

на правах рукописи

Федянин Александр Леонидович

**ГЕРМЕТИЧНЫЙ СИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ
ДЛЯ ХИМИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА**

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

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

Томск 2007

Работа выполнена на кафедре электрических машин и аппаратов
Томского политехнического университета

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Муравлев Олег Павлович

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
Селяев Александр Николаевич,
Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники

кандидат технических наук, доцент
Педиков Виктор Михайлович,
Томский государственный архитектурно-
строительный университет

Ведущая организация: ГНУ НИИ АЭМ при ТУСУР, г. Томск.

Защита диссертации состоится 08 ноября 2007 г. в 15⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета К212.269.03 в 331 аудитории 8 корпуса Томского политехнического университета (634034, г. Томск, пр. Ленина, 30, ТПУ).

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ТПУ по адресу: 634034, г. Томск, ул. Белинского, д.55

Автореферат диссертации разослан «05» октября 2007 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент _____ Ю.Н. Дементьев

Актуальность работы. Герметичные электрические машины предназначены для работы на ядерно-химических производствах для обеспечения безопасности, защиты обслуживающего персонала и окружающей среды от вредного воздействия, в условиях аварийных режимов работы, со стороны технологического оборудования. Эксплуатация герметичных асинхронных двигателей в течение многих лет показала, что они имеют малый срок службы, вызванный проникновением внутрь технологических жидкостей вызывающих разрушающее действие на конструктивные элементы машины.

Одним из слабых мест в герметизации машины является узел сочленения валов электродвигателя с исполнительным механизмом. Всевозможные попытки защитить узел сочленения валов различными типами уплотнения не принесли успеха. Наиболее распространенным способом герметизации асинхронных двигателей, получили защитные гильзы, которые устанавливались между статором и ротором электрической машины, защищая обмотки статора от воздействия среды. Однако такой способ, в силу уменьшения энергетических показателей ставит вопрос о разработке нового типа герметичных электрических машин.

Решить данную задачу удалось благодаря успехам в разработке и освоении редкоземельных постоянных магнитов, с высокой магнитной энергией и исследованию торцевых электрических машин. В разработке и исследовании нового типа двигателя, герметизация осуществляется сплошным неподвижным экраном, который располагается между технологическим оборудованием и двигателем, при этом крутящий момент электродвигателя передается к рабочему органу через герметизирующую перегородку, выполненную из материалов стойких к агрессивной среде. Электродвигатель такого типа является объектом исследования в настоящей работе.

Использование электродвигателя дискового типа позволяет максимально упростить конструкцию герметизирующего экрана и выполнить электрическую машину более надежной, так как основная часть двигателя остается вне зоны технологической емкости. Внедрение нового типа двигателя повышает экономическую эффективность за счет уменьшения затрат на ремонт оборудования и увеличения межремонтных сроков.

Однако анализ научно-технического состояния данной области техники показал, что разработка такого рода машин требует решения ряда задач, которые в настоящее время недостаточно проработаны и слабо освещены в технической литературе.

В данной работе проводится разработка герметичного синхронного двигателя с двумя магнитосвязанными роторами. За счет использования предложенной нами конструкции предполагается увеличение времени безотказной работы привода за счет герметичного исполнения магнитной системы машины.

Задачей разработки нового электродвигателя является исследование электромагнитных процессов, протекающих в электрической машине при двухроторном исполнении с магнитной связью между дисками роторов. Снижение зубцового эффекта, моделирование процессов при наличии маг-

нитной связи, анализ динамических характеристик машины является основным направлением исследовательской работы. Также не достаточно изученным является влияние величины воздушного зазора на форму внешних характеристик вследствие объемного распределения характеристик магнитного поля в рабочем воздушном зазоре электрической машины с аксиальным магнитным потоком. Данное исследование необходимо проводить с использованием методов и алгоритмов, позволяющих анализировать параметры трехмерных магнитных полей и моделировать на базе их характеристики машины при изменении угла положения ротора относительно статора машины. Построение, таким образом, динамических характеристик способствует более глубокой проработке конфигурации активной зоны, а значит и разработке синхронного двигателя с наилучшими энергетическими показателями при условии герметичного исполнения магнитной системы.

В целом, разработанные математические модели и результаты теоретических и экспериментальных исследований могут быть использованы при создании герметичных электромашинных для ядерно-химических производств.

Диссертационная работа была поддержана грантами:

- Президента Российской Федерации № МК-1128.2004.8,
- индивидуального гранта Томского политехнического университета, приказ ректора от 07/05/07 № 2593.

Целью является разработка и исследование герметичного синхронного двигателя с двумя магнитосвязанными роторами для химического производства. В связи с этим решаются следующие задачи:

- разработка математических моделей для исследования трехмерного магнитного поля синхронного двигателя;
- проведение комплекса теоретических исследований для поиска наилучших размеров геометрии магнитной системы;
- создание программного комплекса, позволяющего автоматизировать проектирование синхронных машин с постоянными магнитами;
- разработка конструкции синхронного двигателя;
- изготовление макетного образца синхронного двигателя для экспериментальной оценки результатов теоретических исследований.

Научной новизной работы является:

1. Разработана модель электромеханического устройства на основе расчета трехмерного магнитного поля для моделирования динамических режимов работы синхронных дисковых двигателей с магнитосвязанными роторами, позволяющая исследовать устойчивость работы электрической машины.
2. Предложена новая конструкция герметичного синхронного двигателя дискового типа с магнитосвязанными роторами.

3. Разработана алгоритмическая модель синхронного двигателя дискового типа на основе комбинированного метода для исследования статических характеристик и геометрии магнитной системы.
4. Создана математическая модель процесса взаимодействия магнитосвязанных роторов в дисковой синхронной электрической машине для динамических режимов работы.

Практическую ценность представляют следующие результаты исследовательской работы:

1. Разработана конструкция герметичного синхронного двигателя с двумя магнитосвязанными роторами для оборудования химического производства.
2. Предложена методика расчета стационарных электромагнитных процессов, позволяющая исследовать внешние характеристики машины с магнитосвязанными полюсами.
3. Разработан алгоритм полевой модели электромеханического устройства для моделирования и исследования динамических режимов работы.
4. Создан программно-вычислительный комплекс моделирования статических и динамических электромагнитных процессов, с учетом использования современных численных методов, которые позволяют проводить исследования дисковой электрической машины с постоянными магнитами.

