

На правах рукописи
УДК 621.313.323:621.318.2 (043.3)

ГОЛОВАНОВ ДМИТРИЙ ВИКТОРОВИЧ

**«СИНХРОННЫЕ ВТСП ДВИГАТЕЛИ С ПОСТОЯННЫМИ
МАГНИТАМИ»**

Специальность – 05.09.01
«Электромеханика и электрические аппараты»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва – 2009

Работа выполнена на кафедре «Электроэнергетические, электромеханические и биотехнические системы» Московского авиационного института (государственного технического университета).

Научный руководитель: д.т.н., проф. Ковалев Лев Кузьмич
Официальные оппоненты: д.т.н., проф. Копылов Сергей Игоревич
к.т.н., доц. Бочаров Владимир Владимирович

Ведущая организация: ОАО АКБ «Якорь» г. Москва

Защита диссертации состоится « 16 » февраля 2010 г. в 11 часов на заседании диссертационного совета Д 212.125.07 при Московском авиационном институте (государственном техническом университете) «МАИ» по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д.4, Учёный совет МАИ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского авиационного института (государственного технического университета) «МАИ».

Ваш отзыв на автореферат в одном экземпляре, заверенный печатью учреждения, просим направлять по указанному адресу.

Автореферат разослан _____ 2009 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д 212.125.07
к.т.н., доцент



А.Б. Кондратьев

Общая характеристика диссертационной работы

Актуальность темы. Современная энергетика и аэрокосмическая техника предъявляют повышенные требования к системам генерирования, передачи, хранения и преобразования электроэнергии. Для электромеханических преобразователей (ЭМП) наиболее существенными являются такие показатели, как удельная мощность и габариты, которые особенно важны для авиационной и космической техники. Развитие современной электроэнергетики связано с использованием новых материалов с уникальными свойствами. Для электроэнергетических систем и комплексов наиболее перспективными являются сверхпроводниковые материалы, которые позволяют существенно улучшить энергетические показатели ЭМП.

До недавнего времени широкое внедрение сверхпроводимости (СП) в электроэнергетике было затруднено. Это было связано с низкой критической температурой перехода сверхпроводника в СП состояние и, как следствие, большими затратами на системы криостатирования на основе жидкого гелия. В конце 1980-х годов появление высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП) с критическими температурами $\sim 100\text{ K}$ существенно повысило интерес к электрическим машинам на их основе. Это объясняется тем, что переход от жидкого гелия (4,2 K) к относительно дешёвому жидкому азоту (77 K) позволяет существенно сократить затраты в системах криостатирования и делает экономически оправданным применение электромеханических преобразователей, основанных на ВТСП. Наиболее перспективным является применение ВТСП электрических машин в тех системах, где уже имеется криогенное оборудование (например самолёты на водородном топливе, энергетические системы на жидком водороде, перспективная судовая и аэрокосмическая техника и др.).

Ещё один импульс в развитии ЭМП связан с появлением магнитов на основе редкоземельных материалов, обладающих высокой удельной энергией. Применение высокоэнергетических редкоземельных постоянных магнитов (РЗМ ПМ) в ЭМП позволяет получать магнитные поля до 1,5 Тл в воздушном зазоре электрической машины, причём эти магниты не размагничиваются на воздухе в отличие от уже устаревших магнитов типа ЮНДК.

Наиболее мощными, обладающими высоким значением КПД и $\cos \varphi$ являются на сегодняшний день магнитоэлектрические синхронные машины (СМ). Среди них различают СМ с радиальными и тангенциальными магнитами, а также достаточно редко встречающиеся СМ с радиально-тангенциальными магнитами. Применение в роторах синхронных машин ВТСП материалов совместно с РЗМ позволяет существенно повысить параметры таких ЭМП. Объёмные ВТСП элементы благодаря своим диамагнитным свойствам целесообразно применять в роторах СМ с ПМ для создания магнитной анизотропии и повышения реактивной составляющей мощности.

Основные надежды разработчики ВТСП устройств в настоящее время связывают с появившимися в последнее время ВТСП проводниками 2-ого поколения на основе иттриевых керамик. Это так называемые «*coated tapes*» (т.е. пленки с покрытием). Токонесущая способность такой пленки весьма высока (до 300 А/мм² в сверхпроводнике при температуре жидкого азота). Данные ВТСП материалы можно эффективно применять в индукторе СМ в качестве диамагнитного экрана для

экранирования магнитных полей якоря, что позволяет снизить главные индуктивные сопротивления электрической машины, а также в качестве обмотки переменного тока при малых частотах – до 30 Гц. Использование ВТСП проводов в СМ предоставляет значительные конкурентоспособные преимущества, позволяя существенно уменьшать размер, вес и производственные затраты относительно обычных двигателей. Из-за сокращений стоимости производства, связанных с уменьшенным размером ВТСП машин ожидается, что рыночная цена будет эквивалентна обычным машинам с медной обмоткой.

Целью диссертации является разработка высокоэффективных синхронных двигателей с ротором, содержащим объёмные и плёночные ВТСП элементы и ПМ, методов их расчёта и рекомендаций по их применению. Поставленная цель была достигнута на основе решения следующих задач:

1. Разработка в рамках единого подхода аналитических методик расчёта двухмерных магнитных полей и параметров синхронных двигателей (СД) с радиальными, радиально-тангенциальными и тангенциальными ПМ и плёночными ВТСП элементами в роторе.
2. Проведение сравнительного анализа энергетических параметров магнитоэлектрических ВТСП двигателей различного конструктивного исполнения: с радиальными, радиально-тангенциальными и тангенциальными магнитами.
3. Поиск рациональных конструктивных схем СД с радиально-тангенциальными ПМ и объёмными ВТСП элементами в роторе, и частичная оптимизация геометрии и активных элементов ротора.
4. Создание и экспериментальное исследование опытного образца криогенного синхронного двигателя с радиально-тангенциальными ПМ и объёмными ВТСП элементами в роторе и проверка математических моделей.

Методы исследования. При решении поставленной задачи в диссертации использовались методы математической физики, теория поля, электромеханики и прикладной сверхпроводимости; численные методы решения уравнений в частных производных (метод конечных элементов). Для численного расчёта, построения диаграмм, графиков, и рисунков, а также для решения уравнений использовался пакет математического моделирования *MathCAD 11*; для решения задач методом конечных элементов использовался пакет прикладных программ *Elcut Professional 5.4*; «твердотельное» моделирование и эскизное проектирование было осуществлено на базе пакета *Solidworks 2007*, а также *AutoCAD 2004*; для построения графиков использовалась программа *Grapher 5.02*; рисунки были подготовлены в программах *ACDSee 3.0* и *Adobe Photoshop CS2*; оформление работы производилось с помощью программ из пакета *MS Office 2003*.

Научная новизна полученных результатов заключается в следующем:

1. Предложены перспективные схемы СД с постоянными магнитами и плёночными и массивными ВТСП элементами в роторе.
2. В рамках единого подхода разработаны аналитические методы расчёта ВТСП СД с радиальными, радиально-тангенциальными и тангенциальными магнитами и плёночными ВТСП элементами в роторе. На основе

аналитического подхода с последующей численной калибровкой создана методика расчёта СД с тангенциальными ПМ без ВТСП элементов.

3. Проведён сравнительный анализ энергетических параметров различных конструктивных схем ВТСП двигателей с радиальными, радиально-тангенциальными и тангенциальными магнитами и выполнена частичная оптимизация геометрии и активных элементов ротора машины с радиально-тангенциальными и тангенциальными магнитами.
4. Подробно рассмотрены различные конструктивные схемы СД с радиально-тангенциальными магнитами и объёмными ВТСП элементами в роторе.
5. Проведены испытания разработанного криогенного СД с объёмными ВТСП элементами в роторе и получены экспериментальные результаты, подтверждающие разработанные теоретические модели.
6. Показана возможность создания высокоэффективных магнитоэлектрических ВТСП двигателей с ПМ и композитными тонкоплёночными и листовыми элементами в роторе, обладающими в 1.5–2 раза более высокими массоэнергетическими показателями по сравнению с традиционными СД с ПМ.

Практическая ценность работы:

1. Разработаны алгоритмы и программы расчёта характеристик ВТСП СД различного конструктивного исполнения.
2. Определены области рационального использования для трёх типов СД с ПМ: радиальными, радиально-тангенциальными и тангенциальными постоянными магнитами (как с ВТСП экраном в роторе, так и без него).
3. Создан первый отечественный экспериментальный образец криогенного ВТСП СД с ПМ и объёмными ВТСП материалами в роторе мощностью 150 кВт. Проведены его испытания.

Реализация результатов. Результаты диссертационной работы внедрены в НИР по теме «Исследования по созданию высокоэффективных систем электроснабжения на основе сверхпроводящих компонентов для военной техники нового поколения», шифр «Машук-М» (№210703/6237).

Апробация работы:

Отдельные результаты обсуждались и докладывались на следующих конференциях:

1. Всероссийская конференция молодых учёных и студентов «Информационные технологии в авиационной и космической технике – 2008», 21–24 апреля 2008 г., МАИ, г. Москва.
2. Открытый конкурс 2008 г. на лучшую работу студентов по разделам «Электротехника и электрические аппараты, материалы и изделия. Энергетическое машиностроение» и «Энергосберегающие технологии» (работа отмечена медалью Минобрнауки РФ)
3. 7-й международной конференции «Авиация и космонавтика – 2008», 20–23 октября 2008 г., МАИ, г. Москва.
4. 8-й международной конференции «Авиация и космонавтика – 2009», 26–28 октября 2009 г., МАИ, г. Москва.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 3 научные работы, из них 1 — в журнале «Электричество», рекомендованном ВАК РФ и 1 в журнале «Известия академии электротехнических наук РФ».

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4-х глав, заключения, списка используемых источников и приложения; имеет 140 страниц, 104 рисунка, 13 таблиц и 107 наименований списка литературы.

