

На правах рукописи  
УДК 621.313.323:621.318.2 (043.3)

**НЕКРАСОВА ЮЛИЯ ЮРЬЕВНА**

**«НОВЫЕ ТИПЫ СИНХРОННЫХ ВТСП ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН  
С РАДИАЛЬНО-ТАНГЕНЦИАЛЬНЫМИ 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 Л. К.

Официальные оппоненты: д.т.н., Копылов С. И.  
к.т.н., Бочаров В.В.

Ведущая организация: НИИ Электромеханики (ФГУП НИИЭМ), г. Истра

Защита диссертации состоится «22» декабря 2009 г. в 15 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 \_\_\_\_\_

А.Б. Кондратьев

к.т.н., доцент

## Общая характеристика диссертационной работы

**Актуальность темы.** Совершенствование электроэнергетических систем и повышение их экологичности становятся приоритетными направлениями в развитии электроэнергетики в XXI веке, когда, как ожидается, производство и потребление электроэнергии возрастет в 4-6 раз. Одним из перспективных путей решения этих задач является использование сверхпроводниковых электромеханических преобразователей и устройств, позволяющих существенно повысить экономическую и экологическую эффективность электроэнергетических процессов, а также улучшить параметры электротехнических устройств.

Открытие высокотемпературных сверхпроводниковых (ВТСП) материалов с температурой перехода выше температуры жидкого азота (77 К) позволило приступить к разработке, созданию и внедрению нового энергетического оборудования на их основе, основными преимуществами которого по сравнению с аналогами на низкотемпературных сверхпроводниках (НТСП) являются низкая стоимость хладагента и сравнительная простота систем криостатирования и криообеспечения.

Наиболее перспективными на сегодняшний день являются электромеханические преобразователи, в конструкции которых используются постоянные магниты из редкоземельных материалов (РЗМ ПМ) в сочетании с объемными или пленочными ВТСП элементами. На сегодняшний день ВТСП двигатели с массивными элементами из иттриевой керамики уже могут успешно работать при температурах кипения жидкого азота, что недостижимо при применении токонесущих элементов на основе висмутовых керамик и соединений  $MgB_2$ . Усовершенствование и использование тонкопленочных материалов позволит в ближайшем будущем значительно увеличить массогабаритные и энергетические показатели электрических машин.

Следует отметить, что повышение эффективности электрооборудования должно быть осуществлено с учетом возрастающих требований к сбережению ресурсов, экономии материалов и энергии, а также к снижению вредного влияния на окружающую среду. Одним из наиболее перспективных направлений решения глобальных энергетических проблем является развитие водородной энергетики, позволяющей радикально решить как проблемные вопросы самой энергетики (включая получение, транспортировку, хранение и распределение электроэнергии и водорода как будущей топливной базы), так и экологические аспекты современных энергоемких технологий и транспортных проблем.

**Цель и задачи работы.** Целью диссертационной работы является создание новых типов синхронных электродвигателей с радиально-тангенциальными постоянными магнитами (ПМ) из редкоземельных материалов (РЗМ) и ВТСП элементами в роторе.

Достижение поставленной цели предполагает решение ряда задач, среди которых:

- разработка новых конструктивных схем синхронных ВТСП двигателей с радиально-тангенциальными постоянными магнитами и ВТСП элементами, обладающих высокими массоэнергетическими показателями;

- создание аналитических и численных методик расчета двумерных магнитных полей и параметров синхронных ВТСП двигателей с радиально-тангенциальными ПМ;
- создание опытного образца синхронного ВТСП электродвигателя и экспериментальное исследование его характеристик;
- сопоставление экспериментальных и расчетных параметров ВТСП электродвигателей и калибровка математических моделей;
- разработка рекомендаций по использованию новых типов ВТСП двигателей в перспективных областях промышленности и энергетики.

**Методы исследования.** Для решения поставленных задач использовались методы математической физики, теория поля, электромеханики и прикладной сверхпроводимости; численные методы решения уравнений в частных производных (метод конечных элементов). Для решения уравнений использовался пакет математического моделирования *MathCAD 11*; для решения задач методом конечных элементов использовался пакет прикладных программ *Elcut Professional 5.4*; для построения графиков использовалась программа *Grapher 5.02*; рисунки были подготовлены в программах *CorelDraw X3* и *Adobe Photoshop CS2*. Оформление работы было выполнено с использованием программ из пакета *MS Office 2007*. Проверка аналитических и численных методов расчета производилась на экспериментальных моделях ВТСП электродвигателей.

**Научная новизна** полученных результатов состоит в следующем:

- предложены новые схемы синхронных ВТСП электродвигателей с радиально-тангенциальными ПМ;
- получены аналитические решения задач расчета двумерных магнитных полей, выходных характеристик и параметров синхронных ВТСП двигателей с постоянными магнитами, учитывающие как свойства материалов, так реальную геометрию двигателей;
- разработаны численные алгоритмы расчета магнитных полей, параметров и выходных характеристик ВТСП двигателей при постоянном напряжении фаз статора;
- проведен сравнительный анализ конструктивных схем синхронных ВТСП электродвигателей с радиальными и радиально-тангенциальными ПМ;
- получены экспериментальные данные, подтверждающие основные положения теории.

### ***Практическая ценность работы:***

- разработаны алгоритмы расчета двухмерных магнитных полей и параметров ВТСП двигателей с радиально-тангенциальными постоянными магнитами с различным числом пар полюсов;
- разработана конструкция шестиполусного синхронного ВТСП электродвигателей с радиально-тангенциальными постоянными магнитами в роторе;
- создан и испытан опытный образец шестиполусного синхронного ВТСП электродвигателей с радиально-тангенциальными постоянными магнитами мощностью 15 кВт;
- сформулированы предложения по использованию новых типов синхронных ВТСП электродвигателей с радиально-тангенциальными постоянными магнитами в качестве высокодинамичных промышленных приводов и приводов криогенных насосов.

***Реализация результатов.*** Разработанные автором алгоритмы и программы расчета синхронных ВТСП двигателей с радиально-тангенциальными ПМ переданы промышленным предприятиям (НИИЭМ, г. Истра и ОАО АКБ «Якорь») и используются при проектных расчетах нового перспективного класса электродвигателей. Результаты диссертационной работы внедрены в НИР по нескольким темам научно-технических программ Минобразования РФ в виде алгоритмов проектирования и методик расчета, новых ВТСП электродвигателей с ПМ. Материалы диссертации используются при чтении курсов лекций по дисциплинам «Электромеханика», «Криогенные и сверхпроводниковые электроэнергетические установки», «Физико-технические основы электрооборудования ЛА» и «Компьютерные технологии» в МАИ, а также вошли в методические пособия по курсовому и дипломному проектированию, предназначенные для студентов электромеханических и энергетических специальностей. Внедрение результатов подтверждено соответствующими актами.

***Апробация работы.*** Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на различных российских и международных конференциях, в том числе на международной конференции «Авиация и космонавтика» в 2007 и 2008 году; на Всероссийской конференции молодых ученых и студентов «Информационные технологии в авиационной и космической технике – 2008», МАИ, г. Москва.

***Публикации.*** По теме диссертации опубликовано 8 научных работ, из них 2 — в журнале «Электричество», рекомендованном ВАК РФ.

***Структура и объем работы.*** Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка используемых источников и 2 приложений; имеет 144 страницы, 62 рисунка, 6 таблиц и 68 наименования списка литературы.

### ***Краткое содержание работы***

**Во введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи диссертации, определена научная новизна и практическая ценность работы, дана информация о структуре и объеме диссертации.

**В первой главе** приводится обзор состояния разработок в области ВТСП синхронных машин с редкоземельными постоянными магнитами. Рассматриваются ха-