Методы исследования

При исследовании электромагнитных процессов, протекающих в магнитной системе дискового двигателя, в настоящей работе использовались: теория электрических машин; метод интегрирования по источникам поля; трехмерные математические модели электромагнитного поля; метод простых итераций и метод Зейделя для решения систем нелинейных уравнений; матрично-топологический метод теории графов; элементы метода Иванова-Смоленского, а также эксперименты с макетными образцами синхронного дискового двигателя. Все исследования проведены с применением современной вычислительной техники.

Апробация

Результаты проведенных исследований докладывались, обсуждались и получили одобрение на следующих конференциях:

- VIII всероссийская научно-техническая конференция “Современные тенденции в развитии и конструировании коллекторных и других электромеханических преобразователей энергии” (г. Омск, 2003г);
- международная научно-техническая конференция “Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири” (г. Иркутск, 2005г);
- международная научно-техническая конференция с международным участием “Электротехника, электромеханика и электротехнологии” (г. Новосибирск, 2005г);

- международная научно-техническая конференция “Электромеханические преобразователи энергии ” (г. Томск, 2005г);
- XI международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых учёных “Современные техника и технологии” (г. Томск, 2005г);
- всероссийская научно-техническая конференция с международным участием “Актуальные проблемы энергосберегающих электротехнологий” (г. Екатеринбург, 2006г);
- XI международная конференция “Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты”, МКЭЭЭ-2006, (г. Алушта 2006);
- XII международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых учёных “Современные техника и технологии” (г. Томск, 2006г);
- всероссийская научно-техническая конференция молодых учёных “Наука. Технологии. Инновации” (г. Новосибирск, 2005г);
- всероссийская конференция-конкурсного отбора инновационных проектов студентов и аспирантов “Энергетика и энергосбережение” (г. Томск, 2006г).

Публикации

По результатам выполненной работы опубликовано 17 докладов, 1 научная статья и оформлена заявка на патентование вновь разработанной конструкции синхронного двигателя, предназначенного для работы в условиях ядерно-химического производства.

Реализация результатов работы

Основные выводы, полученные при исследовании синхронного двигателя с магнитосвязанными роторами, используются при разработке синхронных двигателей в насосах для откачки электролитов, по заданию ООО “Завод нестандартного оборудования”.

Разработанная конструкция синхронного двигателя с магнитосвязанными роторами, а так же теоретические и экспериментальные исследования используется при совершенствовании конструкций синхронных электрических машин в ООО “Тетран”.

На основе приведенной методики расчета трехмерных магнитных полей разработана компьютерная программа, которая используется в учебном процессе при подготовке студентов в ФГОУ ВПО “Северская государственная технологическая академия”.

Структура и объем диссертации. Работа состоит из пяти разделов и заключения, содержащих 145 страниц машинописного текста, 8 таблиц и 35 рисунков, списка литературы из 94 наименований и приложений.

В первом разделе обоснована актуальность задач разработки и исследования герметичных электрических машин. Сформулирована цель, поставлены основные задачи, описана научная новизна и практическая ценность

диссертационной работы, приведена краткая аннотация выполненной работы по разделам.

Во втором разделе проведен обзор существующих конструкций герметичных электрических машин ядерно-химических производств, изложены основные технические требования и условия эксплуатации герметичного двигателя.

Для повышения эффективности работы на большинстве ядерно-химических предприятий встает вопрос о модернизации технологического оборудования в связи с его износом, а также с непрерывным расширением и увеличением мощности производства. Вопрос модернизации должен затрагивать не только замену основного оборудования, но и решать проблему герметизации вспомогательного электрооборудования, использующего электропривода с герметичным электродвигателем. Актуальность герметизации отдельных установок несомненна в связи с высокой степенью химической активности перерабатываемых веществ, представляющих потенциальную опасность не только для технологического оборудования, но и для окружающей биологической среды.

Таким образом, через место ввода движущихся частей при повышении давления или температуры возникает опасность выброса из технологического аппарата в окружающую среду высокотоксичных и агрессивных материалов. При аварийных ситуациях, вследствие внештатной работы технологического оборудования может быть нанесен непоправимый ущерб здоровью обслуживающего персонала.

Анализ научно-технического состояния данной области техники показал, что разработка такого рода машин требует решения ряда задач, которые в настоящее время недостаточно проработаны и слабо освещены в технической литературе. Для решения поставленной задачи предложена конструкция герметичной синхронной электрической машины дискового типа (рис. 1), выполненная на базе аксиальной машины, которая наряду с перечисленными достоинствами торцевых двигателей позволяет повысить выходную мощность.

В данной работе выбран синхронный двигатель с постоянными магнитами, который может быть применен в качестве приводного двигателя в тяжелых условиях эксплуатации. Синхронный двигатель выполнен по классической схеме с радиальным направлением магнитного потока в воздушном зазоре. Магнитное поле двигателя создается постоянными магнитами, расположенными на роторе электрической машины. Статор машины содержит трехфазную обмотку. Выводы статорной обмотки соединяются с разъемом наконечника, через который осуществляется электропитание синхронного двигателя.

В предлагаемой конструкции двигатель состоит из двух дисков, на которых расположены высококоэрцитивные постоянные магниты (рис. 2). Постоянные магниты устанавливаются и удерживаются на дисках посредством сил магнитного притяжения.

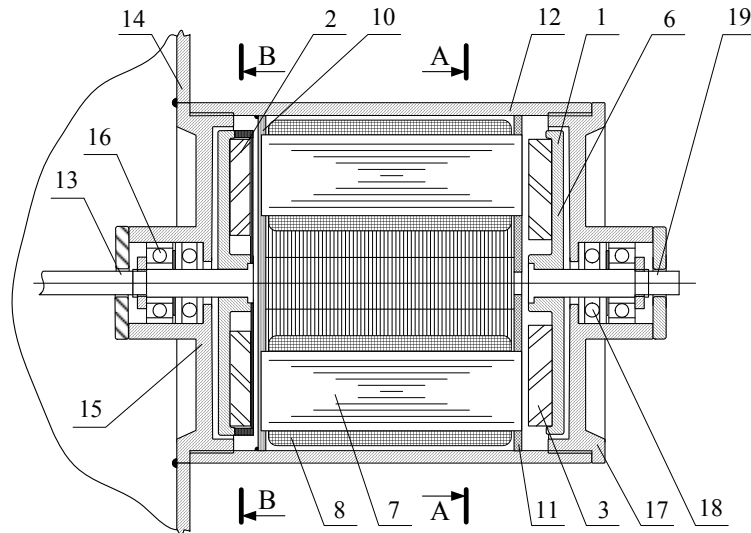


Рис. 1 Конструкция герметичной синхронной машины дискового типа
1 – ротор; 2,3 – диски; 3 – магниты; 6 – ярмо; 7 – статор; 8 – стержни; 10 – герметичная перегородка; 11 – каркас; 12 – корпус .13 – вал; 14 – часть технологического аппарата; 15,17 – щит; 16,18 – подшипники

