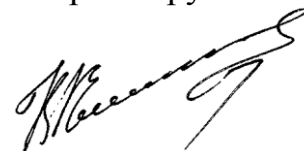


на правах рукописи



Калаев Владислав Евгеньевич

**ГЕРМЕТИЧНЫЙ СИНХРОННЫЙ
РЕАКТИВНЫЙ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ
С ПОДМАГНИЧИВАЮЩИМ ДИСКОМ**

**Специальность 05.09.01 – «Электромеханика и
электрические аппараты»**

**АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Томск - 2011

Работа выполнена на кафедре «Электропривода и автоматики» Северского технологического института – филиале Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ»

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Щипков Александр Андреевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Обрусник Валентин Петрович;

кандидат технических наук, доцент
Теплов Алексей Иванович.

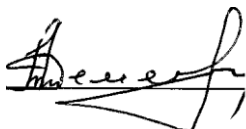
Ведущая организация: Открытое акционерное общество
"Сибэлектромотор", г. Томск

Защита состоится « 23 » декабря 2011 г. в 15:00 часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.269.11 при ФГБОУ ВПО НИ ТПУ по адресу: 634034, г. Томск, ул. Усова, 7, ауд.217.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВПО НИ ТПУ по адресу: г. Томск, ул. Белинского, 55.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2011 г.

Ученый секретарь совета
к.т.н., доцент



Ю.Н. Дементьев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Известно, что применение машин и аппаратов герметического типа (реакторы, газодувки, центрифуги, сепараторы, компрессоры, насосы и т. д.) позволяет коренным образом улучшить и создать новые прогрессивные химико-технологические процессы, отличающиеся непрерывностью, меньшими затратами и существенным улучшением условий труда.

Как показала практика, сложнее всего обеспечить необходимую герметизацию в местах ввода в аппаратуру и машины движущихся деталей: вращающихся валов и совершающих поступательно-возвратное движение штоков.

Доказано, что для нормального функционирования технологических агрегатов с сальниками и торцевыми уплотнениями необходима их подтяжка и замена набивки, а также постоянное наблюдение за их работой, что для производств с вредными и агрессивными средами представляет собой достаточно серьезную проблему.

Агрегаты с герметическими электродвигателями отличаются тем, что вращение рабочего органа у них производится посредством вращающегося магнитного поля, передающего крутящий момент через герметичную перегородку, установленную в зазоре между статором и ротором. На этом принципе строятся изобретения (использующие как известные, так и существенно отличающиеся от прежних подходы), патентующие новые системы передачи движения внутрь аппарата и обеспечивающие полную герметичность машины.

Ротор и вал такого электродвигателя непосредственно соприкасаются с компонентами, которые поступают в химико – технологическую машину или получают в ней в результате реакций. Обмотка и сталь статора отделены перегородкой и находятся вне рабочей среды, тем самым надежно защищены от разрушающего воздействия. Таким образом, внедрение герметичных электроприводов положительно сказывается на снижении травматизма и сокращении профессиональных заболеваний, позволяет работать обслуживающему персоналу при нормальных условиях, без средств индивидуальной защиты.

Отметим, что перегородка является важнейшей частью большинства предлагаемых конструкций герметичных электромеханических преобразователей цилиндрического исполнения. Ее изготовление, установка в расточку статора и приварка концов требуют в большей мере, чем какой-либо другой элемент двигателя, тонких технологических приемов, что является достаточно трудоемким процессом. Этого можно избежать, используя электрические машины дисковой конструкции.

Кроме того, к преимуществам дисковых электродвигателей можно отнести и удобство встраивания, максимальную простоту стыковки с рабочим органом машины, применение в безредукторных системах (работа при малых оборотах), а также возможность реализовать малоотходную технологию массового производства с улучшенным использованием объема и т.д. Однако такие электромеханические преобразователи до настоящего времени не получили широкого распространения, так как при их разработке необходимо учитывать следующие особенности: неуравновешенная сила осевого магнитного притяжения в одно пакетных образ-

цах, требующая применения радиально – упорных подшипников; повышенный момент инерции зубчатого ротора, усложняющий работу механизмов с реверсами и быстрым торможением; увеличенные потери трения в подшипниках и ротора о воздух.

Отсутствие общепризнанных, хорошо апробированных опытом инженерных методик электромагнитных расчетов герметичных дисковых электрических машин (сложность заключается в необходимости расчета объемных электромагнитных полей, что связано с неравномерным распределением индукции в радиальном направлении и допущение о плоскопараллельности поля не является допустимым), а также многофакторность и многокритериальность возможных процедур оптимизации предполагают применение специализированных пакетов программ.

Сегодня разработка трехмерных моделей электрических машин является актуальной задачей. При анализе конструкций герметичных дисковых электрических машин необходим точный учет наличия большого воздушного зазора, несимметрии магнитной цепи, влияния ее насыщения (ярма и полюсов статора) на выходные характеристики и т. п. Но расчет поля, как правило, не является самоцелью разработчика, так как его задача – синтез оптимальных соотношений размеров и параметров электрической машины по заданным выходным параметрам. Это диктуется дороговизной и дефицитностью используемых материалов (в особенности имеет значение при современной тенденции применения магнитов с высокой удельной энергией), а также потребностью в разработке принципиально новых конструкций, подлежащих детальному исследованию. В случае проектирования герметичных приводов нарушается, как правило, привычная схема выбора двигателя. Лишь изредка удастся подобрать готовый электромеханический преобразователь, удовлетворяющий в определенной степени поставленным требованиям. Более типичная ситуация – разработка герметичного двигателя для конкретного механизма. Поэтому большой интерес представляет выяснение потенциальных возможностей исследуемого типа систем в широком диапазоне изменения геометрии активной зоны и используемых конструкционных материалов.

Таким образом, проектирование герметичных дисковых электрических машин возможно только на основе компьютерной модели, которая сочетает в себе алгоритмы оптимизации с методами расчета и анализа трехмерного магнитного поля.

Целью диссертационной работы является решение вопросов, связанных с разработкой и исследованием конструкции герметичного дискового синхронного электродвигателя на основе моделирования электромагнитных процессов в активной зоне электрической машины.

В связи с этим необходимо решить следующие задачи:

- дать анализ состояния вопроса определения параметров и рабочих характеристик дисковых электрических машин;
- предложить новую конструкцию герметичного двигателя с улучшенными энергетическими и массогабаритными показателями;
- выбрать и развить метод исследования электромагнитных процессов, происходящих в активной зоне и создать математическую модель двигателя, учитывающую особенности дисковой конструкции;

- разработать методику и алгоритм, позволяющие получить точное выражение для расчета электромагнитного момента, пригодное для проведения оптимизационных расчетов, на их базе создать программное обеспечение;
- экспериментально исследовать макетный образец с целью подтверждения правильности выбранного метода расчета;
- выработать рекомендации по проектированию машин данного типа для различных потребителей (синтезу нужных механических характеристик по техническим и технологическим соображениям).

Методы исследования. Для решения поставленных задач использовалась теория электрических машин и электромагнитного поля, методы математического анализа, включая векторный анализ, методы математического моделирования и нелинейного программирования (случайный поиск), методы численного решения задач интегрирования.

Экспериментальные исследования опытного образца синхронного двигателя проводились на специальном стенде в лаборатории электрического привода СТИ НИЯУ МИФИ.

