытаний генератора

Испытания генератора проводились при пониженной частоте вращения 2400 мин^{-1} вместо номинальной частоты 6000 мин^{-1} по причине неполной готовности оборудования испытательного стенда к моменту испытаний.

При испытаниях генератора были получены характеристики холостого хода, короткого замыкания, внешние и мощностная характеристики.

На рисунке 6.4 представлены характеристики холостого хода генератора, полученные при работе обеих катушек СПОВ (1) и при работе только одной из них (2 и 3). Характеристики приведены в относительных единицах. За базисное значение тока возбуждения принята величина тока возбуждения холостого хода, за базисное значение ЭДС фазы якоря — номинальное фазное напряжение якоря.

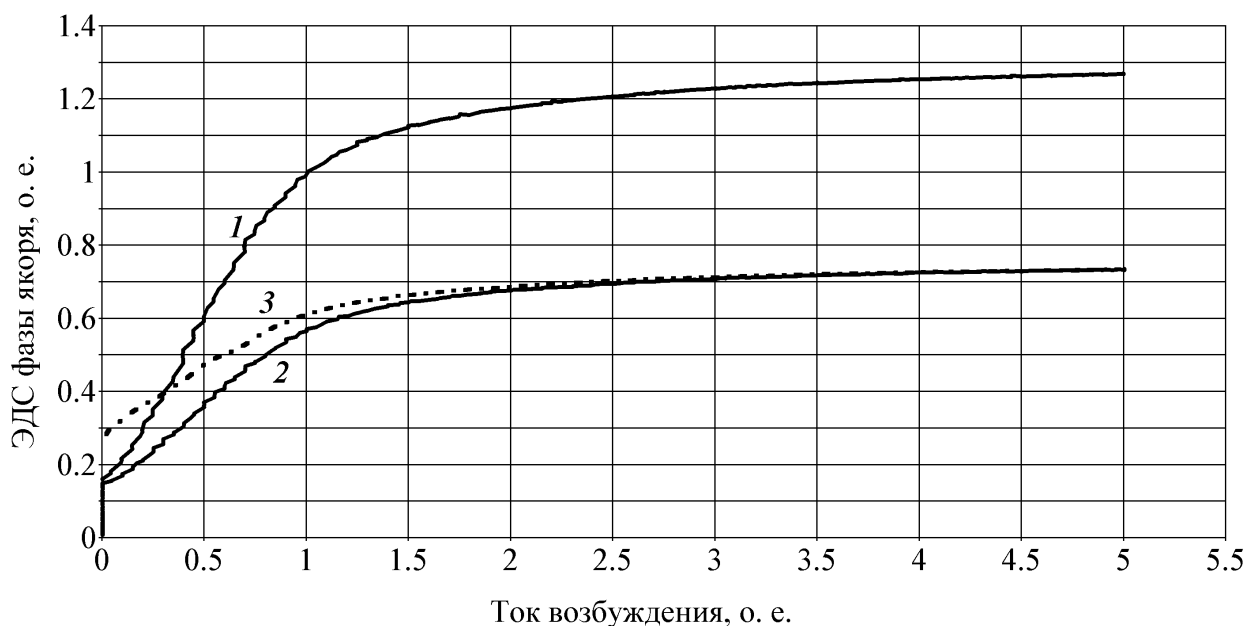


Рисунок 6.4. Характеристики холостого хода генератора: 1 — работают обе катушки СПОВ, 2 — работает только одна катушка СПОВ (ввод тока возбуждения), 3 — работает только одна катушка СПОВ (вывод тока возбуждения)

Характеристики показывают, что магнитный поток от постоянных магнитов при отсутствии тока СПОВ составляет около 16 % от номинальной величины.

Внешние характеристики получены при двух токах возбуждения: токе возбуждения холостого хода (1 о. е.) и при токе возбуждения 3,75 о. е. Характеристики построены в относительных единицах и представлены на рисунке 6.5. За базисное значение тока якоря принята величина номинального тока якоря, за базисное значение напряжения фазы якоря — номинальное фазное напряжение якоря.

