

На правах рукописи

Кадыков Вилор Константинович

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ
КЛАПАННЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА
С РАЗЛИЧНОЙ ФОРМОЙ ПОЛЮСНЫХ НАКОНЕЧНИКОВ

Специальность 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Чебоксары – 2016

Работа выполнена на кафедре электрических и электронных аппаратов федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова»

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Свинцов Геннадий Петрович

Официальные оппоненты: **Павленко Александр Валентинович**
доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова», кафедра «Электромеханика и электрические аппараты», заведующий кафедрой;

Дергачев Павел Андреевич
кандидат технических наук, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», кафедра электромеханики, электрических и электронных аппаратов, старший научный сотрудник.

Ведущая организация: **федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет»**

Защита состоится «23» декабря 2016 г. в 16 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.301.06 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова» по адресу: г. Чебоксары, ул. Университетская, д. 38 (учебный корпус № 3), зал заседаний Ученого совета, к. 301.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова» и на сайте www.chuvsu.ru.

Автореферат разослан «21» октября 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.301.06

Н.В. Руссова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В электромагнитных реле, контакторах, магнитных пускателях в качестве приводных устройств чаще всего применяются клапанные электромагниты постоянного тока. Массовое производство последних определяет необходимость экономии дорогостоящих материалов (меди и электротехнической стали), электрической энергии, что достигается минимизацией габаритных размеров и потребляемой мощности. Эти условия являются определяющими при создании автономных объектов спецтехники. Весьма важным аспектом улучшения отечественной электроаппаратуры является и повышение качества проектных работ, снижающих финансовые и временные затраты на разработку и доводку изделий на макетных образцах. Это достигается при наличии в распоряжении проектировщика эффективных методов синтеза, разработанных на основе достоверных математических моделей электромагнитных характеристик и тепловых процессов электромагнитов.

Задача обобщенного описания электромагнитных характеристик и тепловых параметров клапанных электромагнитов с различной формой полюсных наконечников на основе экспериментальных и теоретических исследований, результаты которых обобщены и представлены в форме удобной для решения задач проектирования, является актуальной.

Степень разработанности темы исследования. Современные требования к электромагнитным приводам могут быть реализованы на базе использования достоверных математических моделей, прежде всего, электромагнитных характеристик в методиках синтеза.

В применяемых методах проектного расчета принимаются допущения плоскопараллельности поля рассеяния в клапанных электромагнитах, не учитываются потоки рассеяния, замыкающиеся с поверхности полюсного наконечника на скобу магнитопровода, недостаточно обосновано учитывается сопротивление ферромагнитных элементов магнитной системы, что снижает качество проектных работ.

Исследование магнитных систем различных электромагнитных преобразователей энергии, совершенствование методов расчета и проектирования рассматривается в работах А. А. Афанасьева, Г. А. Бугаева, О. Б. Буля, М. А. Витенберга, А. В. Гордон, М. Г. Кобленца, О. В. Ковалева, П. А. Курбатова, И. П. Иванова, Б. Н. Лобова, М. А. Любчика, Г. В. Могилевского, В. А. Нестерина, А. Г. Никитенко, А. В. Павленко, А. Г. Сливинской, Ю. В. Софронова, В. Н. Шоффы и многих других.

Цель и задачи исследования. Целью работы является разработка эффективной методики проектного расчета клапанных электромагнитов постоянного тока с Г-образной скобой на основе математических моделей их обобщенных, экспериментально полученных характеристик, обеспечивающих определение оптимальных размеров с учетом реальной картины трехмерного магнитного поля, минимизирующих массу активных материалов и габаритные размеры.

Для достижения сформулированной цели поставлены и решены следующие задачи:

1. Оценка существующих методик расчета и исследования магнитных систем нейтральных приводных электромагнитов и способов представления их характеристик в виде, удобном для решения задач проектирования.

2. Выбор основных факторов, диапазонов их варьирования при исследованиях и создание экспериментальной установки, физических моделей клапанных электромагнитов.

3. Экспериментальные исследования кривых намагничивания, нагрузочных характеристик, эпюр распределения магнитного потока по оси сердечника, коэффициентов рассеяния

магнитного потока клапанных электромагнитов с круглой, сегментной, прямоугольной формой полюсных наконечников и обработка их результатов методами теории подобия и планирования эксперимента.