Научная новизна работы состоит в следующем:

- создана математическая модель магнитной системы герметичного синхронного реактивного электродвигателя с подмагничивающим диском (ГСРДсПД) для анализа электромагнитных процессов на основе решения интегральных уравнений магнитного поля;
- разработана математическая модель расчета моментных характеристик герметичного электромеханического преобразователя, отличающаяся численной реализацией метода разделяющей плоскости;
- предложен алгоритм параметрической оптимизации ГСРДсПД с поиском величины максимального удельного момента.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций в диссертационной работе обосновывается хорошим совпадением результатов расчетно-теоретического исследования с данными эксперимента, полученными на макетном образце для различных режимов работы исследуемого двигателя.

Практическая ценность результатов работы определяется следующим:

- разработана новая конструкция герметичного синхронного реактивного дискового электродвигателя, для усиления величины основного магнитного потока в воздушном зазоре которого размещен подмагничивающий диск;
- определено влияние геометрии магнитной системы ГСРДсПД на его энергетические показатели;
- создан пакет программ, который позволяет производить оптимизационные расчеты и анализ электромагнитных процессов в электрических машинах (в том числе и оригинальных конструкций, для которых отсутствуют инженерные методики расчета) с целью уменьшения массо - габаритных показателей при сохранении энергетических (электромагнитных) характеристик;
- выработаны практические рекомендации по электромагнитному расчету ГСРДсПД различной конфигурации (различным соотношением числа зубцов статора и ротора) с внешними диаметрами от 70 до 120 мм, полученные на основе анализа имеющегося опыта разработки и исследований с использованием пред-

ложенной математической модели.

Основные положения, выносимые на защиту:

- конструкция дискового синхронного реактивного электродвигателя с подмагничивающим диском, позволяющая расширить область использования герметичных электрических машин;
- алгоритм оптимизации ГСРДсПД по критерию максимума удельного момента, построенный на базе методов интегрирования по источникам поля и разделяющей плоскости;
- рекомендации к расчету ГСРДсПД с требуемыми моментными характеристиками при заданных габаритных показателях.

Реализация результатов работы. Разработанный пакет прикладных программ используется в ОАО "Сибирский химический комбинат" при проектировании эффективных магнитных систем и магнитопроводов сложной конфигурации (отчет о НИР "Физико–математическая модель и программное обеспечение для расчета магнитных систем с постоянными магнитами" № ГР 01.2.00317187; Инв. № 0220.0 503697).

Основные положения теоретических исследований диссертационной работы вошли составной частью в отчет по х/д тематике №8-6/07 от 20.02.2007 г. «Разработка бесконтактного двигателя для сканирующего устройства ДРГ-1еЮ», а также использованы при разработке новых типов электромеханических преобразователей для герметичных машин и аппаратов в ООО "Завод нестандартного оборудования" (г. Томск).

Программный комплекс расчета параметров дисковых электромеханических преобразователей использован в Томском научно – производственном и внедренческом ООО "Тетран" при выполнении ряда плановых научно – исследовательских работ.

Апробация работы. Основные положения и результаты теоретических и экспериментальных исследований диссертационной работы докладывались и получили одобрение на:

- отраслевых научно – технических конференциях "Технология и автоматизация атомной энергетики" Северск, СГТА, 2003, 2006, 2007, 2009;
- международной научно-технической конференции "Электроэнергетика, электротехнические системы и комплексы" Томск, ТПУ, 2003;
- международной научно – технической конференции "Электромеханические преобразователи энергии" Томск, ТПУ, 2005;
- XVII научно – технической конференции "Электронные и электромеханические системы и устройства " Томск, ФГУП "НПЦ "Полус", 2006;
- IV Всероссийской научно – практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых "Молодежь и современные информационные технологии" Томск, ТПУ, 2006;
- XII, XIII, XIV, XV Международных научно-практических конференциях студентов и молодых ученых "Современная техника и технологии" Томск, ТПУ, 2006, 2007, 2008, 2009;
- научно-практических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых "Инновации в атомной отрасли: проблемы и решения" Северск, СГТА,

2005, 2006, 2007.

Публикации. Основное содержание диссертационной работы отражено в 28 печатных работах, в том числе в 2 научных статьях в журналах, рекомендованных ВАК, 1 депонированном научно-техническом отчете, в 25 сборниках статей, трудов, материалов, тезисов докладов.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из шести глав, заключения, содержит 142 страницы основного текста, 67 рисунков, 6 таблиц, включает список использованной литературы из 119 наименований и приложения на 2 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе обоснована актуальность темы, сформулирована цель работы, поставлены основные задачи, характеризуется научная новизна и практическая ценность результатов исследований, приведена краткая аннотация выполненной работы по разделам.

Во второй главе на основе литературного обзора проведен анализ современного состояния вопроса, касающегося теории и практики реализации герметизации технологических машин и механизмов, рассмотрены особенности конструкций, тенденции развития и области применения герметических электрических машин. Представлены варианты исполнения магнитных систем дисковых электромеханических преобразователей, проведено теоретическое сопоставление их массогабаритных показателей и моментов с цилиндрическими машинами.

Долгое время герметичные приводы оснащались только асинхронными электродвигателями с фиксированной частотой вращения 1500 и 3000 об/мин, и проблема заключалась в том, что регулирование частоты вращения в широком диапазоне с высокой точностью было затруднено. Совершенствование регулируемых электромеханических преобразователей энергии напрямую связано с достижениями силовой электроники. Сегодня направлением наиболее динамичного развития вентильного электропривода является создание "бездатчиковых" систем, не содержащих датчика положения ротора, существенно ограничивающего область применения электрических машин.

Наиболее же рациональным является использование в составе регулируемого герметичного электропривода синхронной электрической машины с магнито-электрическим возбуждением. По информации компании DRS Power Technologies двигатели с постоянными магнитами (ПМ) на 1-2% превосходят по КПД асинхронные и синхронные двигатели с фазным полем при полной нагрузке и на 10-15% - при неполной. Эффективность обеспечивается за счет полного возбуждения ротора без тока и отсутствия соответствующих потерь на всех скоростях.

Важно, что именно применение высококоэрцитивных постоянных магнитов позволяет увеличить воздушный зазор между статором и ротором (он значительно больше, чем у АД). Это, во – первых, определяет большую механическую надёжность, а во – вторых, дает возможность разместить в зазоре тонкостенную гильзу, герметически разделяющую полости статора и ротора.

В то же время проектировщику приходится проявлять искусство компромисса, в особенности при разработке электрических машин с постоянными магнитами нового типа, когда применение встречающихся в литературе рекомендаций по выбору отношения индукции в зазоре к линейной токовой нагрузке не может быть использовано.

По аналогии с трансформацией конструкции цилиндрической машины в дисковую (рисунок 1), частично могут быть трансформированы и подходы к электромагнитным расчетам.

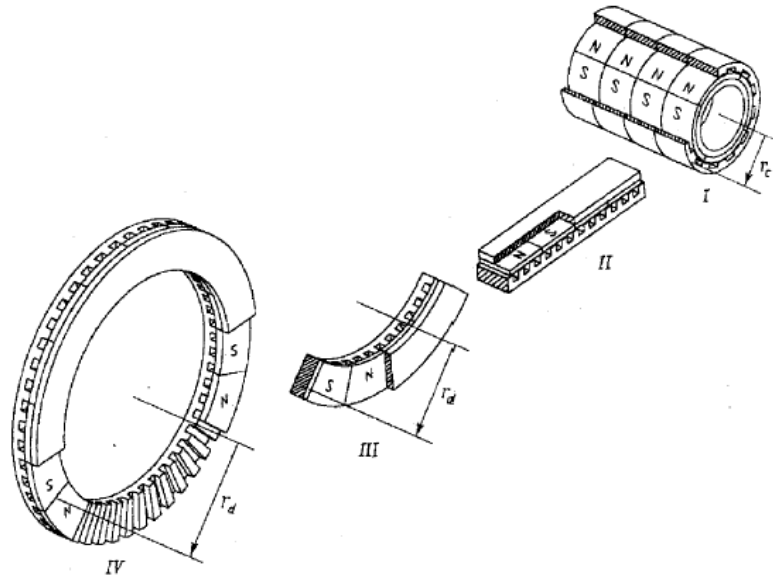


Рисунок 1 – Переход от цилиндрической конструкции к дисковой

В третьей главе предложена конструкция герметичного синхронного реактивного электродвигателя с подмагничивающим диском (ГСРДсПД), описан принцип его действия.