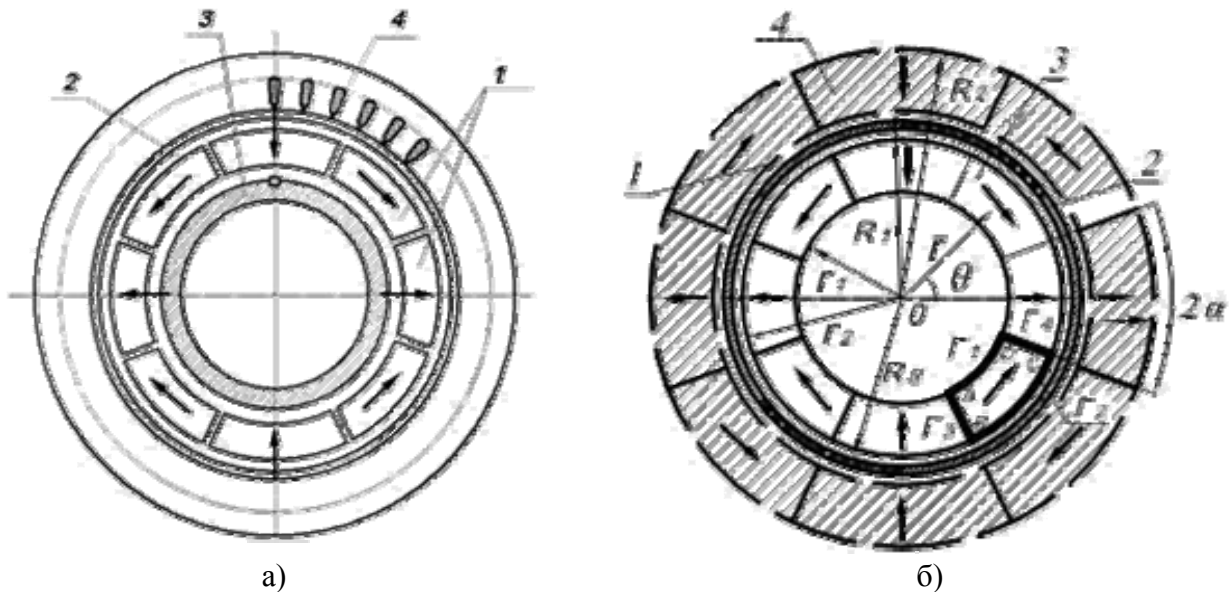
рактеристики постоянных магнитов из редкоземельных материалов, современные высокотемпературные сверхпроводниковые материалы, а также существующие типы и классификации синхронных электрических машин с постоянными магнитами и машин с ВТСП элементами, основные направления работ по созданию электрических машин с постоянными магнитами и ВТСП элементами в роторе. Показано, что высокая эффективность электрических машин может быть достигнута за счет применения в конструкции новых перспективных материалов, таких как РЗМ, объемные ВТСП элементы и тонкие ВТСП пленки. Проведенный объем теоретических и экспериментальных исследований показал, что вопросы проектирования двигателей с радиально-тангенциальными ПМ и ВТСП элементами в роторе являются особенно актуальными, поскольку позволят, как ожидается, получить лучшие выходные характеристики машины по сравнению с существующими образцами.

**Во второй главе** рассматриваются аналитические модели расчета двухмерных магнитных полей и параметров синхронных ВТСП двигателей с радиально-тангенциальными и радиальными магнитами, описывается постановка двухмерных электродинамических задач, дается структура решений задачи для уединенных цилиндров из ПМ радиально-тангенциального намагничивания в терминах скалярного магнитного потенциала и функции магнитного потока, рассматриваются двухмерные магнитные поля в активной зоне ВТСП электродвигателей с радиально-тангенциальными и радиальными ПМ, приведены векторные диаграммы и основные параметры синхронных ВТСП электродвигателей, даны результаты расчета и сравнительный анализ параметров синхронных ВТСП двигателей с радиально-тангенциальными магнитами.

Конструктивная схема синхронного двигателя с радиально-тангенциальными РЗМ ПМ показана на рис. 1 а. Здесь стрелками обозначено направление намагниченности ПМ. Ротор содержит постоянные магниты секторной формы радиального и тангенциального намагничивания 1, для удержания которых на роторе используются титановые пластины 2. Пластины составляют немагнитный шихтованный пакет ротора и напрессовываются на полый вал 3. Статор электрической машины 4 представляет собой шихтованный сердечник из электротехнической стали, в пазах которого располагается трехфазная обмотка, питаемая переменным током. К достоинствам таких машин можно отнести легкость ротора, не содержащего стальных элементов во внутренней области, высокоиндуктивные магнитные поля в воздушном зазоре машины, а также высокие удельные энергетические характеристики при относительной простоте конструкции. На рис. 1 б приведена расчетная схема СД с радиально-тангенциальными магнитами. В данной постановке статор электрической машины заменяется кольцевым ферромагнитным экраном 1 с внутренним радиусом  $R_s$ , на поверхности которого расположен эквивалентный токовый слой 2. Магнитопровод статора считается ненасыщенным, и его относительная магнитная проницаемость  $\mu_r \gg 1$ . В этом случае для анализа структуры магнитных полей в зоне расточки статора ( $r < R_s$ ) можно воспользоваться методом отражений в бесконечно толстом экране, согласно которому статор заменяется цилиндрическим «магнитным зеркалом». С учетом сделанных замечаний магнитное поле в области  $r < R_s$  можно представить в виде суммы полей от токового слоя, реальных магнитов индуктора и соответствующих им отраженных магнитов 4, расположенных соответственно на радиусах:

$$R_1 = R_s^2 / r_2; \quad R_2 = R_s^2 / r_1, \quad (1)$$

где  $r_1, r_2$  - внешний и внутренний радиусы цилиндра из РЗМ.



**Рисунок 1. Четырехполюсный синхронный двигатель с радиально-тангенциальными ПМ:**  
**а — конструктивная схема; б — расчетная модель.**

Таким образом, учет влияния магнитопровода статора на поля, создаваемые магнитами ротора, сводится к расчету двумерных магнитных полей, создаваемых радиально-тангенциальными магнитами, собранными по схеме, обеспечивающей внутреннюю концентрацию магнитного потока (рис. 1 б). В такой схеме направление намагниченности тангенциальных магнитов изменяется на противоположное по сравнению со схемой с внешней концентрацией магнитного потока, размещенной на роторе. При этом радиальная координата из условия соответствия областей при конформных преобразованиях заменяется как  $r = R_s^2 / r'$ . Следует отметить, что аналогичные результаты можно получить из условия отсутствия касательных составляющих напряженности магнитного поля на поверхности ферромагнитного экрана ( $r = R_s$ ) с  $\mu_{Fe} \gg 1$ . В дальнейшем величина магнитного момента каждого единичного магнита принимается постоянной ( $M = const$ ), что вполне допустимо для постоянных магнитов на основе редкоземельных материалов. Двигатель полагается достаточно длинным ( $L/D > 3-4$ ).

С учётом сделанных допущений аналитическое решение электродинамической задачи для определения двумерных магнитных полей в активной зоне машины на основе уравнений магнитостатики ( $rot \bar{H} = 0; div \bar{B} = 0$ ) с заданными граничными условиями ( $H_{\theta+} = H_{\theta-}; B_{r+} = B_{r-}$ ) можно найти, как суперпозицию следующих трёх задач.

1. Определение двумерных магнитных полей от уединённого цилиндра из системы радиально-тангенциальных магнитов.
2. Определение двумерных магнитных полей, учитывающих граничные условия на границе магнитопровода статора.
3. Определение двумерных магнитных полей от токового слоя статорных обмоток на расточке статора.

При решении электродинамических задач зависимость магнитной индукции от напряжённости магнитного поля задавалась известным соотношением ( $\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \vec{M}$ ).

В работе показано, что задача определения двухмерного магнитного поля в цилиндре из ПМ радиально-тангенциального намагничивания сводится к решению одной или нескольких сопряженных задач типа Неймана относительно скалярного  $\phi$  или векторного магнитного потенциала  $A_z$ :

$$\phi = \frac{1}{2\pi} \int_L GM dl - \frac{1}{2\pi} \int_S G \frac{M}{r} dS, \quad A = \mu_0 \frac{1}{2\pi} \oint_L GM dl + \mu_0 \frac{1}{2\pi} \int_S G \frac{M}{\rho} dS, \quad (2)$$

где  $G$  - функция Грина для  $p$ -полюсного источника  $G = \frac{1}{2} \ln \frac{r^{2p} + \rho^{2p} - 2r^p \rho^p \cos[p(\theta - \theta_1)]}{r^{2p} + \rho^{2p} + 2r^p \rho^p \cos[p(\theta - \theta_1)]}$ , которая для упрощения расчета преобразуется с помощью разложения в ряд Фурье.

Для уединенного цилиндра из РЗМ ПМ радиально-тангенциального намагничивания с внешней концентрацией магнитного потока в терминах эквивалентных поверхностных токов при условии  $M_r = M_\theta = M_0$  решение поставленной задачи имеет вид:

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

при  $r < r_1$ ;

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

при  $r > r_2$ .

