

На правах рукописи



Тулинова Екатерина Евгеньевна

**МНОГОПОЛЮСНЫЕ СИНХРОННЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ
ДЛЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

Специальность 05.09.01 – «Электромеханика и электрические аппараты»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2019

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель: **Ковалев Константин Львович,**
доктор технических наук, с.н.с., заведующий кафедрой
«Электроэнергетические, электромеханические и
биотехнические системы» ФГБОУ ВО «Московский
авиационный институт (национальный
исследовательский университет)»

Официальные оппоненты: **Геча Владимир Яковлевич,**
доктор технических наук, профессор, заместитель
генерального директора по научной работе АО
«Корпорация «ВНИИЭМ»

Румянцев Михаил Юрьевич,
кандидат технических наук, доцент, заведующий
кафедрой «Энергетические комплексы автономных
объектов» ФГБОУ ВО Национальный
исследовательский университет «МЭИ»

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Ивановский государственный энергетический
университет имени В.И. Ленина»

Защита диссертации состоится **27 декабря 2019 г.** в 11 час. 00 мин. в ауд. 302, корпус 57 на заседании диссертационного совета Д 212.125.07, созданного на базе ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д.4

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д.4, и на сайте: <http://mai.ru>.

Автореферат разослан « ___ » _____ 2019 г.

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



Д.С. Дежин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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

Реализация данной концепции требует разработки принципиально новых электрических машин, отличающихся высокими удельными характеристиками, такими как удельная мощность (кВт/кг) и объемная мощность (кВт/м³). Большое количество мировых научных центров ведет работу над созданием таких электрических машин.

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

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

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

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

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

Степень разработанности темы исследования. Отдельные вопросы расчета и проектирования ЭМП с высокой удельной мощностью рассмотрены в работах

Исмагилова Ф.Р., Чубраевой Л.И., Захаренко А.Б. Оценочные методики расчета и проектирования ВТСП электрических машин частично изложены в работах Ковалева Л.К., Пенкина В.Т.

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

Объект исследования. Объектом исследования является синхронная электрическая машина с увеличенной удельной и объемной мощностью, которая имеет возбуждение от постоянных магнитов или выполнена на основе ВТСП обмоток ротора и статора.

Предмет исследования. Предметом исследования являются распределения магнитных полей в активной зоне многополюсных синхронных машин, удельные параметры таких машин. Построение аналитических методик для расчета ЭМП повышенной удельной мощности для ПЭС/БЭС и верификация полученных результатов.

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

Для достижения поставленной цели должны быть решены следующие задачи:

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

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

Разработана новая методика электромагнитного расчета явнополюсных синхронных машин с ВТСП ОВ и ОЯ, основанная на аналитическом расчете двумерных распределений магнитных полей в активной зоне синхронной машины.

Особенностью данной методики является возможность учесть геометрические размеры активной зоны, свойства используемых материалов, в том числе ферромагнитных и сверхпроводниковых. Полученные аналитические выражения позволяют получать соотношения размеров активной зоны ЭМП, которые позволят обеспечить при заданных исходных данных максимальное значение удельной или объемной мощности.

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

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

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

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

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

1. Возможность практической реализации ПЭС/БЭС только при применении в их составе высокоэффективных ЭМП на основе ПМ и современных ВТСП элементов.
2. Аналитическая методика расчета основных параметров многополюсной синхронной машины с возбуждением от ПМ, учитывающая полюсность машины, размеры активной зоны, объем ПМ.
3. Анализ параметров современных ВТСП материалов и методика выбора рациональных параметров ВТСП материалов для их использования в конкретных ЭМП для ПЭС/БЭС.
4. Аналитическая методика расчета основных параметров многополюсных синхронных машин с ВТСП ОВ и ОЯ, учитывающая полюсность машины, размеры активной зоны, свойства материалов активной зоны, критические параметры ВТСП.
5. Результаты экспериментального исследования полностью ВТСП электрической машины с явнополюсным ротором.

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

Апробация работы. Основные результаты обсуждались и докладывались на конференциях: 14-я Международная конференция «Авиация и космонавтика – 2015», 16-20 ноября, МАИ, Москва; XLII Международная молодежная научная конференция «Гагаринские чтения – 2016», 12-15 апреля, Москва; 2017 International Conference on

Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2017, 16-19 мая 2017, Санкт-Петербург; 17-я Международная конференция «Авиация и космонавтика», 19-23 ноября, МАИ, Москва; Международная (XX Всероссийская) научно-техническая конференция «Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии», 29-31 мая 2019, ИГЭУ, Иваново.

Публикации. Результаты выполненных исследований отражены в 15 научных работах, в том числе в 6 изданиях, рекомендованных ВАК РФ, в 2 статьях, индексируемых в базах Scopus и WoS, в 2 патентах на полезную модель, в 5 тезисах докладов Всероссийских и Международных научных конференций.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы из 59 наименований. Общий объем работы составляет 117 страниц машинописного текста, включая 61 рисунок и 11 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность, новизна и практическая значимость диссертационной работы, сформулирована цель и поставлены задачи исследования, представлены основные положения, выносимые на защиту, представлена апробация и структура работы.

В первой главе проведен обзор перспективных разработок ПЭС/БЭС и проектов по созданию магистральных летательных аппаратов на основе ПЭС/БЭС. На основе обзора литературных данных установлено, что создание ПЭС/БЭС является перспективным направлением разработок, при этом реализация данных проектов возможна только при условии применения на борту высокоэффективных ЭМП.

Проведен обзор традиционных электрических машин, которые могут использоваться в ПЭС/БЭС, а также разработки по созданию машин с использованием эффекта сверхпроводимости.

На основе обзора публикаций показано, что на данный момент реализация концепции ПЭС/БЭС возможна только для малых летательных аппаратов из-за небольших мощностей силовых установок. В то же время использование высококоэрцитивных ПМ и сверхпроводниковых обмоток в электрических машинах может повысить удельные показатели силовых установок и реализовать магистральные ПЭС/БЭС.

Проведен анализ современных ВТСП материалов, на основе которого определены значения критических параметров сверхпроводников, которые могут быть достижимы в краткосрочной и долгосрочной перспективе с точки зрения их применимости в ЭМП для ПЭС/БЭС. Выбраны рациональные ВТСП длинномерные композиты с точки зрения их использования для ПЭС/БЭС.

Во второй главе представлена аналитическая методика расчета многополюсных синхронных электрических машин с постоянными магнитами.

Схема многополюсного ЭМП с постоянными магнитами представлена на рисунке 1. При постановке задачи расчета двумерных магнитных полей в дальнейшем принимаются следующие основные допущения: вектор намагниченности всех постоянных магнитов (ПМ) \vec{M} имеет компоненту только по радиусу ($\vec{M}\{0, M_\rho\}$); в расчетах при рассмотрении магнитного поля машины ярмо статора считается ненасыщенным, $\mu_c \rightarrow \infty$; для получения простых аналитических решений, описывающих электромагнитные процессы в ЭМП с ПМ используется приближение

активной зоны обмотки статора эквивалентным токовым слоем на радиусе R_s с линейной плотностью J_0 , синусоидально распределенной по угловой координате φ ; машина считается достаточно длинной - $\tau/L \ll 1$.

