

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»

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2018

Работа выполнена на кафедре «Электроэнергетические, электромеханические и биотехнические системы» Института № 3 «Системы управления, информатика и электроэнергетика» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (МАИ).

Научный руководитель Пенкин Владимир Тимофеевич,  
доктор технических наук, старший научный сотрудник, профессор  
кафедры «Электроэнергетические, электромеханические и  
биотехнические системы» МАИ

Официальные оппоненты Круглов Сергей Леонидович, доктор технических наук,  
ведущий научный сотрудник Курчатовского комплекса  
НБИКС-технологий Федерального государственного  
бюджетного учреждения «Национальный  
исследовательский центр «Курчатовский институт» (НИЦ  
«Курчатовский институт»)

Мисютин Роман Юрьевич, кандидат технических наук,  
начальник конструкторского отдела электрических машин  
Департамента систем электроснабжения Центра  
проектирования АО «Технодинамика»

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования «Национальный  
исследовательский университет «МЭИ»

Защита диссертации состоится 25 сентября 2018 года в 11 часов на заседании диссертационного совета Д 212.125.07 в Московском авиационном институте (национальном исследовательском университете) по адресу: г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4, Главный административный корпус, аудитория 308.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» и на сайте: <http://www.mai.ru/events/defence>.

Ваш отзыв на автореферат в количестве двух экземпляров, заверенных печатью, просим направлять по адресу: 125993, ГСП-3, А-80, Москва, Волоколамское шоссе, д.4, Учёный совет МАИ.

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 201\_\_ года.

Учёный секретарь

Диссертационного совета Д 212.125.07

к. т. н.



В. С. Степанов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**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. 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.

**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<sup>-1</sup>. 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, наличие вращающихся криостатов со сверхпроводящими обмотками и низкая частота вращения. 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 для систем электродвижения морских судов;
- 5) разработка методики поверочного расчёта 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, защищённая 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, подтверждающими основные теоретические положения работы.

**Апробация результатов.** Результаты работы докладывались на следующих конференциях:

- ежегодной Московской молодёжной научно-практической конференции «Инновации в авиации и космонавтике» в 2012, 2014 и 2015 годах (17 — 20 апреля 2012 г., Москва, РФ; 22 — 24 апреля 2014 г., Москва, РФ; 21 — 23 апреля 2015 г., Москва, РФ);
- 12-й Международной конференции «Авиация и космонавтика — 2013» (12 — 15 ноября 2013 г., Москва, РФ), 13-й Международной конференции «Авиация и космонавтика — 2014» (17 — 21 ноября 2014 г., Москва, РФ);
- Всероссийской научно-технической конференции «XI Научные чтения по авиации, посвященные памяти Н. Е. Жуковского» (17 — 18 апреля 2014 г., Москва, РФ);
- III национальной конференции по прикладной сверхпроводимости НКПС-2015 (25 — 26 ноября 2015 г., Москва, РФ);
- 11-й европейской конференции по прикладной сверхпроводимости EUCAS-2015 (6 — 10 сентября 2015 г., Лион, Франция);
- XLII Международной молодёжной научной конференции «Гагаринские чтения — 2016» (12 — 15 апреля 2016 г., Москва, РФ).

**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 «Электроэнергетические, электромеханические и биотехнические системы» Института № 3 МАИ.

**Структура и объём диссертации.** Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы. Объем основного текста диссертации — 125 страниц, включающих 72 рисунка, 16 таблиц. Список литературы состоит из 53 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность выбранной темы исследования, изложена степень её разработанности, поставлены цели и задачи работы, изложены методы исследования, научная новизна и практическая значимость, указаны положения, выносимые на защиту, и личный вклад автора, описаны причины и основные этапы истории развития систем морского электродвижения.

**В первой главе** показаны преимущества применения в электромеханике высокотемпературных сверхпроводящих материалов в сравнении с низкотемпературными, приведены характеристики современных токонесущих элементов на их основе. Проведён обзор существующих в мире ВТСП-двигателей с цилиндрическим ротором для морских систем электродвижения, ВТСП-двигателей торцевого типа с дисковым ротором и ВТСП-генераторов. Описана система криообеспечения сверхпроводниковых электрических машин на примере разработанной в МАИ автономной системы криостатирования СКР-001.

Для уменьшения массы и габаритов электрической машины необходимо увеличивать частоту вращения ротора. Основная проблема, возникающая при создании высокооборотных ВТСП-генераторов, состоит в том, что вращающиеся ВТСП-обмотки, выполненные из современных токонесущих элементов как первого, так и второго поколения, не сохраняют сверхпроводящее состояние при высоких частотах вращения под действием центробежных сил. Высокооборотные синхронные сверхпроводниковые генераторы с вращающимся индуктором могут быть реализованы только на базе низкотемпературных сверхпроводников и объёмных ВТСП-элементов.

Для создания высокооборотных ВТСП-генераторов необходима конструктивная схема электрической машины с неподвижной обмоткой возбуждения. В литературе известен созданный по такой конструктивной схеме синхронный генератор с когтеобразным ротором и внешезамкнутым магнитным потоком. На основе его конструкции в диссертации разработана конструктивная схема ВТСП-генератора с когтеобразным ротором и комбинированным возбуждением, изображённая на рисунке 1.

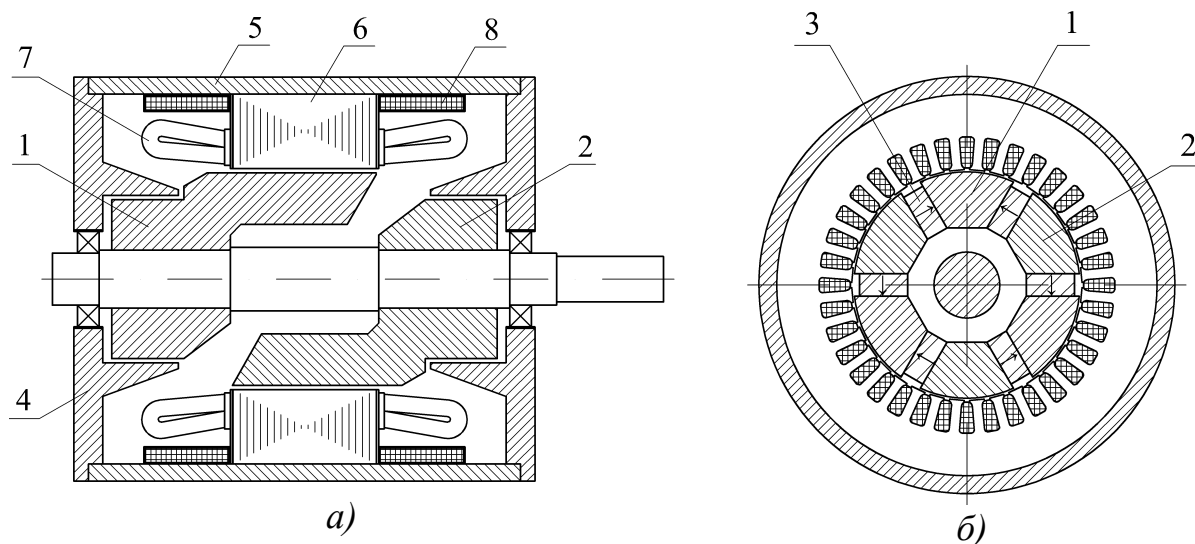


Рисунок 1. Конструктивная схема ВТСП-генератора с когтеобразным ротором и комбинированным возбуждением: *а)* – продольное сечение, *б)* – центральное поперечное сечение

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).