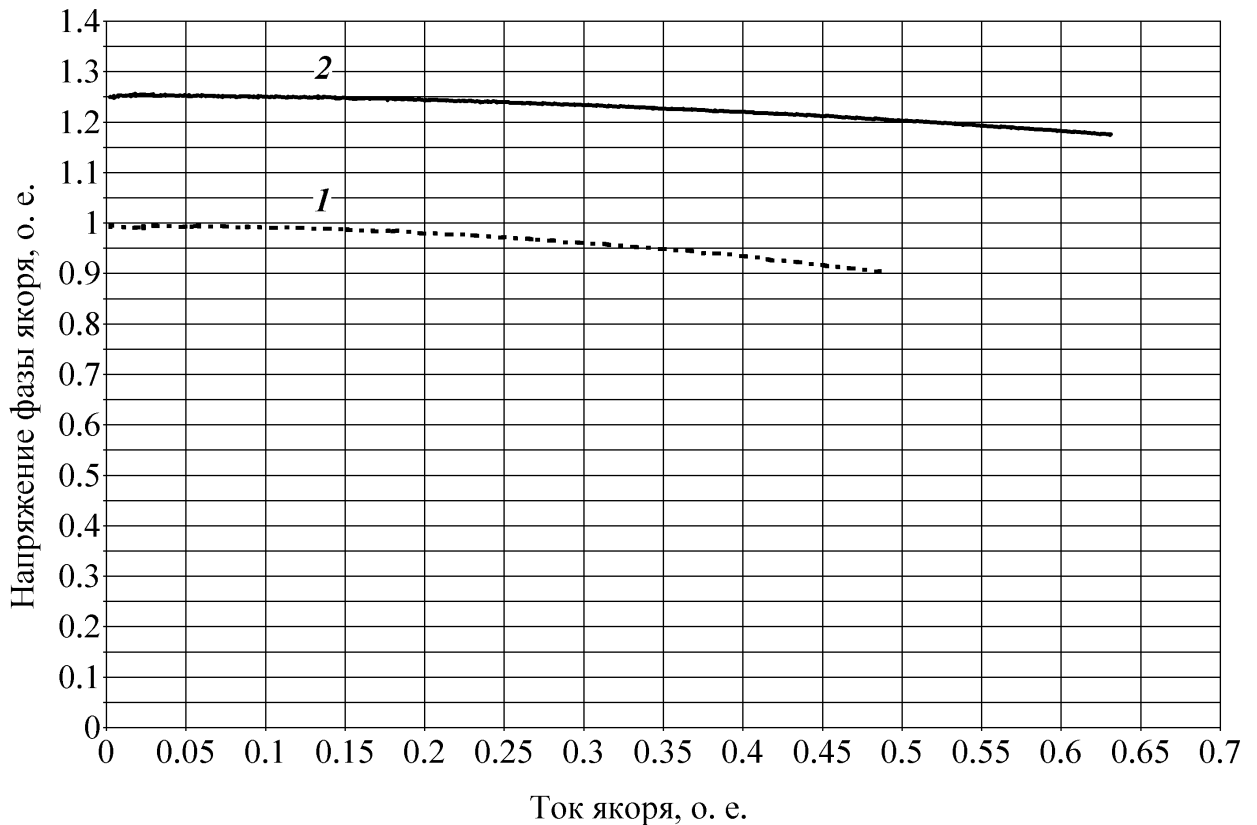


Рисунок 6.5. Внешние характеристики генератора:

1 — при токе возбуждения 1 о. е.; 2 — при токе возбуждения 3,75 о. е.

На рисунке 6.6 представлена характеристика короткого замыкания. Величина тока короткого замыкания (около 0,2 о. е.) при отсутствии тока возбуждения вызвана магнитным потоком от постоянных магнитов. Малое значение тока короткого замыкания (1,25 о. е.) при токе возбуждения, близком к току возбуждения холостого хода, связано с большой величиной магнитного потока продольной реакции якоря при коротком замыкании статора.