Краткое содержание работы

Во введении обоснована актуальность выбора темы диссертационной работы, связанная с перспективностью применения ВТСП элементом совместно с ПМ при создании высокоэффективных СД с постоянными магнитами, сформулированы цель и задачи диссертации, определена научная новизна и практическая ценность работы, дана информация о структуре и объеме диссертации.

В первой главе рассматриваются современные токонесущие элементы на базе ВТСП: объемные материалы на основе иттриевой керамики, диборида магния, листовые композитные материалы на основе соединений висмута, и композитные ВТСП провода 2-го поколения. Приводится классификация СП электрических машин: с СП проводами в индукторе, с СП проводами на якоре, с массивными и композитными листовыми ВТСП материалами. Приведены описания отечественных и зарубежных разработок в области СП электрических машин. Рассмотрены перспективы использования современных ВТСП материалов в наиболее перспективных магнитоэлектрических ЭМП с РЗМ с целью улучшения их энергетических характеристик.

Во второй главе рассмотрены аналитические модели расчёта магнитных полей и параметров синхронных магнитоэлектрических ВТСП двигателей.

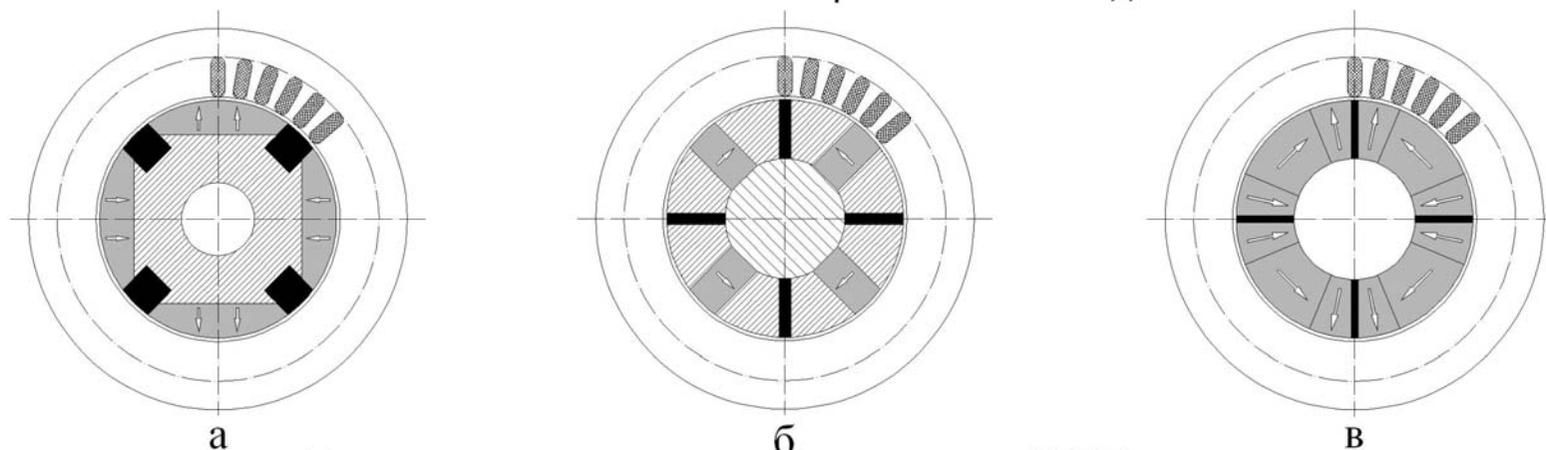
Можно выделить следующие три основные конструктивные схемы роторов магнитоэлектрических ВТСП двигателей – с радиальной, радиально-тангенциальной и тангенциальной намагниченностью (рис. 1, а, б, в). Каждая из них имеет свои особенности, преимущества и недостатки, в связи с чем проблема выбора конкретной схемы при проектировании машины становится весьма актуальной.

Возможные пути улучшения выходных параметров синхронных машин с возбуждением от ПМ путем использования в роторе массивных или пленочных ВТСП элементов можно проиллюстрировать на основе известной угловой зависимости электромагнитной мощности машины:

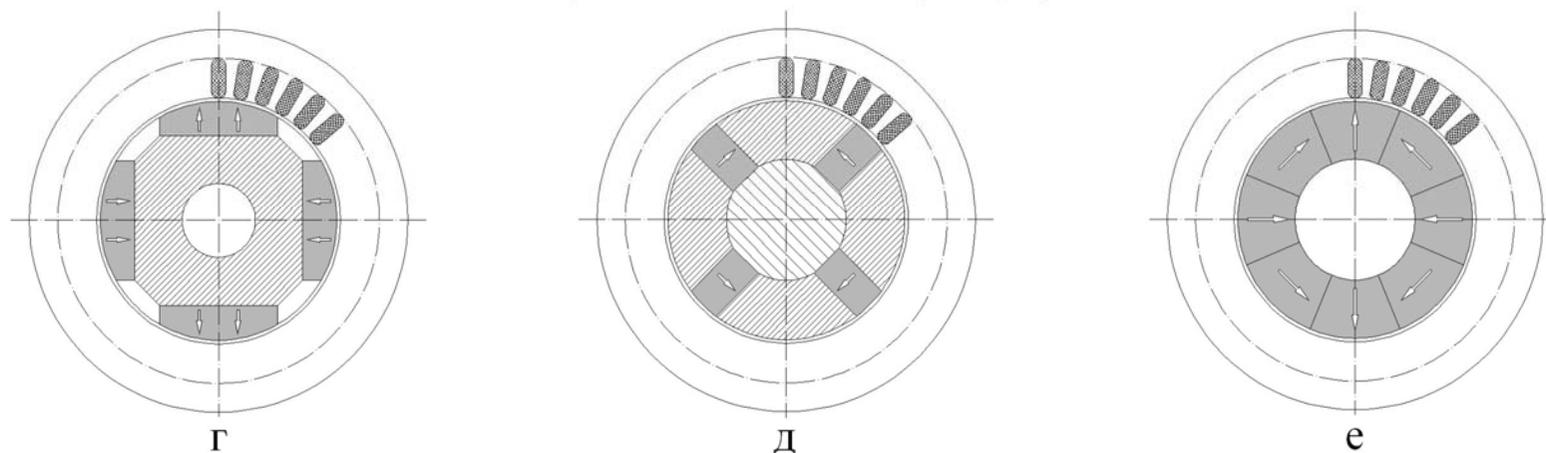
$$P_{\Sigma} = P'_1 + P''_2 = \frac{m_{\phi} E_0 U}{x_d} \sin \theta + \frac{m_{\phi} U^2}{2} \left[\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right] \sin 2\theta. \quad (1)$$

Здесь x_d и x_q – полные индуктивные сопротивления по продольной и поперечной осям ротора; m_{ϕ} – число фаз; θ – угол между направлениями векторов ЭДС E_0 ротора и напряжением питания U . Составляющая P'_1 определяется возбуждением машины от ПМ в роторе и индуктивным сопротивлением x_d вдоль оси d . Величина P''_2 связана с взаимодействием явнополюсного ротора с токами якоря и существенно зависит от соотношения индуктивных сопротивлений вдоль осей d и q (соответственно x_d и x_q).

Явнополюсные магнитоэлектрические ВТСП двигатели



Неявнополюсные магнитоэлектрические ВТСП двигатели (с ВТСП плёнкой на роторе)



- постоянные магниты
 - ферромагнитная сталь
 - ВТСП

Рисунок 1 – Перспективные схемы магнитоэлектрических ВТСП двигателей с постоянными магнитами

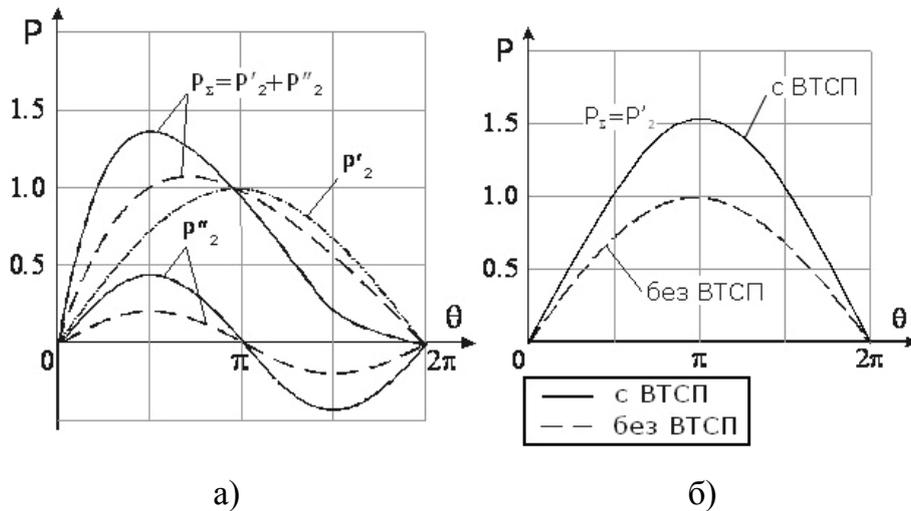


Рисунок 2 – Угловые характеристики явнополюсных (а) и неявнополюсных (б) синхронных двигателей

Для неявнополюсной машины ($x_d = x_q$) это слагаемое отсутствует.

На рис. 2 приведены типичные зависимости $P=P(\theta)$ для неявнополюсной ($x_d = x_q$) (рис. 2, б) и явнополюсной ($x_d \neq x_q$) (рис. 2, а) конструкций синхронных машин.

Так как индуктивные сопротивления машины по осям d и q существенно зависят от структуры ротора, то использование в его составе диамагнитных массивных ВТСП элементов позволяет заметно менять их значения. Анализ физических процессов в ВТСП элементах показывает, что при комнатных температурах керамические элементы не имеют диамагнитных свойств и магнитные поля от ПМ ротора не экранируются. При понижении температуры ниже критической ($T < T_c$) магнитные поля от ПМ ротора «вмораживаются» в керамический ВТСП элемент, а сам элемент приобретает ярко выраженные диамагнитные свойства. В этой связи представляет большой интерес применение тонкоплёночных ВТСП элементов в качестве диамагнитного экрана на поверхности ротора (рис. 3, рис. 1, г, д, е).