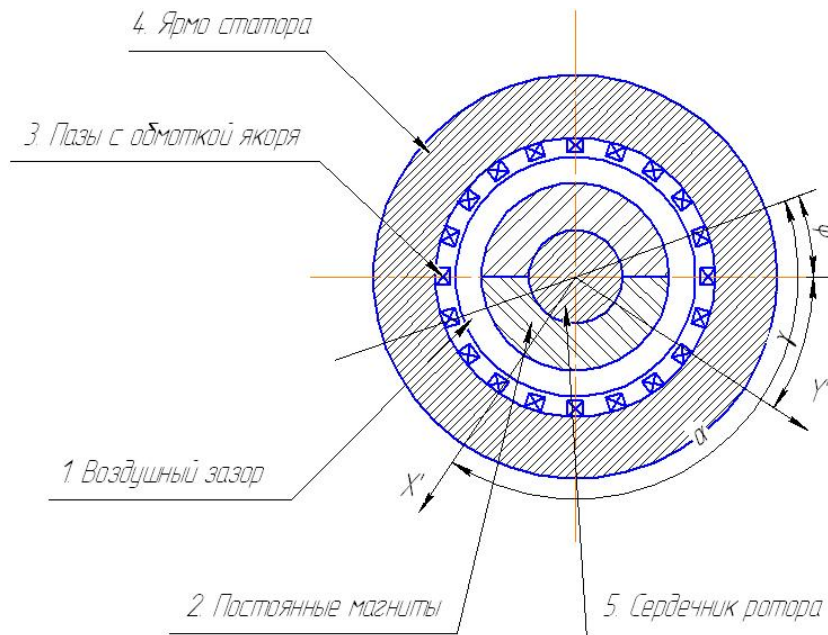


Рисунок 1 – Конструктивная схема многополюсного ЭМП с ПМ

Геометрия задачи имеет следующие характерные области, различающиеся магнитными свойствами (рисунок 1): воздушный зазор, $R_r < r < R_a$, $\mu=1$, $M=0$, $j=0$; область с постоянными магнитами (ротор), $R_i < r < R_r$, $\mu=1$, $M \neq 0$, $j=0$; область пазов и обмотки статора, $R_a < r < R_s$, $\mu=1$, $M=0$, $j=j_0 \delta(r-R_a)$; ядро статора, $R_s \leq r \leq \infty$, $\mu \rightarrow \infty$, $M=0$, $j=0$.

На рисунке 2 приведена расчетная схема ЭМП с учетом сделанных выше допущений.

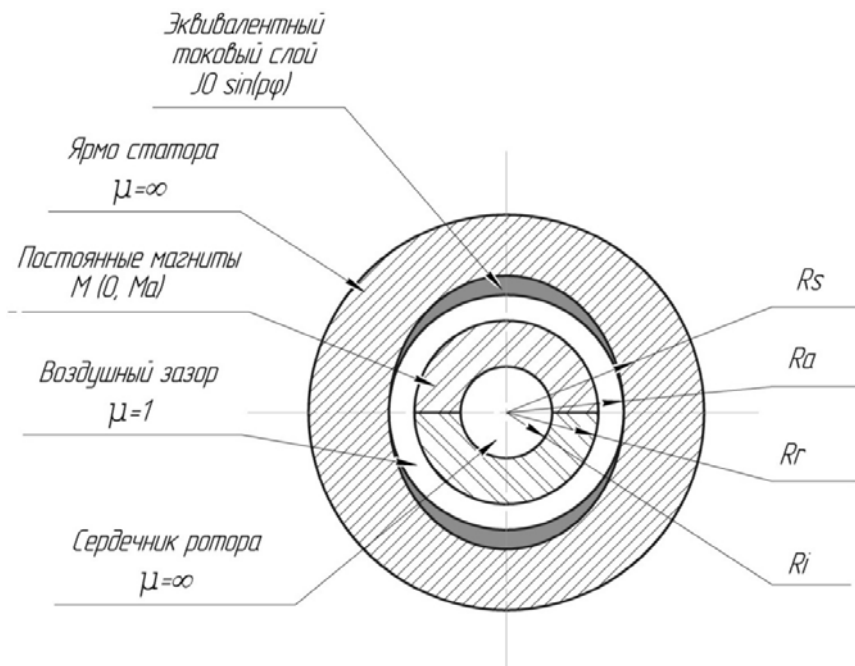


Рисунок 2 – Расчетная схема с учетом допущений

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

$$\Delta A = -\mu\mu_0 J_0 \sin(p\varphi) \delta(\rho - R_s) \quad (1)$$

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

Граничные условия для уравнения (1) на границах сред с различными магнитными проницаемостями имеют следующий вид:

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

Таким образом, при расчете магнитного поля в активной зоне ЭМП можно выделить следующие области, отличающиеся электрическими и магнитными свойствами (используется полярная система координат): сердечник ротора: $\mu_p = \infty$; область с постоянными магнитами: $\bar{B} = \mu_0 \bar{H} + \bar{M}$; $M = M_0(R_r/\rho)\sin(p\alpha)$; область воздушного зазора: $\mu_{B3} = 1$; область статора ЭМП: $\mu_{\text{ст}} = \infty$.

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

На основе решения уравнения (1) получено решение для векторного магнитного потенциала в различных областях ЭМП. Структура решения имеет вид:

- в воздушном зазоре ($R_r < r < R_s$):

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

- в области ПМ ($R_i < r < R_r$):

$$A_m = \frac{M_0 p}{1-2p} \rho^{1-p} \cos\left(\frac{\pi}{2}p + p\varphi + p\gamma\right) + \left(d_1 \rho^p + \frac{d_2}{\rho^p} \right) \sin(p\varphi) + \left(d_3 \rho^p + \frac{d_4}{\rho^p} \right) \cos(p\varphi), \quad (3)$$

- в сердечнике ротора ($r < R_i$):

$$A_i = c_1 \rho^p \sin(p\varphi) + c_2 \rho^p \cos(p\varphi), \quad (4)$$

где коэффициенты a_p , c_p , d_1 , d_2 , d_3 , d_4 , c_1 и c_2 – неизвестные константы, которые определяются из граничных условий на поверхности раздела сред с различными магнитными свойствами. Аналитические выражения для констант приведены в диссертации.

На рисунке 3 представлены расчеты распределения векторного магнитного потенциала A в активной зоне ЭМП с ПМ при различном числе пар полюсов p . Из рисунков видно, что при увеличении числа пар полюсов p распределение векторного магнитного потенциала становится существенно неоднородным. При больших p распределение локализовано в основном в области воздушного зазора и быстро затухает вне его.