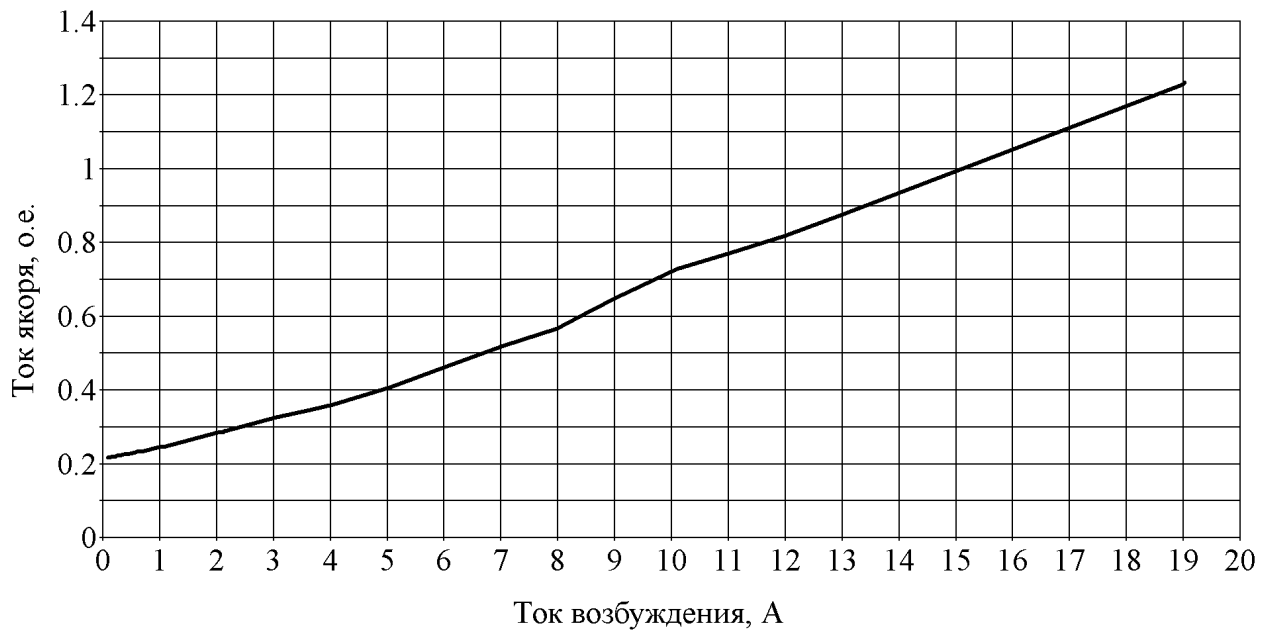


Рисунок 6.6. Характеристика короткого замыкания генератора

На рисунке 6.7 представлены мощностные характеристики генератора — зависимости активной мощности нагрузки, подключенной к якорю генератора, от тока якоря при постоянном токе возбуждения, равном 3,75 о. е.

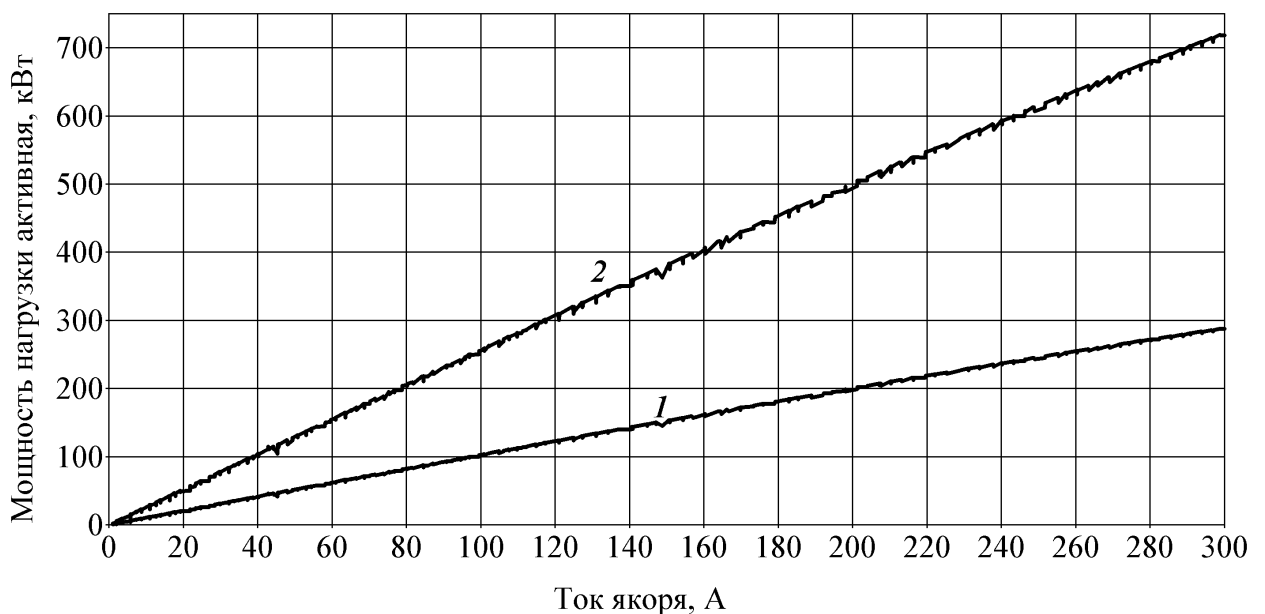


Рисунок 6.7. Мощностная характеристика: 1 — при частоте вращения 2400 мин^{-1} , 2 — при номинальной частоте вращения 6000 мин^{-1} (пересчитана)

Кривая 1 получена экспериментально при частоте вращения 2400 мин^{-1} , кривая 2 получена путем умножения значений мощности кривой 1 в 2,5 раза (что

соответствует искусственному увеличению частоты вращения до номинального значения 6000 мин^{-1}). По причине пониженной величины ЭДС при проведении эксперимента ток якоря был ограничен величиной 300 А.