Развитие специального химического машиностроения выдвинуло ряд дополнительных требований к выполнению электропривода. Наиболее оптимальным вариантом является совмещение в моноблочном корпусе агрегата двигателя и рабочего органа. Однако для технологического оборудования это зачастую встречает специфические затруднения, обусловленные условиями эксплуатации, технологическими параметрами в рабочей зоне, разрушающими воздействиями рабочих сред на части привода и т. д. И тогда выполнить активный электромагнитный ротор, разместить на нем обмотку возбуждения и подавать на нее напряжение невозможно, как и создание ротора из постоянного магнита.

Фактически, единственным вариантом в таком случае является использование синхронных реактивных муфт, в которых ведущая полумуфта находится вне рабочего пространства с агрессивной средой и в то же время в полной мере используется способность создавать постоянным магнитом высокую индукцию в ограниченном объеме. Однако предлагаемое в данной работе конструктивное решение позволяет не только обеспечить полную герметичность, но и дает выигрыш в массогабаритных показателях.

Статор синхронного реактивного электродвигателя (рисунок 2), в магнитной системе которого имеется дополнительный m -полюсный подмагничивающий диск 1, передающий вращающий момент от статора к ротору через герметичную

перегородку 2, состоит из n шихтованных стержней 3, которые устанавливаются между элементами каркаса. На стержнях располагаются катушки, составляющие фазную обмотку 4 электродвигателя. Ротор 5 образован диском из ферромагнитного материала. Подмагничивающий диск 1 посажен на вал 6, который удерживается подшипниками 7 и 8.

Ротор имеет прорези и связан с валом 10, который удерживается подшипниками 11, 12 и служит для привода исполнительных устройств в герметичном объеме 13. Статор и его ядро 9 вместе с подмагничивающим диском закреплены внутри защитного корпуса 14.

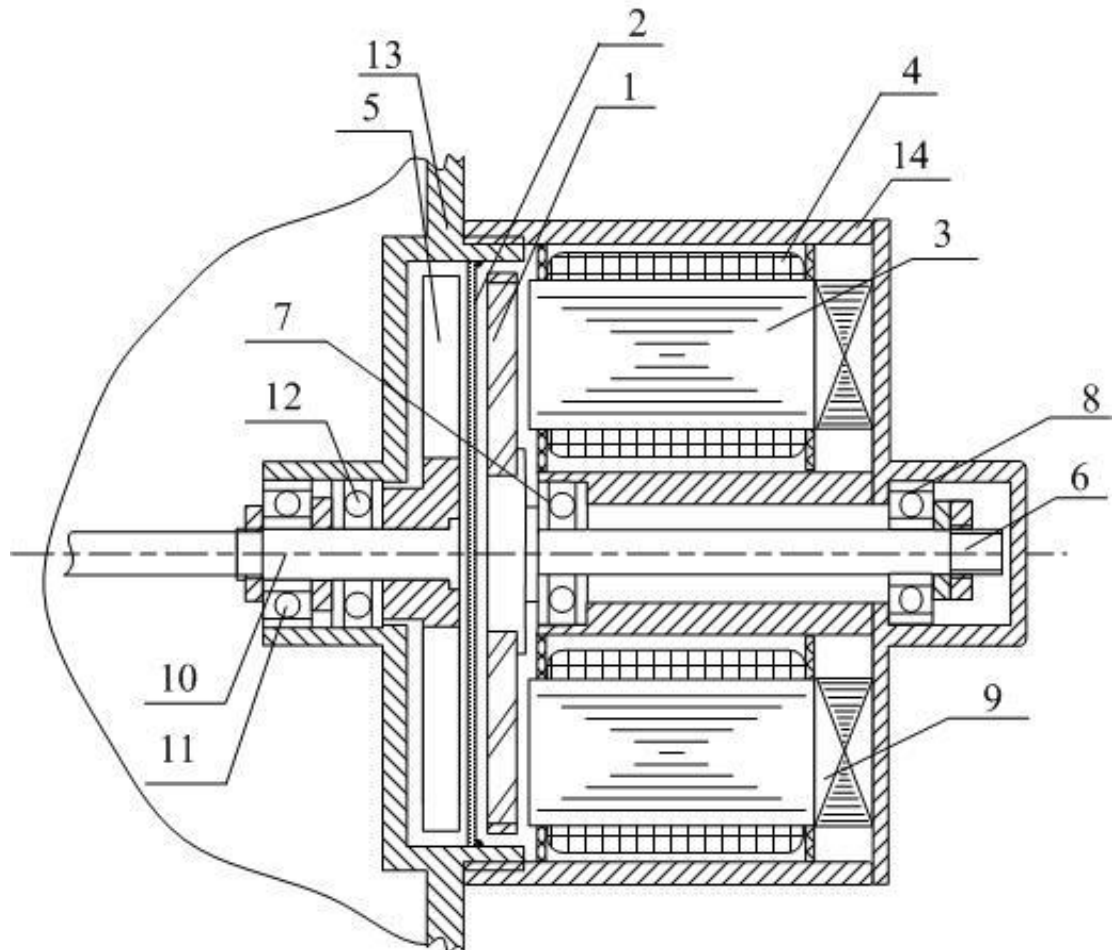


Рисунок 2 – Конструкция герметичного синхронного реактивного электродвигателя с подмагничивающим диском (ГСРДсПД)

Упрощенная схема замещения магнитной цепи (рисунок 3) предлагаемой конструкции ГСРДсПД построена с учетом наиболее вероятных путей распространения магнитных потоков.

На рисунке 3 приняты следующие обозначения:

F_m , F_s , F_{pg} – МДС полюсной системы подмагничивающего диска, обмотки якоря машины и МДС остаточной намагниченности материала ротора соответственно; λ_m , $\lambda_{\delta 1}$, $\lambda_{\delta 2}$, λ_z , λ_g – магнитные проводимости полюса подмагничивающего диска, воздушных зазоров и зубца якоря, а также ротора; λ_{js} , λ_{jg} – магнитные проводимости ярма статора и ротора; λ_{ss} , λ_{sm} , λ_{sg} – магнитные проводимости рассеяния статора, полюсной системы подмагничивающего диска и ротора машины.