Для уединенного цилиндра из РЗМ ПМ радиально-тангенциального намагничивания с внутренней концентрацией магнитного потока решение задачи при  $M_r = M_\theta = M_0$  имеет вид:

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

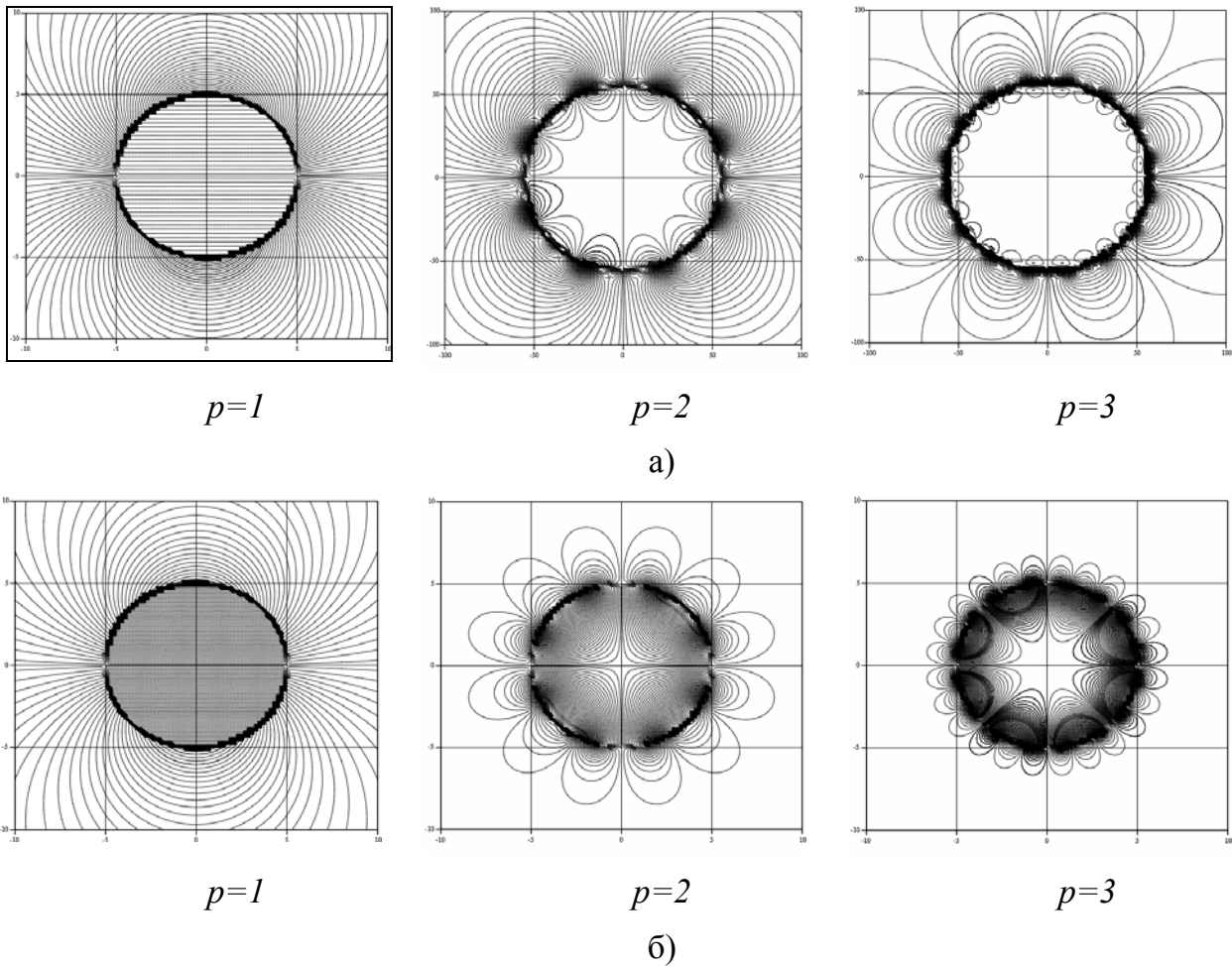
при  $r < r_1$ ;

$$A_e(r, \theta) = -\mu_0 \frac{2\sqrt{2}M_0}{\pi} \sum_{n=1,3,5,\dots} \frac{r^{-pn} (r_2^{1+pn} - r_1^{1+pn})}{n(1+pn)} \sin(pn\theta) \sin\left(\frac{\pi}{4} - pn\alpha\right), \quad (6)$$

при  $r > r_2$ .

На рис. 2 а,б приведены картины распределения функции магнитного потока в уединенных цилиндрах из РЗМ ПМ радиально-тангенциального намагничивания с различным числом пар полюсов.





**Рисунок 2. Структура магнитных полей в уединенных цилиндрах из РЗМ ПМ радиально-тангенциального намагничивания при  $p=1,2,4$ :**

**а - с внешней концентрацией магнитного потока; б – с внутренней концентрацией магнитного потока.**

Из рисунка видно, что в зависимости от направления магнитного момента азимутальных ПМ магнитный поток концентрируется внутри или снаружи уединенного цилиндра из РЗМ ПМ радиально-тангенциального намагничивания. При внешней концентрации магнитного потока (рис.2, а) первая гармоника магнитного поля отсутствует при  $r < r_1$ , что особенно заметно при большем числе пар полюсов, например,  $p=2$  и  $p=3$ . В этих случаях во внутренней области цилиндра из РЗМ ПМ радиально-тангенциального намагничивания присутствуют только высшие гармоники поля, амплитуда которых невысока. Аналогично, при концентрации магнитного потока внутри уединенного цилиндра из РЗМ ПМ радиально-тангенциального намагничивания первая гармоника магнитного поля, обладающая максимальной амплитудой, отсутствует при  $r > r_2$ . Влияние высших гармоник, находящихся снаружи цилиндра, незначительно. В случае  $p=1$  концентрация линий уровня внутри цилиндра на рис. 2, б заметно выше, чем на рис. 2, а.

Как отмечалось выше, в силу линейности уравнения для векторного магнитного потенциала  $A$  общее решение задачи определения магнитных полей в активной зоне машины можно найти в виде суммы трех слагаемых:

$$A = A_\delta + A_e + A_{Fe}. \quad (7)$$

Здесь слагаемое  $A_\delta$  определяется токовым слоем на радиусе расточки статора,  $A_e$  - уединенными постоянными магнитами ротора, а  $A_{Fe}$  - влиянием ферромагнитопровода машины на распределение полей от ротора СД.

С учетом сделанных замечаний, влияние ферромагнитного экрана статора будет аналогично влиянию цилиндра из РЗМ ПМ радиально-тангенциального намагничивания с внутренней концентрацией магнитного потока. Аналитическое выражение для функции  $A_{Fe}(r, \theta)$ , учитывающей влияние ферромагнитного экрана в области  $r < R_s$ , имеет вид:

$$A_{Fe}(r, \theta) = \mu_0 \frac{2\sqrt{2}M_0}{\pi} K \sum_{n=1,3,5\dots} R_s^{-2pn} \frac{r^{pn} (r_2^{1+pn} - r_1^{1+pn})}{n(1+pn)} \sin(pn\theta) \cos\left(\frac{\pi}{4} - pn\alpha\right), \quad (8)$$

где  $K$  – коэффициент, учитывающий влияние конечной величины относительной магнитной проницаемости магнитопровода статора  $\mu$ , определяемый в первом приближении из соотношения  $K = \frac{\mu - 1}{\mu + 1}$ .

Аналитическое решение задачи определения двухмерных магнитных полей от трехфазной обмотки с учетом граничных условий на поверхности расточки статора  $r=R_s$  записывается как :

$$A_\delta(\rho, \theta) = \frac{\mu_0 W_a i_a m_\phi}{2\pi p} \sum_{\nu=1,3,5\dots} \frac{K_{a\nu}}{\nu} \left[ (a_\nu + 1) \left(\frac{\rho}{R_s}\right)^{p\nu} + (a_\nu - 1) \left(\frac{R_s}{\rho}\right)^{p\nu} \right] \times \sin(\nu p \theta). \quad (9)$$

Здесь  $m_\phi$  – число фаз обмотки якоря, коэффициент  $a_\nu$  учитывает структуру индуктора и определяет реакцию якорных обмоток на нее. Если на внешнем радиусе ротора находится ВТСП оболочка, то из условия равенства векторного потенциала нулю при  $r = r_2$  можно получить следующее выражение для коэффициента  $a_\nu$  :

$$a_\nu = \sum_{\nu=1,3,5\dots} \left[ \left( \left(\frac{R_s}{r_2}\right)^{p\nu} - \left(\frac{r_2}{R_s}\right)^{p\nu} \right) / \left( \left(\frac{R_s}{r_2}\right)^{p\nu} + \left(\frac{r_2}{R_s}\right)^{p\nu} \right) \right]. \quad (10)$$

По существу при наличии на поверхности ротора ВТСП оболочки с  $\mu = 0$  ротор представляет собой систему постоянных магнитов с диамагнитными свойствами относительно полей, создаваемых обмоткой статора. Это значительно снижает рассеяние магнитных полей и индуктивное сопротивление  $X_{ad}$  линейной зоны машины.

При отсутствии ВТСП экрана на роторе машины значение  $a_\nu = 1$ .

С учетом полученных соотношений распределение суммарного магнитного поля от ПМ индуктора и токов статора можно представить как:

$$A_\Sigma(r, \theta) = A_\delta(r, \theta) + A_{\delta M}(r, \theta - \gamma), \quad (11)$$

где  $\gamma$  - угол между изображающим вектором тока статора и осью  $d$  ротора, а векторный потенциал индуктора  $A_{\delta M}$  с учетом влияния магнитопровода машины находится как  $A_{\delta M}(r, \theta - \gamma) = A_e(r, \theta - \gamma) + A_{Fe}(r, \theta - \gamma)$ .