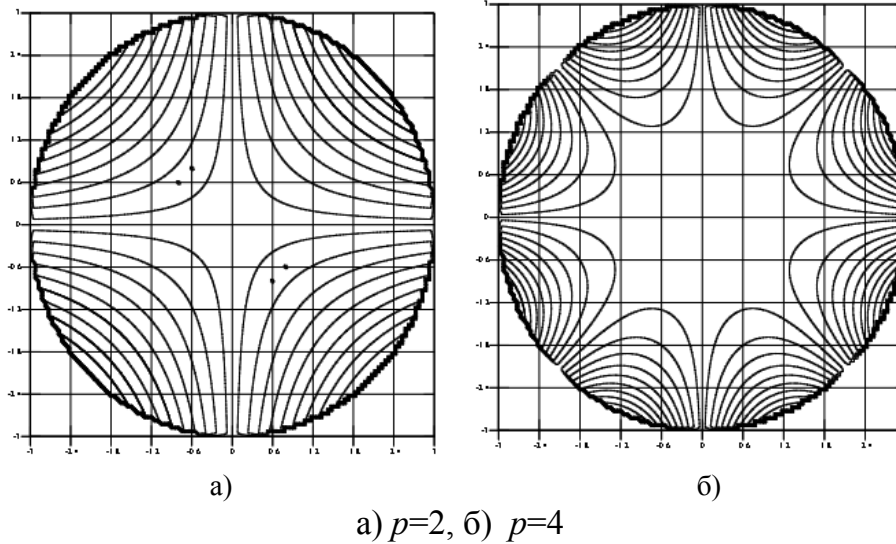


Рисунок 3 – Картина распределения векторного магнитного потенциала в активной зоне ЭМП с ПМ при различном числе пар полюсов

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

$$W = \frac{1}{2} \int J A_\delta dV = \frac{1}{2} J_0 L_s R_s \int_0^{2\pi} A_\delta \sin(p\varphi) d\varphi. \quad (5)$$

После интегрирования получаем выражение для энергии магнитного поля:

$$W = \frac{1}{2} \frac{m^2 i_m^2 k_a^2 w_a^2 L_s R_s^p \mu_0}{\pi p} \left(\frac{\bar{R}^2 R_r^p (\mu+1) - R_r^{-p} R_i^{2p} (1-\mu)}{\bar{R} (\bar{R}^2 R_r^{2p} (\mu+1) - R_i^{2p} (\mu-1))} \right), \quad (6)$$

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

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

$$X_a = 4 \mu_0 f k_a^2 m w_a^2 L_s m_1 / p. \quad (7)$$

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

$$E_0 = \pi \sqrt{2} k_a w_a f \Phi_m, \quad \Phi_m = \frac{2}{\pi} \tau L_s B_m, \quad \tau = \frac{\pi}{p} R_s, \quad (8)$$

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

$$E_0 = 2 \sqrt{2} \frac{\pi}{p} k_a w_a f R_s^p L_s M_0 \left((\bar{R}^p + \bar{R}^{2p}) m_1 + (\bar{R}^p - \bar{R}^{2p}) \right) \frac{\bar{R}^p - 1}{2 \bar{R}^{p-1} R^p}, \quad (9)$$

где $m_1 = \frac{\mu+L}{\mu L+1}$, $L = \frac{R_s^{2p} - R_i^{2p}}{R_s^{2p} + R_i^{2p}}$, $\bar{R} = \frac{R_r}{R_i}$, $\bar{R} = \frac{R_s}{R_i}$.

Используя выражения (7) и (9) можно построить зависимости индуктивного сопротивления и ЭДС холостого хода от количества пар полюсов p (рисунок 4). В расчетах принималось одинаковое значение числа витков фазы w_a при различных p .

Из рисунка 4 видно, что с увеличением числа пар полюсов p индуктивное сопротивление и ЭДС холостого хода уменьшаются.

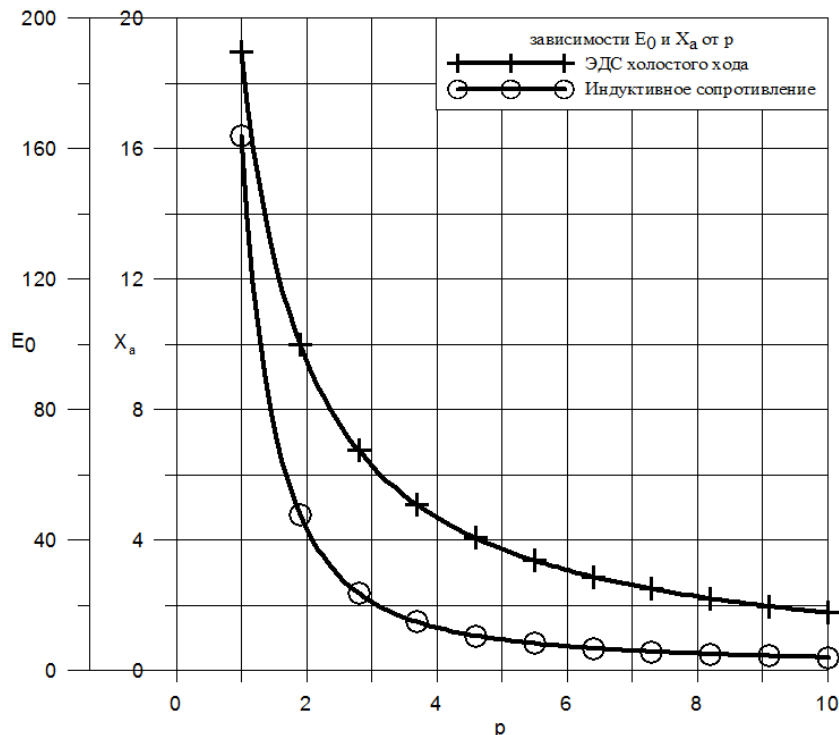


Рисунок 4 – Зависимости ЭДС холостого хода E_0 и индуктивного сопротивления X_a от количества пар полюсов p

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

$$\cos\varphi(\theta) = E_0 \sin(\theta) / \sqrt{(U \cos(\theta) - E_0)^2 + (U \sin(\theta))^2}, \quad (10)$$

$$I(\theta) = \sqrt{(U \cos(\theta) - E_0)^2 + (U \sin(\theta))^2} / x^2, \quad (11)$$

$$P_2(\theta) = \frac{mUE_0}{x} \sin(\theta). \quad (12)$$

Используя выражения (10-12) построены угловые характеристики машины в двигательном режиме (рисунок 5). Из рисунка 5 видно, что коэффициент мощности $\cos\varphi$ имеет максимум при небольшом угле нагрузки. Мощность двигателя P_2 имеет максимальное значение при угле нагрузки 90 градусов. А ток статора I возрастает с ростом угла нагрузки.

Внешняя характеристика ЭМ с ПМ в генераторном режиме приведена на рисунке 6:

$$U = \sqrt{E_0^2 - (X_a I)^2 \cos^2(\varphi)} - X_a I \sin(\varphi), \quad (13)$$