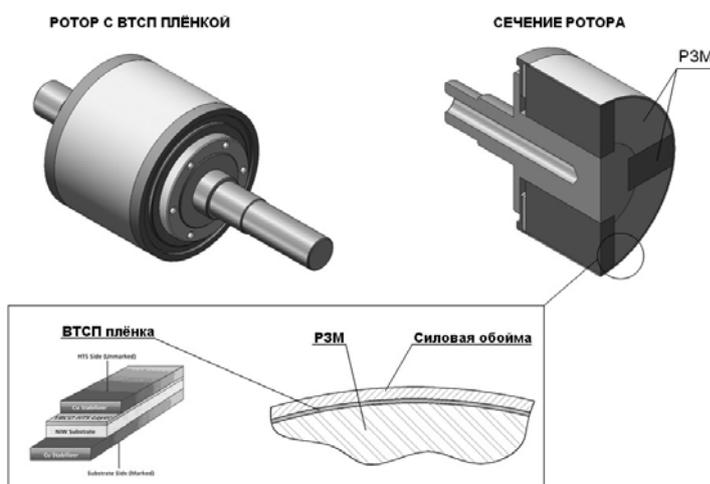


Рисунок 3 – Ротор с тонкоплёночным ВТСП элементом

Среди трёх представленных типов СД с ПМ, синхронные машины с радиальными магнитами являются наиболее распространёнными. Это связано с относительно простой конструкцией (рис. 4, а). В представленной конструкции постоянные магниты 1 удерживаются биметаллической обоймой 3. Магнитный поток внутри ротора замыкается через ферромагнитный сердечник 2. В пазах статора 4

располагается трёхфазная обмотка переменного тока. Расчётная схема показана на рис. 4, б.

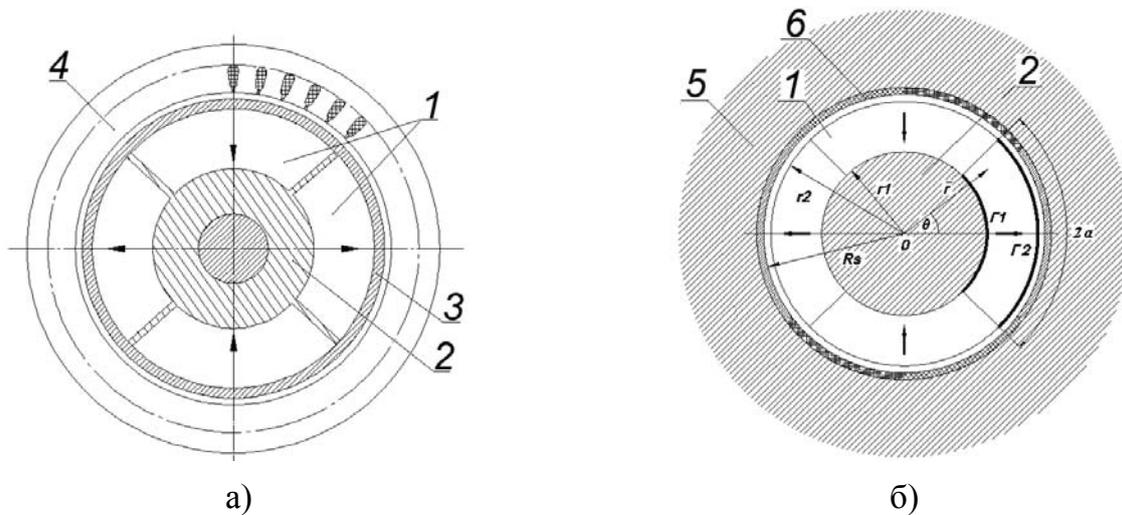


Рис. 4 – СД с радиальными магнитами (а – конструктивная схема СД; б – расчетная схема СД)

При построении аналитических решений для распределения магнитных полей вводились следующие допущения: задача решается в плоской постановке, статор 4 (рис. 4, а) заменялся ферромагнитным экраном 5 (рис. 4, б), обмотка статора представлена эквивалентным токовым слоем 6, ферромагнитный сердечник 2 и экран 5 считаются ненасыщенными с $\mu_r \gg 1$. Величины магнитных моментов радиальных магнитов принимались постоянными $M_r = const$, машина считается достаточно длинной. Величина магнитного поля на бесконечном удалении от начала координат стремится к нулю ($B \rightarrow 0$ при $r \rightarrow \infty$). Решение задачи нахождения распределения магнитных полей в активной зоне машины было найдено в виде трёх слагаемых:

- 1) определяемого токовым слоем 6 на радиусе расточки статора,
- 2) определяемого полем уединённых ПМ ротора 1,
- 3) учитывающего влияние электротехнических сталей ротора и статора.

Распределение магнитных полей в активной зоне синхронной машины с радиальными магнитами находится из решения задач магнитостатики, описываемых уравнениями Максвелла:

$$\begin{cases} \text{rot} \bar{H} = \bar{J}_a; & \text{div} \bar{B} = 0; \\ \bar{B} = \mu_0 \mu (\bar{H} + \bar{M}) \end{cases} \quad (2)$$

Вводя понятие векторного магнитного потенциала $\bar{A}(0,0,A_z)$ с помощью соотношения $\bar{B} = \text{rot} \bar{A}$, системы (2) сводятся к следующим уравнениям:

$$\Delta A = 0, \quad (3)$$

$$\Delta A = -\mu_0 J_a \delta(\rho - R_s). \quad (4)$$

Уравнение (4) описывает магнитные поля от постоянных магнитов, а (5) от токового слоя статора. Как отмечалось выше, суммарное поле в машине складывается из трёх слагаемых:

$$A = A_{\delta} + A'_e + A'_{Fe}. \quad (5)$$

Здесь A_{δ} определяется токовым слоем на статоре, A'_e - уединёнными постоянными магнитами ротора, а A'_{Fe} - влиянием магнитопровода машины. Решение для A_{δ} имеет вид:

$$A_{\delta} = \frac{\mu_0 W_a i_a m_{\phi}}{2\pi p} \sum_{n=1,3,5\dots} \frac{K_{an}}{n} \left[(a_n + 1) \left(\frac{r}{R_s} \right)^{pn} + (a_n - 1) \left(\frac{R_s}{r} \right)^{pn} \right] \times \sin(pn\theta) + \\ + \frac{\mu_0 W_a i_a m_{\phi}}{2\pi p} \sum_{n=1,3,5\dots} \frac{K_{an}}{n} c_n \left[\left(\frac{r}{R_s} \right)^{pn} + \left(\frac{R_s}{r} \right)^{pn} \right] \times \cos(pn\theta). \quad (6)$$

Здесь m_{ϕ} – число фаз обмотки якоря, коэффициенты a_n и c_n определяют реакцию якорных обмоток на структуру индуктора.

Константы a_n и c_n при наличии ВТСП экрана на поверхности ротора ($r = r_2$) находится из условия $A_{\delta} = 0$:

$$a_n = \sum_{v=1,3,5\dots} \left[\left(\left(\frac{R_s}{r_2} \right)^{np} - \left(\frac{r_2}{R_s} \right)^{np} \right) / \left(\left(\frac{R_s}{r_2} \right)^{np} + \left(\frac{r_2}{R_s} \right)^{np} \right) \right], \quad c_n = 0. \quad (7)$$

При отсутствии ВТСП экрана - из условия отсутствия компоненты поля B_{θ} ($\partial A_{\delta} / \partial r = 0$) на поверхности ферромагнитного сердечника ротора ($r = r_1$) как:

$$a_n = - \left(\frac{r_1^{np-1}}{R_s^{np}} + \frac{R_s^{np}}{r_1^{np+1}} \right) / \left(\frac{r_1^{np-1}}{R_s^{np}} - \frac{R_s^{np}}{r_1^{np+1}} \right), \quad c_n = 0. \quad (8)$$

Векторный потенциал уединённого цилиндра из радиально намагниченных ПМ определяется из решения уравнения (4). При построении аналитических решений используется функция Грина G в форме p -полюсного источника:

$$G = -2 \sum_{n=1,3,5\dots} \frac{1}{n} \left(\frac{\rho}{r} \right)^{\pm pn} \cos[pn(\theta - \theta_1)]. \quad (9)$$

Аналитическое решение находится из интегрального соотношения:

$$A = \mu_0 \frac{1}{2\pi} \oint_L G M dl + \mu_0 \frac{1}{2\pi} \int_S G \frac{M}{r} dS. \quad (10)$$

где L – контур Γ_1 - Γ_2 (рис. 4, б); S – площадь поперечного сечения радиальных магнитов; M – магнитный момент ПМ.