Таким образом, все слагаемые в уравнении (7) известны, что позволит получить общее решение задачи распределения магнитных полей в активной зоне синхронного электродвигателя с радиально-тангенциальными постоянными магнитами и тонкой ВТСП оболочкой на внешней поверхности ротора.

Аналогичным образом ищется решения задачи определения двумерных магнитных полей в синхронном двигателе с радиальными ПМ.

Конструктивная и расчетная схемы СД с радиальными ПМ приведены на рисунке 3.

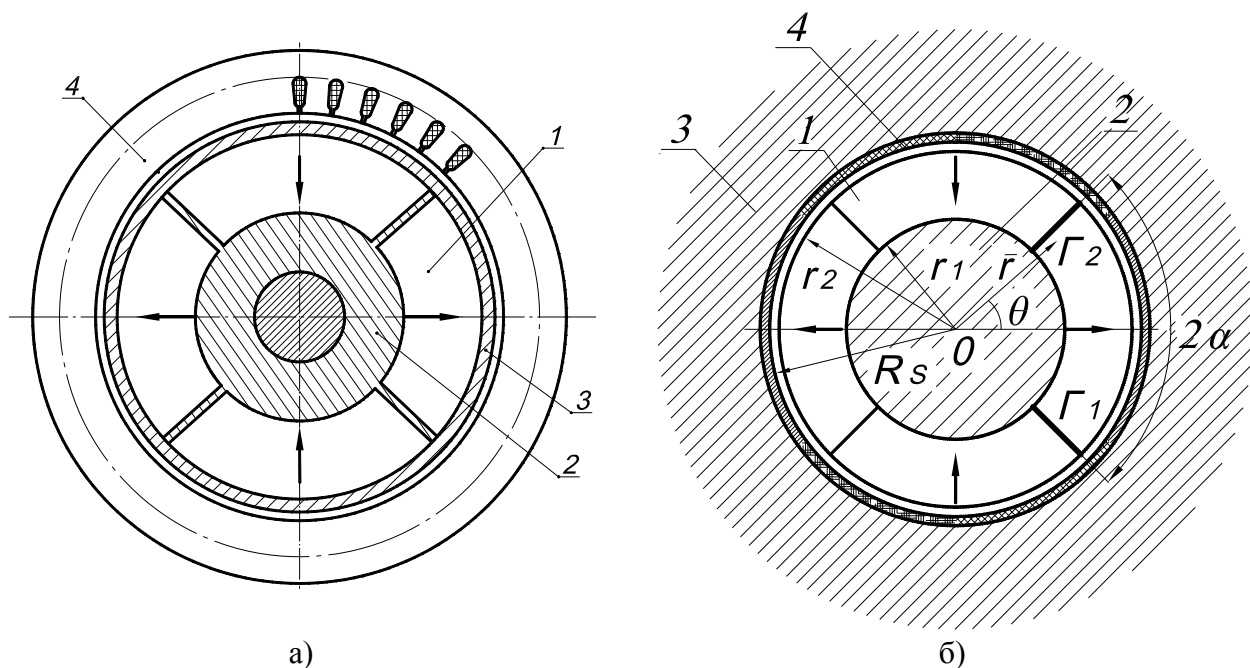


Рисунок 3. Четырехполюсный синхронный двигатель с радиальными ПМ:  
а — конструктивная схема; б — расчетная модель.

Ротор СД (рис. 3, а) содержит постоянные магниты 1, примыкающие своими внутренними торцами к ферромагнитному сердечнику 2, а наружными торцами – к магнитомягким участкам биметаллической обоймы 3. Статор 4 машины также выполняется шихтованным и аналогичен рассмотренному ранее.

При построении аналитических решений для распределения магнитных полей радиальных магнитов 1 обмотка статора также заменяется эквивалентным токовым слоем 4 (рис. 3, б). Ферромагнитный сердечник ротора 2 и спинка статора 3 считаются ненасыщенными с  $\mu_{Fe} \gg 1$ . Это допущение позволяет с достаточной точностью полагать, что внешний радиус спинки статора на параметры машины не влияет (т.е.  $R \rightarrow \infty$ ). Величины магнитных моментов радиальных магнитов принимаются постоянными  $M_r = const$ , а линейная зона машины считается достаточно длинной.

Как и в предыдущем случае, общее решение задачи представимо в виде трех слагаемых:

$$A = A_\delta + A'_e + A'_{Fe} \quad (12)$$

Здесь слагаемое  $A_\delta$  определяется токовым слоем не статоре,  $A'_e$  - уединенными постоянными магнитами ротора, а  $A'_{Fe}$  - влиянием магнитопровода машины.

Задачу расчета распределения магнитных полей в активной зоне машины с радиальными магнитами можно свести к уравнению Пуассона:

$$\Delta A = -\mu_0 J_a \delta(r - R_s), \quad (13)$$

где  $\delta$  - дельта-функция.

В качестве граничных условий используются следующие соотношения:

$$A_+ = A_-; \quad \left( \frac{\partial A}{r \partial \theta} \right)_+ - \left( \frac{\partial A}{r \partial \theta} \right)_- = \mu_0 M_r, \quad \text{при } r_1 \leq r \leq r_2, \quad \theta = \frac{\pi}{p} \quad (14)$$

$$A_+ = A_-; \quad \left( \frac{\partial A}{\partial r} \right)_+ = \left( \frac{\partial A}{\partial r} \right)_-, \quad \text{при } r = r_1, \quad \theta \leq \frac{\pi}{2p}; \quad (15)$$

$$\frac{\partial A}{\partial r} = 0, \quad \text{при } r = r_1, \quad r = R_s. \quad (16)$$

Векторный потенциал токового слоя  $A_\delta$  описывается рядом (9), в котором константа  $a_\nu$  при наличии ВТСП экрана на поверхности ротора ( $r = r_2$ ) определяется из соотношения (10), а при отсутствии ВТСП экрана – из условия отсутствия компоненты поля  $B_\theta$  ( $\partial A / \partial r = 0$ ) на поверхности ферромагнитного сердечника ротора ( $r = r_1$ ) как

$$a_\nu = - \sum_{\nu=1,3,5} \left[ \left( \frac{r_1^{\nu-1}}{R_s^\nu} + \frac{R_s^\nu}{r_1^{\nu+1}} \right) / \left( \frac{r_1^{\nu-1}}{R_s^\nu} - \frac{R_s^\nu}{r_1^{\nu+1}} \right) \right]. \quad (17)$$

Векторный потенциал магнитов индуктора  $A'_e$  и  $A'_i$  для уединенного  $p$ -полюсного цилиндра из РЗМ радиального намагничивания определяется из решения уравнения Лапласа (13) с граничными условиями (14, 15) и условия отсутствия поля при  $r \rightarrow \infty$ .

Аналитическое решение задачи имеет вид:

$$A'_i(r, \theta) = \mu_0 \frac{2M_0}{\pi} \sum_{n=1,3,5\dots} \frac{r^{pn} (r_2^{1-pn} - r_1^{1-pn})}{n(1-pn)} \sin(pn\alpha) \sin(pn\theta), \quad (18)$$

при  $r < r_1$ ;

$$A'_e(r, \theta) = \mu_0 \frac{2M_0}{\pi} \sum_{n=1,3,5\dots} \frac{r^{-pn} (r_2^{1+pn} - r_1^{1+pn})}{n(1+pn)} \sin(pn\alpha) \sin(pn\theta), \quad (19)$$

при  $r > r_2$ .

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 (16):  $\frac{\partial(A'_i + A'_{Fe})}{\partial r} = 0$  при  $r = r_1$  и  $\frac{\partial(A'_e + A'_{Fe})}{\partial r} = 0$  при  $r = R_s$ . На радиусе расточки статора ( $r = R_s$ ) выражение для  $A_{Fe}$  может быть представлено в виде