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

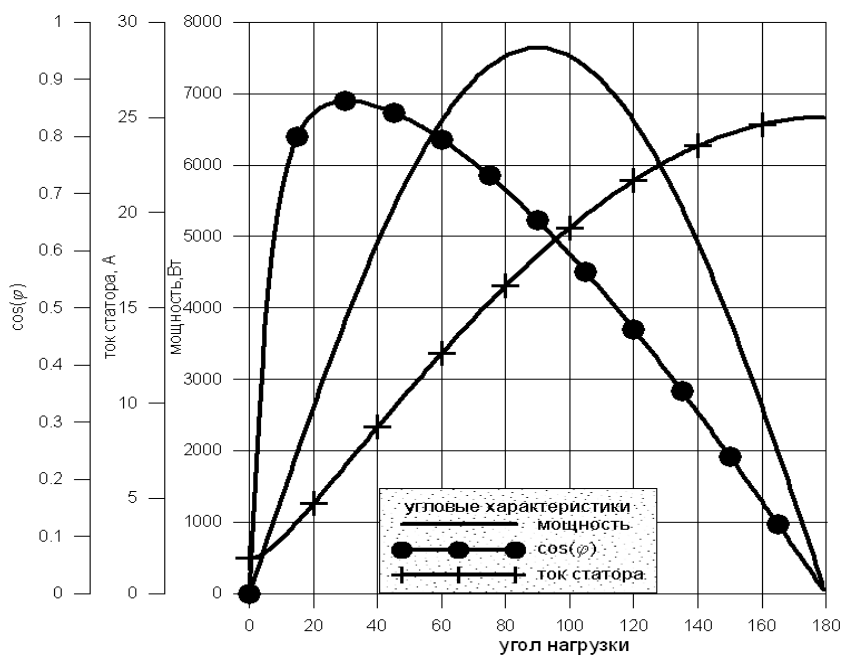


Рисунок 5 – Угловые характеристики машины в двигательном режиме

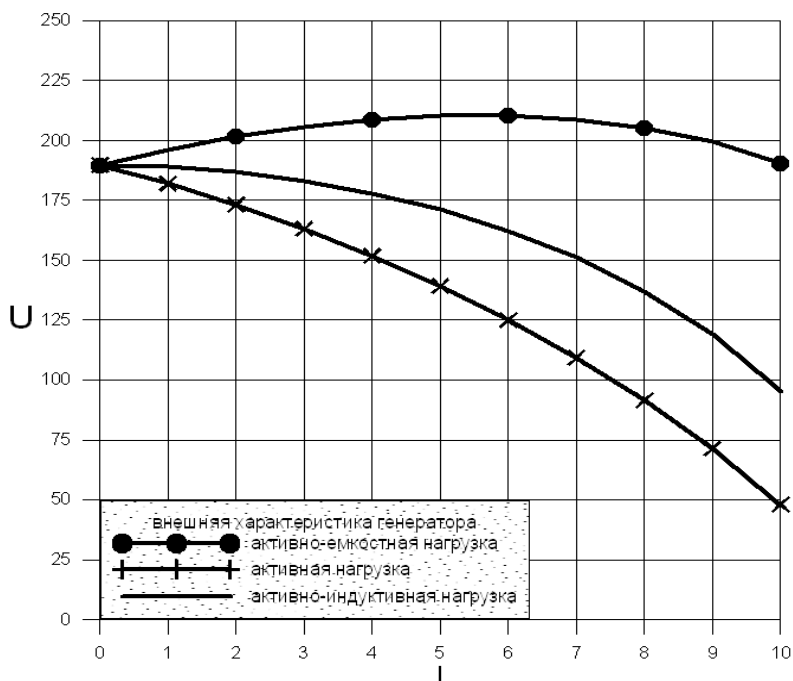


Рисунок 6 – Внешняя характеристика генератора

На основе теоретических результатов, полученных в главе 2, разработана методика поверочного расчета основных параметров синхронного ЭМП с возбуждением от ПМ для ПЭС/БЭС, которая может быть использована на этапе эскизного проектирования таких машин.

В третьей главе представлена аналитическая методика расчета многополюсных явнополюсных ВТСП электрических машин с увеличенной удельной мощностью для ПЭС/БЭС.

Конструктивная и расчетная схемы многополюсной синхронной электрической машины с ВТСП обмотками на массивном магнитомягком роторе представлены на рисунках 7 и 8 соответственно.

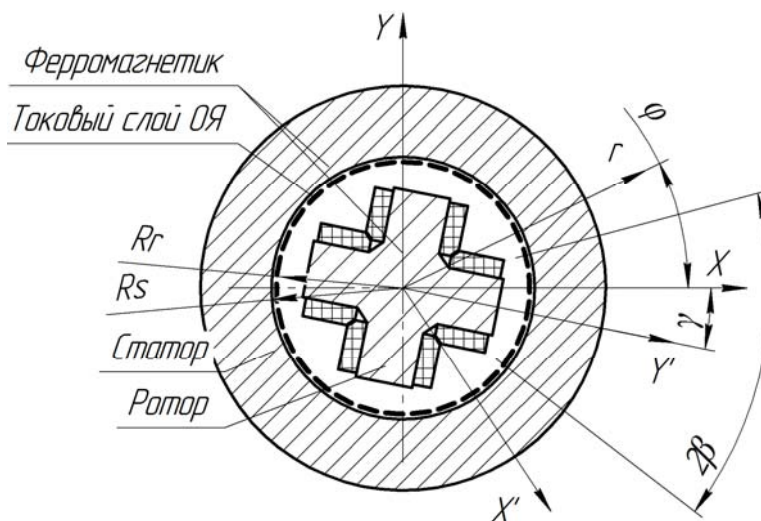


Рисунок 7 – Конструктивная схема электрической машины ВТСП обмотками

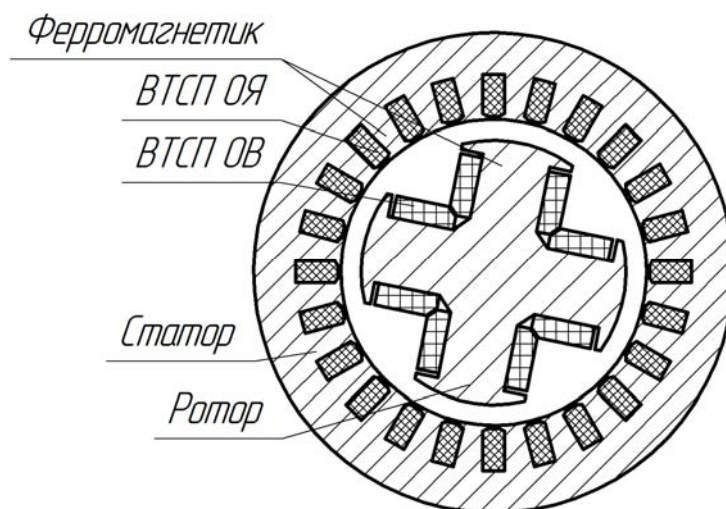


Рисунок 8 – Расчетная схема машины со сверхпроводниковыми обмотками ротора и статора

В общем случае распределение магнитных полей можно найти из решения системы уравнений Максвелла, которые для случая синхронных электрических машин могут быть записаны как

$$\operatorname{rot} \bar{H} = \bar{J}, \operatorname{div} \bar{B} = 0, \bar{B} = \mu \bar{H}. \quad (14)$$

Граничные условия для уравнений (14) на границах сред с различными магнитными проницаемостями имеют следующий вид:

$$\begin{cases} H_{\tau+} - H_{\tau-} = 0, \\ B_{n+} - B_{n-} = 0. \end{cases} \quad (15)$$

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

При решении задачи (14) и (15) используются те же допущения, что и на странице 7.

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

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

с соответствующими граничными условиями на поверхностях раздела сред с различными свойствами. Здесь $\delta(\rho - R)$ – дельта-функция, J – плотность тока, Δ – толщина токового слоя обмоток ротора и статора.