Эта машина имеет преимущества генератора с когтеобразным ротором и внешезамкнутым магнитным потоком и генератора с возбуждением от постоянных магнитов, такие как:

- высокая допустимая окружная скорость ротора;
- отсутствие обмоток на роторе;
- жесткость конструкции ротора;
- возможность создания высоких значений магнитной индукции в зазоре с помощью постоянных магнитов из редкоземельных материалов.

**Во второй главе** приведён анализ распределения трёхмерных магнитных потоков в сверхпроводниковом синхронном генераторе с когтеобразным ротором и комбинированным возбуждением. Расчётная модель, построенная на основе теории магнитных цепей для разработанной конструктивной схемы генератора, и распределение магнитных потоков в ней представлены на рисунках 2 и 3.

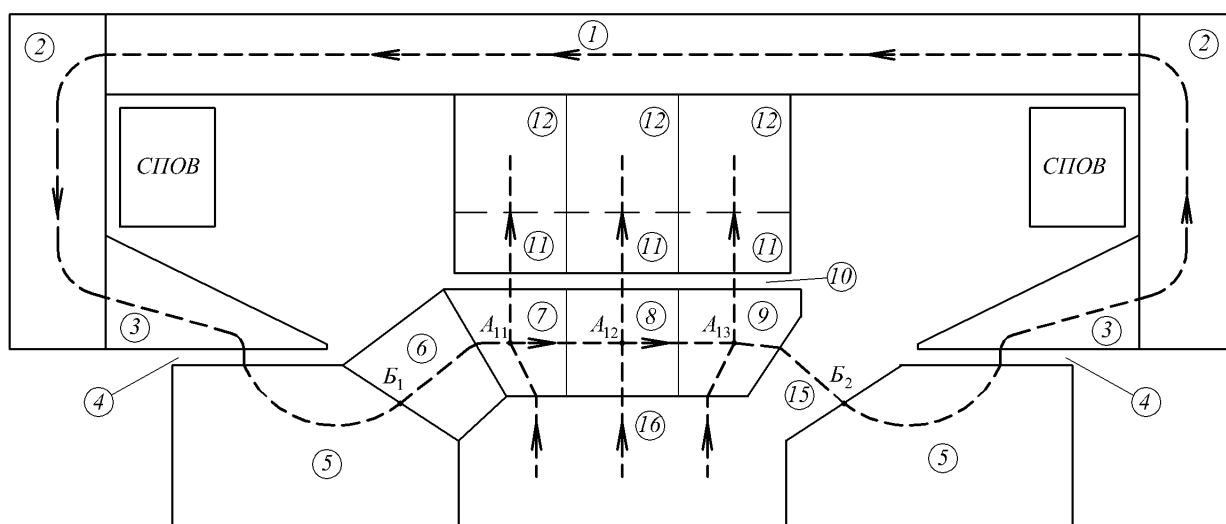


Рисунок 2. Расчётная модель генератора и распределение магнитных потоков в продольном сечении

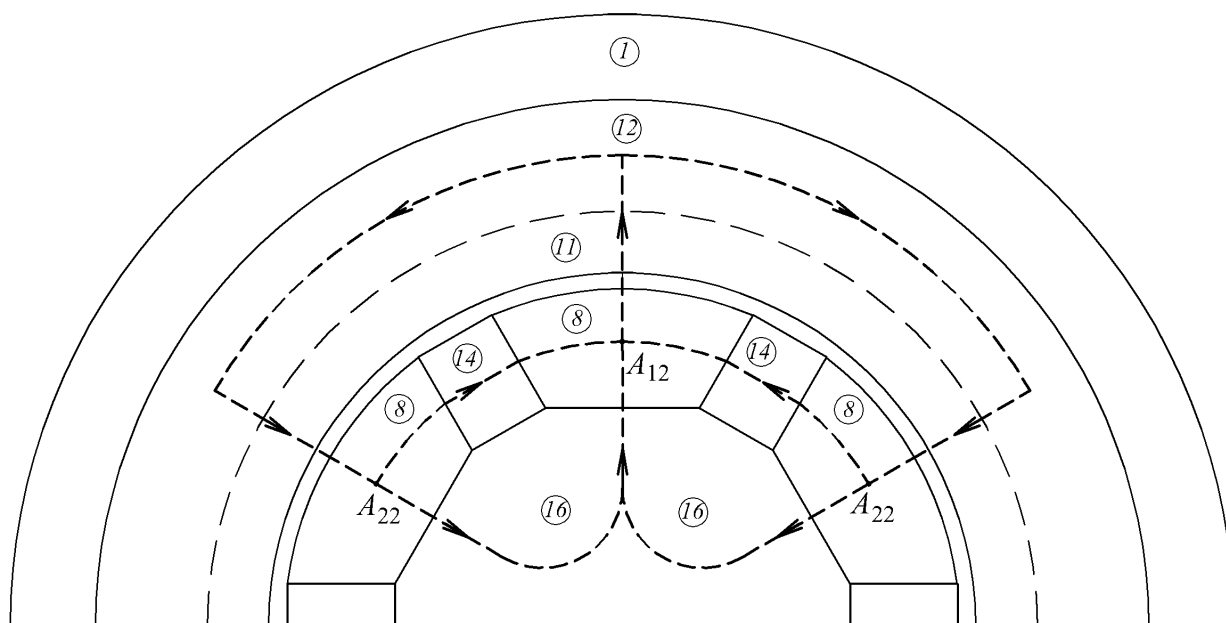


Рисунок 3. Расчётная модель генератора и распределение магнитных потоков в центральном поперечном сечении

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

Во второй главе показано, что ПМ повышают магнитный поток в основном воздушном зазоре и уменьшают магнитный поток в щитах и корпусе машины.



В соответствии с распределением магнитных потоков составляется схема замещения магнитной цепи, магнитные сопротивления в которой вычисляются в соответствии с общей формулой:

$$R_{k_i}(\mu_k) = \frac{l_{k_i}}{\mu_0 \mu_k S_{k_i}}, \quad (1)$$

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, м<sup>2</sup>;  $\mu_k$  – относительная магнитная проницаемость  $k$ -участка, о.е.;  $\mu_0$  – магнитная проницаемость вакуума, Гн/м.

По схеме замещения в соответствии с теорией магнитных цепей вычисляются величины магнитных потоков в машине. Поскольку некоторые участки магнитной цепи могут быть насыщенными, расчёт проводится методом итераций с уточнением значений магнитной проницаемости отдельных участков по значению магнитной индукции и заданной кривой намагничивания участков. Схема замещения магнитной цепи и блок-схема алгоритма итерационного расчёта приведены во второй главе.

По этой методике была рассчитана магнитная цепь маломасштабного образца генератора и получена расчётная характеристика холостого хода. Сравнение экспериментальной и расчётной характеристик приведено на рисунке 4.