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

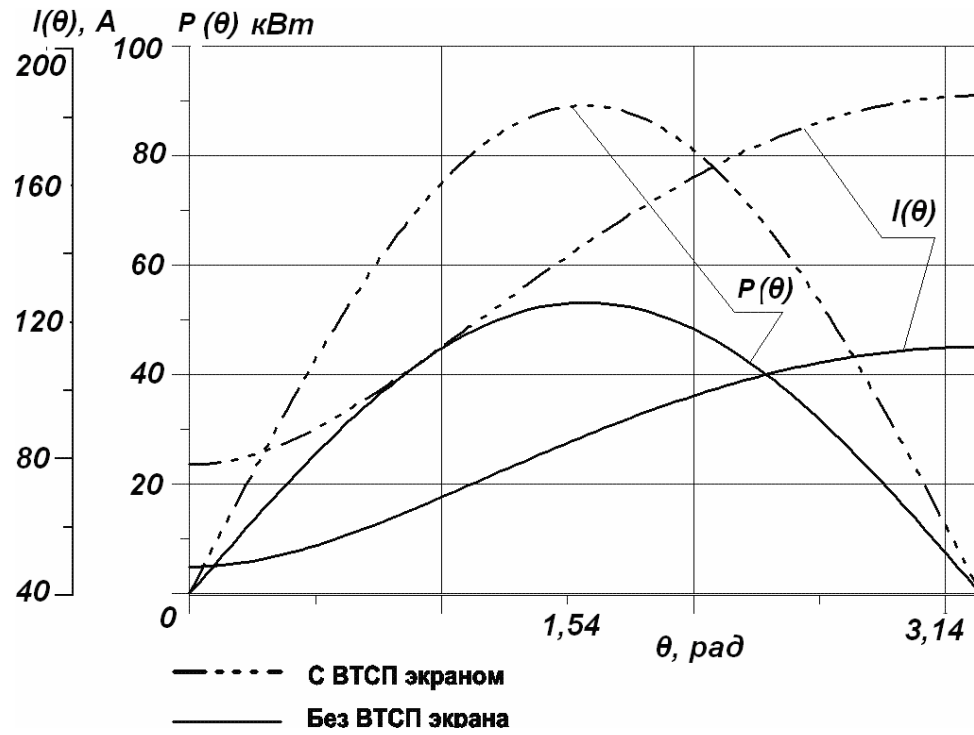
$$\text{где } a = \frac{(r_2^{1-pn} - r_1^{1-pn})}{n(1-pn)}, \quad b = \frac{(r_2^{1+pn} - r_1^{1+pn})}{n(1+pn)}, \quad d = \frac{1}{R_a^{-2pn} - r_1^{-2pn}}.$$
(20)

Имея все слагаемые в уравнении (12), можно получить общее решение задачи распределения магнитных полей в активной зоне синхронного электродвигателя с радиальными ПМ и ВТСП экраном на внешней поверхности ротора.

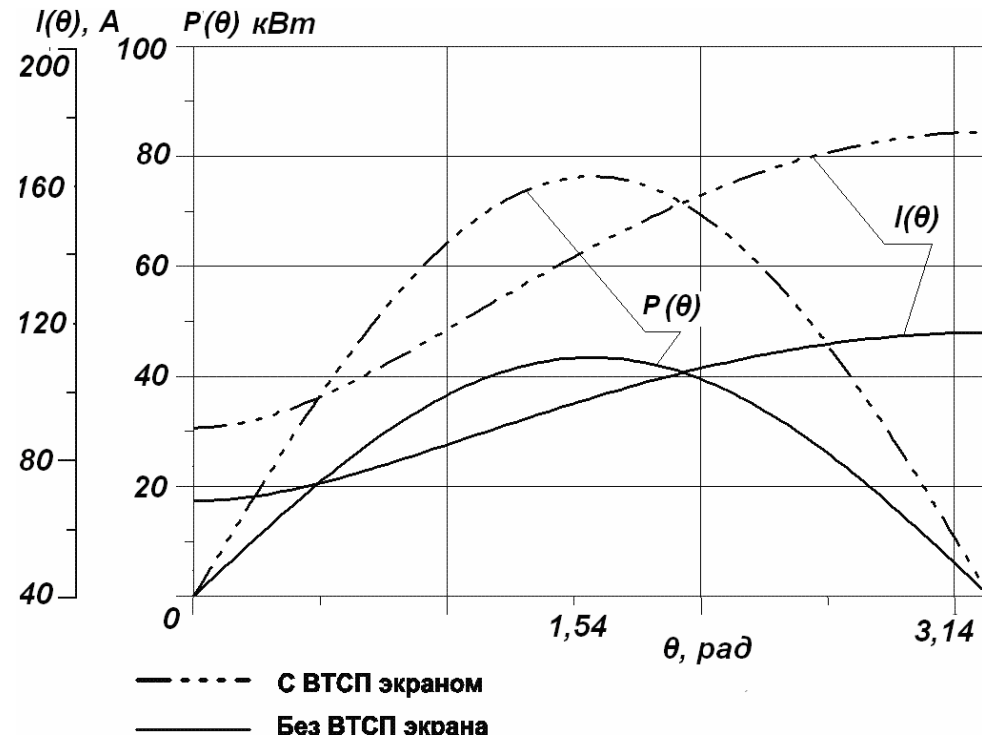
На основе полученных выше решений двумерных электродинамических задач в рамках единого подхода можно провести сравнительный анализ СД с ПМ радиально-тангенциального намагничивания и СД классического, наиболее распространенного типа с ПМ радиального намагничивания.

В расчетах использовались следующие исходные параметры модельных двигателей: диаметр расточки статора  $D_s = 84$  мм, длина пакета статора  $L_s = 78$  мм, внутренний радиус цилиндра из РЗМ  $r_1 = 18,5$  мм, внешний радиус цилиндра -  $r_2 = 41$  мм, воздушный зазор  $\delta = 1$  мм, число пар полюсов  $p = 2$ , число пазов на полюс и фазу  $q = 3$ , число витков фазы якоря  $W_a = 200$ , напряжение питающей сети  $U = 220$  В, частота тока  $f = 200$  Гц. Предполагалось, что магнитный момент постоянных магнитов равен  $M = 780000$  А/м. При принятых исходных данных обеспечивается перевозбужденный режим работы двигателя как для СД с радиально-тангенциальными магнитами, так и для СД с радиальными магнитами с  $\varepsilon = E_0/U = 2,099$  и  $\varepsilon = 2,162$  соответственно.

На рис. 4 представлены результаты сопоставления угловых характеристик СД с радиально-тангенциальными и радиальными магнитами.



а)



б)

Рисунок 4. Сравнение угловых характеристик СД при наличии и отсутствии ВТСП экрана  
 а - СД с радиально-тангенциальными магнитами; б – с радиальными магнитами.

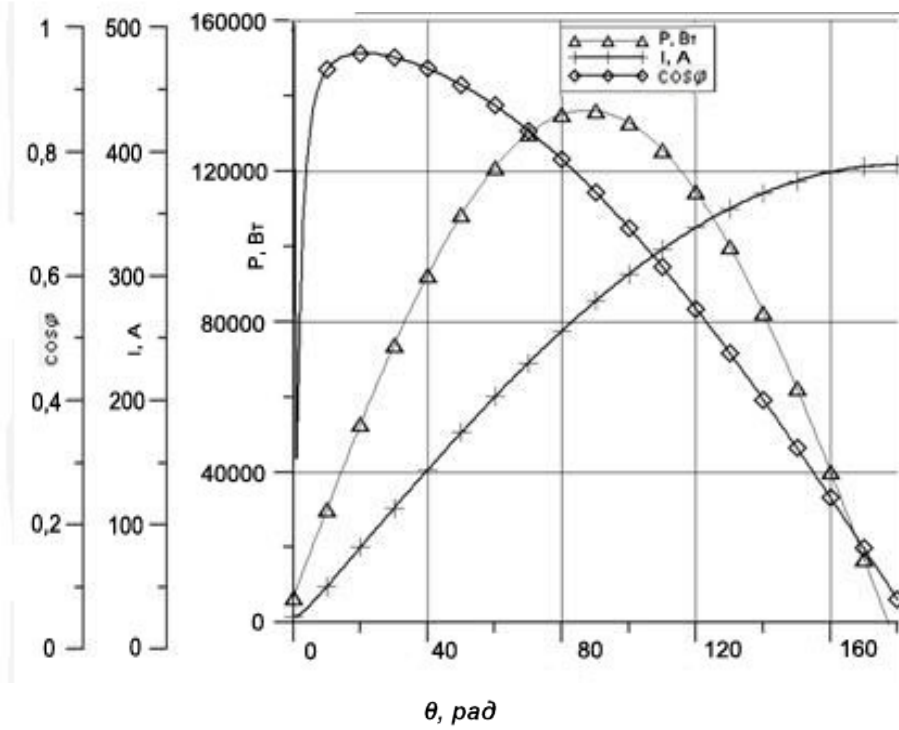
Результаты расчетов параметров таких двигателей показали, что применение ПМ радиально-тангенциального намагничивания повышает выходную мощность по сравнению с традиционными СД с радиальными магнитами. Отсутствие магнитопровода ротора машины позволяет также снизить его массу, что особенно важно для электромашиностроения, авиационно-космической отрасли и высокодинамичных промышленных приводов. Использование в роторе ВТСП оболочек из иттриевых керамик и композитных ВТСП листовых материалов позволяет существенно (в 2-2,5 раза) увеличить максимальную мощность сверхпроводниковых электродвигателей и возможности высокодинамичного привода. (В данной модели сверхпроводник считался идеальным диамагнетиком с  $\mu_s \approx 0$ ). В диссертации показано, что выигрыш по мощности имеет место вследствие значительного снижения индуктивного сопротивления машины. Указанное обстоятельство позволяет заключить, что СД с тонкими ВТСП оболочками могут оказаться перспективными при их использовании в качестве электроприводов криогенных насосов в системе криостатирования силовых СП кабелей и водородной энергетике, а также в качестве высокодинамичных приводов.