Мощностная характеристика показывает, что при токе якоря 300 А (0,63 о. е.) величина мощности нагрузки равна 290 кВт (725 кВт при пересчете на 6000 мин^{-1}).

Так как мощностная характеристика была получена при насыщенной магнитной цепи (при токе возбуждения 3,75 о. е.), то можно предположить, что рост тока нагрузки до номинального значения тока якоря 478 А не приведёт к значительному уменьшению напряжения на обмотке якоря, так как магнитный поток поперечной реакции якоря будет оказывать незначительное влияние на магнитный поток в воздушном зазоре из-за насыщения магнитной цепи потоком возбуждения. Тогда характер зависимости активной мощности нагрузки от тока якоря будет незначительно отличаться от линейного до достижения током нагрузки значения 478 А. В этом случае возможно достижение номинального значения активной мощности нагрузки 990 кВт при номинальном токе якоря и коэффициенте мощности нагрузки $\cos\varphi = 1$, что отражено на рисунке 6.8.

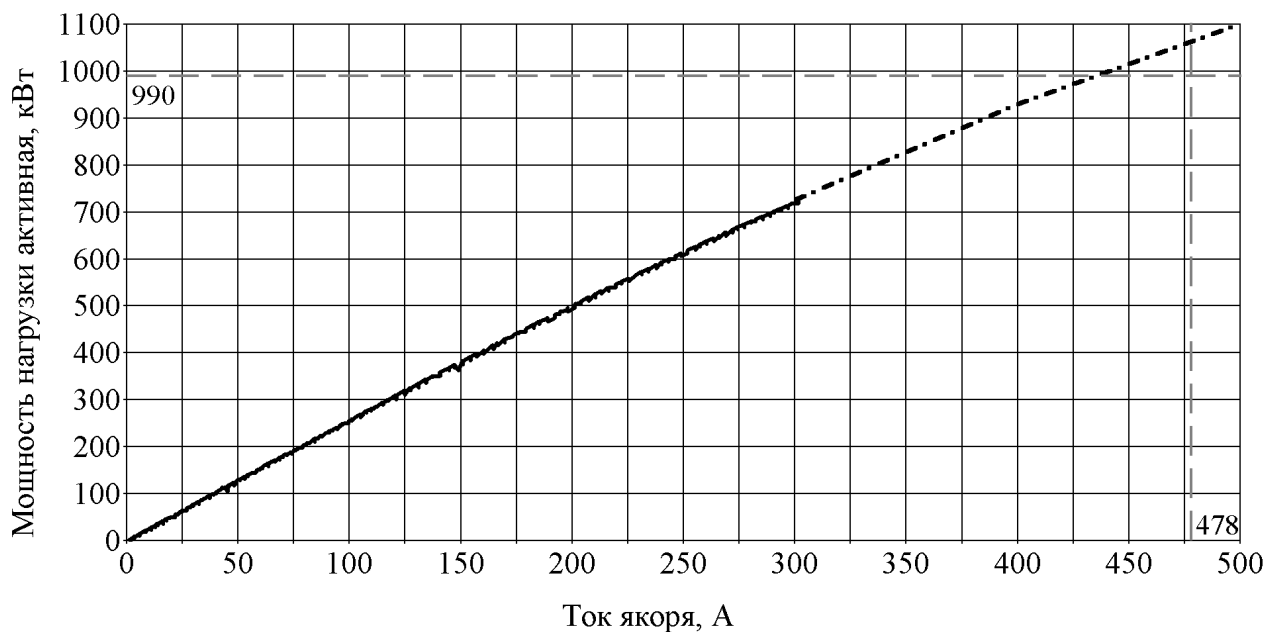


Рисунок 6.8. Прогнозируемая мощностная характеристика генератора при частоте вращения 6000 мин^{-1} и токе возбуждения 3,75 А

Выводы

1. Создан испытательный стенд для экспериментальных исследований электрических ВТСП-машин мегаваттного уровня мощности, включающий систему криогенного обеспечения и систему автоматизированного контроля и регистрации параметров.
2. Спроектирован, изготовлен и успешно испытан первый в РФ ВТСП-генератор с когтеобразным ротором и комбинированным возбуждением.
3. Проведены экспериментальные исследования макетного образца ВТСП-генератора мегаваттного уровня мощности, показавшие его превосходство по сравнению с машинами переменного тока традиционной конструкции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По итогам выполненной диссертационной работы можно заключить следующее.