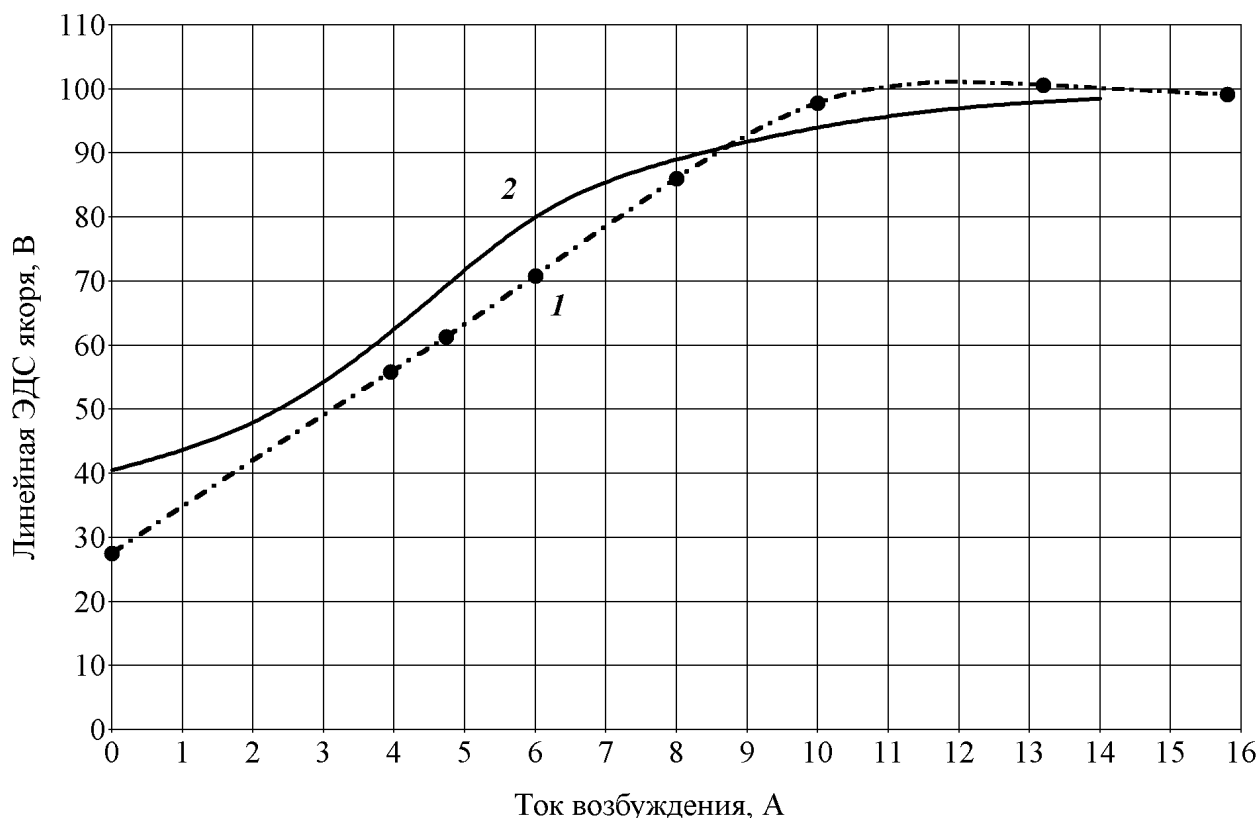
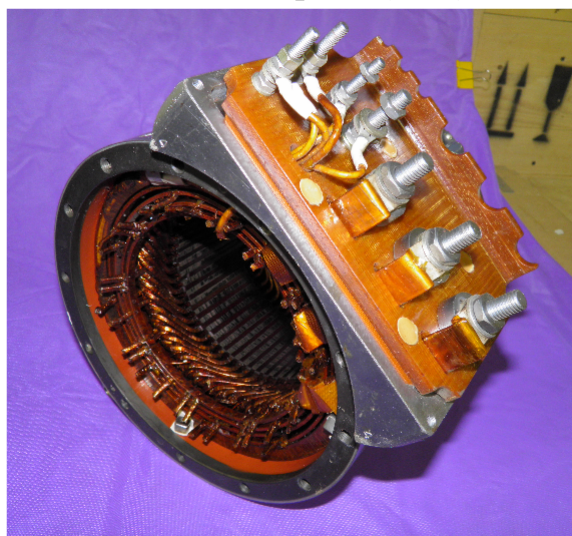


Рисунок 4. Характеристики холостого хода маломасштабного образца генератора: 1 — расчётная, 2 — экспериментальная.

В третьей главе описана конструктивная схема маломасштабного образца генератора с когтеобразным ротором и комбинированным возбуждением, приведены результаты его экспериментальных исследований: характеристики холостого хода и внешние характеристики.

Внешний вид узлов генератора изображен на рисунке 5, основные параметры генератора указаны в таблице 1. Маломасштабный образец создан на основе существующего генератора с когтеобразным ротором и внешнезамкнутым магнитным потоком мощностью около 20 кВА, рассчитанного на частоту вращения 15000 мин<sup>-1</sup>, для которого был разработан и изготовлен ротор с постоянными магнитами. Максимально возможная частота вращения разработанного ротора — 9000 мин<sup>-1</sup>. Поэтому в таблице 1 приведены значения для двух вариантов частоты вращения: для 15000 мин<sup>-1</sup> (первое значение) и для 9000 мин<sup>-1</sup> (второе значение), разделенные косой чертой (« / »).



а)



б)

Рисунок 5. Экспериментальный маломасштабный образец генератора:

а) – статор, б) – ротор

Таблица 1 Основные параметры маломасштабного образца генератора

Мощность полная, кВА	21,4 / 12,8	Относительная длина	0,513
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	0,95	Полюсное деление, м	0,068
КПД	0,92	Окружная скорость ротора, м/с	100 / 60
Число пар полюсов	3	Величина основного зазора, мм	1,5
Частота вращения ротора, мин <sup>-1</sup>	15000 / 9000	Величина дополнительного зазора, мм	0,3

Для сравнения характеристик сначала был испытан существующий генератор с ротором без ПМ при номинальной частоте вращения  $15000 \text{ мин}^{-1}$ , а затем был испытан генератор с когтеобразным ротором и ПМ при частоте вращения  $9000 \text{ мин}^{-1}$ .

На рисунке 6 представлены характеристики холостого хода генераторов: кривая 1 — с когтеобразным ротором без ПМ, пересчитанная по величине электродвижущей силы (ЭДС), наводимой в обмотке якоря, с  $15000 \text{ мин}^{-1}$  на  $9000 \text{ мин}^{-1}$ , 2 — с когтеобразным ротором и ПМ. Характеристики показывают, 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).

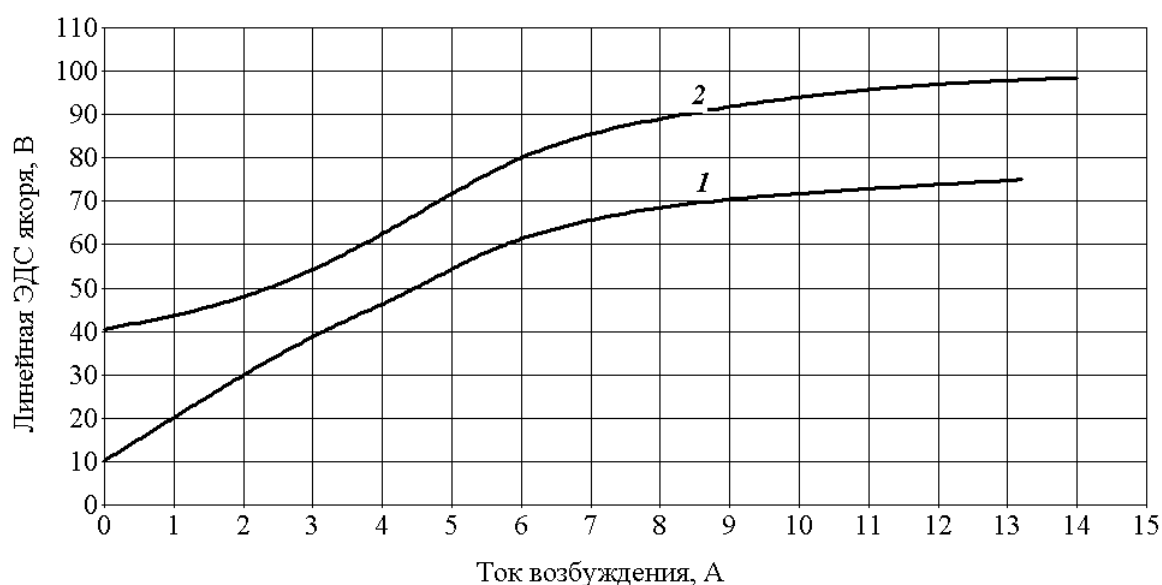


Рисунок 6. Характеристики холостого хода генератора: 1 — с когтеобразным ротором без ПМ, 2 — с когтеобразным ротором и ПМ