4. Определение границы линейности клапанных магнитных систем с различной формой полюсных наконечников ферромагнитные элементы которых изготовлены из стали марки 10895.

5. Оценка доли потока рассеяния, замыкающегося между скобой магнитопровода и поверхностью полюсного наконечника и его размеров, обеспечивающих максимум электромагнитного момента.

6. Разработка методики проектного расчета оптимальных клапанных электромагнитов с круглым полюсным наконечником по частным критериям и оценка влияния исходных данных проектирования на оптимальные соотношения размеров и индукцию в основании сердечника.

7. Планирование и реализация вычислительного эксперимента для обобщения результатов оптимизационных расчетов клапанных электромагнитов с круглыми полюсными наконечниками.

8. Сравнение результатов проектирования клапанных электромагнитов при одинаковых исходных данных по различным методикам проектного расчета.

Объект исследования – клапанные электромагниты постоянного тока с круглой, сегментной, прямоугольной формой полюсного наконечника с Г-образной скобой. **Область исследования** – математические модели статических электромагнитных характеристик, полученных на основе экспериментальных исследований, представленные в обобщенном виде, которые могут быть использованы в алгоритмах параметрического синтеза оптимальных электромагнитов.

Научная новизна.

1. В результате обработки экспериментальных исследований получены обобщенные статические электромагнитные характеристики клапанных электромагнитов с круглыми, сегментными, прямоугольными полюсными наконечниками, которые в отличие от известных непосредственно зависят от величин геометрических соизмерностей полюсов и усредненной магнитной индукции в сечении основания сердечника.

2. Впервые получены расчетные выражения для оценки величины магнитного потока в рабочем воздушном зазоре с учетом потока рассеяния полюсных наконечников, которые рекомендуются для корректировки существующих методик расчета клапанных электромагнитов с различной формой полюсных наконечников, базирующихся на методах теории цепей.

3. Разработана методика определения границы линейности магнитных систем постоянного тока, позволившая описать электромагнитные характеристики линейных и нелинейных клапанных магнитных систем структурно одинаковыми математическими выражениями.

4. Разработана методика проектного расчета клапанных электромагнитов постоянного тока с круглыми полюсными наконечниками на базе их обобщенных электромагнитных характеристик, полученных на основе экспериментальных исследований, выполненных методами теории подобия и планирования эксперимента. Она составляет основу оптимизационной методики расчета электромагнитов, позволяющей в отличие от известных существенно сократить количество недостаточно обоснованно выбираемых коэффициентов и соизмерностей, что обеспечит получение достоверных результатов проектирования.

5. Получены полиномиальные зависимости оптимальных основных соизмерностей и технико-эксплуатационных параметров клапанных электромагнитов с круглыми полюсными наконечниками, которые в отличие от известных позволяют не только обеспечить более высокое качество функционирования, но и уменьшить затраты на проектирование и доработку опытных образцов.

Теоретическая и практическая значимость работы.

1. Разработанная методика проектирования клапанных электромагнитов может быть использована при их оптимизации по массогабаритным показателям.

2. Экспериментальные обобщенные статические электромагнитные характеристики клапанных электромагнитов приведены в удобной для использования форме при анализе влияния на них геометрических соотношений, магнитного состояния элементов магнитопровода. Они так же могут быть использованы при разработке эффективных методик синтеза приводных электромагнитов, работающих в продолжительном, повторно-кратковременном, кратковременном режимах, в том числе и при форсированном управлении.

3. Оптимизационные расчеты клапанных электромагнитов с круглыми полюсными наконечниками, работающих в продолжительном режиме, описаны в виде полиномиальных зависимостей, обеспечивающих экономию времени и средств при проектных расчетах.

4. На основе экспериментально полученных обобщенных электромагнитных характеристик показано, что через рабочий воздушный зазор замыкается всего около 70% потока, который протекает через сечение сердечника, примыкающего к полюсным наконечникам круглой, сегментной, прямоугольной формы, что свидетельствует о необходимости уточненных методик расчета, базирующихся на методах теории цепей.

5. Разработана методика определения границ линейности клапанных магнитных систем с различной формой полюсных наконечников.