1. Обзор литературных данных показал актуальность и перспективность применения ВТСП-генераторов для систем электродвижения морских судов.

2. Разработана конструктивная схема пожаробезопасного синхронного генератора с когтеобразным ротором и комбинированным возбуждением, позволяющая повысить надёжность генератора благодаря применению неподвижной ВТСП-обмотки возбуждения и цельнометаллического ротора с постоянными магнитами, защищённая патентом РФ на полезную модель.

3. Разработана методика поверочного расчёта магнитной цепи сверхпроводниковых синхронных генераторов с когтеобразным ротором и комбинированным возбуждением для систем электродвижения транспортных средств, основанная на методах теории магнитных цепей.

4. Экспериментальные исследования маломасштабного образца генератора предложенной конструктивной схемы показали, что он превосходит по ЭДС классические генераторы с когтеобразным ротором.

5. Проведены выбор и расчёт параметров макетного образца сверхпроводникового синхронного ВТСП-генератора с когтеобразным ротором и комбинированным возбуждением мегаваттного уровня мощности и моделирование его магнитных полей, показавшие реализуемость и перспективность предложенной конструктивной схемы.

6. Разработана конструкция когтеобразного ротора с постоянными магнитами для макетного образца ВТСП-генератора и проведено трёхмерное моделирование магнитных полей и механических процессов.

7. Разработан рациональный способ изготовления круглых катушек из ВТСП-ленты второго поколения, по которой изготовлены катушки обмотки возбуждения с криостатами для макетного образца генератора мегаваттного уровня мощности.

8. Проведены экспериментальные исследования катушек ВТСП-обмотки возбуждения, показавшие, что критическое значение тока обмотки при прокачном режиме охлаждения соответствует критическому току короткого образца в заданном магнитном поле.

9. Разработан испытательный стенд для экспериментальных исследований электрических ВТСП-машин мощностью около 1 МВА, включающий систему криогенного обеспечения.

10. Изготовлен и успешно испытан первый в РФ генератор с неподвижными ВТСП-обмотками и комбинированным возбуждением мегаваттного уровня мощности.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Криогенные электрические машины для аэрокосмической техники [Текст] / В. Т. Пенкин, К. Л. Ковалев А. Е. Ларионов, К. А. Модестов, А. А. Дубенский // Сборник трудов III-й Национальной конференции по прикладной сверхпроводимости НКПС-2015. – Москва, 2017. – с. 295 – 301.
2. An Outlook of the Use of Cryogenic Electric Machines On-board Aircraft [Text] / A. A. Dubensky, K. L. Kovalev, A. E. Larionoff, K. A. Modestov, V. T. Penkin, V. N. Poltavets // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – April 2016. – Vol. 26. – No. 3. – [4] p.
3. Специальные электрические машины: (Источники и преобразователи энергии). Учеб. пособие для вузов [Текст] / А. И. Бертинов, Д. А. Бут, С. Р. Мизюрин и др.; Под ред. А. И. Бертинова. – М.: Энергоиздат, 1982. – с. 419.
4. Развитие электродвижения военных флотов в мире [Текст] / И. Г. Целуйко // Молодой ученый. – 2012. – №4. – с. 54 – 57.
5. Морской флот. Судовые энергетические установки. Лекция 10 [Электронный ресурс] // Проект «Автоматика и морской флот» [автор проекта В. В. Цветков]. – Режим доступа: http://vtsv.16mb.com/s_doc9b.html.
6. Assessment of Potential Performance of a 45 MW Marine Superconducting Motor [Text] / A. D. Appleton, R. Potts, B. J. C. Grand. – Canada, Transport Canada, International Research & Development Co. Ltd. – 1980. – pp. 1 – 15.
7. Design and Manufacture of a Large Superconducting Homopolar Motor (and Status of Superconducting AC Generator) [Text] / Appleton A. D. // IEEE T. Mag. – 1983. – Vol. 19(3). – pp. 1047 – 1050.
8. Электрические машины и устройства на основе массивных высокотемпературных сверхпроводников [Текст] // Колл. авт. под редакцией Л. К. Ковалева, К. Л. Ковалева и С. М.-А. Конеева. – М.: Физматлит, 2010. – 294 с.