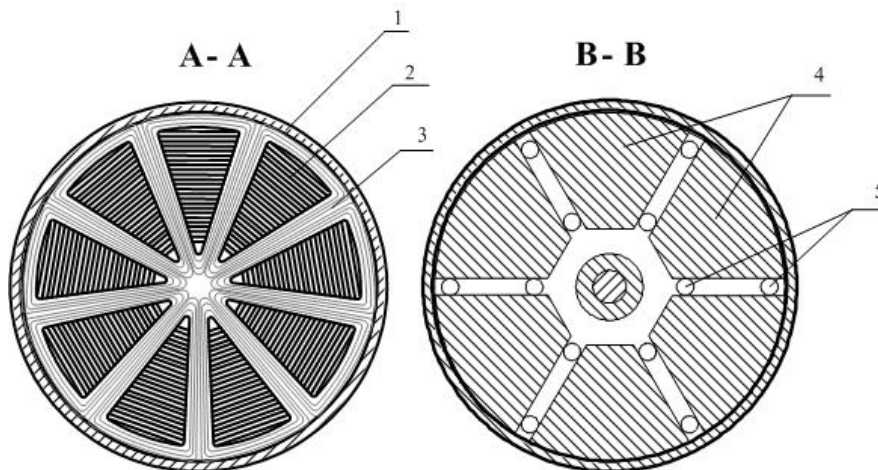


Рис. 2 Эскиз сечения статора и ротора

1 – корпус; 2 – стержень; 3 – обмотка; 4 – постоянные магниты; 5 – упоры

Эскизы сечения статора и ротора приведены на рис 2. Упоры служат для предотвращения проскальзывания магнитов относительно ярма машины. Между дисками ротора находится статор, содержащий n количество стержней (рис 2) с намотанной на них обмоткой. Стержни статора закреплены между герметичной перегородкой и каркасом, которые выполнены из немагнитного материала. Статор 7 размещается внутри прочного корпуса. При этом диск устанавливается на валу внутри технологического аппарата и удерживается щитом с подшипниками. К щиту резьбовым соединением прикрепляется прочный корпус. Диски и ротора взаимно притягиваются за счет магнитных сил и функционируют синхронно. Герметичная перегородка 10 и щит имеют сварное соединение с прочным корпусом и со стенками технологического аппарата. Постоянные магниты диска закрыты снаружи обечай-

кой 19 из немагнитного материала. Стержни статора выполняются из листов электротехнической стали.

На основании проведенного анализа определены задачи исследований.

В третьем разделе представлен анализ методов моделирования электромеханических устройств и определены основные допущения математических моделей реализуемых на основе дифференциальных уравнений, численного расчета схемы замещения и полевых методов. В результате было принято решение о разработке математической модели синхронного двигателя дискового типа с двумя магнитосвязанными роторами на основе комбинированного метода расчета использующего достоинства полевого метода и универсального метода зубцовых контуров.

Данное обстоятельство обусловлено следующими критериями: возможен расчет трехмерного магнитного поля с учетом нелинейности характеристик ферромагнитных материалов; высокая эффективность решения полевой задачи и сравнительно несложное определение интегральных характеристик магнитной системы. Составление расчетных уравнений производится только для элементов магнитной системы, т.е. возможно описание открытых магнитных систем.

Метод интегрирования по источникам поля заключается в решении общего интегрального выражения напряженности через намагниченность элементов магнитной системы [5, 6, 7, 9]:

$$\overline{H}(q) = \frac{J_{cm}}{4\pi} \int_V \frac{[\overline{dl}_g, \overline{r}_{gq}]}{r_{gq}^3} dS_g - \frac{1}{4\pi} grad_q \int_V \frac{\overline{M}_p \overline{r}_{pq}}{r_{pq}^3} dV_p, \quad (1)$$

где $\overline{H}(q)$ – напряженность магнитного поля в вакууме, А/м; $\overline{dl}_g$ – вектор, равный по модулю элементарному участку тока и совпадающий с ним по направлению, м; J_{cm} – плотность стороннего тока, А/м²; $\overline{M}_p$ – намагниченность элементарного объема dV_p , А/м; $\overline{r}_{gq}$ – радиус-вектор, проведенный от участка элементарного тока $\overline{dl}_g$ в точку наблюдения q , м; $\overline{r}_{pq}$ – радиус-вектор, проведенный из элементарного намагниченного объема dV_p в точку наблюдения q , м; r_{gq}, r_{pq} – модуль соответствующего радиус-вектора, м; dS_g – площадь поперечного сечения элементарного проводника, м².

Решение уравнения (1) производится численным методом. При этом пространство, занимаемое намагниченным веществом, разбивается на малые объемы ΔV_i , в пределах каждого из которых плотность тока и намагниченность считаются постоянными и сосредоточенными в центре элементарного объема.

При принятии незначительных допущений, что проводники обмотки разбиваются на векторы конечной длины $\Delta \vec{l}_j$ совпадающие с осью соответствующего проводника и направленные по току, система уравнений после

дифференцирования по частным производным и перехода к конечным разностям в матрично-векторной форме принимает вид:

$$h_q = h_{cm} - A \cdot m, \quad (2)$$

$$h_q = [H_x(q), H_y(q), H_z(q)]^T$$

$$m = [M_{x_1}, M_{y_1}, M_{z_1}, \dots, M_{z_n}]^T$$

$$h_{cm} = \left[\frac{J_{cm}}{4\pi} \cdot \left[\sum_{j=1}^m \frac{r_{gqz_j} \Delta g_{y_j} - r_{gqy_j} \Delta g_{z_j}}{r_{gqj}^3} \right], \frac{J_{cm}}{4\pi} \cdot \left[\sum_{j=1}^m \frac{r_{gqx_j} \Delta g_{z_j} - r_{gqz_j} \Delta g_{x_j}}{r_{gqj}^3} \right], \frac{J_{cm}}{4\pi} \cdot \left[\sum_{j=1}^m \frac{r_{gqy_j} \Delta g_{x_j} - r_{gqx_j} \Delta g_{y_j}}{r_{gqj}^3} \right] \right]^T$$