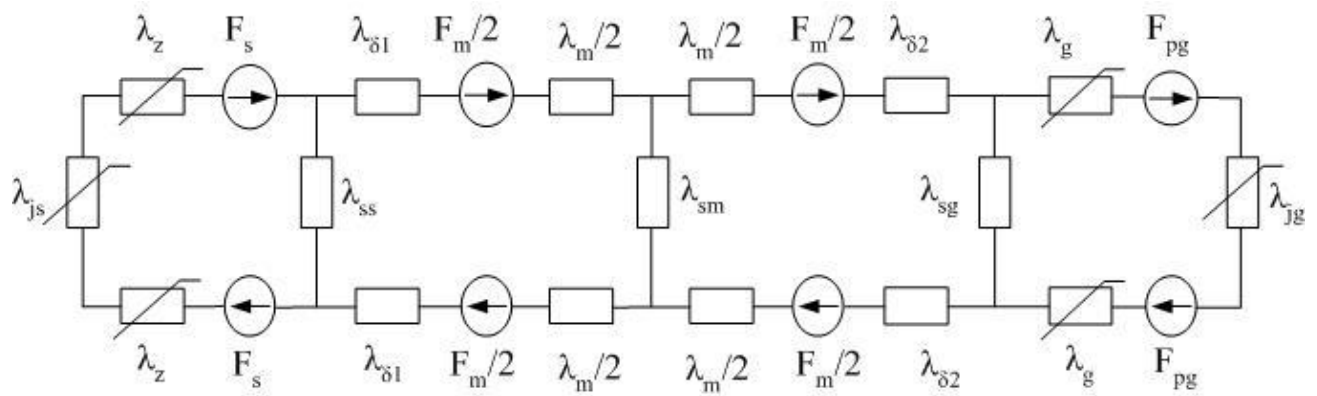


Рисунок 3 – Схема замещения ГСРДсПД

На основе представленной схемы замещения и алгоритма простых итераций в среде MatLab была написана программа, которая дает возможность рассчитывать характеристики ГСРДсПД при различных конфигурациях магнитной системы. Полученные таким образом результаты были использованы для сравнения с показателями традиционной торцевой синхронной реактивной машины с увеличенным рабочим воздушным зазором в одних и тех же габаритах, а также позволили уже на данном этапе работы выбрать параметры оптимизации (H_m – высота полюса подмагничивающего диска, H_g – высота зубца ротора; $\alpha_{срм}$, $\alpha_{срз}$ – коэффициенты полюсного перекрытия подмагничивающего диска и статора), которые описывают геометрию машины и оказывают наибольшее влияние на величину электромагнитного момента.

В четвертой главе анализируется состояние вопросов математического моделирования электромагнитных процессов в электромеханических преобразователях и разработки программных продуктов расчета магнитного поля на ЭВМ.

Обзор применения поисковых методов оптимизации показывает, что большинство из них так или иначе уже апробировано в проектировании. Однако сравнительные оценки затруднены из-за использования их в разработке различных типов электромеханических преобразователей для различных функций цели и ограничений. И все же можно отметить, что если критерий оптимальности задан не в явном виде, наиболее пригодны безградиентные методы. Поэтому в работе используется одна из разновидностей методов случайного поиска – метод наилучшей пробы, графическая интерпретация которого представлена на рисунке 4.

Применительно к оптимизационным расчетам герметичного синхронного реактивного электродвигателя с подмагничивающим диском

$x^0 = [a_1, a_2, a_3, \dots, a_n]$ – набор из n параметров, описывающих геометрию исходного варианта двигателя (начальный вариант);

y^j – семейство новых M наборов параметров геометрии, получаемых путем использования M случайных векторов ξ размерностью n (ξ_n).

Значения $f(y^m)$ получаются путем сравнения результатов, найденных при вычислении критерия оптимальности для каждого набора, входящего в семейство y^j , и выбора того варианта, при котором значение целевой функции максимально.

Поскольку функция цели сложным образом зависит от параметров системы, в любом случае необходимо найти эту связь в виде некоторой математической модели, адекватность которой должна быть достаточно высокой.

$$\vec{H}_c(p) = \frac{1}{4\pi} \iiint_V \frac{(\vec{J} \times \vec{r}_{qp})}{|\vec{r}_{qp}|^3} dV \quad (2)$$

или напряженность $\vec{H}_m$ в произвольной точке p , создаваемую магнитным материалом намагниченностью $\vec{M}$, занимающим объем V :

$$\vec{H}_m(p) = -\frac{1}{4\pi} \iiint_V \frac{\vec{M} * \vec{r}_{qp}}{|\vec{r}_{qp}|^3} dV \quad (3)$$

В (2) и (3) $\vec{r}_{qp}$ - радиус-вектор, направленный из элемента dV в точку p , в которой требуется определить $\vec{H}$.

Это позволяет учитывать реальное распределение тока в обмотках статора машины, нелинейные свойства ферромагнитных элементов конструкции и дает возможность получать картину поля в магнитной системе сложной геометрии, рассчитывать статические режимы электрических машин. Именно поэтому в работе использован один из способов реализации второго подхода к решению (1) - метод пространственных интегральных уравнений.

При таком подходе выражение для сил, действующих на намагниченные детали, с учетом использования аппроксимации в виде кусочно – постоянных распределений векторов намагниченности по объемам ферромагнитных деталей, принимает вид

$$\vec{F} = \mu_0 \sum_{j=1}^N \int_{S_j} (\vec{n}_j \vec{M}_j) \vec{H}_1 dS, \quad (4)$$

где индекс j указывает на принадлежность параметра к j – му элементарному объему, а суммирование производится по N -объемам, составляющим группу деталей магнитной системы, $\vec{H}_1$ – напряженность поля от источников, расположенных вне поверхности S , $\vec{n}$ – внешняя нормаль.

Формула (4) имеет простую структуру, однако алгоритм расчета предусматривает интегрирование по всем ограничивающим элементарные объемы поверхностям функций напряженности или индукции магнитного поля, которые в свою очередь сами вычисляются по интегральным формулам.

Прием, позволяющий получить выражения для усилий (моментов) через параметры поля, состоит во введении вспомогательных поверхностей, разделяющих взаимодействующие группы деталей магнитной системы, на которых помещаются фиктивные источники поля.

Оценка конструктивных особенностей дисковых электромеханических преобразователей указывает на целесообразность применения с такой целью бесконечной плоскости. Графическая интерпретация подхода, применяемого к дисковым электрическим машинам, представлена на рисунке 5.

Метод разделения области взаимодействия базируется на выводах теории потенциала и интегральных законах векторного анализа, в частности теореме Грина, связывающей объемные интегралы по области V и поверхностные по границе S_r этой области.

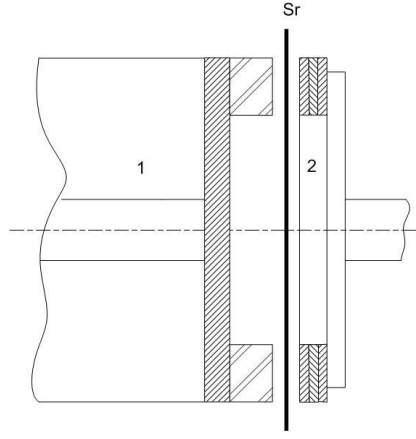


Рисунок 5 - Разделение плоскостью двух взаимодействующих элементов

Обозначим $\vec{H}_1$ и $\vec{H}_2$ – напряженности поля, создаваемые первой и второй группой взаимодействующих деталей, и отбросим одну из групп деталей, заменив ее вклад в напряженность поля в оставшейся области полем от зарядов σ на S_r .

Для этого достаточно обеспечить выполнение равенств:

- для первой группы

$$\vec{H}^* = \vec{H}_1 + \vec{H}_2 = \vec{H}_1 + \frac{1}{4\pi\mu_0} \int_{S_r} \sigma_1 \nabla \frac{1}{r} dS, \quad (5)$$

- или для второй группы

$$\vec{H}^{**} = \vec{H}_1 + \vec{H}_2 = \vec{H}_2 + \frac{1}{4\pi\mu_0} \int_{S_r} \sigma_2 \nabla \frac{1}{r} dS. \quad (6)$$

Определить фиктивные заряды на разделяющей поверхности позволяет формулировка второй краевой задачи теории потенциала. Точка наблюдения помещается на S_r и записывается уравнение для нормальной компоненты результирующей напряженности магнитного поля:

$$\vec{n}\vec{H} = \vec{n}\vec{H}^* = \vec{n}\vec{H}^{**}$$

$$\vec{n}\vec{H} = \vec{n}\vec{H}_1 + \frac{1}{4\pi\mu_0} \int_{S_r} \sigma_1 (\vec{n}\nabla \frac{1}{r}) dS + \frac{\sigma_1}{2\mu_0} = \vec{n}\vec{H}_2 + \frac{1}{4\pi\mu_0} \int_{S_r} \sigma_2 (\vec{n}\nabla \frac{1}{r}) dS - \frac{\sigma_2}{2\mu_0}, \quad (7)$$

где $\vec{n}$ – нормаль к плоскости S_r , направленная в первую область.