9. Superconducting Electrical Machines State of the Art [Text] / Jacek F. Gieras // Przegląd Elektrotechniczny. – December 2009. – pp. 1 – 21.
10. Сверхпроводниковые электрические машины и магнитные системы [Текст]: Учеб. пособие для вузов по специальности «Электромеханика» / А. И. Бертинов, Б. Л. Алиевский, К. В. Илюшин и др.; Под ред. Б. Л. Алиевского. – М.: Изд-во МАИ, 1993. – 344 с.: ил.
11. Перспективы применения криогенных электрических машин в авиации [Текст] / Ковалев Л. К., Ларионов А. Е., Модестов К. А., Пенкин В. Т., Полтавец В. Н. // Электричество. – 2015. – № 1. – с. 4 — 12.
12. EUCAS – 2013 Сверхпроводники на основе MgB₂ [Электронный ресурс] / Д. Н. Раков // Бюллетень «Сверхпроводники в электроэнергетике». – 2013. – т. 10. – вып. 5. – Режим доступа: http://htsc-power.ru/bulletein.php?menu=bull_subj&id=1078&issue_id=106.
13. Обзор современного состояния разработок в области ВТСП-2 по результатам представленных на EUCAS-2015 докладов [Электронный ресурс] / П. Н. Дегтяренко // Бюллетень «Сверхпроводники в электроэнергетике». – 2015. – т. 12. – вып. 5. – Режим доступа: http://htsc-power.ru/bulletein.php?menu=bull_subj&id=1225&issue_id=120.
14. Электромеханические преобразователи энергии на основе массивных высокотемпературных сверхпроводников [Текст] / Л. К. Ковалев, К. Л. Ковалев, С. М.-А. Конеев, В. Т. Пенкин, В. Н. Полтавец. – М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2008. – 440 с.: ил.
15. BSCCO Wire [Electronic resource] // Sumitomo Electric Industries, Ltd. Superconductivity Web Site BSCCO Wire. – Режим доступа: http://global-sei.com/super/hts_e/index.html.
16. YBCO Coated Conductor Development at Bruker HTS: Status and Outlook [Electronic resource] / A. Usoskin // Braunschweig May 12, 2009. – Режим доступа: https://elenia.tu-bs.de/fileadmin/content/sls/4sls/4BSSupraleiter_YBCO_Coated_Conductor_Development.pdf.

17. Сверхпроводники на основе железа: от открытия к первым проводам для прикладной сверхпроводимости [Электронный ресурс] / Д. И. Шутова // Бюллетень «Сверхпроводники в электроэнергетике». – 2013. – т. 10. – вып. 3. – Режим доступа: http://htsc-power.ru/bulletein.php?menu=bull_subj&id=1042&issue_id=104.

18. Сверхпроводники на основе железа 2013-2015 гг [Электронный ресурс] / Д. И. Шутова // Бюллетень «Сверхпроводники в электроэнергетике». – 2015. – т. 12. – вып. 5. – Режим доступа: http://htsc-power.ru/bulletein.php?menu=bull_subj&id=1226&issue_id=120.

19. 365kW HTS ship motor cooled by Liquid Nitrogen [Электронный ресурс] // Sumitomo Electric Industries, Ltd. Superconductivity Web Site Ship motor. – Режим доступа: global-sei.com/super/magnet_coil_e/shipmotor.html.

20. Test Results from Siemens Low-Speed, High-Torque HTS Machine and Description of further Steps towards Commercialization of HTS Machines [Text] / W. Nick, J. Grundmann, J. Fraunhofer // IEEE/CSC & ESAS European Superconductivity News Forum. – 2012. – No. 19. – p. 5.

21. Физическое моделирование потерь на трение в режиме холостого хода синхронного ВТСП-двигателя [Текст] / Е. Н. Андреев, Д. А. Волков, А. Р. Орлов, С. С. Тимофеев, М. А. Турубанов, Л. И. Чубраева, В. Ф. Шишлаков // Информационно-управляющие системы, 2011. – № 3. – с. 34 – 38.

22. Основы электромеханики [Текст]: Учебное пособие / Бут Д. А. – М.: Изд-во МАИ, 1996. – 468 с.: ил.

23. Существующие в мире ВТСП крупные электродвигатели и генераторы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://htsc-power.ru/message.php?menu=item&id=467>.

24. High Power Density Superconducting Machines - Development Status and Technology Roadmap [Text] / K. S. Haran [et al.] // Supercond. Sci. Technol. – 2017. – No. 30. – p. 36 – 37.