$$A = \begin{bmatrix} \frac{(r_{pqy_i}^2 + r_{pqz_i}^2 - 2r_{pqx_i}^2) M_{x_i} \Delta V_i}{r_{pq_i}^5} & -\frac{3r_{pqx_i} r_{pqy_i} M_{y_i} \Delta V_i}{r_{pq_i}^5} & \dots & -\frac{3r_{pqx_i} r_{pqz_i} M_{z_i} \Delta V_i}{r_{pq_i}^5} \\ \frac{(r_{pqx_i}^2 + r_{pqz_i}^2 - 2r_{pqy_i}^2) M_{y_i} \Delta V_i}{r_{pq_i}^5} & -\frac{3r_{pqy_i} r_{pqx_i} M_{x_i} \Delta V_i}{r_{pq_i}^5} & \dots & -\frac{3r_{pqy_i} r_{pqz_i} M_{z_i} \Delta V_i}{r_{pq_i}^5} \\ \frac{(r_{pqx_i}^2 + r_{pqy_i}^2 - 2r_{pqz_i}^2) M_{z_i} \Delta V_i}{r_{pq_i}^5} & -\frac{3r_{pqz_i} r_{pqx_i} M_{x_i} \Delta V_i}{r_{pq_i}^5} & \dots & -\frac{3r_{pqz_i} r_{pqy_i} M_{y_i} \Delta V_i}{r_{pq_i}^5} \end{bmatrix}$$

где $-h_q$ – вектор проекций напряженности магнитного поля в точке наблюдения q ; h_{cm} – вектор проекций напряженности поля, создаваемого сторонним током в точке наблюдения q ; A – матрица коэффициентов, в которой первый индекс переменной обозначает номер точки и показывает, по какой оси рассматривается влияние намагниченности, а второй – точку оси, на которую это воздействие создается; $\bar{B}_{qi}$ – вектор индукции магнитного поля в пределах ΔV_i , совпадающий по направлению с $\bar{H}_{qi}$; m – вектор компонент намагниченности, модуль которого определяется по характеристике материала $B = f(H)$; r_{pqx} , r_{pqy} , r_{pqz} , r_{nqx} , r_{nqy} , r_{nqz} – проекции радиус-векторов $\bar{r}_{pq}$ и $\bar{r}_{nq}$ на оси декартовой системы координат; dl_x , dl_y , dl_z – проекции элемента длины проводника $\bar{dl}$; M_{xi} , M_{yi} , M_{zi} – проекции вектора намагниченности $\bar{M}_i$ малого объема ΔV_i ; H_{xq} , H_{yq} , H_{zq} – проекции вектора напряженности поля в точке наблюдения q .

$$\bar{M}_{qi} = \frac{\bar{B}_{qi}}{\mu_o} - \bar{H}_{qi}. \quad (3)$$

При расчете вектор намагниченности высокоэнергетических магнитов принимается постоянным и совпадающим с направлением первоначального намагничивания.

Согласно с основными задачами разработки математической модели для описания электромагнитных процессов в статоре синхронного двигателя, необходим переход к трехмерной схеме замещения магнитной цепи.

Описание электромагнитных процессов в статоре производится путем разбиения расчетной области на элементарные объемы и описания в пределах каждого объема характеристик поля в виде сосредоточенных параметров рис. 3. При этом элементарный объем магнитопровода представлен в виде ветвей соединяющих нелинейные элементы и МДС.

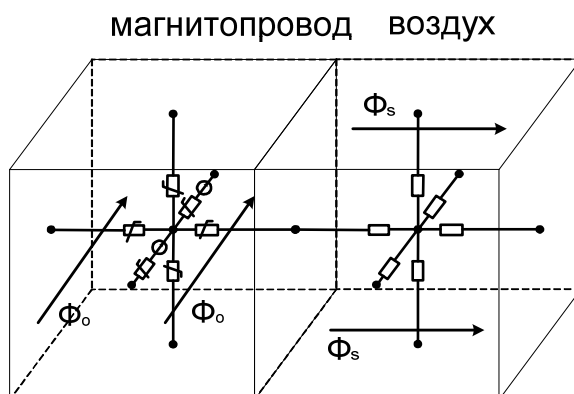


Рис. 3 Участок магнитной системы на разделе сред магнитопровод – воздух

Участки статора, описывающие области возможного прохождения основного магнитного потока представлены в виде линейных проводимостей. В результате магнитную систему статора можно представить в виде трехмерной схемы замещения, проводимости которой главным образом зависят от магнитной проницаемости среды.

На рис. 4 приведена трехмерная схема замещения статора синхронного двигателя.

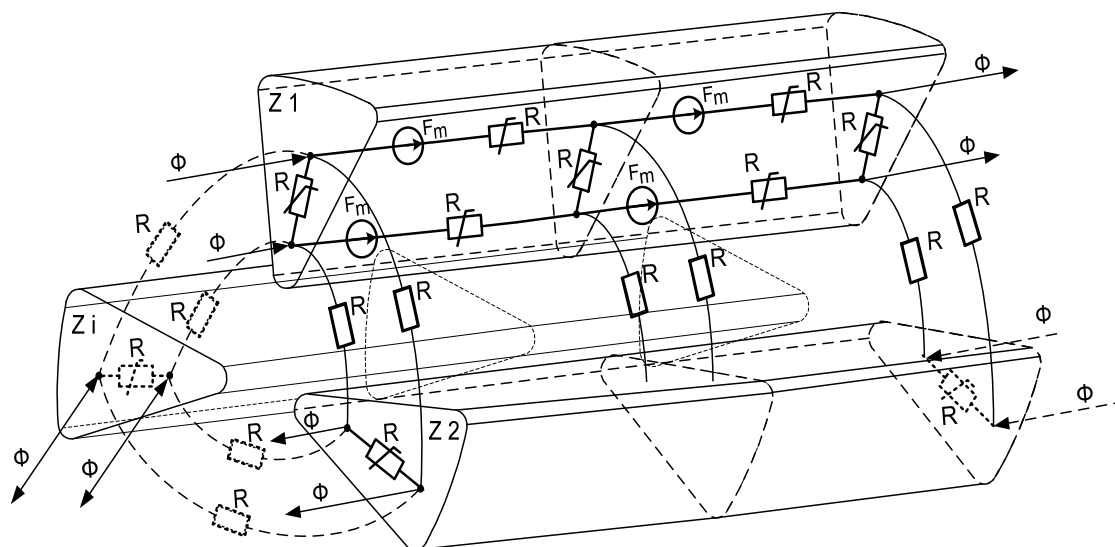


Рис. 4 Трехмерная схема замещения статора синхронного двигателя

Исходными данными при расчете машины по данной схеме замещения является распределение характеристик магнитного поля полюсной системы ротора. При переходе к сосредоточенным параметрам, определяются магнитные потоки, входящие в стержни статора. Далее аналогично подходам при моделировании электрической машины по схеме замещения с сосредоточенными параметрами с учетом характеристик ферромагнитных сред.