Следует отметить, что полученные аналитические модели позволяют проводить сравнительный анализ рассматриваемых машин как при кратковременном, так и при длительном режиме работы с заданными ограничениями по плотности тока

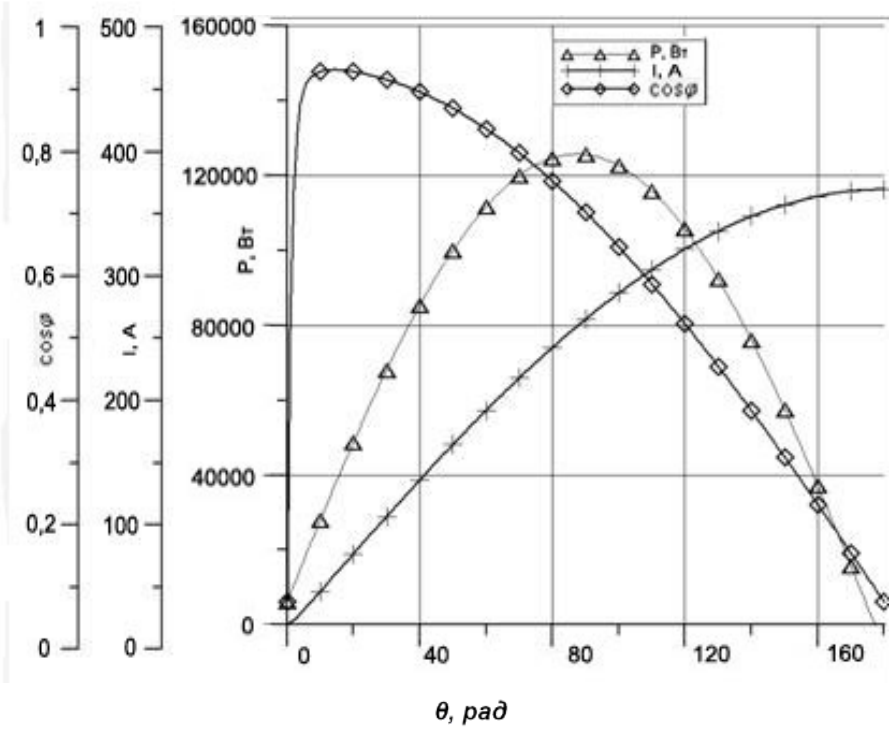
**В третьей главе** рассмотрены численные методы поверочного расчета магнитных полей и параметров ВТСП двигателей с ПМ радиально-тангенциального намагничивания с учетом геометрии и насыщения магнитопровода машин. Кроме того, развитые в главе II аналитические подходы предназначены для неявнополюсных вариантов конструкций ВТСП двигателей с радиально-тангенциальными магнитами. В ряде случаев представляет также интерес явнополюсные конструкции синхронных двигателей со вставками из иттриевых керамик. Расчет параметров таких ВТСП СД может быть проведен лишь численными методами.

Для получения решений методом конечных элементов (МКЭ) использовался пакет прикладных программ «*Elcut Professional*». Особенности численного расчета ВТСП двигателей при заданном напряжении фазы подробно рассмотрены в диссертационной работе.

По разработанным алгоритмам были проведены численные расчеты синхронных двигателей с радиально-тангенциальными ПМ. На рис. 5 показаны результаты численных и аналитических расчетов СД с ПМ радиально-тангенциального намагничивания.



а)



б)

Рисунок 5. Графические зависимости выходных параметров СД с радиально-тангенциальными ПМ от угла нагрузки:  
а – аналитический расчет, б – численный расчет.



Видно, что разработанные аналитические методики расчета синхронного ВТСП двигателя с радиально-тангенциальными постоянными магнитами хорошо согласуются с численными моделями в пределах 5 – 10%.

Численный расчет серии ВТСП двигателей показал, что использование вставок из массивных ВТСП элементов, а также тонких ВТСП пленок в конструкции роторов шестиполюсных синхронных электродвигателей с радиально-тангенциальными ПМ позволяет при одинаковых режимах охлаждения заметно увеличить их мощность. Так, наиболее перспективными моделями синхронных ВТСП электродвигателей с радиально-тангенциальными ПМ являются модели с использованием ВТСП пластин вдоль оси  $d$  машины (рис. 6) и модели с тонкими ВТСП пленками на внешнем радиусе цилиндра из РЗМ (рис.7).

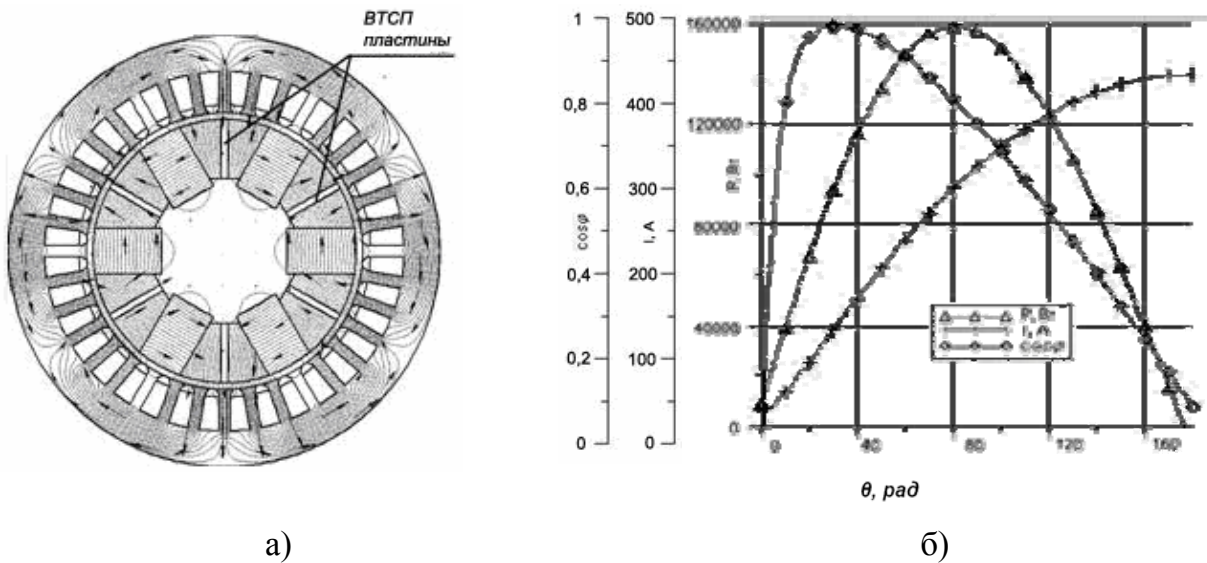


Рисунок 6. Результаты расчета СД с радиально-тангенциальными ПМ и пластинами из иттриевой керамики:

а – картина магнитного поля, б – зависимости параметров СД от угла нагрузки  $\theta$ .

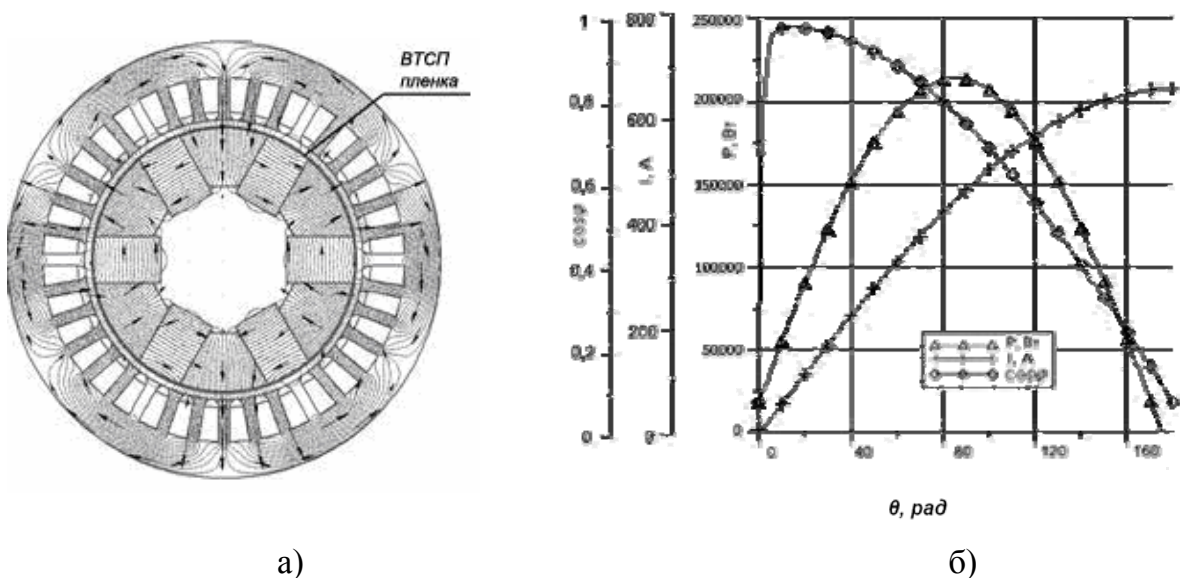


Рисунок 7. Результаты расчета СД с радиально-тангенциальными ПМ и тонкой ВТСП пленкой на внешнем радиусе ротора:

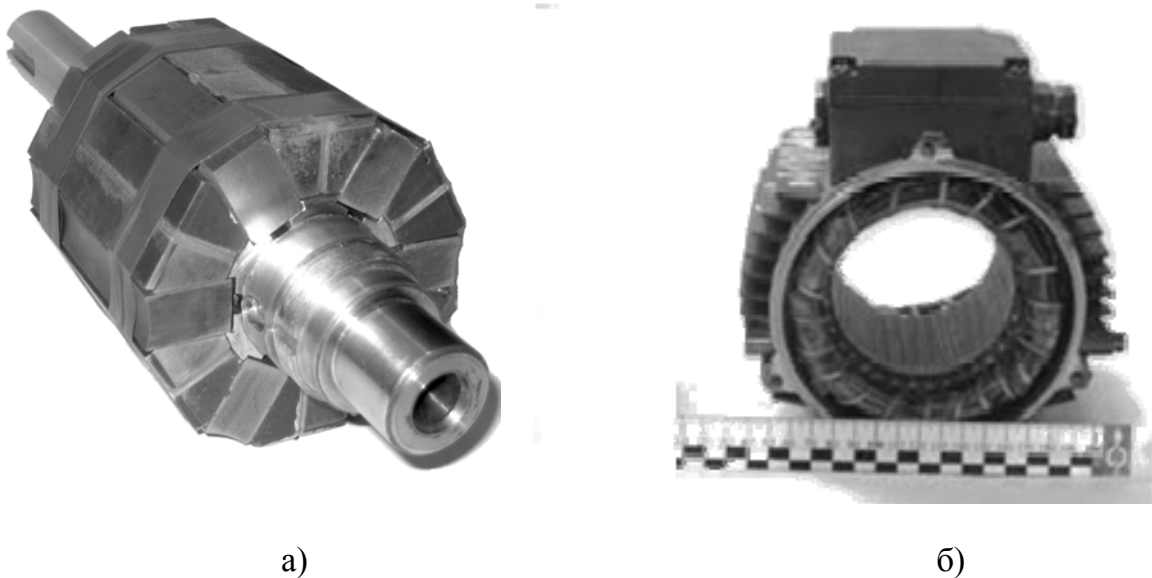
а – картина магнитного поля, б – зависимости параметров СД от угла нагрузки  $\theta$ .

**Пятая глава** диссертации посвящена экспериментальным исследованиям синхронных ВТСП двигателей с радиально-тангенциальными постоянными магнитами. В работе детально описан спроектированный и изготовленный макетный образец ВТСП двигателя, а также этапы проведения экспериментов на автоматизированном испытательном комплексе для криогенных электрических машин.

На основе созданных теоретических моделей и расчетных программ был спроектирован, изготовлен и испытан экспериментальный образец шестиполюсного синхронного ВТСП электродвигателя с радиально-тангенциальными постоянными магнитами и радиальными вставками из иттриевой керамики.

Макетный образец синхронного ВТСП электродвигателя с радиально-тангенциальными постоянными магнитами представлен на рис. 8.

Порядок проведения экспериментальных работ включал в себя несколько основных этапов: подготовку экспериментального стенда и автоматизированной системы измерения к работе, охлаждение экспериментального ВТСП электродвигателя до температуры жидкого азота и технологический запуск на холостом ходу, запуск ВТСП электродвигателя под нагрузкой, регистрацию и первичную обработку экспериментальных данных в реальном масштабе времени.



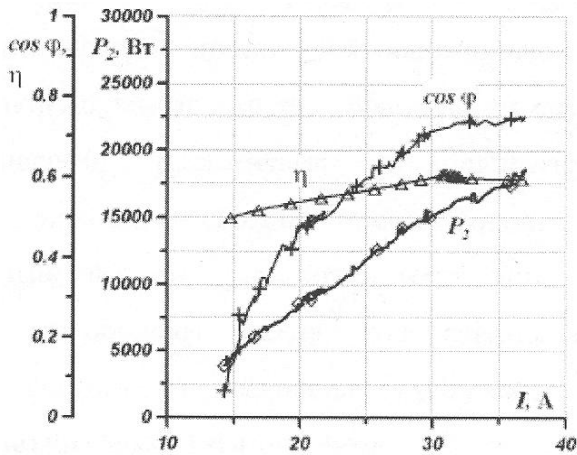
**Рисунок 8. Макетный образец экспериментального ВТСП двигателя:  
а – ротор без обоймы, б - статор**

Для оценки влияния ВТСП элементов на параметры электродвигателя были проведены две серии испытаний: с ВТСП пластинами и без них (рис. 9). В последнем случае, ВТСП блоки были заменены текстолитовыми вставками.

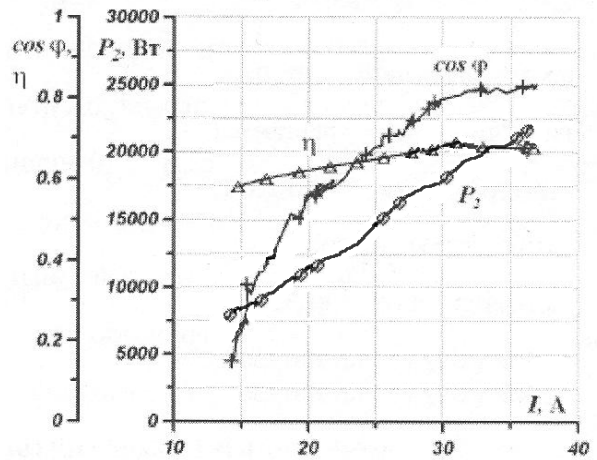
Без ВТСП

С ВТСП

$U = 110 \text{ В}, n = 3000 \text{ мин}^{-1}$

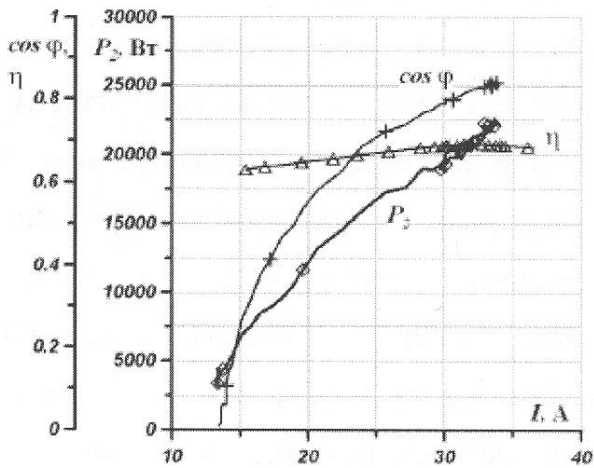


а)

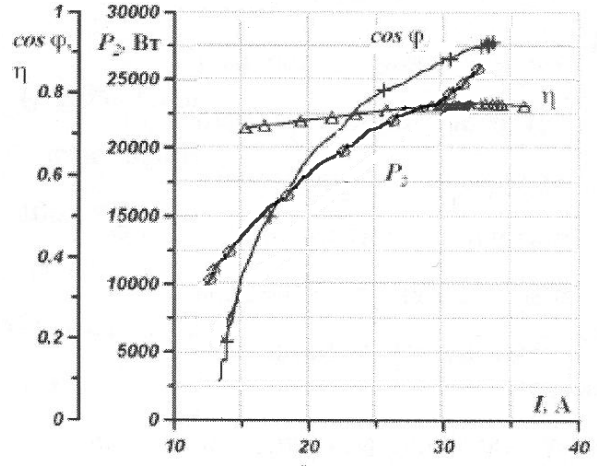


б)

$U = 147 \text{ В}, n = 4500 \text{ мин}^{-1}$

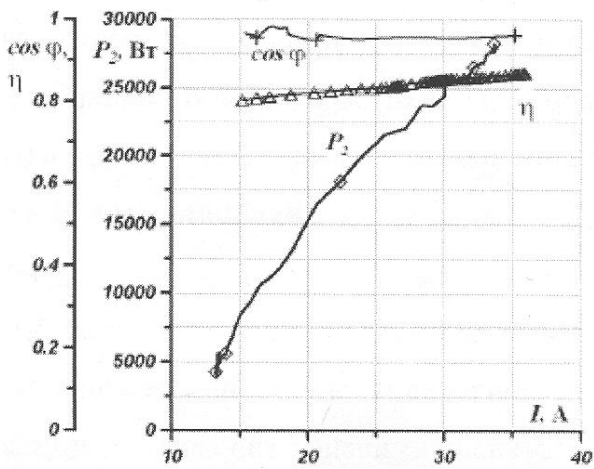


в)