С учётом (10) решение (11) записывается в виде:

$$A'_e(r, \theta) = \mu_0 \frac{2M_0}{\pi} \sum_{n=1,3,5,\dots} \frac{r^{-pn} (r_2^{1+pn} - r_1^{1+pn})}{n(1+pn)} \sin(pn\alpha) \sin(pn\theta), \text{ при } r > r_2. \quad (11)$$

Величина A'_{Fe} , определяющая влияние магнитопровода статора машины на характеристики поля в воздушном зазоре, удовлетворяет уравнению Лапласа $\Delta \bar{A}'_{Fe} = 0$ с граничными условиями:

$$\frac{\partial(A'_i + A'_{Fe})}{\partial r} = 0 \text{ при } r = r_1 \text{ и } \frac{\partial(A'_e + A'_{Fe})}{\partial r} = 0 \text{ при } r = R_s. \quad (12)$$

На радиусе рашотки статора ($r = R_s$) выражение для A_{Fe} может быть представлено в виде:

$$A'_{Fe}(R_s, \theta) = \frac{2M_0\mu_0}{\pi} \sum_{n=1,3,5,\dots} R_s^{-pn} (b - 2d(a + bR_a^{-2pn})) \sin(pn\alpha) \sin(pn\theta) \quad (13)$$

$$\text{где } a = \frac{(r_2^{1-pn} - r_1^{1-pn})}{n(1-pn)}, \quad b = \frac{(r_2^{1+pn} - r_1^{1+pn})}{n(1+pn)}, \quad d = \frac{1}{R_a^{-2pn} - r_1^{-2pn}}.$$

Основной элемент магнитной системы СД с радиально-тангенциальными магнитами представляет собой цилиндр, составленный из массива ПМ с чередующейся радиальной и тангенциальной намагниченностью (рис. 5, а). Такое расположение ПМ позволяет концентрировать магнитный поток во внешней области ротора (рис. 5, б). Поперечное сечение одной из возможных конструкций СД с

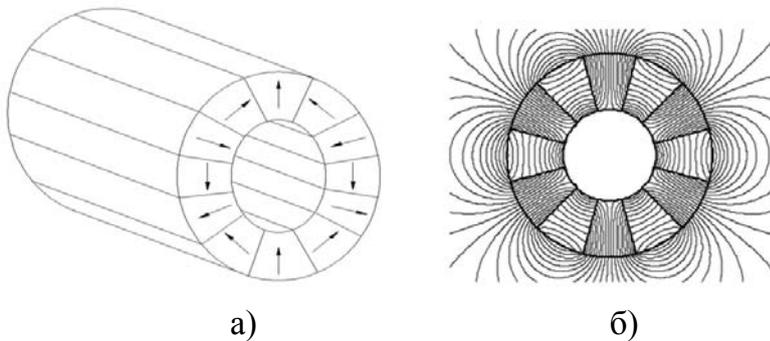


Рисунок 5 – Распределение магнитного поля в цилиндре Хальбаха при внешней концентрации потока (а – цилиндр Хальбаха; б – картина магнитного поля цилиндра Хальбаха)

радиально-тангенциальными ПМ показано на рис. 6, а. Ротор содержит постоянные магниты секторной формы радиального 1 и тангенциального 2 намагничивания, которые удерживаются титановыми либо стальными пластинами 3. Пластины составляют немагнитный шихтованный пакет ротора и напрессовываются на вал 4. Статор электрической машины 5 представляет собой

шихтованный сердечник из электротехнической стали, в пазах 6 которого располагается трехфазная обмотка, питаемая переменным током. Расчётная схема представлена на рис. 6, б. Постановка задачи в данном случае аналогична предыдущей, только в этой расчётной схеме величина магнитного момента радиальных и тангенциальных магнитов одинакова и постоянна $M = const$.

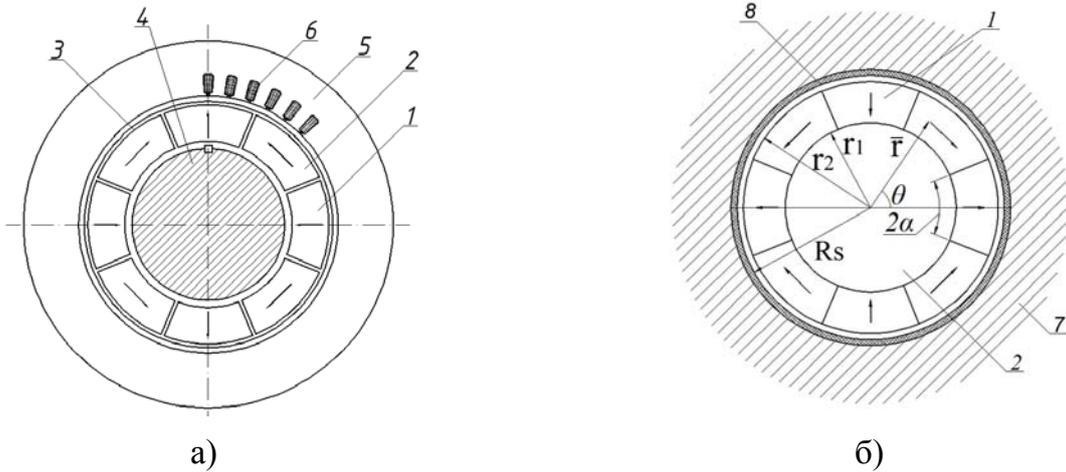


Рисунок 6 – СД с радиально-тангенциальными ПМ (а – конструктивная схема СД; б – расчетная схема СД)

Были получены аналитические выражения для уединенного цилиндра из ПМ радиально-тангенциальной намагниченности с внешней концентрацией магнитного потока (рис. 5, а, б), которые при условии $M_r = M_\theta = M_0$ приводятся к виду:

$$A_e(r, \theta) = \mu_0 \frac{2\sqrt{2}M_0}{\pi} \sum_{n=1,3,5\dots} \frac{r^{-pn}(r_2^{1+pn} - r_1^{1+pn})}{n(1+pn)} \sin(pn\theta) \cos\left(\frac{\pi}{4} - pn\alpha\right), \text{ при } r > r_2 \quad (14)$$

Выражение, учитывающее влияние статора на магнитные поля находится из решения уравнения Лапласа $\Delta A_{Fe} = 0$ с граничными условиями $\frac{\partial(A_{Fe} + A_e)}{\partial r} = 0$ на расточке статора ($r=R_s$). и имеет вид:

$$A_{Fe}(r, \theta) = \mu_0 \frac{2\sqrt{2}M_0}{\pi} K_\mu \sum_{n=1,3,5\dots} R_s^{-2pn} \frac{r^{pn}(r_2^{1+pn} - r_1^{1+pn})}{n(1+pn)} \sin(pn\theta) \cos\left(\frac{\pi}{4} - pn\alpha\right), \quad (15)$$

где $K_\mu = \frac{\mu_r - 1}{\mu_r + 1}$ – коэффициент, учитывающий влияние конечной величины

относительной магнитной проницаемости магнитопровода статора. Решение полевой задачи для трехфазной обмотки с учетом граничных условий на поверхности расточки статора $r=R_s$ было показано выше (6). При отсутствии на поверхности ротора ВТСП оболочки, значения константы a_n равно единице. Если на внешнем радиусе ротора устанавливается ВТСП оболочка (рис. 3), то значение константы a_n определяется выражением (7). С учётом вышесказанного, магнитное поле в активной зоне машины можно представить в виде суммы трёх слагаемых:

$$A = A_\delta + A_e + A_{Fe}, \quad (16)$$

которые определяются: A_δ - токовым слоем на радиусе расточки статора (6); A_e - уединенными постоянными магнитами ротора (13); A_{Fe} – влиянием ферромагнитопровода машины (15).

На рис. 7, а представлено поперечное сечение одной из возможных конструкций четырёхполюсного СД с тангенциальными магнитами в роторе. Полюсы 2 сделаны из магнитомягкой стали. Магнитные полюсы вместе с магнитами 4

удерживаются с помощью биметаллической обоймы 3 (рис. 7, а). Передача момента осуществляется через немагнитный вал 5. Статор 1 – шихтованный магнитопровод, в пазах 6 которого находится трёхфазная обмотка.

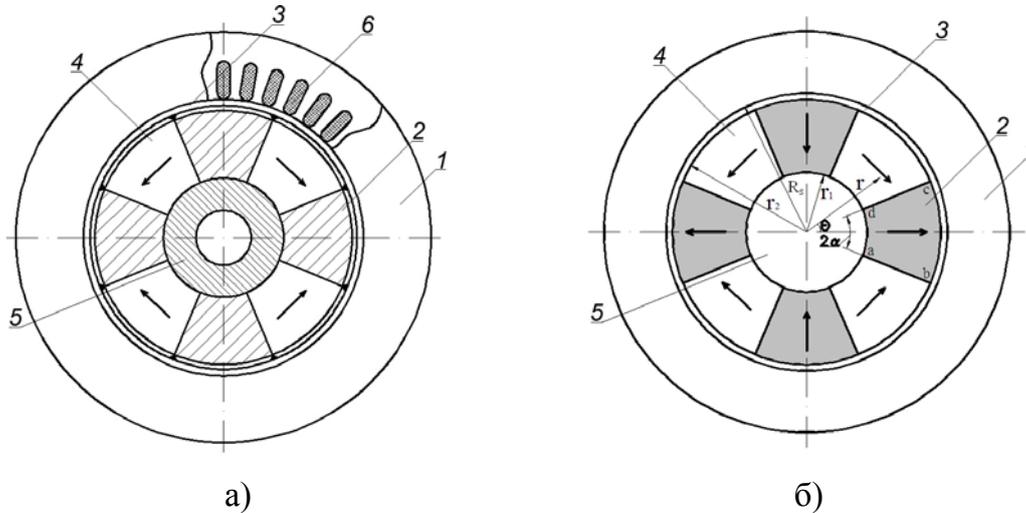


Рисунок 7 – СД с тангенциальными ПМ (а – конструктивная схема СД; б – расчетная схема СД)

На рис. 7, б приведена расчётная схема СД с тангенциальными магнитами. В этой схеме статор электрической машины в первом приближении заменяется кольцевым ферромагнитным экраном с внутренним радиусом R_s , на поверхности которого расположен эквивалентный токовый слой. Считаем, что ферромагнитные полюсы (рис. 7, а) и статор (рис. 7, а) имеют магнитную проницаемость $\mu_{Fe} \gg 1$. Величина магнитного момента в области тангенциальных магнитов принимается постоянной ($M_\theta = const$). Двигатель считается достаточно длинным ($L/D > 3-4$). Для учёта влияния стальных полюсов на поля, создаваемые тангенциальными магнитами представим данную расчётную модель в следующем виде (рис. 7, б): заменим полюсы радиально намагниченными ПМ с магнитным моментом M_r , величина которого находится из решения дополнительных задач магнитостатики и последующей калибровки на основе численного эксперимента.

В рамках данной постановки задачи суммарное поле в зазоре машины будет складываться из трёх составляющих: поля постоянных магнитов ротора A_e , поля стального магнитопровода A_{Fe} и поля токового слоя A_δ , моделирующего трёхфазную обмотку статора. В этой модели, заменив стальные полюсы 2 (рис. 7, а) на радиальные магниты (рис. 7, б), фактически получаем радиально-тангенциальную схему. Однако в данной задаче намагниченность радиальных и тангенциальных магнитов будет различной. Поэтому алгоритм решения задачи будет аналогичным решению для схемы Хальбаха, но с учётом того, что, $M_\theta = const$, а $M_r = f(M_0, r_1, r_2, R_s, p)$.