На рисунке 7 представлены внешние характеристики генераторов при активной нагрузке: 1 — с когтеобразным ротором без ПМ при токе возбуждения 25 А (пересчитана по величине ЭДС с  $15000 \text{ мин}^{-1}$  на  $9000 \text{ мин}^{-1}$ ), 2 — с когтеобразным ротором и ПМ при токе возбуждения 6 А. Из рисунка 7 видно, что генератор имеет жёсткую внешнюю характеристику до точки, соответствующей номинальному значению тока статора. Установка нового ротора с ПМ привела к незначительному снижению жёсткости внешней характеристики генератора.

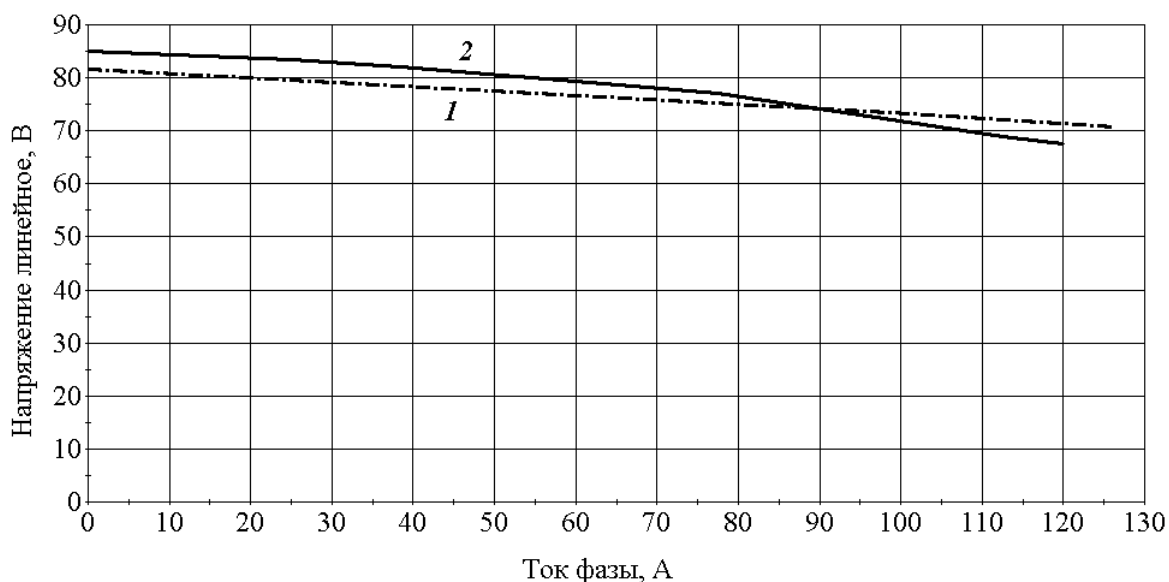


Рисунок 7. Внешние характеристики генератора при активной нагрузке:  
 1 — с когтеобразным ротором без ПМ, 2 — с когтеобразным ротором и ПМ

**В четвёртой главе** приведены методика и результаты расчёта макетного образца генератора с когтеобразным ротором и комбинированным возбуждением мегаваттного уровня мощности, а также результаты трёхмерного моделирования механических процессов в когтеобразном роторе с постоянными магнитами, результаты трёхмерного моделирования магнитных полей, расчёт критического тока, сил, индуктивности и запасённой энергии в СПОВ.

Расчёт и конструирование генератора содержит следующие этапы:

1) расчёт статора по известным методикам проектирования статоров синхронных машин. Определяются главные размеры, число пазов, рассчитываются обмотка и ориентировочный КПД генератора. Важным выходным параметром, определённым на этом этапе, является величина требуемого магнитного потока, которая необходима на последующих этапах расчёта;

2) расчёт внешнего магнитопровода по известному опыту создания бесконтактных синхронных машин с когтеобразным ротором и внешнезамкнутым магнитным потоком. 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 проводилось по известным методикам проектирования роторов бесконтактных

синхронных машин с когтеобразным ротором и внешнезамкнутым магнитным потоком. По этим методикам выбирались основные геометрические параметры ротора и размещаемых в роторе постоянных магнитов. Затем создана трёхмерная геометрическая модель и проведено компьютерное трёхмерное моделирование напряжённо-деформированного состояния ротора с постоянными магнитами, в результате которого определены величины механических напряжений и деформации элементов ротора при его вращении. По результатам механического моделирования конструкция ротора была доработана, затем создана новая геометрическая модель ротора, и повторено моделирование.

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 определены величины индукции магнитного поля в элементах внешнего магнитопровода. По этим значениям изменялись 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 создавалась новая геометрическая модель внешнего магнитопровода с учетом этих изменений, и повторено 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. Поэтому величина магнитного потока, проходящего по внешнему магнитопроводу, отличается от величины требуемого магнитного потока в воздушном зазоре, полученной на первом этапе;

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

6) проектирование и тепловой расчёт СПОВ для определения расхода хладагента — жидкого азота. Уточнялись геометрические параметры внешнего магнитопровода для размещения спроектированных криостатов со СПОВ и обеспечения требуемого охлаждения СПОВ и статора. В результате трёхмерного моделирования магнитных полей определены величины критического тока и действующих на СПОВ электромагнитных сил, её индуктивности и запасённой энергии.

Конструкция генератора изображена на рисунке 8.