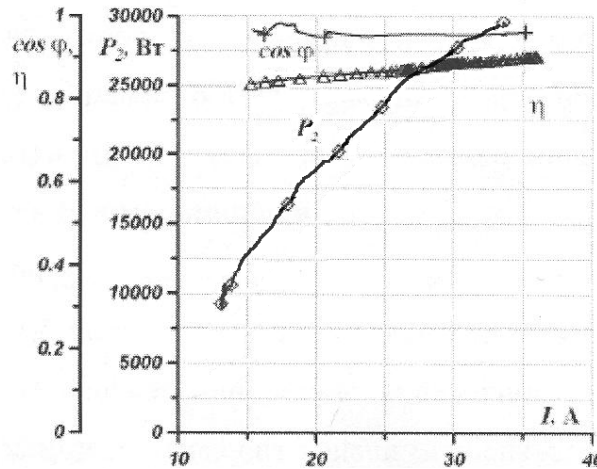


г)

$U = 220 \text{ В}, n = 6000 \text{ мин}^{-1}$



д)



е)

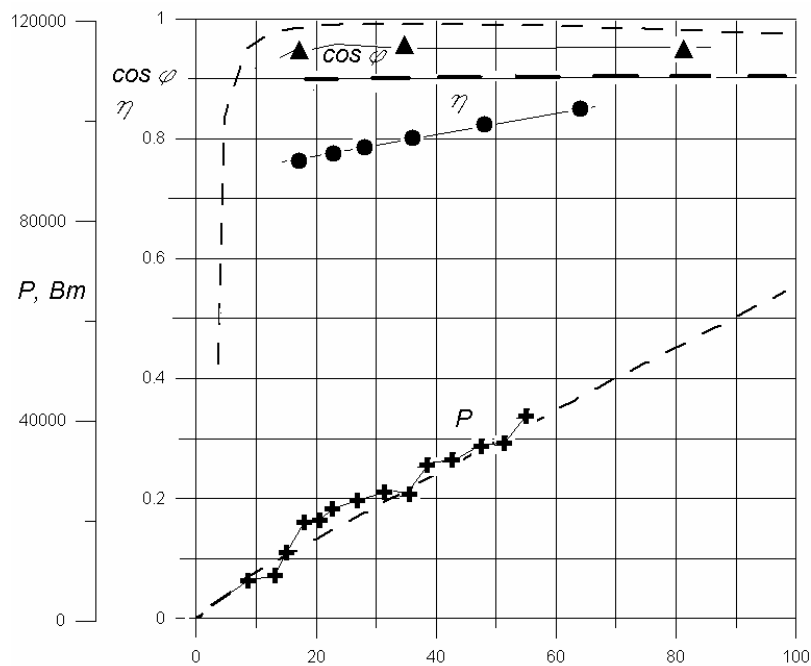
Рисунок 9. Экспериментальные выходные характеристики электродвигателя с радиально-тангенциальными ПМ в роторе.

Из графиков видно, что с ростом питающего напряжения происходит повышение выходной мощности и КПД. КПД машины при номинальном режиме работы достигает 99% и остается стабильным при возрастании нагрузки до значения, соответствующему опрокидывающему моменту.

Видно, что при наличии ВТСП пластин в составе ротора, максимальная мощность электродвигателя возросла приблизительно на 20 %. Коэффициент мощности ( $\cos \varphi$ ), независимо от режима работы ВТСП двигателя, приближается к единице.

Анализируя представленные характеристики ВТСП электродвигателя с радиально-тангенциальными ПМ можно сделать вывод о том, что он сохраняет высокие показатели эффективности при различных значениях входных параметров ( $U, f$ ) и может успешно эксплуатироваться в режимах работы, отличных от номинального.

На рис 10 показано сравнение результатов экспериментальных данных с теоретическими расчетами для синхронных ВТСП двигателей с радиально-тангенциальными и радиальными ПМ. Видно, что и в том, и в другом случае результаты практически совпадают. На основании этого можно сделать вывод о том, что разработанная теоретическая модель и проверочный численный расчет достаточно точно учитывают свойства и параметры ВТСП двигателя.



**Рисунок 10.** Сравнение экспериментальных данных с теоретическими расчетами для синхронных ВТСП двигателей с радиально-тангенциальными ПМ в роторе.

На базе теоретических и экспериментальных исследований ВТСП двигателей с ПМ в диссертационной работе сформулированы рекомендации по использованию этих электрических машин в качестве приводов криогенных насосов и высокодинамичных приводов испытательных стендов для автомобильной промышленности.

### ***Основные выводы и результаты***

1. Предложены новые схемы синхронных электродвигателей на основе ВТСП элементов и постоянных магнитов радиально-тангенциального намагничивания, обладающие высокими массоэнергетическими показателями.
2. Разработанные аналитические методики расчета двухмерных магнитных полей и выходных параметров синхронных ВТСП двигателей с радиально-тангенциальными магнитами позволяют проводить сравнительный анализ параметров СД с радиально-тангенциальными и радиальными ПМ с учетом физических свойств ВТСП элементов и постоянных магнитов.
3. Использование в составе ротора оболочек композитных ВТСП листовых материалов с тонкопленочными слоями из иттриевых керамик позволяет существенно (в 2-2,5 раза) повысить выходную мощность СД по сравнению с синхронными электродвигателями аналогичной конструкции (без ВТСП плёнок) при тех же режимах охлаждения машины на уровне температур жидкого азота.
4. Результаты численных расчетов показали, что использование вставок из массивных ВТСП элементов в конструкции роторов шестиполусных синхронных электродвигателей с радиально-тангенциальными ПМ позволяет при одинаковых режимах охлаждения увеличить их мощность до 25%.
5. Разработаны теоретические методы численного расчета двухмерных магнитных полей и параметров шестиполусных синхронных электродвигателей с радиально-тангенциальными и радиальными ПМ с массивными и тонкопленочными ВТСП элементами на роторе, позволяющие проводить сравнительный анализ энергетических параметров различных конструктивных схем таких двигателей.
6. Разработана конструкция, спроектирована, изготовлена и испытана на стенде кафедры 310 МАИ экспериментальная модель шестиполусного синхронного ВТСП электродвигателя с радиально-тангенциальными ПМ в роторе и вставками из массивных ВТСП элементов ( $D \times L = 86 \times 82$  мм) мощностью ~15 кВт.
7. Экспериментальные исследования шестиполусных синхронных ВТСП электродвигателей показали, что они устойчиво работают в среде жидкого азота, обеспечивая высокие удельные массоэнергетические показатели.
8. Полученные экспериментальные характеристики синхронных ВТСП электродвигателей хорошо согласуются с теоретическими данными, что позволяет рекомендовать их для проектных расчетов высокоэффективных ВТСП приводов.

**Основные положения диссертации опубликованы в работах:**

1. Ковалев Л.К., Кавун Ю.Ю., Д.С. Дежин. Синхронные электродвигатели с радиально-тангенциальными магнитами // *Электричество* №11/ 2007;
2. Л.К. Ковалев, Ю.Ю. Кавун, Д.В. Голованов. Предельные характеристики синхронных машин с постоянными магнитами и высокотемпературными сверхпроводниковыми элементами в роторе // *Электричество* №12/ 2008;
3. Л.К. Ковалев, К.Л. Ковалев Ю.Ю. Кавун, В.А. Альтов, В.Т. Пенкин, Д.В. Голованов. Предельные характеристики синхронных двигателей с постоянными магнитами и ВСТП-элементами в роторе // *Известия Академии электротехнических наук РФ* №1/ 2009.
4. Ю.Ю. Кавун, Л.К. Ковалев. Новые типы синхронных электрических машин с постоянными магнитами // *Проектирование и изготовление аэрокосмических аппаратов / Под ред. проф. Ю.Ю. Комарова. – М. Изд-во МАИ, 2006.*
5. Ковалев Л.К., Кавун Ю.Ю. Предельные характеристики синхронных машин с постоянными магнитами и высокотемпературными сверхпроводниками в роторе // *Современные технологии в задачах управления автоматикой и обработки информации: Труды XVII Международного научно-технического семинара. Алушта, сентябрь 2008 г. – СПб.: ГУАП, 2008.*
6. Ю. Ю. Кавун, Д. В. Голованов. Предельные характеристики синхронных машин с радиальными, тангенциальными и радиально-тангенциальными постоянными магнитами и высокотемпературными сверхпроводниками в роторе // *7-я международная конференция "Авиация и космонавтика 2008", Москва, 2008.*
7. Ю. Ю. Кавун, Д. В. Голованов. Предельные характеристики синхронных машин с радиальными, тангенциальными и радиально-тангенциальными постоянными магнитами и высокотемпературными сверхпроводниками в роторе // *Информационные технологии в авиационной и космической технике – 2008, Москва, 2008*
8. Ковалев Л.К., Кавун Ю.Ю. Синхронные электродвигатели с радиально-тангенциальными постоянными магнитами // *6-я международная конференция "Авиация и космонавтика 2007", Москва, 2007.*