Точность моделирования достигается за счет расчета поля в воздушном зазоре и определения величины потока с учетом геометрических особенностей магнитной системы. С другой стороны переход к схеме замещения с сосредоточенными параметрами не вносит существенных затруднений в модель при условии, что паз выполняется с одинаковой шириной.

Далее для расчета составляется система алгебраических уравнений описывающих электромагнитные процессы в статоре двигателя. Из (рис.4) видно, что даже при таком количестве разбиений магнитной системы составление уравнений без привлечения дополнительного математического аппарата носит весьма сложный характер, а при разбиении более пяти принципиально не возможно.

В связи с этим учитывая сложность задачи и с целью автоматизации расчета нами предложено, использовать матрично–топологический метод графов, способствующий записи расчетных уравнений методом контурных токов для магнитных цепей с большим количеством узлов и объемной конфигурации ветвей.

Топологические (геометрические) свойства электрической цепи не зависят от типа и свойств элементов, из которых состоит ветвь. Поэтому целесообразно каждую ветвь схемы магнитной цепи изобразить отрезком линии.

Условное изображение схемы, в котором каждая ветвь заменяется отрезком линии, называется графом магнитной цепи. Система уравнений матрично–топологического метода.

$$\begin{cases} A \cdot \Phi = 0; B \cdot U = 0 \\ (B) \cdot (A) \cdot (\Phi^K)^T = (B) \cdot [(F) - (\Phi_m) \cdot (A)] \end{cases} \quad (4)$$

где A – узловая матрица соединений; B –матрица главных контуров; Φ – столбцовая матрица потоков ветвей; U_m – матрица магнитных напряжений участков цепи.

Приведенная математическая модель синхронного двигателя позволяет моделировать статические и динамические режимы работы, проводить анализ выходных характеристик, исследовать дисковые электрические машины с большим воздушным зазором, проводить поиск наилучших геометрических соотношений магнитной системы.

В четвертом разделе приведены результаты теоретических исследований математической модели торцевой машины.

Описание расчетной области проводится следующим образом. Определяются симметрии магнитопровода статора и полюсной системы ротора с целью минимизации размерности решаемой задачи. Затем, в зависимости от

основных размеров геометрии машины, выбирается величина дискретизации элементов магнитной системы, участвующих в расчетной области. Построение расчетной области дискового двигателя производится путем разбиения компонентов магнитной системы на элементарные объемы, в пределах которых параметры магнитного поля принимаются постоянными. Достаточным шагом разбиения h считается то значение, при котором расстояние между текущей точкой расчета и источником поля не менее $3 - 5 h$ (см. раздел 3).

В общем случае, разрядность математической модели дисковой машины значительно возрастает при увеличении элементов магнитной системы и количества разбиений, участвующих при описании расчетной области.

С помощью разработанного программного комплекса был проведен расчет синхронного двигателя. При этом были определены данные о реальных магнитных потоках, потокосцеплениях каждого витка обмотки, полученные на основе комбинированного метода моделирования трехмерного магнитного поля машины.

В ходе теоретических исследований с помощью алгоритмической модели была определена степень неоднородности магнитного поля в стержне статора электрической машины, а так же обосновано выбор метода моделирования трехмерных магнитных полей при проектировании машин с аксиальным магнитным потоком, влияние величины воздушного зазора на выходные характеристики электрической машины для определения возможности герметичного исполнения магнитной системы электрической машины.

Исследование неоднородности магнитного поля в стержне статора дискового двигателя выполнено на основе рассмотрения изменения характеристик поля вдоль аксиальных и радиальных размеров статора машины.

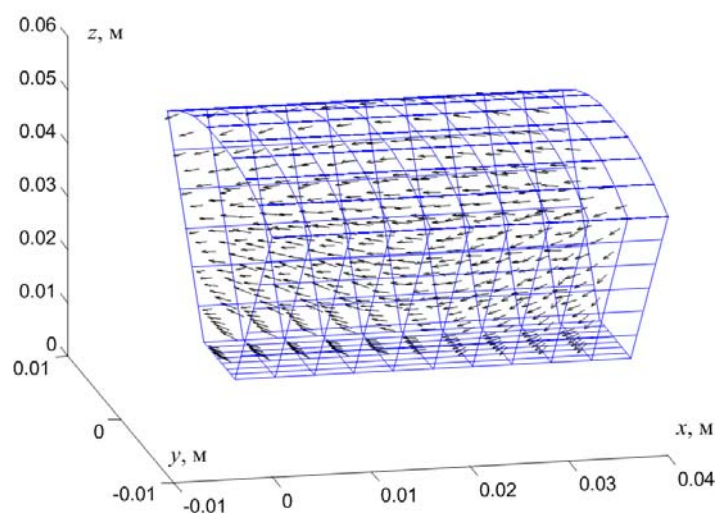


Рис. 5 Магнитное поле в стержне дискового двигателя

На рис. 5 представлены результаты расчета магнитной индукции в пределах элементарного объема, расчета которые качественно отражают значительную неоднородность поля в стержне машины и этим подтверждают необходимость рассмотрения трехмерного распределения параметров магнит-

ного поля при проектировании синхронного двигателя с аксиальным магнитным потоком.

Для дальнейшего исследования математической модели были рассмотрены режимы работы двигателя при пуске и набросе нагрузки на приводной диск ротора. В результате исследования выявлено, что изменение нагрузки влияет на угол сдвига дисков ротора относительно друг друга в переходных режимах работы. Угол сдвига может достигать величины не более одной третьей полюсного деления и в ряде случаев снижает момент сопротивления на валу обусловлен зубцовым эффектом.