Векторный магнитный потенциал для внешней ($r > r_2$) концентрации магнитного потока при условии, что $M_r \neq M_0$ находится путём интегрирования выражения (10), для случая внешней концентрации магнитного потока:

$$A_e(r, \theta) = \mu_0 \frac{2}{\pi} \sum_{n=1,3,5,\dots} \frac{r^{-pn} (r_2^{1+pn} - r_1^{1+pn})}{n(1+pn)} (M_r \sin(pn\alpha) + M_\theta \cos(pn\alpha)) \sin(pn\theta), \quad r > r_2. \quad (17)$$

Для учёта влияния статора, как и в предыдущем случае воспользуемся принципом суперпозиции и представим решение в виде суммы $A_{\delta M} = A_{cm} + A_M$. Первое из слагаемых – это влияние статора, второе – уединенных цилиндров из радиально-тангенциальных РЗМ.

Для области воздушного зазора ($R_s < r < r_2$) имеем выражение:

$$A_{\Sigma}(r, \theta) = \mu_0 \frac{2}{\pi} \sum_{n=1,3,5,\dots} \left[\frac{(r^{-pn} + R_s^{-2pn} r^{pn})(r_2^{1+pn} - r_1^{1+pn})}{n(1+pn)} \right] (M_r \sin(pn\alpha) + M_\theta \cos(pn\alpha)) \sin(pn\theta). \quad (18)$$

Для определения эквивалентного магнитного момента M_r , предварительно выполнялся численный расчёт модели СД с тангенциальными магнитами. На рис. 8, а, б представлен пример расчёта, выполненный в программе «Elcut 5.4». Здесь сплошными стрелочками показано направление намагниченности тангенциальных магнитов, а пунктирной – направление намагниченности M_r стального полюса.

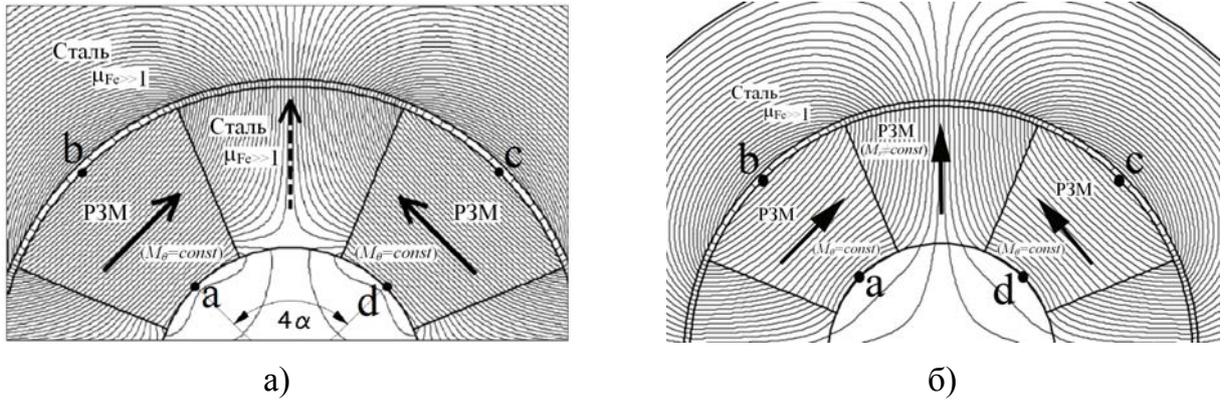


Рисунок 8 – Модель со стальным полюсом (а – модель со стальным полюсом; б – эквивалентная модель с ПМ)

Чтобы учесть в первом приближении погрешность, вносимую данной расчётной схемой, необходимо ввести коэффициент $K = \frac{\Phi_{bc}}{\Phi_{bc} + \Phi_{ad}}$, который показывает какая часть полного потока замыкается через поверхность bc (т.е. снаружи ротора). Величина этого коэффициента зависит от геометрии машины и определяется численными методами в программе «Elcut 5.4».

Решая дополнительную задачу магнитостатики можно получить выражение для определения намагниченности стального полюса СД с тангенциальными ПМ:

$$M_r = \frac{M_\theta \cdot \sum_{n=1,3,5,\dots} \left[\frac{(r_2^{-pn-1} + R_s^{-2pn} r_2^{pn-1})(r_2^{pn+1} - r_1^{pn+1}) \cdot \sin(pn2\alpha)}{n(1+pn)\alpha\pi} \right]}{\frac{\mu_{Fe}}{\mu_{Fe} - 1} \frac{1}{K} - \sum_{n=1,3,5,\dots} \left[\frac{(r_2^{-pn-1} + R_s^{-2pn} r_2^{pn-1})(r_2^{pn+1} - r_1^{pn+1}) \cdot 2 \sin(pn\alpha)^2}{n(1+pn)\alpha\pi} \right]} \quad (19)$$

Анализируя выражение для M_r (23), можно сказать, что намагниченность полюса пропорциональна намагниченности ПМ, при этом одновременно зависит от геометрии машины и от величины магнитной проницаемости полюса μ_{Fe} .

Приведенные приближенные аналитические соотношения, полученные в рамках единого подхода, позволяют проводить сравнительный анализ трех машин с целью выявления рациональных конструктивных схем в зависимости от режимов работы, требуемых оборотов привода и стоимости электродвигателей.

На рис. 9 приведены картины линий уровня поверхности максимальных значений радиальной составляющей магнитной индукции в зазоре, позволяющие определить области ее наибольших значений в зазоре для каждого типа СД. Значение магнитного поля дано для воздушного зазора 1 мм. Из рис. 9, а видно, что схема с ПМ радиальной намагниченности наиболее рациональна в машинах с небольшой относительной толщиной магнитов $\Delta = 0.05 - 0.3$, при этом зависимость магнитной индукции от полюсности машины близка к горизонтальной прямой. Для схемы с ПМ радиально-тангенциальной намагниченности (рис. 9, б) характерно смещение области максимальных значений индукции в сторону более высоких значений $\Delta = 0.35 - 0.5$ при $p = 3 - 8$. Легко видеть, что данная область шире, чем для схемы с ПМ тангенциальной намагниченности (рис. 9, в). Следует отметить, что отсутствие ферромагнитных материалов во внутренней области ротора СД с постоянными магнитами радиально-тангенциальной намагниченности оказывает положительное влияние на его выходные характеристики вследствие существенного снижения индуктивного сопротивления.

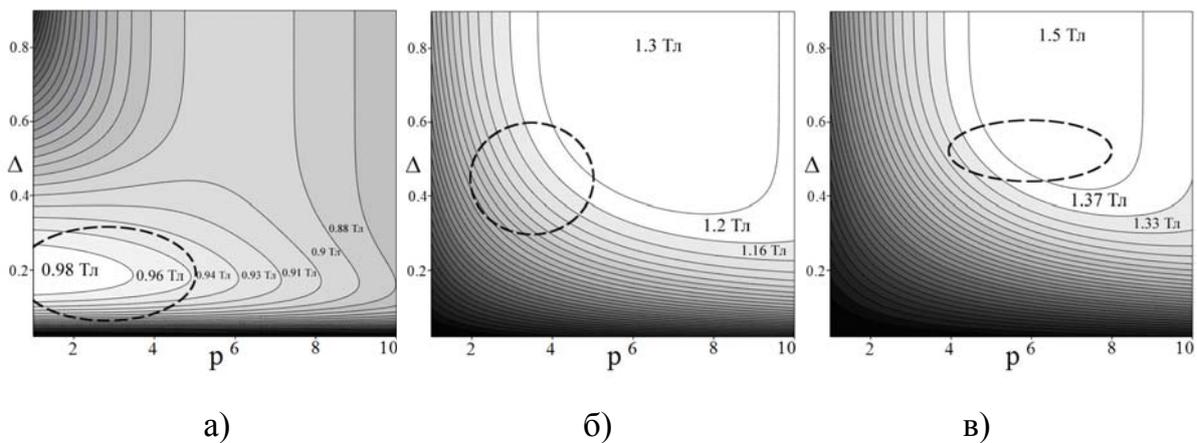
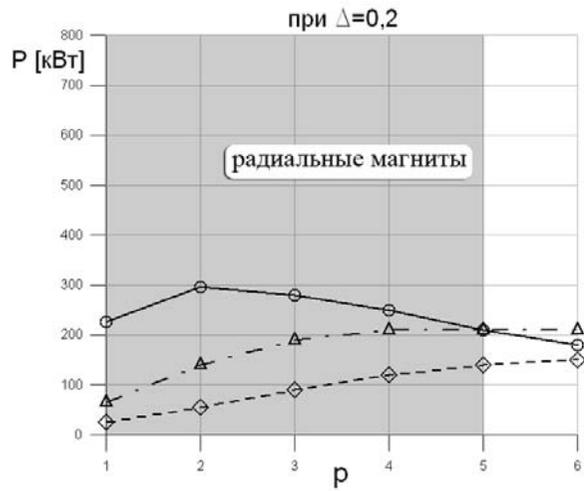


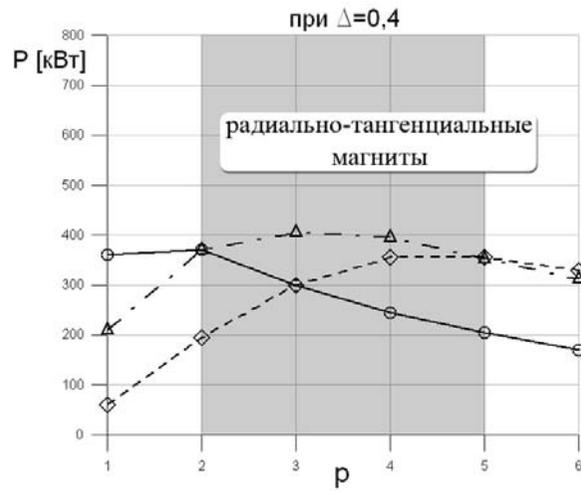
Рисунок 9 – Линии уровня поверхности максимальных значений радиальной составляющей магнитной индукции (а – СД с радиальными магнитами; б – СД с радиально-тангенциальными магнитами; в – СД с тангенциальными магнитами)

На рис. 10 представлены результаты сравнения рассматриваемых машин по предельной мощности при различных Δ и постоянной частоте вращения вала. Тонированием выделены рациональные области использования того или иного типа ротора СД. Зависимости для значения предельной мощности показаны как для СД с ВТСП оболочкой в роторе (рис. 10, г, д, е), так и для СД без ВТСП оболочки (рис. 10, а, б, в).