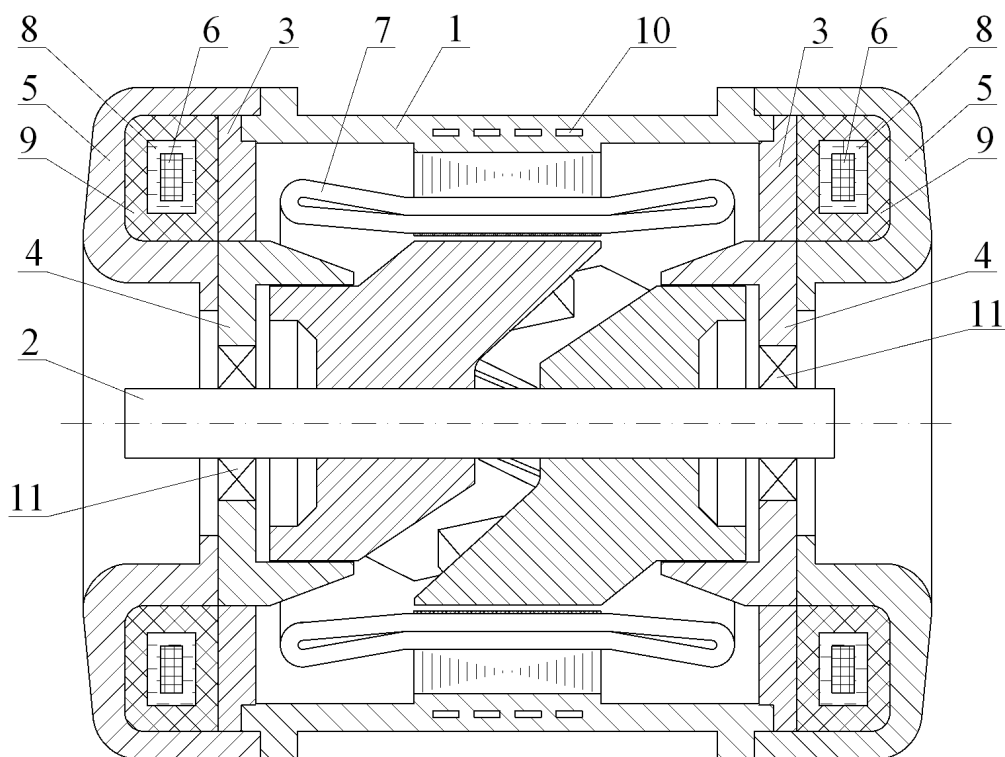


Рисунок 8. Конструкция генератора: 1 – корпус со статором, 2 – ротор, 3 – немагнитная часть подшипникового щита, 4 – магнитопроводящая часть подшипникового щита, 5 – магнитопроводящие крышки, 6 – катушка СПОВ, 7 – медная обмотка статора, 8 – криоагент, 9 – теплоизоляция СПОВ, 10 – каналы охлаждения статора,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

Основные параметры генератора приведены в таблице 2.

Таблица 2 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 <sup>3</sup>	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 <sup>-1</sup>	6000	Величина основного зазора, мм	6
Коэффициент полюсного перекрытия	0,549	Величина дополнительного зазора, мм	1,5

**Пятая глава** посвящена изготовлению и испытанию кольцевых катушек для обмотки возбуждения генератора из ВТСП-ленты второго поколения и их криостатов.

Институтом физики высоких энергий Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (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 охлаждении жидким азотом две круглые катушки обмотки возбуждения из ВТСП-ленты второго поколения в собственных криостатах. Для изготовления катушек сотрудниками ИФВЭ 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.

На рисунке 9 показано размещение криостата с одной из катушек в корпусе генератора.

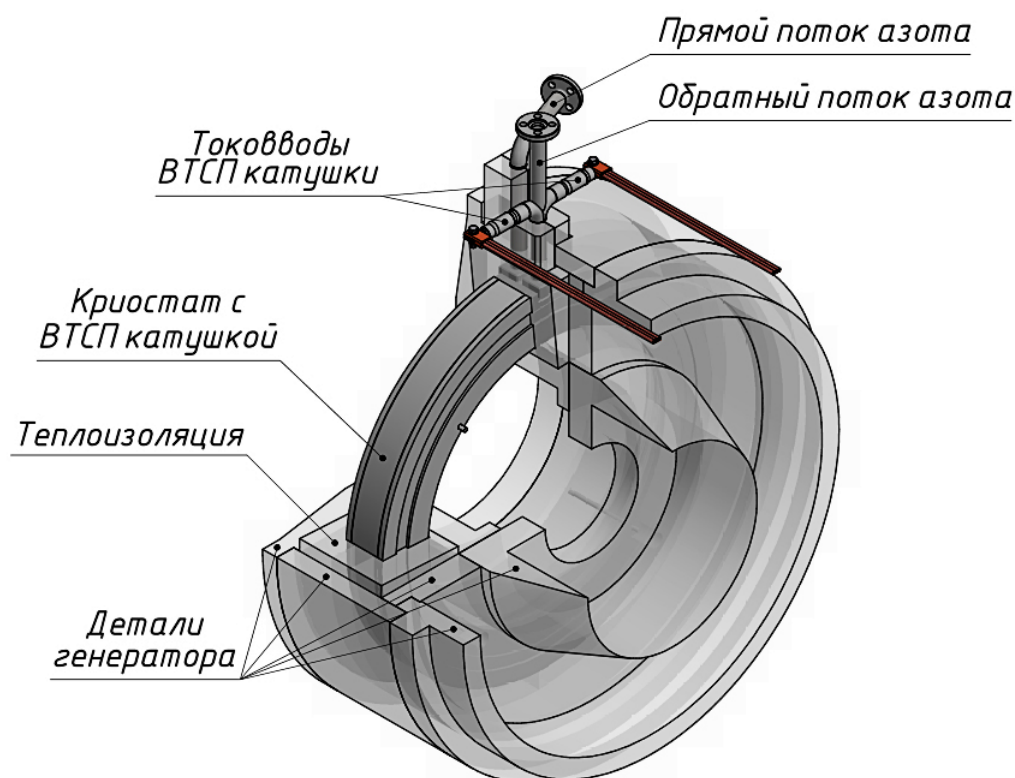


Рисунок 9. Криостат с ВТСП-катушкой в корпусе генератора

В таблице 3 приведены характеристики ленты, из которой были изготовлены катушки.

Таблица 3

## 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

После изготовления катушки были испытаны в двух режимах охлаждения жидким азотом: в погружном режиме (без криостата) и в прокачном (в криостатах). При испытаниях были определены величины критического тока катушек при различных падениях напряжения на ВТСП-ленте (таблица 4), индуктивность и максимальное рабочее (пороговое) значение тока катушек.

Таблица 4

## 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

Испытания 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 режиме охлаждения коллективом ИФВЭ получено пороговое значение тока, при котором нарушается тепловое равновесие нормальной зоны с охлаждающим криоагентом, 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. По этому методу для катушек № 1 и № 2 пороговые значения тока составили соответственно 116 А и 124 А.

В шестой главе приведено описание испытательного стенда и результаты экспериментальных исследований макетного образца генератора. 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 приведен на рисунке 10.