Решение уравнения (1) в воздушном зазоре для первой гармоники векторного потенциала имеет вид в случае отсутствия токов в ОВ ротора:

$$A_{\delta} = \frac{\mu_0 I k_a}{2p} \left(\frac{\rho}{R_s} \right)^p \sin(p\varphi) + \left(a_p \left(\rho^p + \frac{R_s^{2p}}{\rho^p} \right) - \left(\frac{R_s}{\rho} \right)^p \right) \sin(p\varphi) + c_p \left(\rho^p + \frac{R_s^{2p}}{\rho^p} \right) \cos(p\varphi). \quad (16)$$

Решение уравнения $\Delta A = -\mu_0 J \Delta \delta(\rho - R)$ в области ротора имеет вид:

$$A_R = c_p \rho^p \sin(p\varphi) + c_{p1} \rho^p \cos(p\varphi). \quad (17)$$

Амплитуды тока в обмотках ротора и статора определяются максимальным значением критического тока ВТСП ленты, из которых они выполнены. Зная эти амплитуды распределения тока в ВТСП и магнитомягких сегментах, суммарное распределение тока на роторе можно представить в следующем виде (рисунок 9):

$$I_R = \begin{cases} I_{RFe} \sin(p\varphi), & (-\pi + \gamma) \leq p\varphi \leq (-\pi + \gamma + \beta) \\ I_{RS} \sin(p\varphi), & (-\pi + \gamma + \beta) \leq p\varphi \leq (\gamma - \beta) \\ I_{RFe} \sin(p\varphi), & (\gamma - \beta) \leq p\varphi \leq (\gamma + \beta) \\ I_{RS} \sin(p\varphi), & (\gamma + \beta) \leq p\varphi \leq (\pi + \gamma - \beta) \\ I_{RFe} \sin(p\varphi), & (\pi + \gamma - \beta) \leq p\varphi \leq (\pi + \gamma) \end{cases}, \quad (18)$$

где γ – угол между вектором тока статора и осью d ротора, β – угол полюсного раскрытия ротора по магнитомягкому сегменту (рисунок 8).

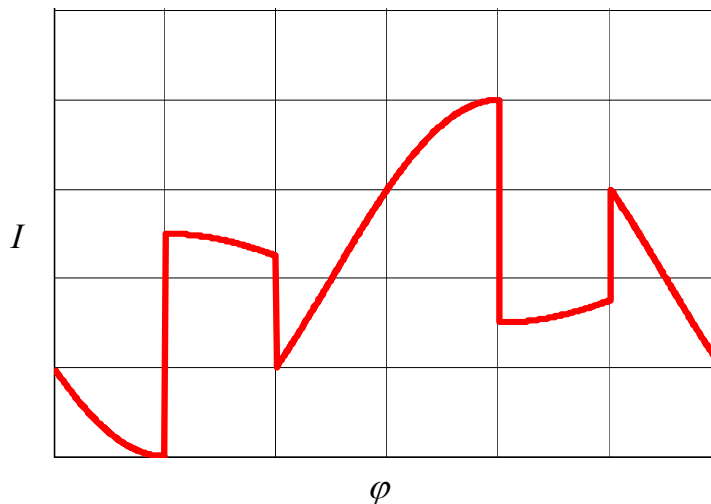


Рисунок 9 – Развертка тока ротора на ВТСП и магнитомягких сегментах

Кусочно-непрерывную функцию I_R можно представить в виде ряда Фурье:

$$I_R = \sum_{k=1,3,5,\dots}^{\infty} a_k \sin(kp\varphi) + b_k \cos(kp\varphi), \quad (19)$$

где k – номер гармоники.

Функция распределения токового слоя, определенная по первой гармонике распределения магнитного поля будет иметь вид:

$$I_R = J\Delta = a_k \sin(p\varphi) + b_k \cos(p\varphi), \quad (20)$$

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

После интегрирования получим следующие выражения:

$$a_k = \frac{I_{RS} - I_{RFe}}{\pi} \sin(2p\beta) \cos(2p\gamma) - 2 \frac{I_{RS} - I_{RFe}}{\pi} p\beta + I_{RS} p, \quad (21)$$

$$b_k = \frac{I_{RFe} - I_{RS}}{\pi} \sin(2p\beta) \sin(2p\gamma). \quad (22)$$

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

- задачи о распределении векторного потенциала в воздушном зазоре машины с однородным ротором с магнитной проницаемостью $\mu_r = \text{const}$.

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

В результате решения этих задач коэффициенты I_{RS} и I_{RFe} будут иметь вид:

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

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

Для определения главных индуктивных сопротивлений X_{ad} и X_{aq} найдем энергию магнитного поля в активной зоне машины. Энергия магнитного поля в активной зоне машины может быть определена на основе выражения (5).

После интегрирования и нахождения энергии одной фазы получим явные выражения для главных индуктивных сопротивлений X_{ad} и X_{aq} по осям d и q :

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

$$X_{aq} \left(\gamma = \frac{\pi}{2} \right) = \frac{2\mu_0 m \omega L_s W_a^2 K_a^2}{p\pi} \left(-\frac{m_1 - n_1}{\pi} \sin(2p\beta) \cos(p\pi) + 2 \frac{m_1 - n_1}{\pi} p\beta + n_1 \right), \quad (24)$$

где m – число фаз, W_a – число витков фазы обмотки якоря, ω – угловая частота, μ_0 – магнитная проницаемость вакуума; L_s – активная длина машины, K_a – обмоточный коэффициент; p – число пар полюсов, $m_1 = (\mu_{Fe} + l)/(\mu_{Fe} l + 1)$, $n_1 = (\mu_s + l)/(\mu_s l + 1)$, $\mu_{Fe} \gg 1$ – относительная магнитная проницаемость магнитомягких сегментов ротора $\mu_s \ll 1$ – относительная магнитная проницаемость областей с ВТСП обмотками в роторе.

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

$$E_0 = \pi \sqrt{2} K_a W_a f \Phi_{\delta}, \quad (25)$$

где K_a – обмоточный коэффициент ОЯ, W_a – число витков фазы ОЯ, f – электрическая частота, Φ_{δ} – главный магнитный поток.

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

$$\oint H dl = \sum_k I_k, \quad (26)$$

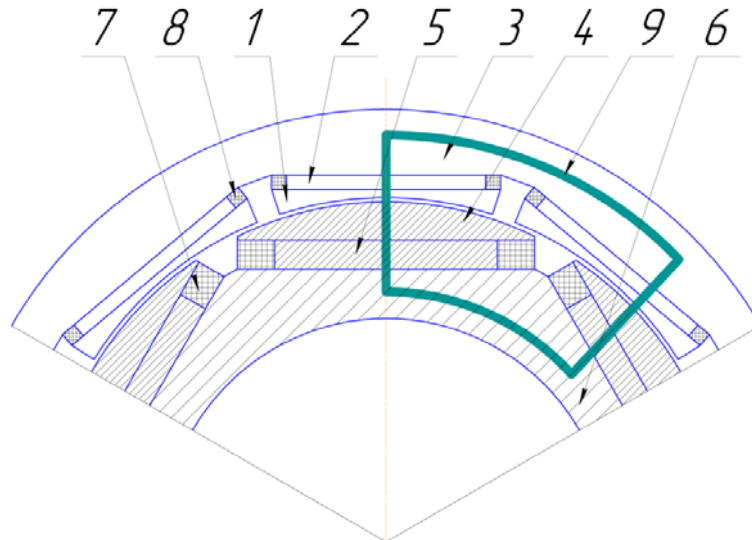
где H - напряженность магнитного поля, dl - элемент длины замкнутого контура L , $\sum I_k$ - алгебраическая сумма токов, связанных с контуром L .