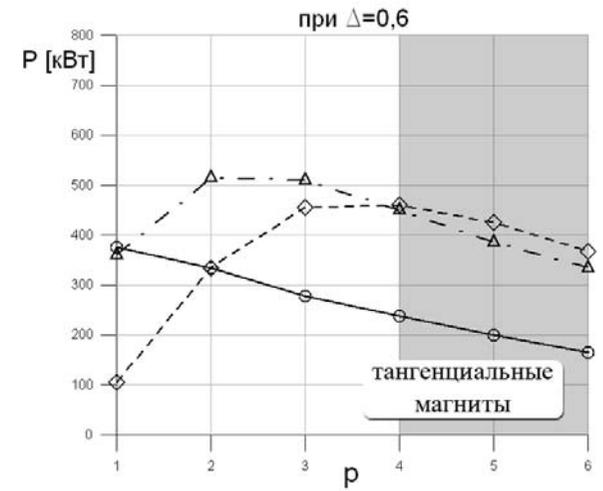
Без ВТСП оболочки



а)

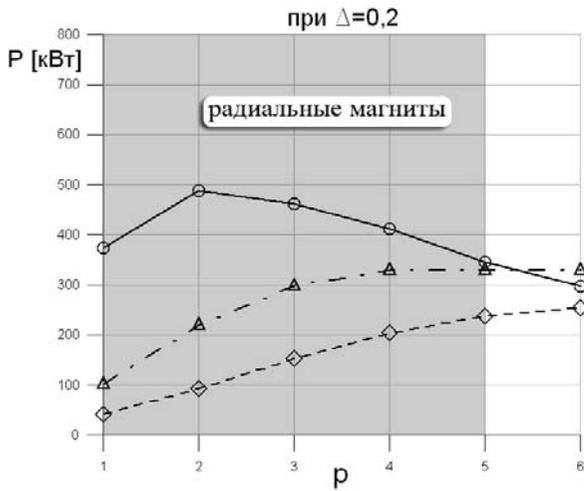


б)

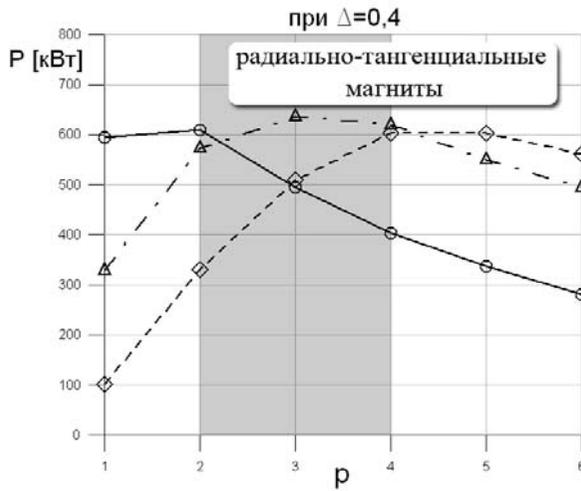


в)

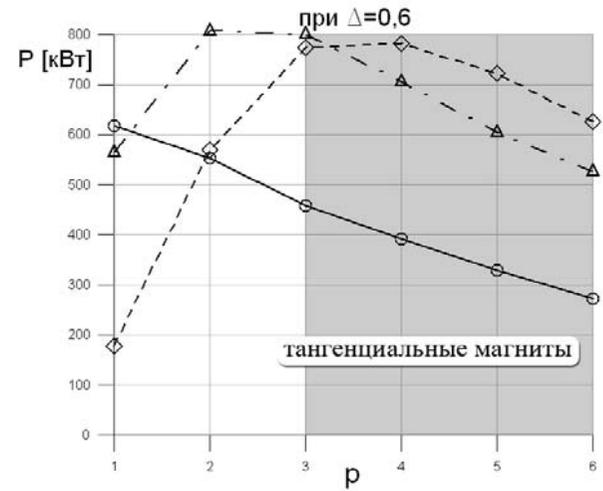
С ВТСП оболочкой в роторе



г)



д)



е)

Рисунок 10 – Результаты сопоставления пиковой мощности при различных Δ и постоянной частоте вращения вала

Из анализа приведенных зависимостей следует, что при выборе небольших значений относительной толщины магнитов ($\Delta \leq 0.25$) целесообразно выполнять СД с радиальным расположением магнитов, при этом p может меняться в широких пределах ($1 \leq p \leq 4$).

Для реализации эффективного СД с ПМ тангенциальной намагниченности необходимо увеличить радиальный размер магнитов до ($0.45 \leq \Delta \leq 0.6$) однако в этом случае данные машины дают преимущество в многополюсных системах – т.е. при $p \geq 4$.

Стоит отметить, что при наличии ВТСП оболочки на поверхности ротора СД с тангенциальными ПМ (рис.10, г, д, е) приводит к существенному снижению главных индуктивных сопротивлений X_d и X_q , при этом машина становится неявнополюсной ($X_d = X_q$), что позволяет увеличить выходную мощность на 65 – 75%. Для СД с радиальными магнитами прирост мощности составляет 60 – 70%, а для СД с радиально-тангенциальными магнитами – 55 – 65%.

В третьей главе рассматриваются численные методы расчёта, а также поиск оптимальной конструкции синхронного двигателя с постоянными магнитами и ВТСП элементами. Исходя из предъявляемых требований к проектируемому СД была выбрана схема ротора с радиально-тангенциальными магнитами с числом пар полюсов $p = 3$ и проведена частичная оптимизация конструкции с учётом свойств и геометрии ВТСП элементов в роторе. Рассмотрены шесть различных вариантов

Таблица 1 – параметры ВТСП двигателя ДС-150	
Мощность, кВт	150
Напряжение питания фазное, В	220
Частота тока, Гц	300
Номинальный ток, А	240
Номинальная плотность тока, А/мм ²	20
Частота вращения, мин ⁻¹	6000

конструктивного исполнения ротора СД с радиально-тангенциальными ПМ и объёмными ВТСП элементами. Численный расчёт конструктивных схем СД, рассмотренных в данной главе, проводился в двухмерной постановке в программе «Elcut 5.4». Проектируемой экспериментальной машиной является СД мощностью 150 кВт с частотой вращения вала – 6000 мин⁻¹ (рис. 11, а). Параметры проектного варианта ВТСП

двигателя показаны в таблице 1.

На рис. 11, б показана зависимость выходной мощности P от угла нагрузки θ для проектируемого СД с ВТСП пластинами в роторе. Для сравнения на том же графике построены аналогичные характеристики для СД без ВТСП элементов в роторе и для перспективного СД с ВТСП плёнками на поверхности ротора. Наличие ВТСП пластин в полюсе проектируемого двигателя приводит к появлению реактивной составляющей P_2 и смещению пиковой точки влево относительно угла $\theta = 90^\circ$. Выигрыш по мощности составляет $\sim 20\%$ по сравнению с СД без ВТСП пластин в роторе. При наличии ВТСП плёнки на поверхности ротора, выполняющей роль диамагнитного экрана (экранирование магнитных полей от токов якоря) существенно снижаются главные индуктивные сопротивления в машине, что приводит к росту пиковой мощности до $\sim 60\%$ по сравнению с СД без ВТСП.

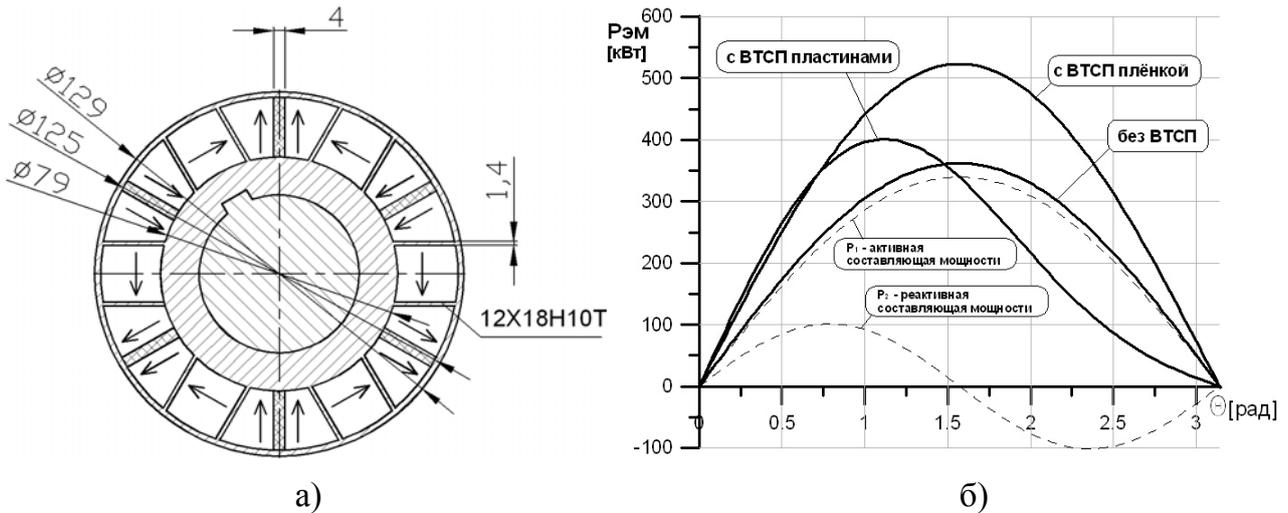


Рисунок 11 – ВТСП двигатель ДС-150; (а – сотовая конструкция ротора с ВТСП пластинами и радиально-тангенциальными ПМ; б – результаты расчётов выходной мощности ДС-150)

Проведенный сравнительный анализ по мощности показывает перспективность использования объёмных, а также плёночных ВТСП материалов в роторах синхронных двигателей с целью повышения их выходных параметров.