6. Установлено, что при использовании ферромагнитных элементов клапанных электромагнитов, выполненных из низкоуглеродистой электротехнической стали марки 10895, граничное значение индукции усредненной по поперечному сечению в основании сердечника составляет в магнитных системах:

- с круглым полюсным наконечником 1,11 Тл;
- с сегментным полюсным наконечником 1,23 Тл;
- с прямоугольным полюсным наконечником 1,16 Тл.

7. Результаты исследований использованы в ОАО «Всероссийский научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт релестроения с опытом производством» (ВНИИР)» при разработке приводных электромагнитов контакторов серии КЭ16.

8. Основные положения и выводы диссертационной работы применяются в учебном процессе при подготовке бакалавров, магистров и аспирантов на кафедре электрических и электронных аппаратов ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова».

Результаты получены при проведении НИР «Синтез оптимальных ресурсо- и энерго-сберегающих приводов электрических аппаратов» (проект №1690), выполненный в рамках базовой части государственного задания №2014/256 от 19.03.2014 г. ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова».

Методология и методы исследования. Методологической основой диссертационной работы является совокупность методов, основанных на использовании теории подобия, плани-

рования эксперимента, теории электрических и магнитных цепей, методов решения нелинейных уравнений, дифференциального исчисления и оптимального параметрического синтеза.

Для решения сформулированных задач диссертационного исследования использовались методы математического анализа, оптимизации, обработки экспериментальных данных, теории цепей, планирования многофакторного эксперимента, подобия.

Основные положения диссертационной работы, выносимые на защиту:

1. Математические модели обобщенных электромагнитных характеристик клапанных электромагнитов с круглыми, сегментными, прямоугольными полюсными наконечниками, описанные в параметрической форме.

2. Методика определения границы линейности магнитных систем постоянного тока, выполненных из низкоуглеродистой электротехнической стали марки 10895.

3. Расчетные выражения зависимости магнитного потока в рабочем воздушном зазоре клапанной магнитной системы от потока, пересекающего площадь поперечного сечения сердечника, примыкающего к тыльной поверхности полюсного наконечника, которые рекомендуются для корректировки методик расчета клапанных электромагнитов, базирующихся на методах теории цепей.

4. Методика проектного расчета оптимальных клапанных электромагнитов с круглыми полюсными наконечниками, работающих в продолжительном режиме, разработанная на основе обобщенных характеристик с исключением недостаточно обоснованно применяемых коэффициентов и допущений.

5. Полиномиальные модели оптимальных кратностей основных геометрических размеров в долях величины диаметра сердечника, полученные с использованием разработанной методики проектного расчета и вычислительного эксперимента минимизируют массогабаритные параметры, потребляемую мощность и стоимость электромагнита.

Апробация работы. Результаты исследований и основные положения диссертационной работы обсуждались на: IV Международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электроподвижного состава» (г. Новочеркасск, 17-19 июня 2003 г.); XII Международной конференции «Электромеханика, электротехнология, электротехнические материалы и компоненты» (Крым, г. Алушта, 29 сентября – 4 октября 2008 г.); VII симпозиуме «Электротехника 2010» (Московская обл., 27-29 мая 2003 г.); Международной научно-технической конференции «Электрические аппараты и электротехнические комплексы и системы» (г. Ульяновск, 22-25 мая 2012 г.); Второй Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Проблемы электротехники, электроэнергетики и электротехнологии» (г. Гольяты, 2007 г.); V Всероссийской научно-технической конференции «Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике» (г. Чебоксары, 2004 г.); III Межотраслевой научно-технической конференции «Автоматизация и прогрессивные технологии (АТП-2002)» (г. Новоуральск, 11-13 ноября 2002 г.); научно-методических семинарах кафедры электрических и электронных аппаратов ФГБОУ ВО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова» (г. Чебоксары, 2006 – 2010 гг., 2014 – 2015 гг.).

Достоверность результатов работы обеспечена:

- экспериментальными исследованиями, организованными и обработанными методами теорий подобия и планирования эксперимента;

- обоснованным выбором метода поиска оптимальных кратностей геометрических размеров в клапанных электромагнитах;

- использованием положений и методов математического анализа.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 18 печатных работ, из них 6 статей – в изданиях из Перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, 7 – тезисов докладов на конференциях и 5 работ – в сборниках научных трудов.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трех разделов, заключения, списка литературы (209 наименований) и приложений. Работа изложена на 204 страницах машинописного текста, содержит 23 рисунка и 41 таблицу.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение содержит обоснование актуальности темы диссертационного исследования, сформулированные цель и задачи работы, научную новизну полученных результатов и их теоретическую и практическую ценность; раскрыты использованные методы исследований.