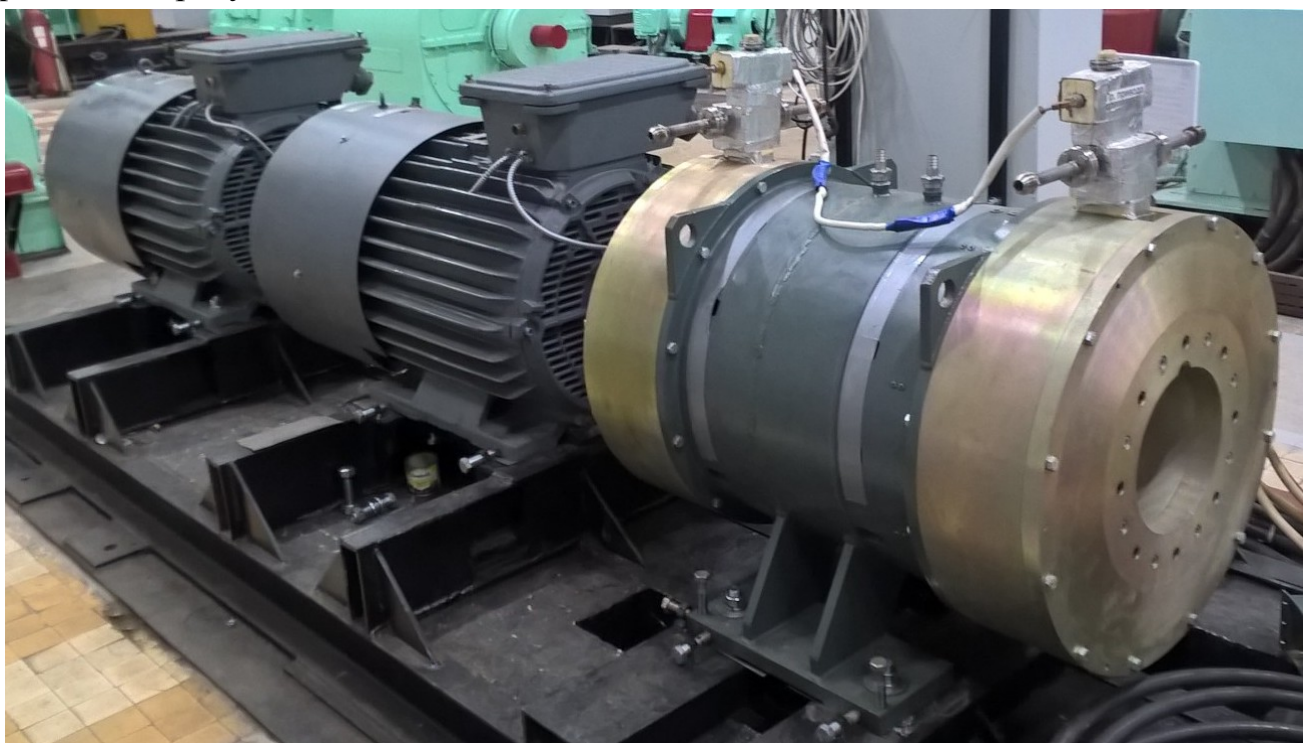


Рисунок 10. Приводные двигатели (слева) и испытуемый генератор (справа) на испытательном стенде

Испытания генератора проводились при пониженной частоте вращения  $2400 \text{ мин}^{-1}$ . При испытаниях генератора были получены характеристики холостого хода, короткого замыкания, внешние и мощностная характеристики.

На рисунке 11 представлены характеристики холостого хода генератора, полученные при работе обеих 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. Характеристики показывают, что магнитный поток от постоянных магнитов при отсутствии тока СПОВ составляет около 16 % от номинальной величины.

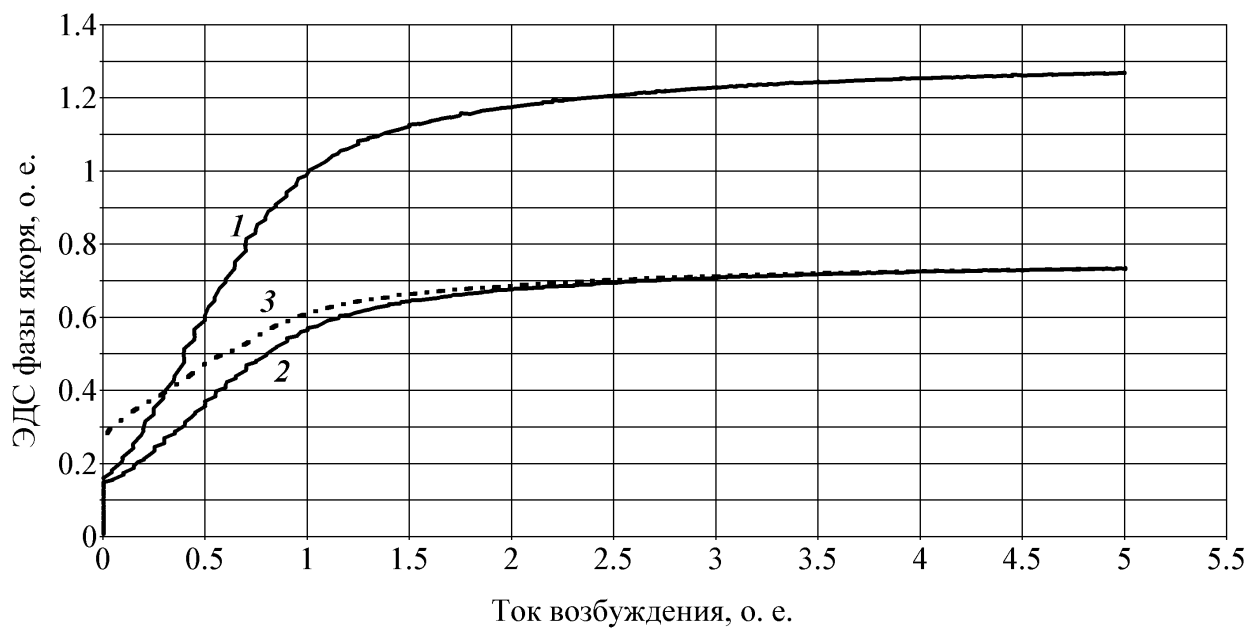


Рисунок 11. Характеристики холостого хода генератора:  
 1 — с двумя СПОВ, 2 — с одной СПОВ (ввод тока возбуждения), 3 — с одной СПОВ (вывод тока возбуждения)

На рисунке 12 представлены внешние характеристики генератора.

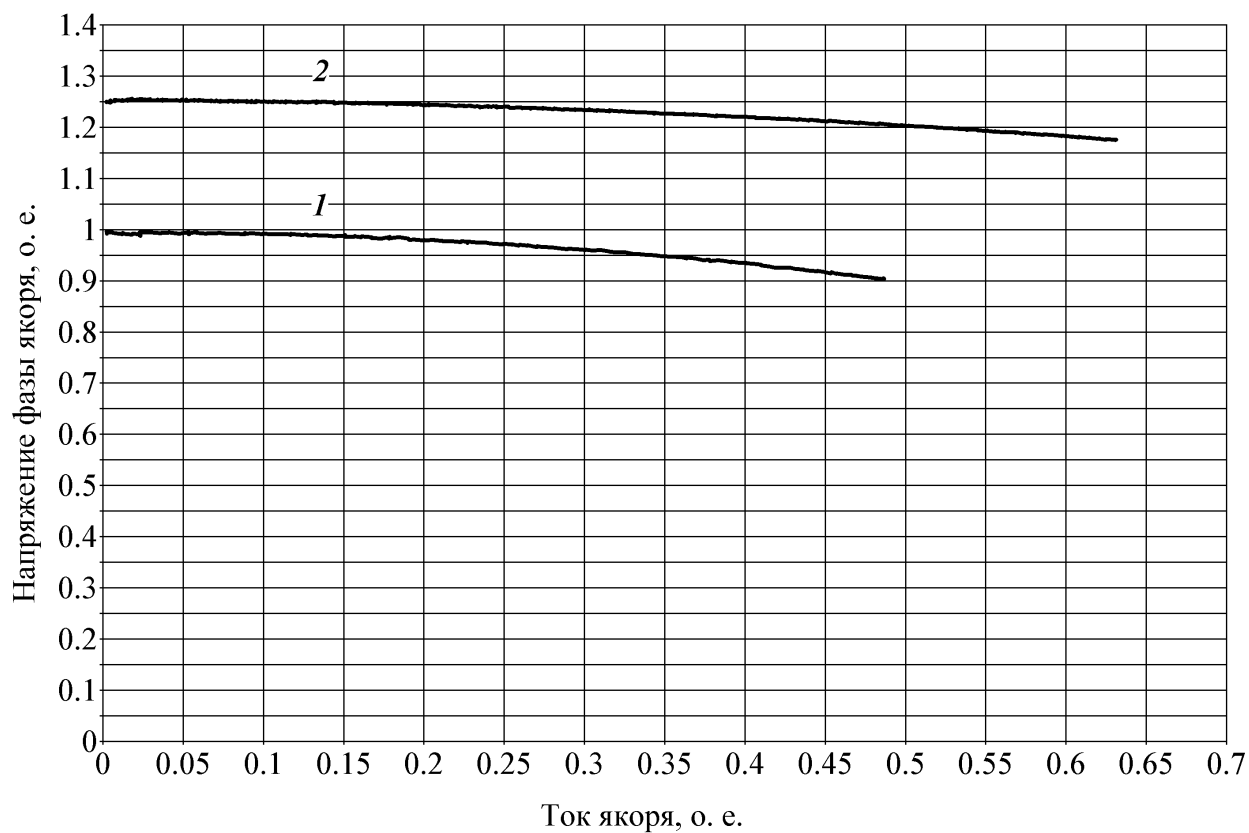


Рисунок 12. Внешние характеристики генератора:  
 1 — при токе возбуждения 1 о. е.; 2 — при токе возбуждения 3,75 о. е.