В четвертой главе приведено описание стенда для экспериментального исследования ВТСП электрических машин, даны результаты экспериментальных исследований синхронного двигателя с постоянными магнитами и ВТСП элементами, а также представлено сопоставление экспериментальных и расчётных результатов. Экспериментальные исследования криогенного синхронного ВТСП двигателя с радиально-тангенциальными ПМ проводились на испытательном стенде в НИИЭМ (г. Истра).

Конструкция проектируемого ВТСП электродвигателя показана на рис. 12. Двигатель представляет собой бесконтактную синхронную машину с общим криостатом и ротором, содержащим постоянные магниты и пластины из ВТСП керамики.

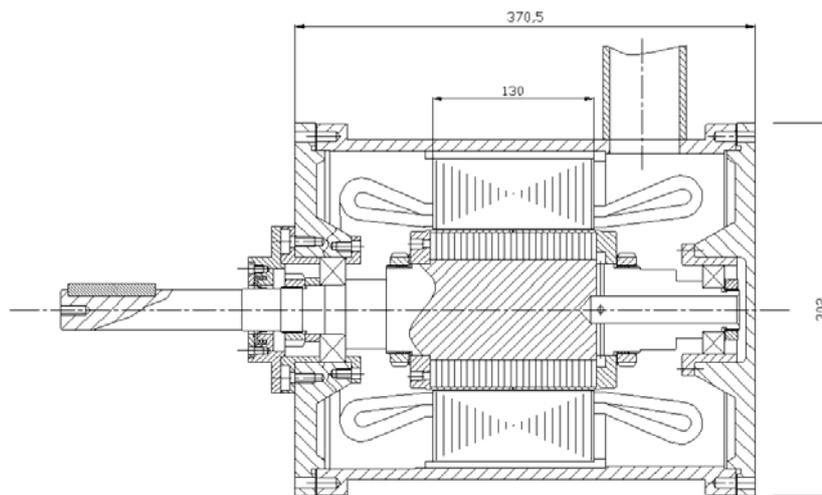
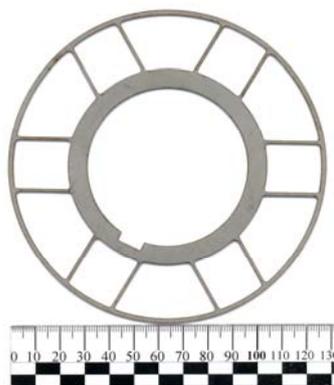


Рисунок 12 – Конструкция экспериментального ВТСП электродвигателя ДС-150

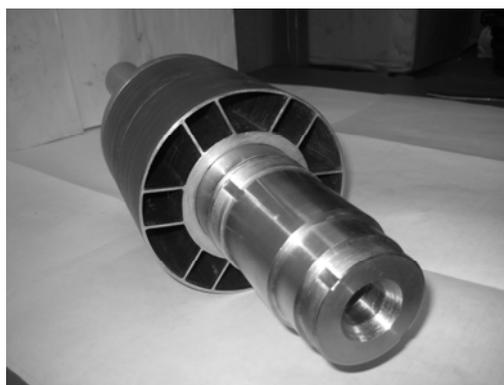
Ротор двигателя состоит из пакета, набранного из листов нержавеющей стали 12Х18Н10Т толщиной 1 мм (рис. 13, а, б), склеенных компаундом ЭКД-14. Пакет ротора напрессован на вал из той же стали. В пазы пакета ротора установлены постоянные магниты НПМ-38. В шести пазах прямоугольной формы установлено по одному тангенциальному магниту, в других шести пазах – по два радиальных магнита, разделенных ВТСП пластиной из иттриевой керамики.

Охлаждение двигателя осуществляется жидким азотом. Вход жидкого азота осуществляется через штуцер, расположенный в подшипниковом щите. Выброс паров азота производится через трубу на корпусе и систему гофрированных труб в атмосферу. На рис. 13, а показано фото двигателя ДС-150, а на рис. б – фото ДС-150 и нагрузочной машины.

На основе анализа критических параметров, токонесущей способности и механических свойств современных ВТСП элементов было показано, что при охлаждении жидким азотом ($T = 77\text{ К}$) наилучшими параметрами обладают объемные ВТСП элементы на основе керамики $YBCO$. В этой связи были изготовлены объемные блоки из ВТСП керамики $YBCO$ для ротора экспериментального электродвигателя с ПМ.



а)

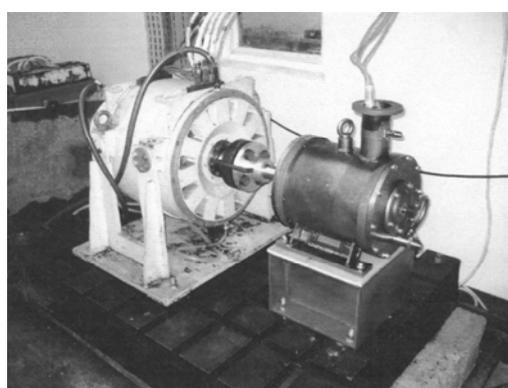


б)

Рисунок 13 – Ротор ДС-150; (а – лист пакета ротора; б – внешний вид ротора без ПМ и ВТСП пластин)



а)



б)

Рисунок 13 – Двигатель ДС-150; (а – фото двигателя ДС-150; б – двигатель ДС-150 на испытательном стенде)

На первом этапе экспериментальных исследований были проведены измерения магнитных полей ротора на воздухе. Замеры проводились датчиком холла на поверхности ротора (посередине пакета) с шагом измерений – 5° . По результатам измерений был построен график показанный на рис. 15.

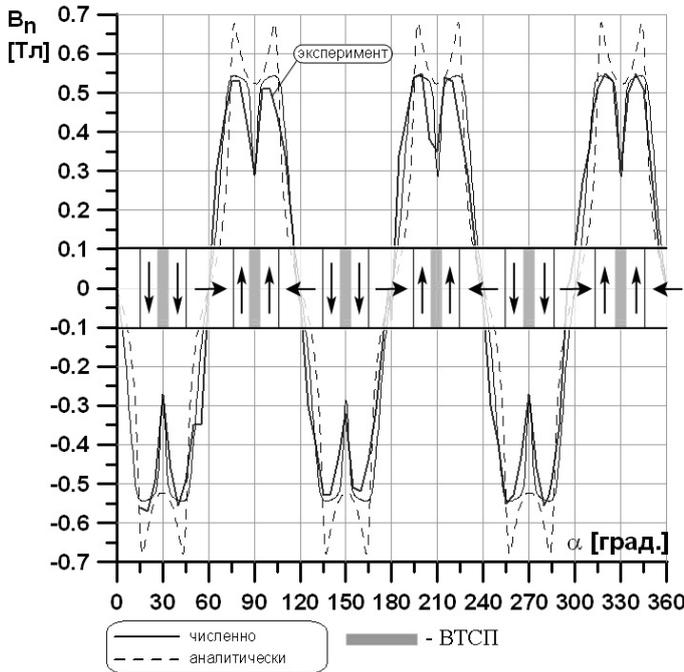


Рисунок 15 – Радиальная составляющая магнитной индукции поля ротора (измерено на воздухе)

На рис. 15 вдоль кривой распределения магнитной индукции показана развёртка магнитных полюсов ротора. Стрелочками условно обозначено направление намагниченности ПМ, а серой полосой – ВТСП элементы в полюсе ротора. Как видно из рисунка, результаты измерений очень хорошо согласуются с результатами численного расчёта. Наличие пиков в аналитических решениях объясняется принятым в модели азимутальным направлением магнитного момента тангенциальных ПМ. В экспериментальном опытном образце ротора использовались магниты с постоянным направлением намагниченности (эти

же свойства ПМ задавались и в программе «Elcut 5.4» при численном расчёте. Наличие ВТСП элементов приводит к появлению характерных провалов магнитной индукции над серединой полюса.

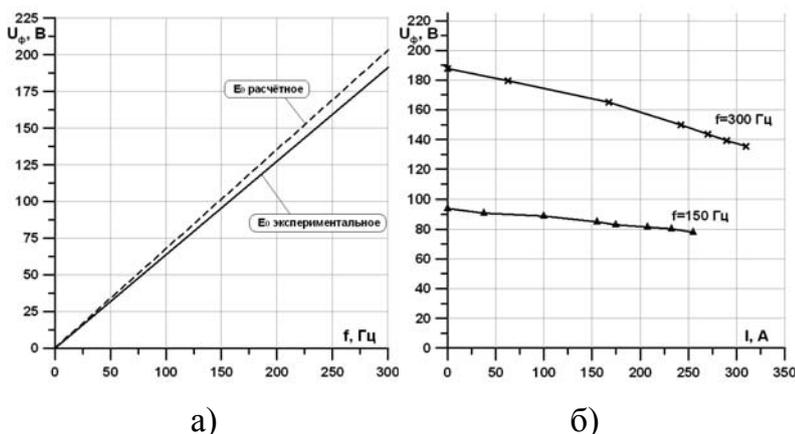


Рисунок 16 – Экспериментальные характеристики ВТСП машины ДС-150 в генераторном режиме (а – холостой ход; б – внешняя характеристика)

Испытания проводились при кратковременном отключении подачи жидкого азота и фиксированной нагрузке на валу.

Результаты испытаний СД в генераторном режиме показаны на рис. 16, в двигательном режиме – на рис. 17.

С целью определения эффективности применения массивных ВТСП элементов в роторе двигателя ДС-150 с радиально-тангенциальными магнитами были проведены испытания при криогенных температурах выше критических для ВТСП керамики ($T > 120$ К).

Сопоставление измерений мощности при частично отогретом роторе машины, когда иттриевая керамика теряет свои сверхпроводящие свойства с мощностью ВТСП двигателя в номинальном режиме (при $T = 77\text{ K}$) показало, что применение в составе ротора массивных ВТСП элементов позволяет увеличить мощность на 20% (рис. 17, г).