В первом разделе рассмотрены основные характеристики приводных электромагнитов и магнитных систем. Выполнена оценка методов расчета последних и приведены способы представления электромагнитных характеристик.

В частности, отмечено, что при электромагнитном расчете магнитных систем методами теории цепей не учитывается поток рассеяния, сходящий с части поверхности полюсных наконечников клапанных электромагнитов на их скобу; принимается существенное упрощение топологии поля рассеяния между сердечником и скобой. Это приводит к значительной погрешности расчета характеристик электромагнитов методами теории цепей.

Обоснован выбор метода физического моделирования электромагнитных характеристик клапанных электромагнитов с использованием положений теории подобия и планирования эксперимента. Учитывая эффективность моделирования объектов электромеханики, применялся центрально-композиционный план второго порядка.

На основе анализа имеющейся информации, выбраны определяющие геометрические соизмерности в клапанных магнитных системах (рис. 1), которые варьировались при исследовании:

$$H_* = \frac{H_0}{d_c} \text{ - относительная высота обмотки;}$$

$$A_* = \frac{A_0}{d_c} \text{ - относительная толщина обмотки;}$$

$$d_* = \frac{d_{\Pi}}{d_c} \text{ - относительный диаметр полюсного наконечника;}$$

$$c_* = \frac{C_{ок}}{d_c} \text{ - относительные расстояние от оси сердечника до скобы магнитопровода;}$$

$$h_{\Pi*} = \frac{h_{\Pi}}{d_{\Pi}} \text{ - относительный размер сегмента полюсного наконечника;}$$

$$b_* = \frac{b_{\Pi}}{b_{\text{як}}} \text{ - относительная ширина прямоугольного полюсного наконечника;}$$

$C_{п*} = \frac{C_{п}}{C_{ок}}$ - относительные длина эффективной части прямоугольного полюсного

наконечника;