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.

На рисунке 13 представлена характеристика короткого замыкания генератора, построенная в относительных единицах. За базисные значения величин приняты те же значения, что и на рисунках 11 и 12. 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.

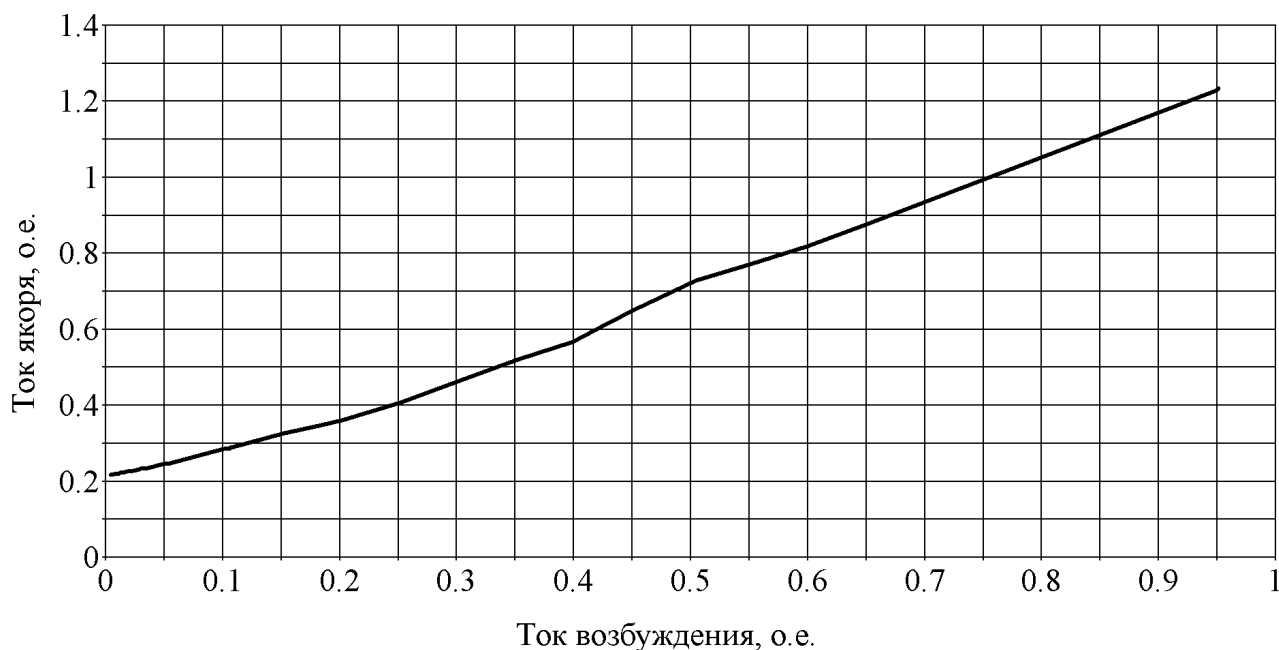


Рисунок 13. Характеристика короткого замыкания генератора

На рисунке 14 представлены мощностные характеристики генератора — зависимости активной мощности нагрузки, подключенной к якорю генератора, от тока якоря при постоянном значении тока возбуждения, равном 3,75 о. е.

Кривая 1 получена экспериментально при частоте вращения 2400 мин<sup>-1</sup>, кривая 2 получена путем умножения значений мощности кривой 1 в 2,5 раза (что соответствует искусственному увеличению частоты вращения до номинального значения 6000 мин<sup>-1</sup>). По причине пониженной величины ЭДС при проведении эксперимента ток якоря был ограничен величиной 300 А.

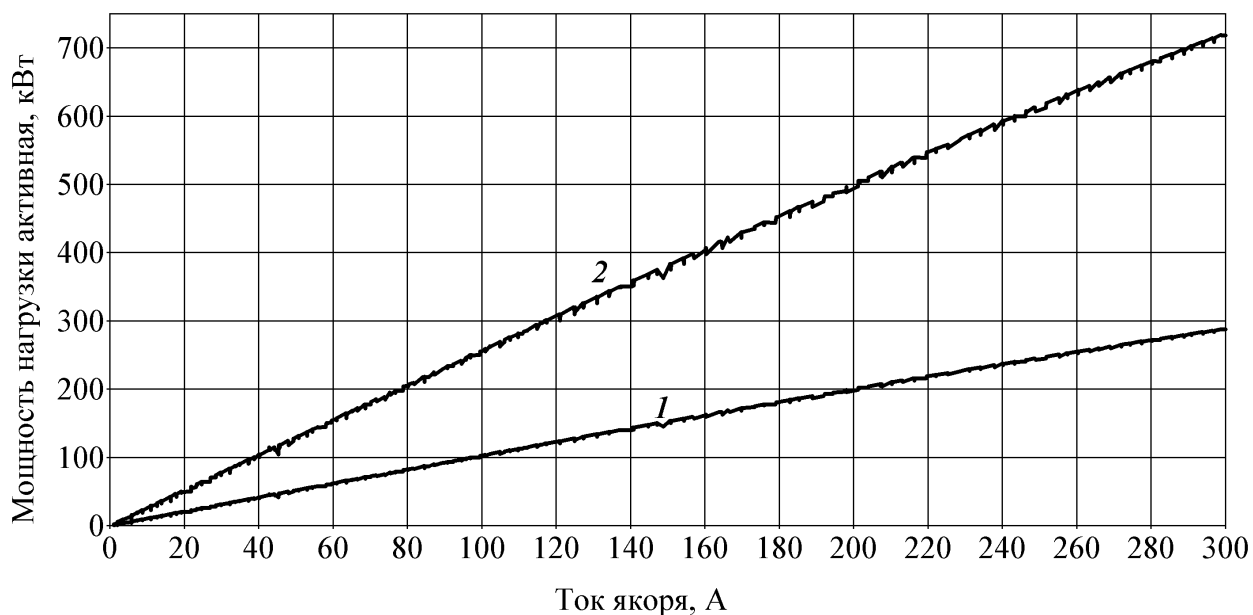


Рисунок 14. Мощностная характеристика: 1 — при частоте вращения  $2400 \text{ мин}^{-1}$ , 2 — при номинальной частоте вращения  $6000 \text{ мин}^{-1}$  (пересчитана)

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

Так как мощностная характеристика была получена при насыщенной магнитной цепи (при токе возбуждения  $3,75 \text{ о. е.}$ ), то можно предположить, что рост тока нагрузки до номинального значения тока якоря  $478 \text{ А}$  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  $478 \text{ А}$ . В этом случае возможно достижение активной мощности нагрузки  $990 \text{ кВт}$  при номинальном токе якоря и коэффициенте мощности нагрузки  $\cos\varphi = 1$ , что отражено на рисунке 15.