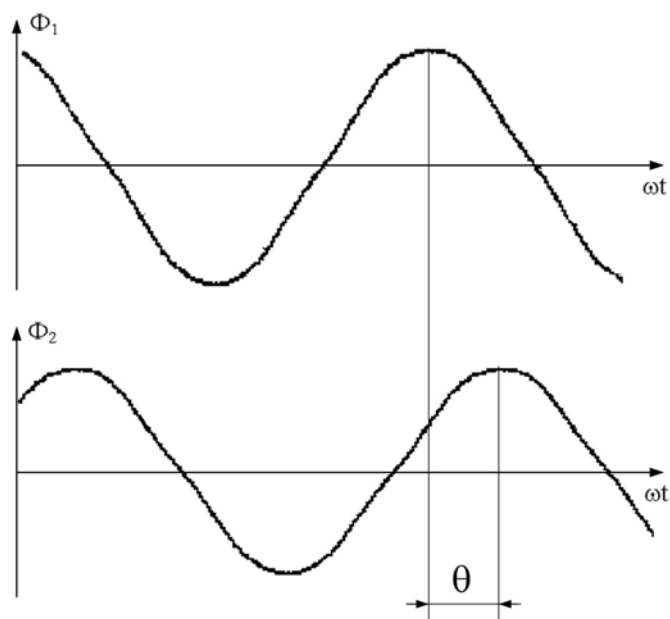


Рис. 6 Изменение магнитного потока в воздушном зазоре приводного и подмагничивающего ротора

В результате, образование угла сдвига обусловлено инерционностью приводного диска ротора, а так же колеблющимся относительно него подмагничивающего диска. Величина колебаний зависит от силового взаимодействия роторов между собой. Теоретическое исследование показало, что при недостаточном взаимодействии дисков роторов возможен выход из синхронизма приводного ротора из-за резкого снижения величины основного магнитного потока.

Для проверки силового взаимодействия в основном воздушном зазоре, была построена зависимость момента от изменения величины воздушного зазора.

На рис. 7 представлена зависимость момента двигателя работающего под статической нагрузкой, при изменении величины воздушного зазора. Из рис. 7 видно, что при увеличении воздушного зазора с 0,5 по 1 мм при внесении герметизирующей перегородки происходит уменьшение электромагнитного момента на 10 %. Увеличение зазора влияет на жесткость характеристики и делает ее круто падающей из-за влияния потока рассеяния в

воздухе. Величина воздушного зазора зависит от толщины и материала изготовления немагнитной перегородки, которая определяется давлением и агрессивностью рабочей среды.

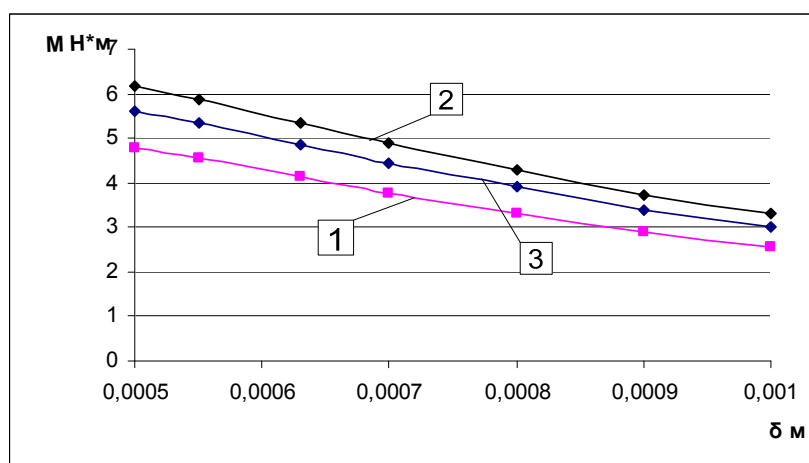


Рис. 7 График зависимости момента от изменения величины воздушного зазора

Представленная конструкция дискового электродвигателя обладает с одной стороны высокой технологичностью и простотой сборки, с другой стороны наличием зубцового эффекта, обусловленного построением магнитной системы. Статический момент сопротивления от зубцового эффекта составляет 0,48 Н·м при воздушном зазоре 1 мм.

В пятом разделе представлены результаты экспериментальных исследований макетных образцов синхронных двигателей. Для дальнейших исследований и оценки адекватности результатов теоретических расчетов был сконструирован и испытан макетный образец рис. 8 герметичного синхронного двигателя с аксиальным магнитным потоком.

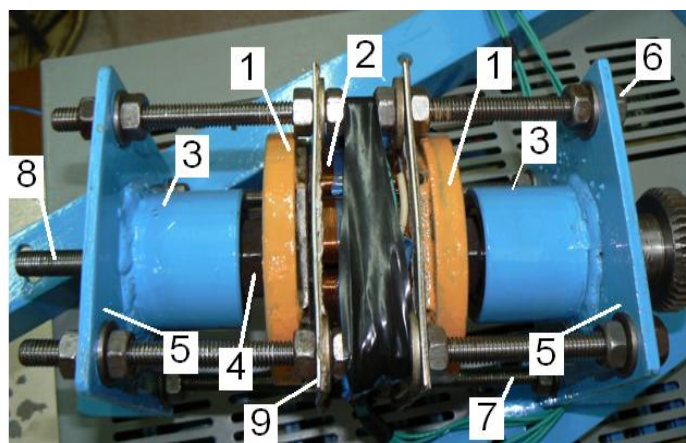


Рис. 8 Конструкция макетного образца дискового двигателя с магнитосвязанными роторами

1 – ротор; 2 – стержень статора двигателя; 3 – подшипниковый узел;
4 - контргайка; 5 – опора с подшипниковым узлом; 6 – гайка прижимного щита; 7 – шпилька; 8 – вал; 9 - прижимной щит

Для проведения исследований было изготовлено и испытано шесть макетных образцов для сравнения энергетических характеристик при двух способах изготовления магнитопровода статора. На основании полученных данных в результате экспериментального исследования, построены характеристики рис. 9, зависимости критического момента, при котором электрическая машина работает на грани устойчивости, от скорости вращения.