$$C_{п1} = 0,75 d_c .$$

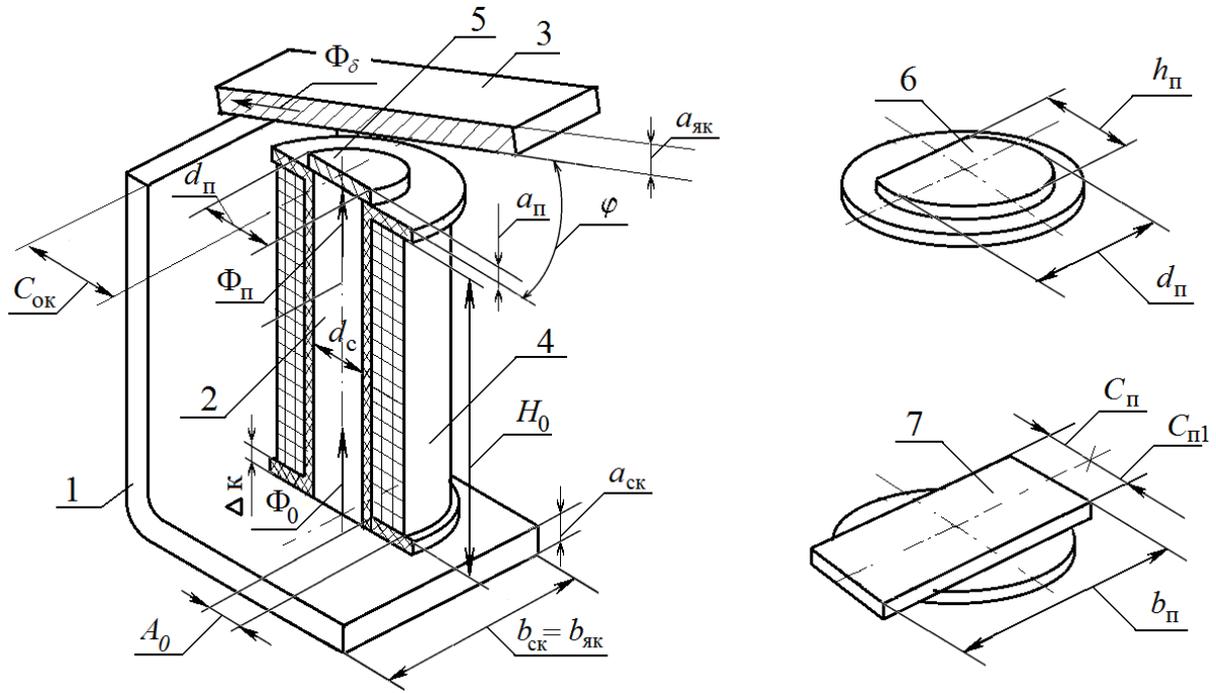


Рисунок 1 – Эскиз магнитной системы клапанного электромагнита с основными разновидностями форм полюсных наконечников постоянного тока:

1-скоба, 2-сердечник, 3-якорь, 4- обмотка, полюсные наконечники: 5-круглый, 6-сегментный, 7- прямоугольный

Остальные соразмерности фиксировались на характерном для клапанных систем уровнях: $\Delta_* = \Delta_k / d_c = 0,1$; $a_{ск*} = a_{ск} / d_c = 0,25$; $a_{п*} = a_{п} / d_c = 0,2$; $a_{як*} = a_{як}$; $b_{ск*} = b_{ск} / d_c = b_{як*} = b_{як} / d_c = 3,14$.

Угол φ , задающий положение якоря фиксировался (рис. 1) в пятнадцати положениях от 1° до 15° , что обеспечило достаточную точность описания электромагнитных характеристик. Исследуемые макеты (рис. 2) выполнены в виде магнитных систем-трансформеров, которые позволяют воспроизводить необходимые кратности геометрических размеров при различной форме полюсных наконечников. Элементы магнитопровода выполнены из низкоуглеродистой стали 10895. Выбор широкого диапазона изменения определяющих кратностей в электромагнитах и усредненной магнитной индукции (B_0) в сечении основания сердечника позволяет использовать результаты моделирования электромагнитных характеристик не только в длительном режиме, но и в повторно-кратковременном, кратковременном и форсированном режимах их работы. Был применен параметрический способ описания исследуемых электромагнитных характеристик, где в качестве параметра использовалась индукция B_0 в основании сердечника.