Учитывая, что магнитную цепь машины можно разделить на участки, на которых напряженность H постоянна, на основе выражения (26), можно получить закон Ома для магнитной цепи:

$$F = \sum \Phi_{\delta} \cdot R_{\mu},$$

где Φ_{δ} - магнитный поток, $R_{\mu} = l/\mu\mu_0 S$ - магнитное сопротивление (l - длина магнитной силовой линии; S - площадь, через которую замыкается магнитный поток, μ_0 - магнитная постоянная; μ - относительная магнитная проницаемость), $F=IW$ - магнитодвижущая сила (МДС) (I - ток в обмотке, W - число витков).

Расчетная схема машины, приведенная на рисунке 8, может быть использована при построении конструктивной схемы.



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

Рисунок 10 - Конструктивная схема полностью ВТСП электрической машины

Учитывая пути замыкания магнитного потока (рисунок 10) можно получить уравнение для определения МДС машины:

$$F = \Phi_{\delta} \left(R_{\mu i} / 2 + 2R_{\mu s} + 2R_{\mu p} + 2R_{\mu \delta} + 3R_{\mu pz} / 2 + 3R_{\mu z} / 2 + R_{\mu a} / 2 \right),$$

где $R_{\mu i}$ - магнитное сопротивление ярма ротора; $R_{\mu s}$ - магнитное сопротивление сердечника полюса ОВ; $R_{\mu p}$ - магнитное сопротивление полюсного наконечника; $R_{\mu \delta}$ - магнитное сопротивление воздушного зазора; $R_{\mu pz}$ - магнитное сопротивление наконечника зубца статора; $R_{\mu z}$ - магнитное сопротивление зубца статора; $R_{\mu a}$ - магнитное сопротивление ярма статора; Φ_{δ} - основной магнитный поток машины.

На основании соотношений для различных участков магнитной цепи машины получено выражение для магнитного потока в зазоре машины:

$$\Phi_{\delta} = \frac{0.4H_s I_f L_s R_{fi} \alpha_i \mu_0 \operatorname{tg} \alpha}{b_l h_l} \left(\frac{\mu_z H_{a-r} \tau_{p-st}}{\left[3H_{a-r} (H_{p-st} + H_z \tau_{p-st}) + \mu_z \tau_{p-st} (1 + H_1) / \mu_s \right]} + \frac{\tau_p}{4 \left((H_p + H_s \tau_p) / \mu_p + \delta / \tau_{\delta} \right)} \right) \quad (27)$$

где L_s – активная длина машины; R_{fi} – внутренний радиус ОВ; α_i – полюсное деление ротора; $\alpha = \pi/(2p)$ – угол, соответствующий одному полюсу ОВ; b_l , h_l – ширина и толщина ВТСП ленты соответственно.

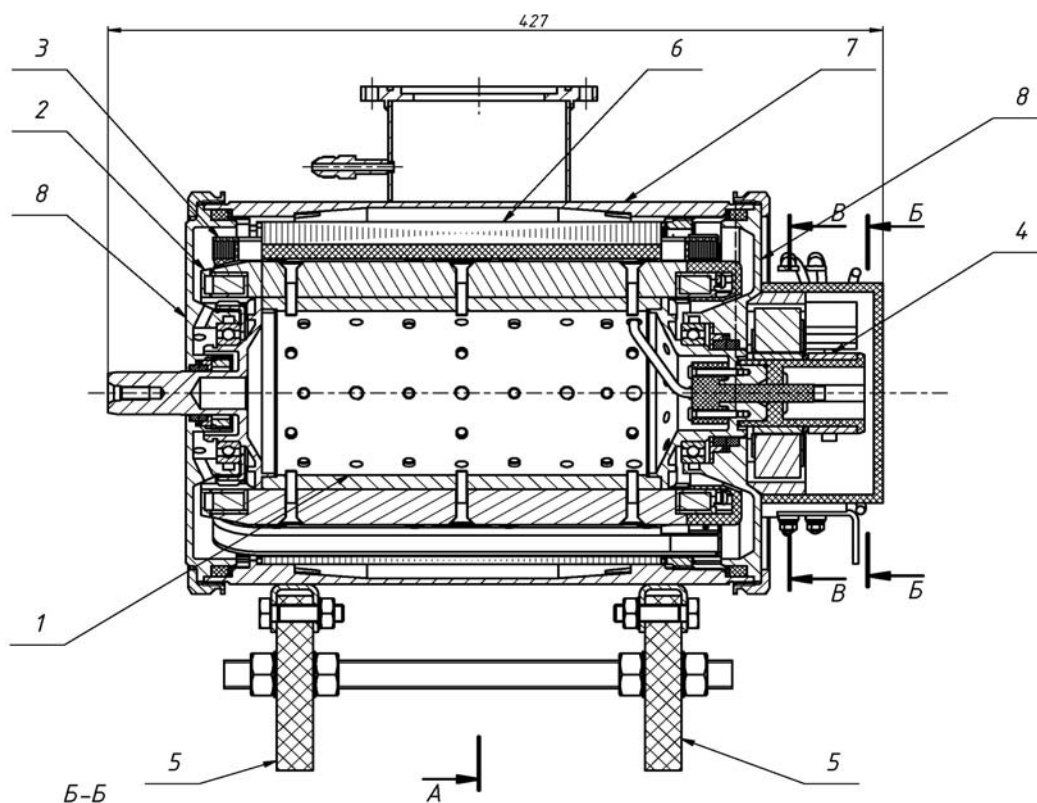
Полученное выражение учитывает геометрические размеры активной зоны машины, число пар полюсов. Таким образом размеры машины могут быть выбраны так, чтобы в воздушном зазоре был получен требуемый магнитный поток.

Таким образом, используя соотношения (24), (25) и (27) для расчета ЭДС и главных индуктивных сопротивлений, может быть определена электромагнитная мощность полностью ВТСП электрической машины с ферромагнитопроводом.

В четвертой главе представлены описание экспериментального стенда, конструкция макетного образца ВТСП ЭМП с высокой удельной мощностью, сопоставление результатов экспериментальных исследований с аналитическими расчетами и конечно-элементным моделированием.

В ходе диссертационной работы был доработан экспериментальный стенд кафедры 310 МАИ для испытаний электрических машин на основе ПМ и ВТСП.

На основании проведенных расчетов в главе 3 спроектирована конструкция макета полностью ВТСП электрической машины. На рисунке 11 представлен общий вид макетного образца с указанными основными элементами.



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

Рисунок 11 – Общий вид макета полностью ВТСП электрической машины

Используя соотношение для определения магнитного потока и соотношения для индуктивных сопротивлений ОЯ, а также соотношения для определения основных параметров синхронной машины составлен аналитический расчёт двигателя с исходными данными, приведёнными в диссертации.

В результате аналитического расчета определены главные основные параметры двигателя, такие как величина ЭДС холостого хода, мощность, индуктивные сопротивления, ток якоря. Для проверки насыщения материала также определены значения индукции в стержнях полюса ротора и зубцах статора (таблица 1).

Таблица 1 - Результаты аналитического расчета

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

На основе проведенного моделирования в AnsysMaxwell определены значения индуктивностей и взаимоиндуктивностей катушек, с помощью чего стало возможно определить действующее значение ЭДС холостого и индуктивные сопротивления ОЯ. С помощью двумерного моделирования получены результаты, представленные в таблице 2.

Таблица 2- Результаты моделирования

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

Сравнение результатов аналитического расчета и моделирования показало хорошую сходимость. На основании этого можно сделать вывод, что разработанная аналитическая методика может быть использована на ранних этапах проектирования сверхпроводниковых ЭМП.