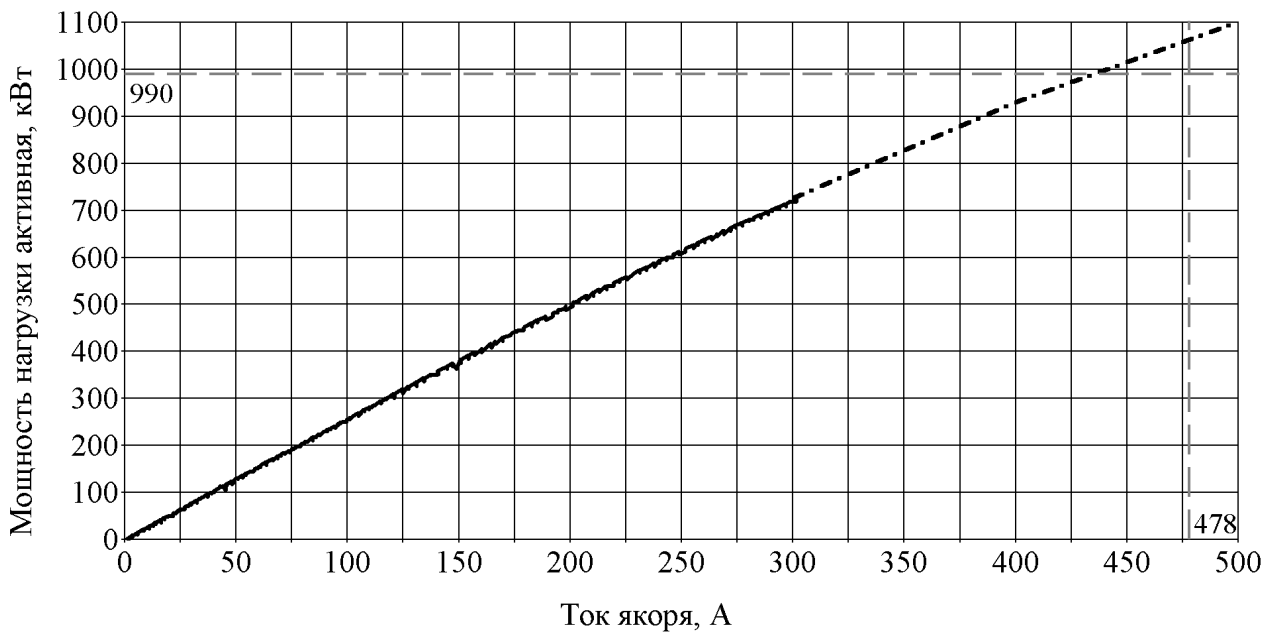


Рисунок 15. Прогнозируемая мощностная характеристика генератора при частоте вращения  $6000 \text{ мин}^{-1}$  и токе возбуждения  $3,75 \text{ о. е.}$

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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 надежность 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 которому изготовлены катушки обмотки возбуждения с криостатами для макетного образца генератора мегаваттного уровня мощности.

8. Проведены экспериментальные исследования 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.

### **ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

**В научных изданиях и журналах, входящих в международную систему цитирования «Scopus»:**

1. An Outlook of the Use of Cryogenic Electric Machines On-board Aircraft [Текст] / A. A. Dubensky, K. L. Kovalev, A. E. Larionoff, K. A. Modestov, V. T. Penkin, V. N. Poltavets // IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 26, No. 3, April 2016.

2. Brushless Superconducting Synchronous Generator With Claw-Shaped Poles and Permanent Magnets [Текст] / 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, Vol. 26, No. 3, April 2016.

**В рекомендованных ВАК научных изданиях и журналах:**

3. 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.

4. 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.

5. 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.

6. Сверхпроводниковая электрическая машина с аксиальным возбуждением и когтеобразным ротором с постоянными магнитами: 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, опублик. 10.08.2016, Бюл. № 22. - 2 с.: ил.

**В других научных изданиях:**

7. 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.

8. 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. проф. Комарова Ю. Ю. – М.: Изд-во Ваш полиграфический партнер, 2013. – с. 142 – 149.

9. 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.

10. Характеристики сверхпроводниковых синхронных генераторов с когтеобразными полюсами и постоянными магнитами для летательных аппаратов нового поколения [Текст] / А. А. Дубенский, К. Л. Ковалев, К. А. Модестов, В. Т. Пенкин // Материалы Всероссийской научно-технической конференции «XI Научные чтения по авиации, посвященные памяти Н.Е. Жуковского». – М.: Издательский дом Академии имени Н.Е. Жуковского, 2014. – с. 224 – 228.

11. Расчет характеристик сверхпроводниковых синхронных генераторов с когтеобразными полюсами и постоянными магнитами для перспективных ЛА [Текст] / Дубенский А. А., Пенкин В. Т. // Тезисы доклада Московской молодёжной научно-практической конференции «Инновации в авиации и космонавтике – 2014» (22 – 24 апреля 2014 г.). – М.: ООО «Принт-салон». – с. 104 – 105.

12. Выбор параметров при проектировании сверхпроводниковых синхронных генераторов с когтеобразными полюсами и постоянными магнитами для летательных аппаратов нового поколения [Текст] / Дубенский А. А., Пенкин В. Т. // 13-я Международная конференция «Авиация и космонавтика – 2014». 17– 21 ноября 2014 года. Москва. Тезисы . – СПб .: Мастерская печати, 2014. – с. 322 — 323.

13. Сравнение бесконтактных конструкций сверхпроводниковых синхронных машин с безобмоточными роторами [Текст] / Ковалев К. Л., Модестов К. А., Ильясов Р. И., Дубенский А. А., Пенкин В. Т. // Московская молодежная научно-практическая конференция «Инновации в авиации и космонавтике – 2015». 21-23 апреля 2015 года. Москва. Сборник тезисов докладов. – с. 75 — 76.

14. Криогенные электрические машины для аэрокосмической техники [Текст] / В. Т. Пенкин, К. Л. Ковалев А. Е. Ларионов, К. А. Модестов, А. А. Дубенский. // Тезисы докладов III-й Национальной конференции по прикладной сверхпроводимости (НКПС-2015). – Москва, 2015 г. с. 98.

15. Криогенные электрические машины для полностью электрического самолета [Текст] / Дубенский А. А., Пенкин В. Т. // Гагаринские чтения – 2016: XLII Международная молодёжная научная конференция: Сборник тезисов докладов: В 4 т. Т. 1: М.: Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2016. с. 658 — 659.

16. 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 г. – с. 273 – 279.

17. 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 г. – с. 359 – 363.

**Личный вклад автора.** В работах [1, 14, 15] опубликован выполненный с участием автора обзор литературы, показывающий преимущества применения криогенных электрических машин в транспортных системах. В публикациях [2, 3, 7, 8, 13, 17] приведена разработанная автором конструктивная схема генератора с когтеобразным ротором и комбинированным возбуждением, а также результаты проведенных с участием автора экспериментальных исследований маломасштабных моделей генератора. В работах [4, 9] приведена разработанная автором методика расчёта магнитной цепи генератора. В статьях [5, 10] опубликованы полученные при участии автора экспериментальные и расчётные характеристики маломасштабных моделей генератора. В [6] приведена разработанная конструктивная схема генератора. Работы [11, 12] посвящены расчёту характеристик и выбору проектировочных параметров генератора разработанной конструктивной схемы. В статье [16] показаны конструкция и результаты испытаний катушек обмотки возбуждения.