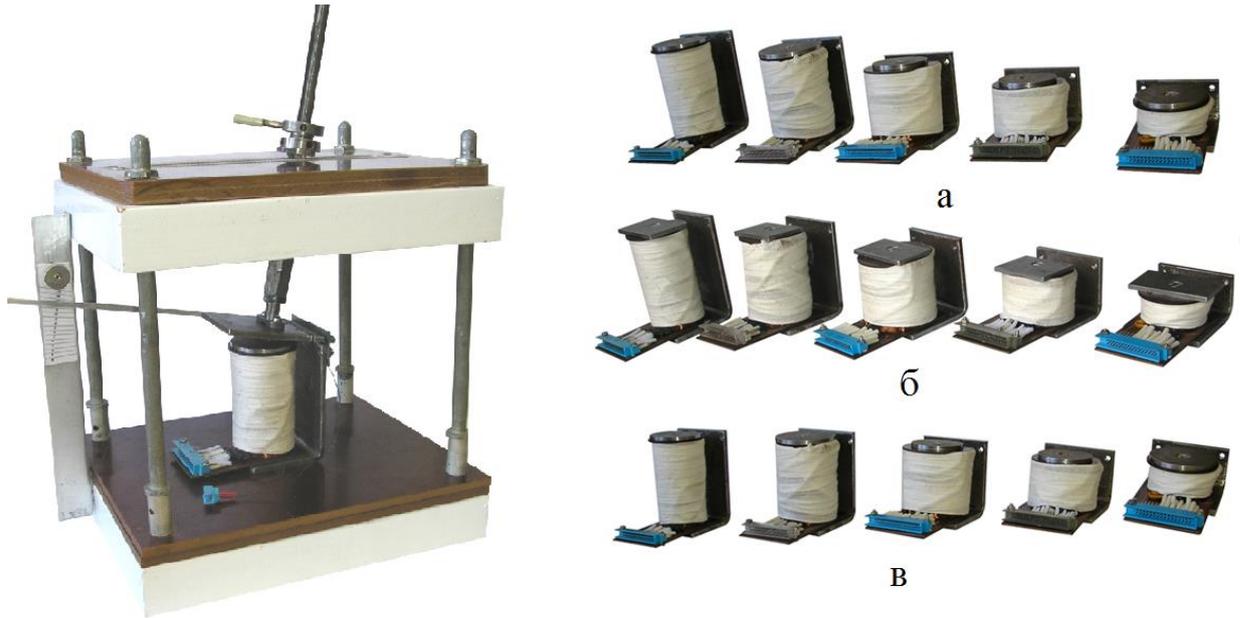


Рисунок 2 – Платформа для исследования магнитных систем, с макетами–трансформерами, а - с круглыми, б - прямоугольными, в - сегментными полюсными наконечниками

Кривые намагничивания магнитных систем представлены в виде безразмерных функций потокосцепления

$$\Psi_* = \Psi / \Psi_{\text{баз}}, \quad (1)$$

и магнитодвижущей силы

$$F_* = F / F_{\text{баз}}, \quad (2)$$

где Ψ , F - потокосцепление и магнитодвижущая сила обмотки;

$$\Psi_{\text{баз}} = B_0 \frac{\pi d_c^2}{4} N \quad \text{- базисные значения потокосцепления и магнитодвижущей силы;}$$

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м} \quad \text{- магнитная постоянная;}$$

Ψ_* , F_* - безразмерные функции потокосцепления и магнитодвижущей силы обмотки.

Нагрузочные характеристики приведены также в виде параметрически заданных зависимостей:

$$M_{\text{эм}} = M_* M_{\text{баз}}, \quad F = F_* F_{\text{баз}}, \quad (3)$$

$$\text{где } M_{\text{баз}} = \frac{\pi d_c^3}{8 \mu_0} B_0^2$$

Эпюра распределения магнитного потока вдоль сердечника представлена в виде:

$$\Phi_*(y_*) = \Phi / \Phi_0 = 1 + \Phi_2 y_* + \Phi_3 y_*^2, \quad (4)$$

где Φ_2 , Φ_3 - безразмерные функции, полученные после обработки экспериментальных данных.

Коэффициент рассеяния магнитного потока в основании сердечника:

$$\sigma_0 = B_0 \frac{\pi d_c^2}{4} / \Phi_\delta, \quad (5)$$

где Φ_s - магнитный поток в рабочем воздушном зазоре.

Экспериментальные электромагнитные характеристики для электромагнитов с круглыми полюсными наконечниками, полученные полиномиальном в виде:

$$\text{для потокосцепления } \Psi_* = 10^{-2} \cdot A^2,$$

$$\text{где } A = a_0 + 0,12 x_2 + a_{11} x_1^2 - a_{22} x_2^2 - a_{33} x_3^2 - a_{44} x_4^2;$$

$$a_0 = 10,4 - 6,22 \varphi + 14,5 \varphi^2; a_{11} = 0,01 - 2,23 \varphi + 5,78 \varphi^2;$$

$$a_{22} = 0,28 - 1,55 \varphi + 4,01 \varphi^2; a_{33} = 0,30 - 1,96 \varphi + 5,75 \varphi^2;$$

$$a_{44} = 0,24 - 2,34 \varphi + 6,52 \varphi^2;$$

$$\text{для магнитодвижущей силы } F_* = 10^{-4} B^4,$$

$$\text{где } B = b_0 + b_1 x_1 - b_2 x_2 + b_5 x_5 + b_{55} x_5^2; b_0 = 4,15 + 7,04 \varphi - 13,9 \varphi^2;$$

$$b_1 = 0,15 - 1,55 \varphi + 4,39 \varphi^2; b_2 = 0,096 + 0,783 \varphi - 2,25 \varphi^2;$$

$$b_5 = 0,204 - 0,953 \varphi + 2,34 \varphi^2; b_{55} = 0,149 - 0,691 \varphi + 1,59 \varphi^2.$$

$$\text{для электромагнитного момента } M_* = 10^{-6} C^6,$$

$$\text{где } C = c_0 - c_1 x_1 - c_2 x_2 - 0,123 x_1^2 - 0,237 x_2^2 - c_{33} x_3^2 - 0,112 x_4^2 - 0,125 x_5^2;$$

$$c_0 = 8,48 - 9,54 \varphi; c_1 = 0,342 - 6,48 \varphi + 63,4 \varphi^2 - 239 \varphi^3 + 322 \varphi^4;$$

$$c_2 = 0,516 - 6,74 \varphi + 54,5 \varphi^2 - 221 \varphi^3 + 338 \varphi^4;$$

$$c_{33} = -0,015 + 3,0 \varphi - 25,2 \varphi^2 + 121 \varphi^3 - 226 \varphi^4;$$