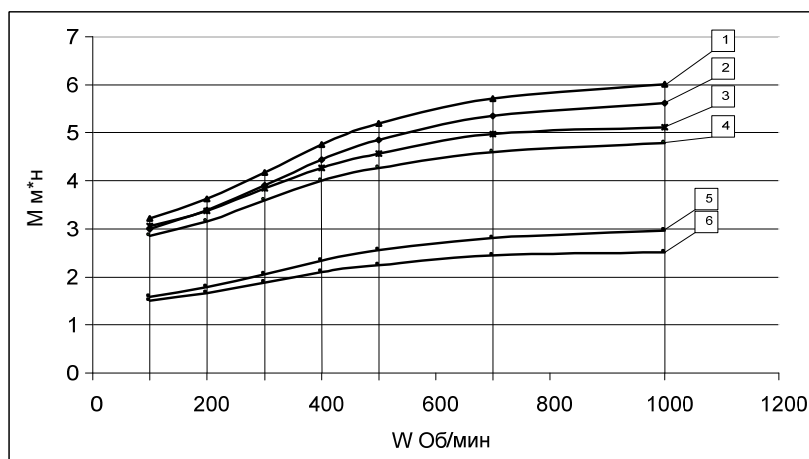


Рис. 9 - Зависимость величины критического момента от скорости вращения, при постоянной нагрузке

- 1 – СД с двумя жестко связанными роторами, с ферромагнитными стержнями; 2 – СД с двумя магнитносвязанными роторами с ферромагнитными стержнями; 3 – СД с двумя жестко связанными, с монолитными стержнями; 4 – СД с двумя магнитносвязанными роторами, с монолитными стержнями; 5 – СД с одним ротором, с ферромагнитными стержнями; 6 – СД с одним ротором, с монолитными стержнями

По кривым (1,2,3,4) видно, что энергетика машины с двумя дисками выше более чем в 1,5 раза по сравнению с двигателем, с одним ротором. Так же такого типа машины позволяют монолитное исполнения стержней в связи с тем, что потери в магнитопроводе низкие на малых скоростях. Уменьшение критического момента на малых скоростях за счет действия инерционных сил обусловлено массивным исполнением роторов машины с одной стороны и малым количеством стержней статора влияющих на стабильность скорости вращения.

Для дальнейшего исследования были рассмотрены режимы работы двигателя при пуске и внезапном набросе нагрузки рис.10 на приводной диск ротора. В результате экспериментального исследования выявлено, что изменение нагрузки влияет на угол сдвига дисков ротора относительно друг друга в переходных режимах работы. Угол сдвига может достигать величины не более одной третьей полюсного деления. При значительном увеличении угла сдвига дисков ротора относительно друг друга возможен выход двигателя из синхронизма.

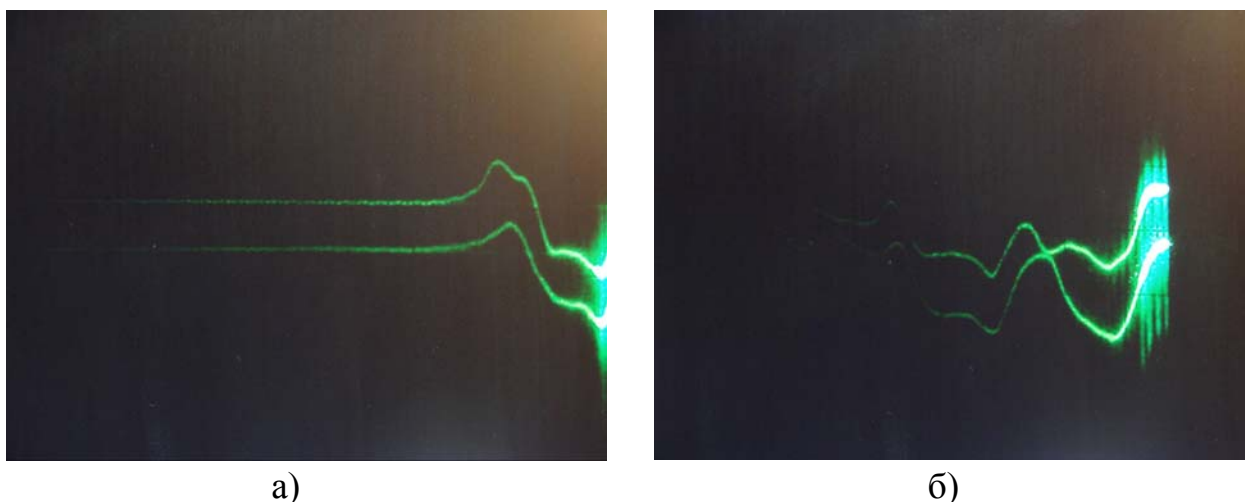


Рис. 10 Изменение магнитной индукции при пуске двигателя (а) и набросе нагрузки (б)

Из рис. 10 видно, что подмагничивающий диск ротора опережает приводной диск ротора на некоторый угол. Данное обстоятельство обусловлено увеличением нагрузки на валу приводного диска ротора.

В заключении приведены основные результаты выполненных научных исследований, которые состоят в следующем:

1. Анализ состояния существующих герметичных электродвигателей показал, что для обеспечения надежных условий эксплуатации электродвигателей в составе технологического оборудования ядерно-химического производства, необходимо заменить общепринятые системы герметизации, герметичные электродвигатели, на более совершенные конструкции, обеспечивающие высокие показатели надежности работы при аварийных ситуациях.
2. Проведенный анализ литературы и патентов показал, что дисковые магнитоэлектрические двигатели обладают рядом положительных качеств, которые позволяют успешно применять их в составе регулируемого электропривода. В качестве объекта исследования выбран дисковый синхронный двигатель с возбуждением от постоянных магнитов. Двигатель содержит два магнитосвязанных ротора один из которых приводной, а второй подмагничивает и увеличивает магнитное поле машины.
3. Для обеспечения более высокой надежности герметичность дискового синхронного двигателя целесообразно обеспечивать установкой немагнитного экрана между статором и ротором, закрывающего уязвимые элементы магнитной системы машины (пазы статора, обмотки и полюсную систему ротора).
4. Сравнительный анализ расчётных методов показал, что аналитическое решение уравнений магнитного поля ротора затруднительно. Для численного решения задачи моделирования магнитного поля ротора целесообразно использовать метод интегрирования по источникам поля,

позволяющий производить расчет трехмерного магнитного поля с учетом нелинейности характеристик ферромагнитных материалов.