25. Superconductivity in Westinghouse / R. D. Blaugher, A. I. Braginski, B. S. Chandrasekhar, J. Gvaler, C. K. Jones, J. Parker, J. Przybysz, M. S. Walker //

IEEE/CSC & ESAS European Superconductivity News Forum. – 2012. – No. 20. – p. 12.

26. Криогенное оборудование для сверхпроводниковых электротехнических устройств [Электронный ресурс] / В. И. Щербаков, В. В. Лобынцев // Бюллетень «Сверхпроводники в электроэнергетике». – 2008. – т. 5. – вып. 1. – Режим доступа: http://htsc-power.ru/bulletein.php?menu=bull_subj&id=373&issue_id=32.

27. Компактные криогенные рефрижераторы средней мощности / М. П. Алексеев, А. В. Кутергин // Бюллетень «Сверхпроводники в электроэнергетике». – 2009. – т. 6. – вып. 1. – Режим доступа: http://htsc-power.ru/bulletein.php?menu=bull_subj&id=530&issue_id=46.

28. Криообеспечение ВТСП электрогенераторов и электродвигателей [Текст] / В. В. Костюк, Б. И. Каторгин, В. П. Фирсов, К. Л. Ковалев, Ю. А. Равикович, С. Ф. Тимушев // Инновационные технологии в энергетике / Российская академия наук. – М.: Наука, 2010. Кн. 3. Прикладная высокотемпературная сверхпроводимость / под ред. академика РАН В. В. Костюка и академика РАН Б. И. Каторгина. – 2016. – 142 с.

29. Бесконтактные электрические машины [Текст]: Учеб. пособие для электромех. и электроэнерг. спец. вузов / Бут Д. А. – М.: Высшая школа, 1990. – 416 с.

30. Сверхпроводниковые синхронные машины с когтеобразными полюсами и постоянными магнитами на роторе [Текст] / Боярчук К. А., Вержбицкий Л. Г., Дубенский А. А., Ковалев Л. К., Ковалев К. Л., Кондратюк И. К., Модестов К. А. // Электричество. – 2013. – № 10. – с. 2 – 7.

31. Авиационные электрические генераторы [Текст] / А. И. Бертинов. – М.: Государственное издательство оборонной промышленности, 1959. – с. 396.

32. Бортовой ВТСП-генератор для перспективной схемы полностью электрифицированного самолета [Текст] / Дубенский А. А., Ковалев Л. К. // Тезисы доклада Московской молодёжной научно-практической конференции «Инновации в авиации и космонавтике – 2012» (17 – 20 апреля 2012 г). – М.: ООО

«Принт-салон». – с. 64 – 65.

33. Бортовой ВТСП-генератор для перспективной схемы полностью электрифицированного самолета [Текст] / Дубенский А. А., Ковалев Л. К. // Вопросы создания аэрокосмических и ракетных летательных аппаратов. / Под ред. Профессора Комарова Ю. Ю. – М.: Изд-во Ваш полиграфический партнер, 2013. – с. 142 – 149.

34. Синхронные машины с когтеобразными полюсами [Текст] / Апсит В. В. – Рига: Изд-во АН Латвийской ССР, 1959. – 300 с.

35. Development of a superconducting claw-pole motor [Text] / E. Watanabe, K. Kikukawa, Y. Satoh, and S. Torii // Physica C: Superconductivity. – September 2008. – 468. – pp. 2087 – 2090.

36. Электрические машины летательных аппаратов. Гармонический анализ активных зон [Текст] / Б. С. Зечихин. - М.: Машиностроение, 1983. – с. 16.

37. Магнитоэлектрический генератор [Текст]: пат. СССР № 131402 / Б. С. Зечихин. – № 652053/24; заявл. 25.01.1960, опубл. в БИ, 1960, № 17. – 2 с.: ил.

38. Сверхпроводниковая электрическая машина с аксиальным возбуждением и когтеобразным ротором с постоянными магнитами [Текст]: пат. 163830 Рос. Федерация: МПК H02K 55/02, H02K 21/14, H02K 1/27 / Ковалев К. Л. [и др.]; заявитель ОАО ВНИИКП, патентообладатель Министерство промышленности и торговли РФ. – № 2016105566/07; заявл. 18.02.2016, опубл. 10.08.2016, Бюл. № 22. – 2 с.: ил.

39. Методика расчета магнитной цепи сверхпроводниковых синхронных электрических машин для перспективных ЛА [Текст] / Дубенский А. А., Ковалев Л. К., Модестов К. А. // Вестник МАИ. – 2013. – т. 20. - № 4. – с. 146 – 158.