для эпюры магнитных потоков по высоте сердечника

$$\Phi_2 = 10^{-8} (62,5 + 7,18 x_1 - 1,82 x_2 - 0,94 x_3 - 1,03 x_4 + 4,45 x_5 - 2,17 x_3^2 - 1,21 x_4^2 - 1,04 x_1 x_3)^4;$$

$$\Phi_3 = -10^{-8} [(68,2 + 88,0 \varphi + 177,6 \varphi^2) + (7,85 - 9,07 \varphi + 23,1 \varphi^2) x_1 - (0,58 + 82,2 \varphi - 713 \varphi^2 + 2804 \varphi^3 - 4126 \varphi^4) x_2 + 1,39 x_5 - 0,88 x_1^2 + 1,1 x_2^2]^4;$$

для потока рассеяния

$$\sigma_0 = 10^{-2} [(10,64 + 14,19 \varphi - 15,44 \varphi^2) + (0,09 + 1,82 \varphi - 2,77 \varphi^2) x_1 - (0,157 + 1,19 \varphi - 1,80 \varphi^2) x_2 + (0,03 + 1,47 \varphi - 3,58 \varphi^2) x_2^2 + 0,142 x_3^2]^2.$$

$$\text{Здесь } x_1 = 1,007 H_* - 2,769; x_2 = 3,195 d_* - 5,591; x_3 = 4,405 c_* - 7,753;$$

$$x_4 = 6,667 A_* - 4; x_5 = 3,546 B_0 - 4,61.$$

Полученные полиномы справедливы строго при $|x_i| \leq 1$.

Для оценки возможности их использования и в расширенном диапазоне $|x_i| > 1$ факторного пространства проведена оценка погрешности аппроксимации полученными полиномиальными моделями электромагнитных характеристик. Определены относительные расхождения между экспериментальными и расчетными значениями по полиномиальным зависимостям. Для функции Ψ_* они составляют 13,9% (при $H_* = 1,165$, $d_* = 1,75$, $C_* = 1,76$, $A_0 = 0,60$, $B_0 = 1,3$ Тл, $\varphi = 2^\circ$) и 12,4% (при $H_* = 4,335$, $d_* = 1,75$, $C_* = 1,76$, $A_0 = 0,60$, $B_0 = 1,3$ Тл, $\varphi = 2^\circ$). То же для функции F_* составляет 14,4% (при $H_* = 1,757$, $d_* = 2,063$, $C_* = 1,533$,

$A_0 = 0,45$, $B_0 = 1,58$ Тл, $\varphi = 2^\circ$) и 12,3% (при $H_* = 2,75$, $d_* = 1,75$, $C_* = 1,76$, $A_0 = 0,60$, $B_0 = 1,75$ Тл, $\varphi = 2^\circ$).

Наибольшее расхождение для эпюры распределения магнитного потока составляет 8,4% (при $H_* = 3,743$, $d_* = 1,437$, $C_* = 1,533$, $A_* = 0,45$, $B_0 = 1,02$ Тл, $\varphi = 1^\circ$, $y_* = 1$) и 9,8% (при $H_* = 3,743$, $d_* = 1,437$, $C_* = 1,987$, $A_* = 0,75$, $B_0 = 1,58$ Тл, $\varphi = 13^\circ$, $y_* = 1$); для коэффициентов рассеяния σ_0 магнитного потока – 11,5% (при $H_* = 1,757$, $d_* = 1,437$, $C_* = 1,533$, $A_* = 0,45$, $B_0 = 1,02$ Тл, $\varphi = 1^\circ$) и 10,6% (при $H_* = 3,743$, $d_* = 1,437$, $C_* = 1,533$, $A_* = 0,45$, $B_0 = 1,02$ Тл, $\varphi = 6^\circ$).