5. Анализ математических моделей показал, что при расчете статора синхронного двигателя, наиболее оптимальным решением будет применение универсального метода Иванова–Смоленского позволяющего с допустимой точностью моделировать процессы в статоре.
6. Разработанная математическая модель, синхронного двигателя дискового типа с магнитосвязанными, на основе комбинированного метода расчета использующего достоинства полевого метода и универсального метода зубцовых контуров позволяет рассчитать параметры синхронного двигателя, исследовать статические и динамические режимы работы, получить зависимости положения дисков полюсной системы относительно статора машины.
7. Результаты теоретического исследования показали, что во время работы машины сдвиг дисков ротора равен нулю, это обусловлено тем, что радиальные силы притяжения полюсов значительно больше электромагнитных сил создающих приводной момент.
8. В результате теоретического исследования выявлено, что в дисковой машине с магнитосвязанными полюсами момент критический на малых скоростях незначителен и зависит от колебаний дисков ротора при набросе нагрузки, а так же повешенной инертностью роторов.
9. Теоретическое исследование статической устойчивости при разных скоростях работы двигателя позволило сделать вывод о том, что выход из синхронизма возможен и проявляется при совпадении частот вращения роторов с частотой их колебаний относительно друг друга.
10. Полученные, по результатам проведенных экспериментальных исследований, зависимости подтвердили правильность выбранных методов и адекватность созданных математических моделей. В результате сравнения расчетных характеристик с экспериментально полученными данными, определена погрешность математических моделей дискового двигателя, значение которой не превышает 10%.
11. Выполненный анализ статических характеристик, при двух способах изготовления магнитопровода статора показал возможность применения цельнометаллических стержней в составе статора синхронного двигателя, при этом потери составляют не более 15 %.
12. Выполнено экспериментальное исследование внешних характеристик дискового двигателя при изменении скорости вращения вала и величины воздушного зазора дисковой машины. Определен характер изменения энергетических характеристик дискового двигателя. При увеличении воздушного зазора происходит снижение преобразуемой двигательной мощности в допустимых пределах, что подтверждает возможность установки немагнитного экрана в воздушном зазоре.
13. Исследовано положение дисков полюсной системы при пуске двигателя и ступенчатой нагрузке на максимальный момент. Установлено, что в динамическом режиме подмагничивающий ротор опережает привод-

ной ротор на пятнадцать градусов, при этом в установившемся режиме работы сдвиг роторов равен нулю.

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

Результаты исследований и основное содержание работы отражены в следующих публикациях:

1. **Федянин А.Л.**, Муравлев О.П., Леонов С.В., Калаев В.Е., Лялин А.В. Исследование герметичной синхронной машины дискового типа // Изв. вузов. Электромеханика, 2006. - №3. С. 23-25.

2. **Федянин А.Л.**, Каранкевич А.Г., Леонов С.В., Муравлев О.П., Калаев В.Е., Лялин А.В. Моделирование трехмерного магнитного поля торцевого электромашинного генератора // Материалы VIII всероссийской НТК «Современные тенденции в развитии и конструировании коллекторных и других электромеханических преобразователей энергии» Омский государственный университет путей сообщения. Омск, 2003. С. 83 – 87.

3. **Федянин А.Л.**, Леонов С.В., Каранкевич А.Г., Муравлев О.П. Программный комплекс моделирования электромагнитных процессов // Межвуз. Сб.науч.трудов «Оптимизация режимов работы электромеханических систем». Красноярск. ИПЦ КГТУ, 2004. С.127-132.

4. **Федянин А.Л.**, Леонов С.В., Муравлев О.П., Лялин А.В. Исследование характеристик герметичного электродвигателя дискового типа // Материалы Международной НТК «Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири» Иркутск, ИрГТУ, 2005. С. 182-186.

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

6. **Федянин А.Л.**, Леонов С.В., Лялин А.В., Щипков А.А. Герметичная электрическая машина // Материалы второй НТК с международным участием «Электротехника, электромеханика и электротехнологии». Новосибирск. Изд-во НГТУ, 2005. – С. 8-10.

7. **Федянин А.Л.**, Леонов С.В., Муравлев О.П. Программный комплекс моделирования электромеханических устройств // Материалы международная НТК «Электромеханические преобразователи энергии», Томск: Изд. ТПУ, 2005. С.163-165.

8. **Федянин А.Л.**, Леонов С.В., Муравлев О.П. Герметичный двигатель переменного тока для химического производства // Труды XI Международной НПК студентов, аспирантов и молодых учёных «Современная техника и технологии» (СТТ'2005), Томск: Изд. ТПУ, 2005. С. 346-347.

9. **Федянин А.Л.**, Лялин А.В., Леонов С.В., Муравлев О.П. Влияние экранирующей перегородки на энергетические характеристики синхронной машины // Труды Всероссийской НТК с международным участием «Акту-

альные проблемы энергосберегающих электротехнологий» Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2006. С. 216 – 221.

10. **Fedyanin A.L.**, Leonov S.V., Muravlev O.P. Experimental Investigation of a sealed A.C. Motor of Disk Type // [Proceedings](#) of the 11th International Scientific and Practical Conference of Students, Post-graduates and Young Scientists “Modern Technique and Technologies” (MTT’2005), Tomsk, Tomsk Polytechnic University, 2005. P. 92-94.

11. **Федянин А.Л.**, Леонов С.В., Муравлев О.П. Исследование режимов работы низкоскоростных синхронных двигателей // Материалы XI-ой Международной конференции «Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты», (МКЭЭЭ-2006), г. Алушта 2006. С. 34 – 37.

12. **Федянин А.Л.** Низкоскоростной синхронный электродвигатель // Материалы Всероссийской конференции-конкурсного отбора инновационных проектов студентов и аспирантов по приоритетному направлению «Энергетика и энергосбережение». Томск: ТПУ, 2006. С. 137-142.

13. **Федянин А.Л.**, Лялин А.В., Леонов С.В. Исследование синхронного двигателя дискового типа со смещением полюсов // Материалы XII Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых «Современные техника и технологии» (СТТ’2006), Изд. ТПУ, 2006. С. 297-300.

14. **Федянин А.Л.**, Леонов С.В. Информационные технологии в моделировании электромеханических систем // Материалы всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации», Новосибирск: НГТУ, 2006. С. 258-259.

15. **Федянин А.Л.**, Леонов С.В., Муравлев О.П. Анализ применения дисковой машины с магнитной связью двух роторов в составе оборудования ядерно-химической отрасли // Материалы XIII Международной НПК студентов, аспирантов и молодых учёных «Современные техника и технологии» (СТТ’2007), Изд. ТПУ, 2007. С. 346-347.

Личный вклад автора

В работах написанных в соавторстве, автору принадлежит: исследование влияние угла сдвига дисков роторов [1,13] (55%), алгоритм математической модели магнитного поля [2] (40%), разработка основных расчетных модулей программного комплекса [3,7,14] (60%), разработка математической модели взаимодействия дисков ротора [15,8] (65%), разработка алгоритмической модели для исследования статических и динамических характеристик [4,5,6,11] (65%), обзор существующих конструкций герметичных двигателей [9,10,12,15] (75%).

Подписано в печать.

Формат бумаги 60ч84/16. Бумага ксероксная.

Плоская печать. Печ. л.

Тираж 100 экз. Заказ 122. Цена свободная.

Изд. СГТА. Лицензия ИД № 00407

636035, Северск, пр. Коммунистический, 65