Поскольку S_r – плоскость, то несобственные интегралы в (7) с исключенными особенностями равны нулю, так как $\vec{n}\nabla \frac{1}{r} = 0$.

Тогда искомая сила, действующая на выделенную группу деталей системы, равна по модулю и противоположна по направлению силе, которая влияет на фиктивные заряды разделяющей плоскости:

$$\vec{F}_1 = - \int_{S_r} \sigma_1 \vec{H}_1 dS = -2\mu_0 \int_{S_r} (\vec{n}\vec{H}_2) \vec{H}_1 dS; \quad \vec{F}_2 = - \int_{S_r} \sigma_2 \vec{H}_2 dS = 2\mu_0 \int_{S_r} (\vec{n}\vec{H}_1) \vec{H}_2 dS \quad (9)$$

Для вычисления результирующих моментов относительно заданной точки О с пространственными координатами (x_0, y_0, z_0) применяется следующая формула

$$\vec{M} = \oint_{S_r} (\vec{R} \times \vec{F}) ds, \quad (10)$$

где $\vec{M}$ - вектор результирующего момента; $\mathbf{R} = \mathbf{R}_P - \mathbf{R}_O$ - радиус-вектор, соединяющий точку O с текущей точкой интегрирования P ; $\vec{F}$ - подинтегральная функция из формул для расчетов сил.

Формулы (9), (10) более экономичны (просты) при вычислениях и позволяют получить производительность и точность выше, чем при интегрировании по источникам поля (4). Это достигается за счет уменьшения по сравнению с размерами магнитной системы области интегрирования, а также из-за непрерывности подинтегральных функций и их производных, которые сглаживаются при удалении разделяющей поверхности от ферромагнитных деталей с дискретизованными источниками поля. Последнее существенно упрощает построение алгоритмов.

Вычисления поверхностного интеграла (9) осуществляется в цилиндрической системе координат с помощью формул Гаусса – Лежандра и Лагерра.

Разработанный пакет программ проектирования электромеханических устройств (рисунок 6) состоит из расчетных исполняемых модулей и программы, обслуживающей эти модули, с интуитивно понятным интерфейсом (во многом сходным с интерфейсами аналогичных по назначению программ) и стандартной последовательностью действий. Контекстно-зависимое меню значительно упрощает взаимодействие с программой.

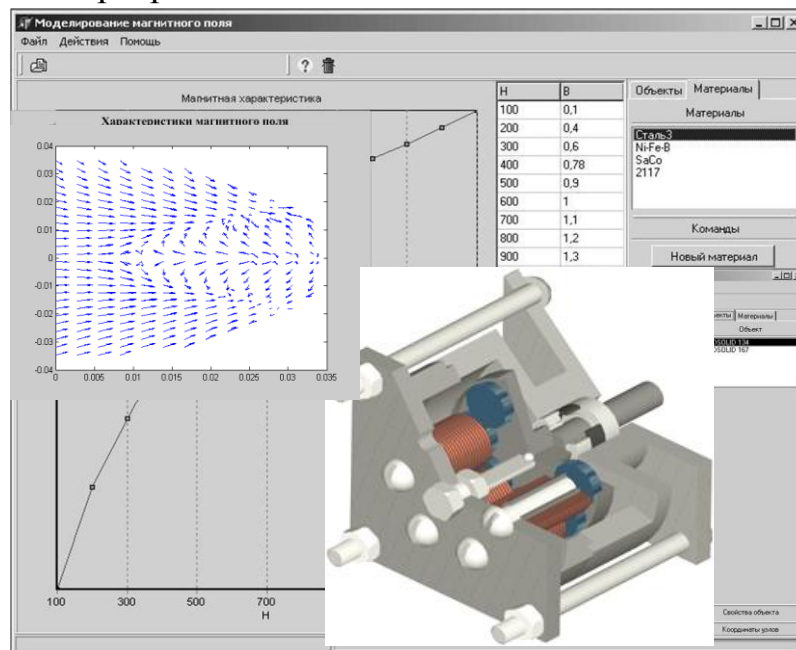


Рисунок 6 – Расчет герметичной машины в разработанном пакете программ

В пятой главе с помощью разработанного программного обеспечения проанализировано влияние геометрии ГСРДсПД на показатели машины. Проведены оптимизационные расчеты ГСРДсПД различных диаметров и сравнение полученных результатов.

Необходимо учитывать, что если в результате проектирования и длительной эксплуатации электродвигателей общепромышленного назначения выработаны известные из литературы рекомендации для выбора рационального соотношения главных размеров, значения магнитной индукции на различных участках магнитной цепи, линейной нагрузки, то дисковые герметичные двигатели составляют

отдельную группу, резко отличающуюся своими конструктивными данными и распространять на них известные рекомендации нельзя.

Отметим, что обмоточные данные и размеры, выбранные в качестве параметров оптимизации, отличаются тем, что первые изменяются дискретно, а вторые - непрерывно (или могут быть приняты изменяющимися непрерывно). Поэтому оптимизация проводится последовательно: размеры в качестве непрерывных параметров оптимизируются при фиксированных постоянных значениях обмоточных данных (и так для каждой разумной их совокупности). Из полученного ряда выбирается путем сравнения наилучший вариант.

С учетом изложенного задача оптимизации проектируемого ГСРДсПД была сведена к максимизации статического удельного момента на валу двигателя.

Исходные данные к началу оптимизационных расчетов приведены в таблице.

Таблица 1 – Исходные данные к оптимизации

Параметры оптимизации							
H_m , мм		H_g , мм		$\alpha_{срм}$		$\alpha_{срз}$	
max	min	max	min	max	min	max	min
8	2	8	2	0,9	0,45	0,75	0,35
Критерий оптимальности (удельный момент)			Ограничения				
			ρ , А/мм ²		B_j , Тл		B_z , Тл
Максимум M / V_{mash} , Н*м / м ³			3,5		1, 6		1,8

В соответствии с данной формулировкой задачи и разработанными алгоритмами произведен расчет ряда ГСРДсПД с внешними диаметрами 70, 80, 90, 100, 110 и 120 мм и длиной 40, 60 и 80 мм.

Наиболее удачной конфигурацией магнитной системы во всем представленном диапазоне изменения диаметров является соотношение зубцов статора к зубцам (полюсам) ротора – 18/12. При этом увеличение внешнего диаметра с 80 до 120 мм при длине ГСРДсПД 80мм приводит к росту удельного момента в 1,65 раза (рисунок 7).

На рисунке 8 приведены результаты многочисленных оптимизационных расчетов, целью которых было определение длины ГСРДсПД, являющейся граничной величиной, после которой никакое варьирование параметров оптимизации не приводит к росту выбранного критерия оптимальности. Как видно, каждая кривая имеет явно выраженный максимум, следовательно, можно вести речь об оптимальной длине электрической машины. Полученные кривые используются при формулировке рекомендаций по выбору внешних размеров ГСРДсПД.