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

Каждая изготовленная катушка испытана на постоянном токе и определен ее критический ток. В диссертации приведены результаты испытаний: критический ток, активное сопротивление при 300 К и индуктивность катушек ротора и статора. Показано, что критический ток всех катушек превышает номинальное значение.

На рисунке 12 показана машина на испытательном стенде. В результате испытаний ВТСП ЭМП получены характеристика холостого хода, внешняя характеристику в генераторном режиме, форма кривой ЭДС холостого хода. Данные зависимости приведены на рисунке 13.

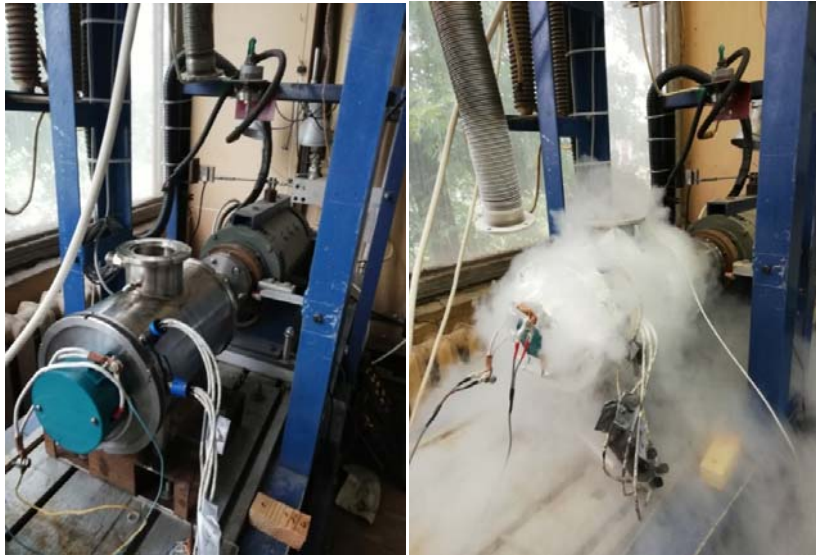


Рисунок 12 – Полностью ВТСП электрическая машина на испытательном стенде

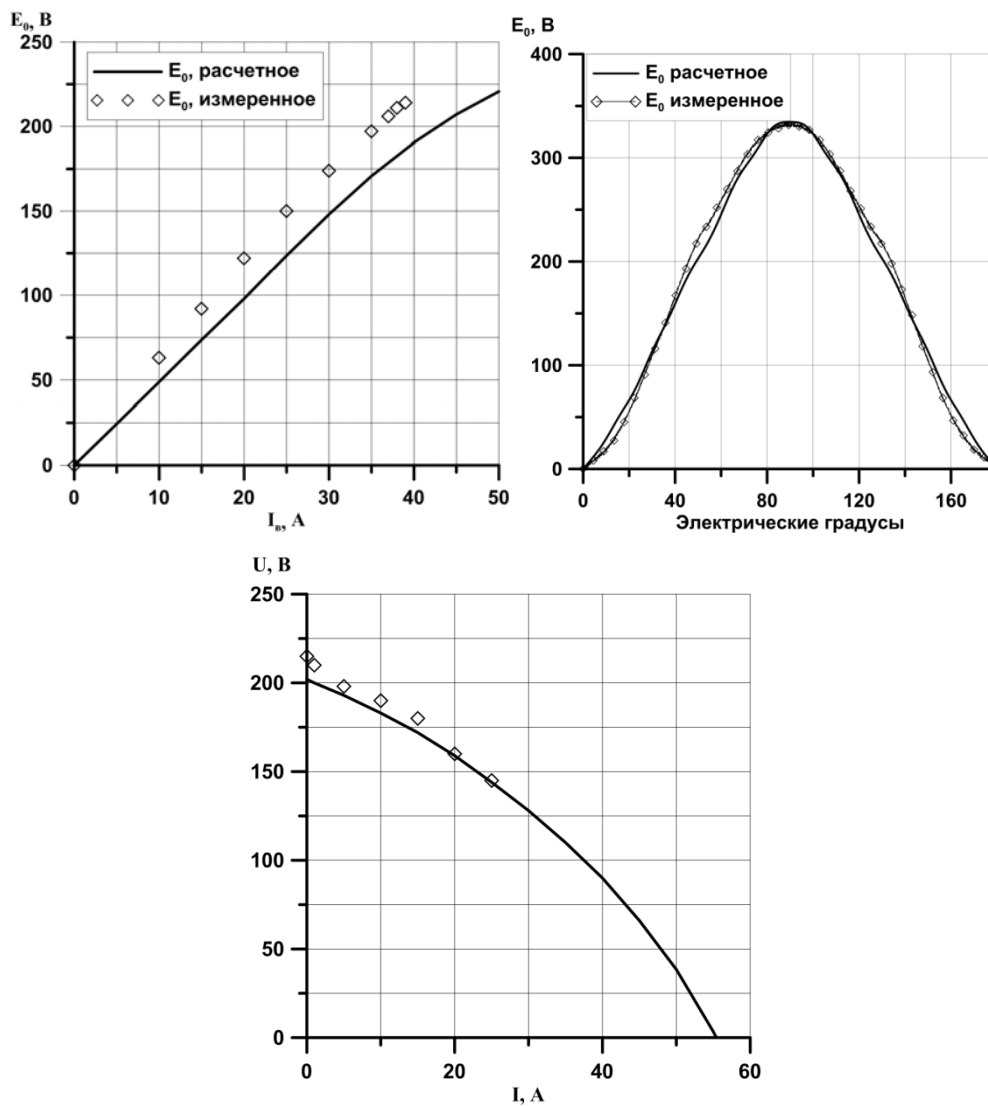


Рисунок 13 – Результаты испытаний полностью ВТСП электрической машины на холостом ходу

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

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

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

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе получены следующие результаты:

1. Обзор данных по преимуществам более/полностью электрифицированных самолетов и ПЭС показывает, что при их создании возможно снижение полной взлетной массы, эксплуатационных расходов, времени технического обслуживания, а также увеличение топливной эффективности.
2. В настоящее время концепция ПЭС реализована только для малых летательных аппаратов, т.к. удельная энергия аккумуляторных батарей не позволяет реализовать мощные их силовые установки.
3. Обзор публикаций, посвященных созданию электрических машин для БЭС/ПЭС, показал, что в настоящее время коммерчески доступны электрические двигатели и генераторы с удельной мощностью не выше 5 кВт/кг при частоте вращения 2500 мин⁻¹.
4. Установлено, что созданные на сегодняшний день ВТСП электрические машины обладают удельной мощностью более 8 кВт/кг при высокой частоте вращения и охлаждении жидким азотом. Также отмечено, что созданием ВТСП двигателей и генераторов занимаются ведущие научные центры по всему миру.
5. Рассмотрены критические параметры ВТСП лент ведущих мировых производителей. На основе анализа характера полевой зависимости критического тока при различных температурах выбраны наиболее рациональные ВТСП ленты для использования в составе ВТСП электрических машин. При температуре жидкого азота (65К-77К) наиболее рациональным является использование ВТСП лент производства AMSC. При температуре жидкого водорода (20К) – лент производства Fujikura.
6. Рассмотрены картины распределения магнитного поля в активной зоне машины при наличии и отсутствии стальных сердечников полюсов. Показано, что установка магнитных сердечников делает распределение магнитной индукции в области ВТСП катушек неравномерным и увеличивает ее локальные значения. Снизить влияние магнитного поля возбуждения на рабочий ток ВТСП катушек можно, увеличив немагнитные зазоры.
7. Проектирование ВТСП электрических машин без учета зависимости их удельной мощности от критических параметров сверхпроводников приводит к неверным результатам расчета, а также перерасходу дорогостоящей ленты.