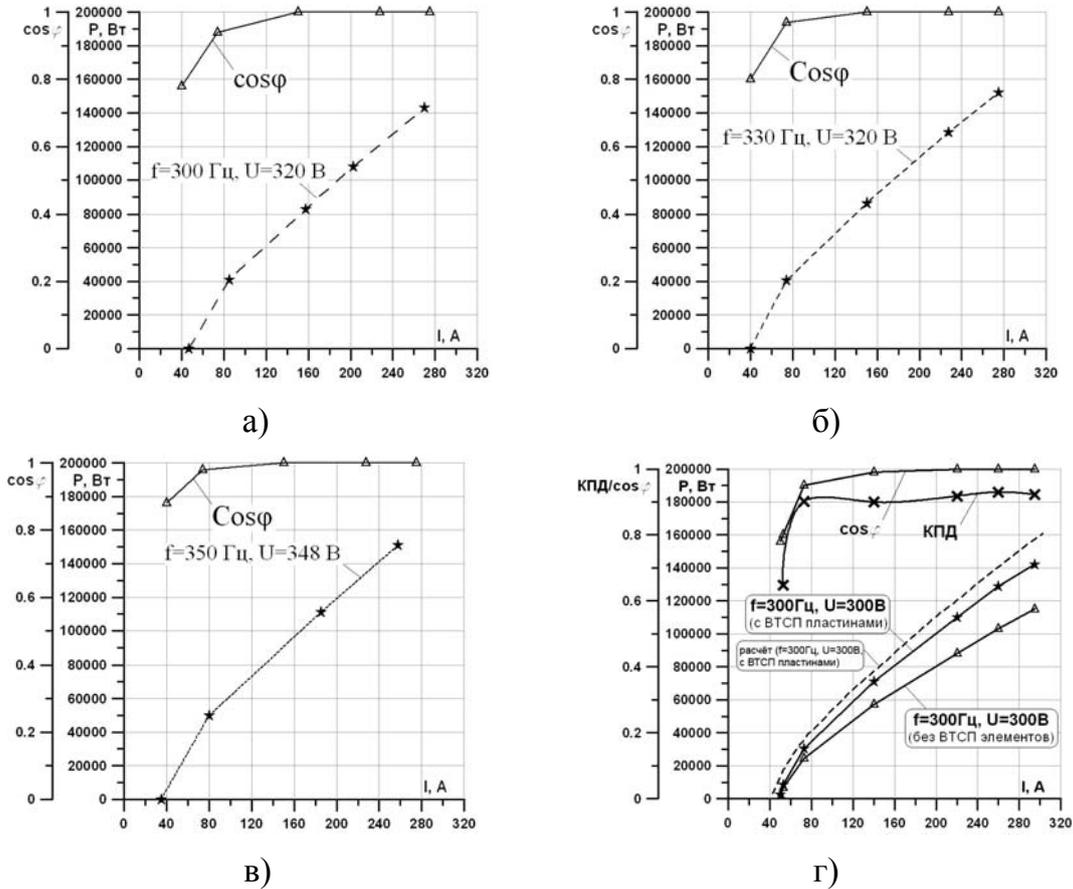


Рисунок 17 – Экспериментальные характеристики ВТСП машины ДС-150 в двигательном режиме работы (а – частота вращения вала $n = 6000\text{ мин}^{-1}$; б – частота вращения $n = 6600\text{ мин}^{-1}$; в – частота вращения $n = 7000\text{ мин}^{-1}$; г – частота вращения $n = 6000\text{ мин}^{-1}$ – номинальный режим)

На рис. 17, г представлено сравнение результатов расчёта с экспериментальными данными. Из построенных зависимостей видно, что результаты расчёта и экспериментальных исследований совпадают с достаточно высокой точностью – до 10%. Некоторое превышение расчётных значений над экспериментальными связано с геометрическими особенностями и физическими свойствами изготовленных ПМ (небольшое отклонение геометрии изготовленных магнитов от проектных размеров и варьирование намагниченности ПМ в пределах 5-10%).

Основные выводы и результаты

1. На основе решения двумерных электродинамических задач получены аналитические решения, позволяющие проводить сравнительный анализ распределений магнитных полей в активной зоне электрических машин с

- радиальными, радиально-тангенциальными и тангенциальными постоянными магнитами при наличии и отсутствии ВТСП элементов в роторе.
2. На базе найденных аналитических решений получены математические модели для расчёта параметров магнитоэлектрических машин с различными схемами расположения постоянных магнитов при наличии и отсутствии ВТСП элементов.
 3. Проведён сравнительный анализ энергетических параметров магнитоэлектрических двигателей различных конструктивных схем исполнения, выделены области оптимального использования для каждой из конструкций. Так двигатели с радиальными постоянными магнитами эффективны в широком диапазоне полюсности при относительно тонких ПМ, использование двигатели с радиально-тангенциальными магнитами предпочтительно при среднем числе пар полюсов – $p = 2-4$ при относительно толстом слое ПМ, двигатели с тангенциальными магнитами имеют преимущество при большом числе пар полюсов – $p > 5$ и относительно толстом слое магнитов.
 4. Проведённые теоретические исследования показали, что при использовании тонкоплёночных ВТСП элементов на поверхности ротора магнитоэлектрических машин позволяет существенно увеличить (в 1,5 – 2 раза) их выходную мощность.
 5. Выполнен сопоставительный анализ ВТСП двигателей с радиально-тангенциальными магнитами различного конструктивного исполнения. Выявлены рациональные конструктивные схемы выполнения роторов таких двигателей.
 6. На основе аналитических и численных методов расчёта проведена частичная оптимизация геометрии ротора с радиально-тангенциальными и с тангенциальными магнитами при числе пар полюсов $p = 3$. Так для созданного ВТСП двигателя мощностью 150 кВт с радиально-тангенциальной схемой расположения магнитов в роторе оптимальная относительная толщина магнитов $\Delta = 0,4$. Для заданного значения $\Delta = 0,4$ оптимальный угол раскрытия радиальных магнитов составляет $\alpha = 15^\circ$.
 7. Определена рациональная схема размещения пластин из ВТСП элементов в роторе. Показано, что схема с радиальным расположением ВТСП пластин в полюсе позволяет улучшить выходную на 20-25% по сравнению с обычной конструкцией ротора (без ВТСП и одинаковом режиме охлаждения).
 8. Проведены сопоставления расчётов двухмерного распределения магнитных полей по полученным аналитическим зависимостям с результатами численных расчётов в пакете прикладных программ «Elcut 5.4». Показано их хорошее соответствие в пределах 5-10%. Результаты экспериментального измерения магнитного поля ротора СД с радиально-тангенциальными магнитами хорошо согласуются с результатами расчётов магнитных полей по разработанным аналитическим и численным методикам (с точностью до 10%). Это позволяет рекомендовать аналитические методики для расчёта параметров исследуемых ВТСП двигателей на начальных этапах проектирования. Численные методы расчёта целесообразно использовать на заключительном этапе поверочного расчёта ВТСП двигателя.

9. Спроектирован и изготовлен криогенный ВТСП синхронный двигатель ДС-150 с радиально-тангенциальными постоянными магнитами и объёмными ВТСП элементами в роторе со следующими основными характеристиками: расчётная мощность – $N = 150$ кВт, число пар полюсов – $p = 3$, частота вращения вала – $n = 6000$ мин⁻¹, напряжение питания – $U_{\phi} = 220$ В, количество фаз – $m = 3$, размеры активной зоны – $D \times L = 130 \times 130$ мм.
10. Проведены испытания изготовленной ВТСП машины ДС-150 при различных режимах работы: двигательный режим (при различных частотах и амплитуде питающего напряжения: $f = 300$ – 350 Гц, $U_{\phi} = 300$ – 350 В) и генераторный режим (при частоте $f = 300$ Гц и $f = 150$ Гц). Результаты соответствуют заданным проектным параметрам.
11. Проведено сопоставление результатов экспериментальных исследований ВТСП двигателя ДС-150 с результатами аналитических и численных расчётов. Получено согласование эксперимента с расчётами с точностью до 10%, что позволяет рекомендовать разработанные методики на этапе проектных и поверочных расчётов.
12. Результаты расчётов и экспериментальных исследований показывают целесообразность применения схемы с радиально-тангенциальным расположением ПМ совместно с ВТСП пластинами при количестве пар полюсов $p = 3$. Эксперименты показали, что испытанный электродвигатель обладает большим запасом по перегрузочной способности (до ~ 2,6).
13. Использование в роторе ВТСП пластин из иттриевой керамики позволило увеличить мощность опытного образца синхронного двигателя ДС-150 на 20%.

Основные положения диссертации нашли отражение в работах

1. Ковалев Л.К., Ковалев К.Л., Кавун Ю.Ю., Альтов В.А., Пенкин В.Т., Голованов Д.В. Предельные характеристики синхронных двигателей с постоянными магнитами и ВТСП – элементами в роторе // Известия академии электротехнических наук РФ. – 2009. – №1. – С. 1–9.
2. Ковалев Л.К., Кавун Ю.Ю., Голованов Д.В. Предельные характеристики синхронных машин с постоянными магнитами и ВТСП – элементами в роторе // Электричество. – 2008. – №12. – С. 16–23.
3. Тезисы доклада. Всероссийская конференция молодых учёных и студентов «Информационные технологии в авиационной и космической технике – 2008», 21–24 апреля 2008 г., МАИ, г. Москва.
4. Открытый конкурс 2008 г. на лучшую работу студентов по разделам «Электротехника и электрические аппараты, материалы и изделия. Энергетическое машиностроение» и «Энергосберегающие технологии» (работа отмечена медалью Минобрнауки РФ)
5. Тезисы доклада. 7-я международная конференция «Авиация и космонавтика – 2008», 20 – 23 октября 2008 г., МАИ, г. Москва.
6. Тезисы доклада. 8-я международная конференция «Авиация и космонавтика – 2009», 26 – 28 октября 2009 г., МАИ, г. Москва.