На рисунке 9 приведены зависимости высоты магнита от линейных габаритных размеров ГСРДсПД. Также было рассмотрено влияние размеров магнита от диаметра машины при оптимальной длине ГСРДсПД, получены значения удельного момента при варьировании коэффициентами полюсного перекрытия статора и ротора.

В связи с отсутствием общепринятой методики проектирования оптимальных герметичных синхронных электрических машин с подмагничивающим диском в работе предлагается следующий подход: 1) на предварительном этапе выбор геометрии ГСРДсПД при заданных требованиях по удельному показателю

(при условии $M_{ud} \leq 800 \text{ Н*м/м}^3$) осуществляется на основе уже накопленных результатов проведенных оптимизационных расчетов и выработанных на их основе рекомендаций; 2) полученные таким образом параметры ГСРДсПД следует уточнить путем проведения численного моделирования магнитного поля и анализа работы устройства в различных режимах.

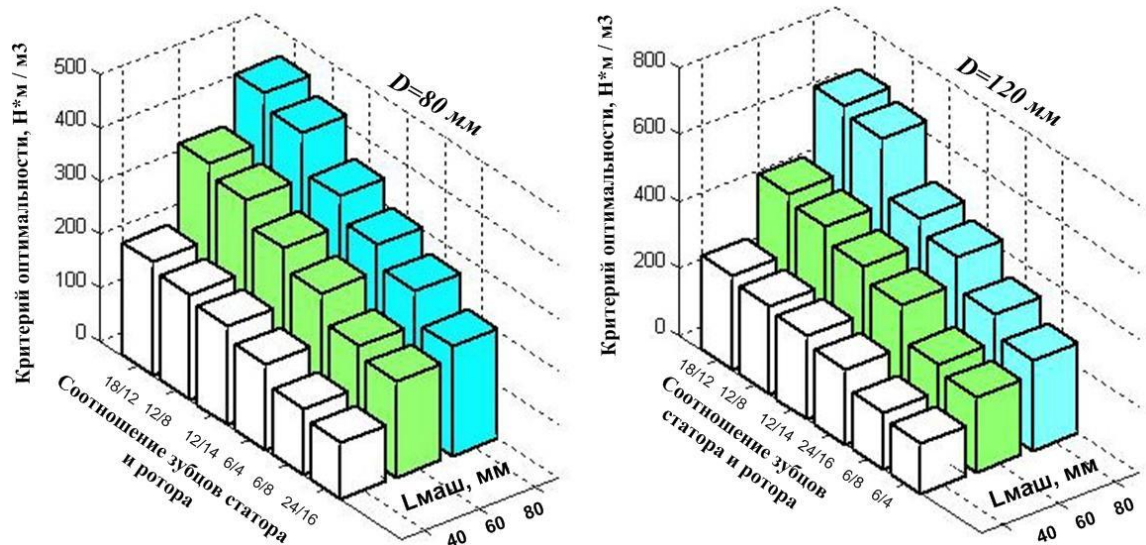


Рисунок 7- Значения удельного момента для ГСРДсПД с внешними диаметрами 80 и 120 мм

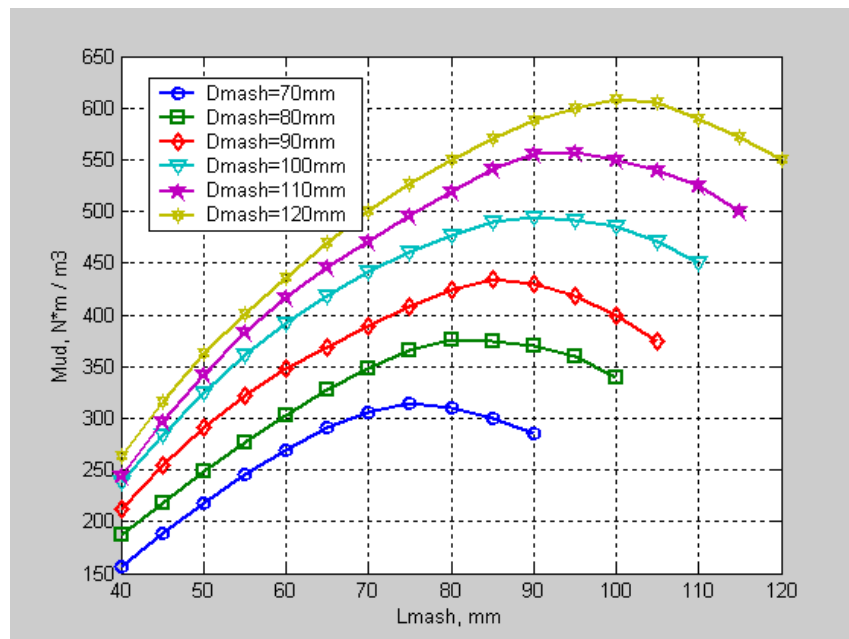


Рисунок 8 – Зависимости значения удельного момента ГСРДсПД от длины машины для разных внешних диаметров

В шестой главе описан спроектированный образец ГСРДсПД и аппаратура для его испытаний.

Все работы по изготовлению и испытанию макетного образца были выполнены в лаборатории кафедры электропривода и автоматики Северского технологического института НИЯУ МИФИ. В ходе экспериментов: 1) исследовано магнитное поле в рабочем зазоре; 2) рассмотрено влияние величины воздушного зазора на выходные характеристики электрической машины для определения воз-

возможности герметичного исполнения статора; 3) снято семейство моментных характеристик.

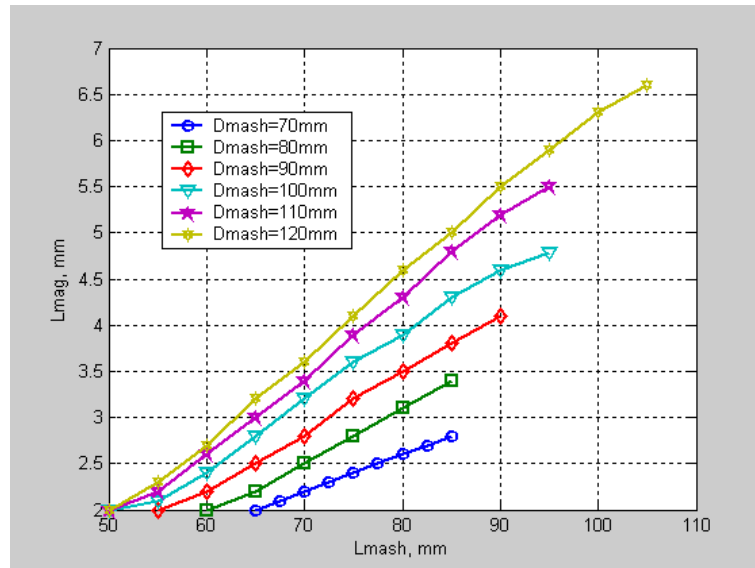


Рисунок 9 – Оптимальная высота магнита в заданных габаритах ГСРДсПД

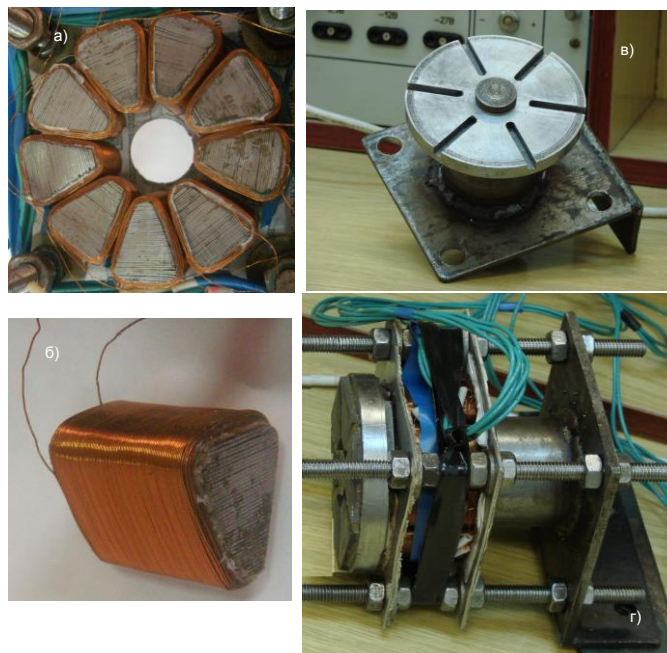


Рисунок 10 – а) статор ГСРДсПД, б) зубец статора, в) ротор ГСРДсПД, г) общий вид экспериментального образца

На рисунке 11 приведены характеристики, относящиеся к макетному образцу, величина рабочего воздушного зазора которого изменялась от 2 мм до 5 мм. Измерялись токи и напряжения на входе электрохимического преобразователя, моменты нагрузки, скорость двигателя. Полезная мощность, значения КПД рассчитывались по измеренным значениям.