8. На основе решений двумерных электродинамических задач получены аналитические соотношения для расчета двумерных магнитных полей в активной зоне ЭМ с ПМ.
9. Показано, что при увеличении числа пар полюсов, ЭДС холостого хода E_0 убывает пропорционально $\sim 1/p$, а главное индуктивное сопротивление X_a пропорционально $1/p^2$.
10. Построенные аналитические решения двумерных электродинамических задач для определения магнитных полей и выходных параметров ЭМП с ПМ позволяют проводить количественные оценки выходных характеристик синхронной машины с учетом количества пар полюсов, размеров постоянных магнитов и режима работы ЭМП. И могут быть использованы при выборе предварительных размеров ЭМП с ПМ на этапе их эскизного проектирования.
11. Получено аналитическое решение задачи о распределении двумерных магнитных полей в активной зоне синхронной электрической машины с ВТСП ОВ и ОЯ и ферромагнитопроводом. Полученное аналитическое решение учитывает геометрию активной зоны машины, число пар полюсов, число фаз и параметры ВТСП обмоток.
12. На основе полученных решений о распределении магнитных полей найдены аналитические выражения для расчета основных параметров полностью ВТСП ОВ и ОЯ при наличии ферромагнитопровода в активной зоне машины.
13. На основе полученных аналитических решений выполнен пример расчета синхронного двигателя с ВТСП ОВ и ОЯ мощностью 12,5 кВт. Показано, что данная машина может обладать удельной мощностью более 10 кВт/кг при охлаждении жидким азотом.
14. Приведенная в данном разделе методика расчета основных параметров и главных размеров ВТСП ЭМП является первым этапом проектирования полностью ВТСП машин, т.к. аналитическая запись выражений для определения основных параметров электрической машины позволяет проводить их частичную оптимизацию, которая не требует существенных вычислительных мощностей.
15. Приведено описание испытательного стенда для исследования ЭМП для БЭС/ПЭС.
16. Описана конструкция макетного образца полностью ВТСП электрической машины.
17. Получены результаты экспериментальных исследований макетного образца полностью ВТСП электрической машины, хорошо совпадающие с теоретическими данными. Это означает, что разработанная методика расчета подобных машин может быть использована при их проектировании и позволяет определить основные параметры машин с высокой точностью.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Работы в журналах по перечню ВАК

1. Ковалев Л.К., Ковалев К.Л., Тулинова Е.Е., Иванов Н.С. Многополюсные синхронные генераторы с постоянными магнитами для ветроэнергетических установок. Статья. // Электричество. – М.: 2013, №8 – с. 2-8.
2. Ковалев Л.К., Ковалев К.Л., Иванов Н.С., Тулинова Е.Е. Методика расчета распределения магнитного поля в активной зоне синхронных генераторов с

электромагнитным возбуждением в автономных электроэнергетических установках. Статья. // Электричество. – М.: 2014, №5 – с. 12-17.

3. **Тулинова Е.Е.**, Ковалев К.Л., Иванов Н.С., Ларионов А.Е. Обзор разработок полностью электрических самолетов. Статья. // Электричество. – М.: 2016, №4 – с. 15-25.

4. К.Л. Ковалев, **Е.Е. Тулинова**, Н.С. Иванов. Сравнительный анализ магнитодвижущих сил синхронной машины обращенной конструкции с постоянными магнитами и обмотками возбуждения. Статья. // Вестник Московского авиационного института. – М.: 2017. Т. 24. № 4 – с. 151-158.

5. Ковалев К.Л., Пенкин В.Т., Семенихин В.С., **Тулинова Е.Е.**, Ларионов А.Е. Анализ параметров синхронного генератора со сверхпроводящими обмотками для автономной электроустановки. Статья. // Электричество. – М.: 2018, №5 – с. 33-38.

6. Ковалев К.Л., Иванов Н.С., **Тулинова Е.Е.**, Кадеров В.А. Аналитический метод расчета параметров сверхпроводниковой электрической машины с ферромагнитопроводом. Статья. // Электричество. – М.: 2019, №8 – с. 42-50.

Работы в журналах, входящих в базы Scopus и WoS

1. Konstantin Kovalev, Nickolay Ivanov, Irina Kobzeva, **Ekaterina Tulinova**. High specific power HTS electric machines. Przegląd Elektrotechniczny, 2017, Volume 93, Issue 11, p.:125 – 128.

2. Kovalev K., Ivanov N., **Tulinova E.**, Nekrasova J. Methodic of calculation of fully HTS salient-pole electrical machine. Przegląd Elektrotechniczny, 2019, Volume 95, Issue 1, p.: 213-218.

Патенты на изобретения РФ

1. Ковалев Л.К., Ковалев К.Л., Полтавец В. Н., Дежин Д. С., Ильясов Р. И., Егошкина Л. А., **Тулинова Е.Е.** Многополюсная синхронная ВТСП электрическая машина. Патент на полезную модель № 126535 по заявке 2012142205/07, опубликовано 27.03.2013, бюллетень №9, 13с.

2. Ковалев К.Л., Иванов Н.С., Пенкин В.Т., Егошкина Л. А., Ильясов Р. И., **Тулинова Е.Е.** Электрическая машина с кольцевой сверхпроводниковой обмоткой якоря. Патент на полезную модель № 177749 по заявке 2017125840, опубликовано 12.03.2018, бюллетень № 8, 7с.

Доклады на конференциях

1. Кобзева И.Н., Ковалёв К.Л., Кулешов М.А., **Тулинова Е.Е.** Разработка сверхпроводниковых электрических машин для полностью электрического самолета. В книге: 14-я Международная конференция «Авиация и космонавтика – 2015». Тезисы Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). 2015. – с. 207-208.

2. Кобзева И.Н., Иванов Н.С., Семенихин В.С., **Тулинова Е.Е.** Сверхпроводниковая электрическая машина с внешним экраном. Гагаринские чтения – 2016: XLII Международная молодёжная научная конференция: Сборник тезисов докладов: В 4 т. М.: Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2016. Т. 1, - с. 666.

3. Kovalev K., Ivanov N., **Tulinova E.** Magnetic field distribution in the active zone of synchronous generators with electromagnetic excitation. 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2017 - Proceedings electronic edition. 2017. – p. 8076353.
4. Кадеров В.А., **Тулинова Е.Е.**, Иванов Н.С. Исследование фундаментальной зависимости удельной мощности электрических машин от критических параметров сверхпроводников. В книге: Авиация и космонавтика - 2018. Тезисы 17-ой Международной конференции. 2018. – с. 157-158.
5. Ковалев К.Л., Иванов Н.С., Журавлев С.В., **Тулинова Е.Е.**, Кадеров В.А. Сверхпроводниковые электрические машины с улучшенными массогабаритными показателями. В сборнике: Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (Бенардосовские чтения). Материалы Международной (XX Всероссийской) научно-технической конференции. 2019. С. 149-153.