40. Методика расчета магнитной цепи сверхпроводниковых электрических машин с когтеобразными полюсами и постоянными магнитами для систем электроснабжения перспективных ЛА [Текст] / Дубенский А. А., Ковалев Л. К. // Тезисы доклада 12-й международной конференции «Авиация и космонавтика – 2013» (12 – 15 ноября 2013 г., Москва). – СПб.: Мастерская печати, 2013. – с. 299 – 300.

41. Основы теории цепей [Текст]. Учебник для вузов. Изд. 4-е, переработанное / Зевеке Г. В., Ионкин П. А., Нетушил А. В., Страхов С. В. – М.: Энергия, 1975. – с. 32 – 35.

42. Курс аналитической геометрии и линейной алгебры [Текст]: Изд. 10-е, испр. / Беклемишев Д. В. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 304 с.

43. Brushless Superconducting Synchronous Generator With Claw-Shaped Poles and Permanent Magnets [Text] / K. L. Kovalev, L. G. Verzhbitsky, S. S. Kozub, V. T. Penkin, A. E. Larionov, K. A. Modestov, N. S. Ivanov, E. E. Tulinova, A. A. Dubensky // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – April 2016. – Vol. 26. – No. 3. – [4] p.

44. Характеристики сверхпроводниковых синхронных машин с когтеобразными полюсами для летательных аппаратов [Текст] / Ковалев К. Л., Пенкин В. Т., Модестов К. А., Дубенский А. А. // Вестник МАИ. – 2014. – т. 21. – № 5. – с. 124 – 128.

45. Бесконтактный сверхпроводниковый синхронный генератор с когтеобразными полюсами и постоянными магнитами [Текст] / Ковалев К. Л., Дубенский А. А., Модестов К. А., Пенкин В. Т., Ларионов А. Е., Тулинова Е. Е., Иванов Н. С., Вержбицкий Л. Г., Козуб С. С. // Сборник трудов III-й Национальной конференции по прикладной сверхпроводимости НКПС-2015. – Москва, 2017. – с. 359 — 363.

46. Проектирование электрических машин [Текст]. Изд. 3-е, переработ. и доп. / П. С. Сергеев, Н. В. Виноградов, Ф. А. Горяинов. – М.: Энергия, 1969. – 632 с.: ил.

47. Автоматизированный расчет авиационного синхронного генератора [Текст]. Методические разработки по курсовому и дипломному проектированию / Авт-сост.: Б. С. Зечихин, М. С. Радько, Н. П. Старовойтова, О. Ю. Цыбакова; Под ред. Б. С. Зечихина. – М.: Изд-во МАИ, 1989. – 64 с.: ил.

48. Проектирование электрических машин [Текст] / И. П. Копылов, Б. К. Клоков, В. П. Морозкин, Б. Ф. Токарев; Под ред. И. П. Копылова. – М.: Энергоатомиздат, 1993.

49. Инженерный анализ в ANSYS Workbench [Текст]. Учебное пособие / Бруйка В. А. , Фокин В. Г., Солдусова Е. А., Глазунова Н. А., Адеянов И. Е. – Самара: Самарский государственный технический университет, 2010. – 271 с.: ил.

50. Материалы в машиностроении. Выбор и применение [Текст] : в 5 т. / Под общей редакцией И. В. Кудрявцева. – М.: Машиностроение, 1967. Т. 1. Цветные металлы и сплавы / Колл. авт. под ред. Л. П. Лужникова. – 304 с.

51. Материалы в машиностроении. Выбор и применение [Текст] : в 5 т. / Под общей редакцией И. В. Кудрявцева. – М.: Машиностроение, 1967. Т. 2. Конструкционная сталь / Колл. авт. под ред. Е. П. Могилевского.

52. Материалы магнитотвердые спеченные. Марки, технические требования и методы контроля [Текст]: ГОСТ 21559-76 [с изменениями № 1 и № 2]. – Введ. 1.07.1977. – М.: Изд-во стандартов, 1976. – 21 с.: ил.

53. ВТСП кольцевые катушки обмотки возбуждения синхронного генератора [Текст] / А. И. Агеев, И. В. Богданов, С. И. Зинченко, Е. М. Каштанов, С. С. Козуб, М. Н. Столяров, И. С. Терский, А. Д. Харченко, В. И. Шувалов, А. А. Дубенский, К. А. Модестов, К. Л. Ковалев, Л. Г. Вержбицкий, А. Л. Меньшенин, А. А. Молодык, С. Р. Ли // Сборник трудов III-й Национальной конференции по прикладной сверхпроводимости НКПС-2015. – Москва, 2017. – с. 273 – 279.