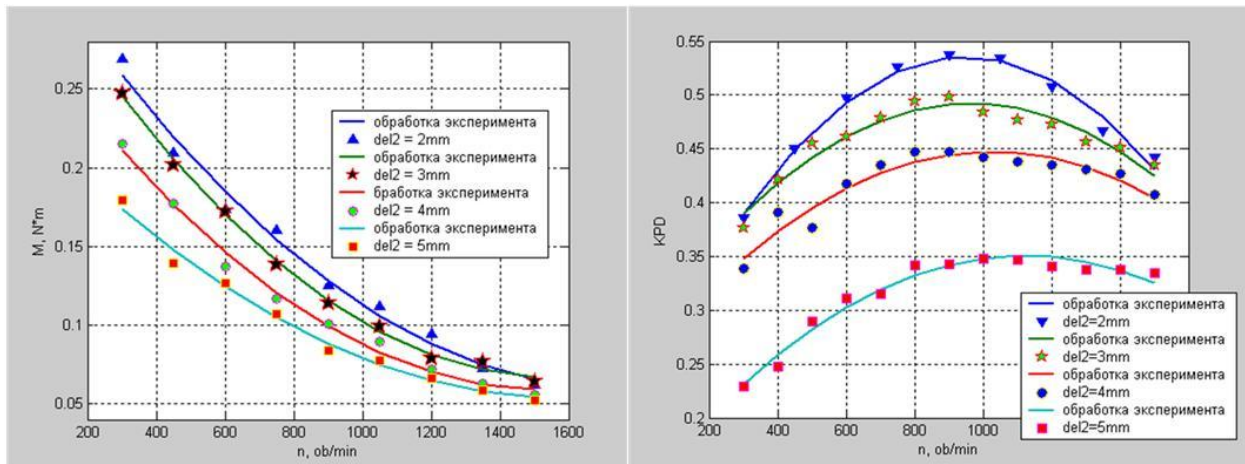


Рисунок 11 – Механические характеристики ГСРДсПД и его энергетические показатели

Проведенные исследования ГСРДсПД показали принципиальную возможность создания на его основе регулируемого электропривода с достаточно высокими энергетическими показателями. При этом обеспечивается устойчивый плавнорегулируемый режим работы электрической машины при скоростях от 300 до 1500 об/мин и рост электромагнитного момента (в зависимости от величины воздушного зазора) на низких скоростях до 0,179 – 0,27 Н*м.

Следует отметить, что испытуемый образец имел значительный запас по нагреву, обусловленный пониженными значениями токов в фазах статора.

Наряду с экспериментальными исследованиями ГСРДсПД были выполнены и его расчеты с помощью разработанного программного комплекса.

Сопоставление полученных результатов позволило сделать вывод о том, что расхождение находится в пределах погрешности эксперимента – 12,5 %. Это подтверждает достаточно высокую адекватность разработанной компьютерной модели.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Развитие работ по герметизации технологических машин и аппаратов отражает одну из главных тенденций в химическом машиностроении, при этом наиболее целесообразно использовать в составе бездатчикового регулируемого герметичного электропривода синхронную электрическую машину с магнитоэлектрическим возбуждением.

2. При необходимости обеспечения максимальной простоты стыковки с рабочим органом исполнительного механизма и получения наибольшей величины удельного момента эффективно конструировать синхронный двигатель в виде дисковой конфигурации при соблюдении условия $D_a / l \geq 6,76 / K_a^3$.

3. Удельные моментные характеристики герметичного синхронного реактивного электродвигателя, в магнитной системе которого имеется подмагничивающий диск (ГСРДсПД), полученные на основе разработанной схемы замещения и проведенных расчетов, во всем диапазоне изменения внешних диаметров (от 60 до 140 мм) и частот вращения (от 300 до 900 об/мин) лучше показателей герметичного торцевого реактивного электродвигателя (выигрыш достигает до 1,38 раза).

4. Для учета нелинейных свойств ферромагнитных элементов конструкции и получения объемной картины поля в магнитной системе ГСРДсПД необходимо использование метода пространственных уравнений; для проведения оптимизационных расчетов ГСРДсПД по критерию максимума удельного момента наиболее пригодны безградиентные методы (среди них легче всего реализуются на ЭВМ методы случайного поиска).

5. При расчетах ГСРДсПД в качестве параметров оптимизации, как оказывающие наибольшее влияние на величину удельного момента, были выбраны: число полюсов ротора и зубцов статора, высота полюса ротора, высота магнитов подмагничивающего диска, коэффициенты полюсного перекрытия статора и ротора.

6. На основе созданной математической модели магнитной системы ГСРДсПД с помощью решения интегральных уравнений магнитного поля и модели расчета силовых характеристик электромеханического преобразователя, отличающейся численной реализацией метода разделяющей плоскости для получения значения момента, разработан алгоритм, который позволяет производить анализ электромагнитных процессов в дисковых электрических машинах (в том числе и оригинальных конструкций, для которых отсутствуют инженерные методики расчета) и их оптимизацию по заданному критерию.

7. Наиболее удачной конфигурацией магнитной системы во всем исследованном диапазоне внешних диаметров является соотношение зубцов статора к зубцам (полюсам) ротора – 18/12. При этом увеличение радиального размера с 80 до 120 мм при длине ГСРДсПД 80мм приводит к росту удельного момента в 1,65 раза.

8. Найдены оптимальные соотношения внешних диаметров ГСРДсПД и его активных длин, составляющие $D_a = (1,2 - 0,9) \cdot l$.

9. При проектировании ГСРДсПД обозначенных внешних диаметров и конфигурации магнитной системы оптимальные показатели можно получить при следующих значениях коэффициентов полюсного перекрытия статора и ротора: $\alpha_{срз} = 0,475$ и $\alpha_{срм} = 0,825$.

10. Сформулированы рекомендации по проектированию ГСРДсПД, которые позволяют не применяя специальные математические методы и пакеты программ, выбрать оптимальные размеры активной зоны для получения наибольшего удельного момента герметичной машины в исследуемом диапазоне.

11. Проведенные экспериментальные испытания ГСРДсПД показали принципиальную возможность создания на его основе регулируемого электропривода с приемлемыми энергетическими показателями ($\eta = 54\%$). При этом обеспечивается устойчивый плавнорегулируемый режим работы электрической машины при скоростях от 300 до 1500 об/мин и рост электромагнитного момента (в зависимости от величины воздушного зазора) на низких скоростях до 0,179 – 0,27 Н*м.

12. Максимальное расхождение экспериментальных и расчетных данных ГСРДсПД составило 12,5%. Это позволяет сделать вывод об адекватности компьютерной модели и о перспективности использования разработанного пакета программ для исследования дисковых герметичных электрических машин.

Автор благодарит научного консультанта, кандидата технических наук **Леонова Сергея Владимировича** за внимательное отношение к работе и практическую помощь в решении поставленных задач.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

Научные публикации по теме диссертации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Муравлев О.П., Леонов С.В., Калаев В.Е. и др. Вопросы исследования трехмерных магнитных полей электрических машин с аксиальным магнитным потоком // Известия высших учебных заведений Электромеханика. - 2004. - №5.

2. Муравлев О.П., Леонов С.В., Калаев В.Е. и др. Исследование герметичной синхронной машины дискового типа // Известия высших учебных заведений Электромеханика. – 2006. - №3.

Другие научные публикации по теме диссертации

1. Физико–математическая модель и программное обеспечение для расчета магнитных систем с постоянными магнитами: Отчет о НИР (промежуточн.) / Северский государственный технологический институт (СГТИ); Руководитель С.В. Леонов; Авторы: С.В. Леонов, В.Е. Калаев, А.В.Лялин; № ГР 01.2.00317187; Инв. № 0220.0 503697. - Северск, 2005. - 54с.

2. Калаев В.Е., Леонов С.В., Щипков А.А. Герметичный электропривод // Инновации: экономика, образование, технологии: Сборник статей - Северск: СГТА, 2005. С.181-191.

3. Леонов С.В., Калаев В.Е. Применение САД-технологий при проектировании электро-механических устройств // Оптимизация режимов работы электротехнических систем: межвуз. сб. науч. тр. / Отв. ред. С.Р. Залялеев. – Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2006. С. 259 -265.

4. Калаев В.Е., Щипков А.А., Леонов С.В. Опыт создания двигателей герметического исполнения // Технология и автоматизация атомной энергетики: Сборник статей. – Северск: СГТА, 2006. С.44-48.

5. Leonov S.V., Kalayev V.E., Shipkov A.A., Grasmik W. WAYS OF ROTATING MOTION DRIVING GEARS GLOSURE // European Journal of Natural History, №6, 2006, с.81-86.

6. Калаев В.Е., Леонов С.В. Электродвигатель дискового типа для герметичного технологического оборудования // Сборник материалов V международной научной конференции по автоматизированному электроприводу. Санкт - Петербург, 2007. С. 243 – 247.

7. S.V. Leonov, O.P. Muravlev, V.E. Kalaev, A.L. Fedyanin. The Engineering Support of Technologies of the Power Complex // The 9-th Korean –Russian International Symposium on Science & Technology (KORUS 2005), Novosibirsk: NSTU, 2005. Vol.2, с.268-272.

8. Калаев В.Е., Леонов С.В., Муравлев О.П. Технология проектирования синхронных электрических машин // Актуальные проблемы ресурсо- и энергосберегающих электротехнологий. Труды Всероссийской научно - технической конференции с международным участием. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ – УПИ, 2006. С. 212 – 216.

9. Калаев В.Е., Леонов С.В., Щипков А.А. Экранированный тихоходный двигатель дискового типа //Электромеханические преобразователи энергии: международная НТК. Томск: ТПУ, 2005. С.159-162.

10. Калаев В.Е., Леонов С.В. Актуальность и вопросы использования герметичных электрических машин // Труды XI Международной конференции "Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты ", МКЭЭЭ-2006 (ICEEE). Москва: ГОУВПО "МЭИ", 2006. Часть 1, с.196-198.

11. Калаев В.Е., Леонов С.В., Щипков А.А. Полевые методы исследования электромеханических устройств // "Электронные и электромеханические системы и устройства ": Тез. докл. XVII науч.-техн. конф. Томск: ФГУП "НПЦ "Полус", 2006. С.163-165.

12. Калаев В.Е., Леонов С.В., Щипков А.А. Синхронный реактивный двигатель со статорной перегородкой для технологий ядерно-энергетического комплекса // "Наука. Технологии. Инновации" Материалы всероссийской научной конференции молодых ученых в 7-ми частях. Новосибирск: НГТУ, 2006. Часть 3, с. 88-90.

13. Калаев В.Е. Варианты решения задачи оптимизации электромеханического преобразователя // Инновации в атомной отрасли: Сборник статей. – Северск: Изд. СГТА, 2007. – с. 53-57.
14. Калаев В.Е., Щипков А.А., Леонов С.В. Электрическая машина специального исполнения для химических производств // Технология и автоматизация атомной энергетики и промышленности: Материалы отраслевой научно - технической конференции. Северск: СГТА, 2006. С.50.
15. Калаев В.Е., Леонов С.В. Разработка конструкции синхронного двигателя защищенного исполнения // Четвертая молодежная научно - практическая конференция "Ядерно – промышленный комплекс Урала: проблемы и перспективы". Тезисы докладов. Озерск: ФГУП "ПО "Маяк", 2007. С.252 – 254.
16. Калаев В.Е., Леонов С.В., Щипков А.А. Разработка электромеханического преобразователя с активным и реактивным дисками в магнитной системе // XIII Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых "Современная техника и технологии", Труды. Томск: ТПУ, 2007. Т.1., с.423 – 426.
17. Калаев В.Е., Леонов С.В., Щипков А.А. Постановка задачи оптимального проектирования магнитоэлектрических машин // Технология и автоматизация атомной энергетики и промышленности ТААЭП-2007: Материалы отраслевой научно-технической конференции. Северск: СГТА, 2007.
18. Калаев В.Е. Об использовании метода разделяющей плоскости для вычисления момента дисковых электрических машин // Технология и автоматизация атомной энергетики и промышленности: Материалы отраслевой научно-технической конференции. Северск: СГТА, 2009. С.47.
19. Калаев В.Е., Леонов С.В. Методика проектирования и оптимизации нетрадиционных электромеханических преобразователей // Современная техника и технологии: Сборник трудов XV Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных. Томск: ТПУ, 2009. С. 425-426.
20. Калаев В.Е., Леонов С.В. Программа 3D-Field как средство моделирования электромагнитных полей // Молодежь ЯТЦ: Наука и производство. Материалы конференции. Томск: ТГУ, 2004. С.18-20.
21. Фокин В.В., Леонов С.В., Калаев В.Е. Разработка программного комплекса моделирования электромеханических устройств // Молодежь и современные информационные технологии: сборник трудов IV Всероссийской научно – практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Томск: ТПУ, 2006. С. 281 – 283.
22. Калаев В.Е., Леонов С.В., Щипков А.А. Обеспечение герметичности электрической машины // XII Международная научно-практическая конференция студентов и молодых ученых "Современная техника и технологии", Труды в 2-х т. Томск: ТПУ, 2006. Т.1, с.260 – 262.
23. Калаев В.Е. Повышение точности расчета электромеханических преобразователей // Инновации в атомной отрасли: проблемы и решения: Материалы научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Северск: СГТА, 2007. С.31.
24. Леонов С.В., Каранкевич А.Г., Калаев В.Е. Исследование магнитного поля электрических машин с аксиальным магнитным потоком // Электроэнергетика, электротехнические системы и комплексы: Материалы международной науч.- техн. конф., Томск: ТПУ, 2003. С. 120 – 122.
25. Калаев В.Е. Компьютерная модель электромеханического преобразователя // Инновации в атомной отрасли: проблемы и решения : материалы научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Северск : СГТА, 2008.
26. Калаев В.Е., Леонов С.В. Оптимизация электромеханических устройств модифицированным методом // Современная техника и технологии: Труды XIV Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Томск: ТПУ, 2008. С. 377-379.