В остальных расчетных точках почти всегда эти расхождения в 3 – 4 раза меньше, чем приведенные выше.

В диссертационной работе так же приведены аналогичные электромагнитные характеристики для магнитных систем с сегментными и прямоугольными полюсными наконечниками.

Во втором разделе рассмотрены результаты исследования влияния геометрических соизмерностей и магнитной индукции в основании сердечника на характеристики и параметры клапанной магнитной системы на основе результатов модели.

Разработана методика определения граничного значения магнитной индукции B_{0r} , определяющая участки линейности и нелинейности магнитной системы на основе сформулированного условия линейности магнитной системы (рис. 3).

На основе сформулированного условия линейности магнитной системы разработана методика определения граничного значения магнитной индукции B_{0r} , определяющая участки линейности и нелинейности магнитной системы (рис. 3). Для определения граничного значения к экспериментальной кривой намагничивания проводится касательная из начала координат, которая проходит через точку Г. Участок кривой намагничивания между точками Г и В является нелинейным, а участок между точками О и Г – линейным.

Определение граничного значения магнитной индукции B_{0r} сводится к нахождению координат точки Г (F_Γ и Ψ_Γ), которые можно определить используя правило дифференцирования функции, заданной в параметрической форме (уравнение 6).

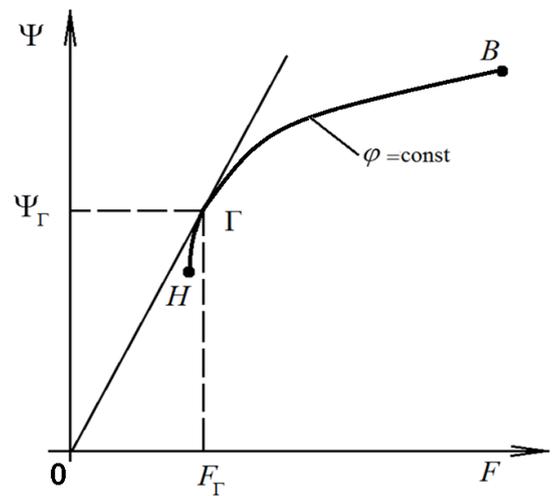


Рисунок 3 – Определение границы линейности магнитной системы на основе ее экспериментальных кривых намагничивания

$$\frac{\Psi_* \Psi_{\text{баз}}}{F_* F_{\text{баз}}} = \frac{\Psi_{\text{баз}} \frac{d\Psi_*}{dB_0} + \Psi_* \frac{d\Psi_{\text{баз}}}{dB_0}}{F_{\text{баз}} \frac{dF_*}{dB_0} + F_* \frac{dF_{\text{баз}}}{dB_0}} \quad (6)$$

Для магнитных систем с сегментными полюсными наконечниками уравнение (6) может быть сведено к кубическому уравнению неполного вида, которое решается в тригонометрической форме:

$$y^3 + py + q = 0, \quad (7)$$

где $y = x_6 + \frac{a}{3}$; $p = \frac{-a^2}{3} + b$;

$$Q = \left(\frac{p}{3}\right)^3 + \left(\frac{q}{2}\right)^2; \quad q = 2\left(\frac{a}{3}\right)^3 - \frac{1}{3}ab + \bar{c};$$

$$a = \frac{7a_{6.c}b_{66.c} + 2a_{66.c}b_{6.c}}{6a_{66.c}b_{6.c}}; \quad \bar{c} = \frac{4b_{6.c}\bar{\Psi} - a_{6.c}\bar{B}}{6a_{66.c}b_{6.c}}; \quad b = \frac{3a_{6.c}b_{6.c} + 8\bar{\Psi}b_{66.c} - 2a_{66.c}\bar{B}}{6a_{66.c}b_{6.c}};$$

$$\bar{B} = b_{ac} + b_{1.c}x_1 + b_{2.c}x_2 + b_{11.c}x_1^2; \quad \bar{\Psi} = a_{0.c} + a_{1.c}x_1 + a_{2.c}x_2 + a_{22.c}x_2^2 + a_{33.c}x_3^2 + a_{44.c}x_4^2 + a_{55.c}x_5^2.$$

Дополнительный индекс «с» для решения формулы (7) относится к сегментному полюсному наконечнику.

Множество выполненных расчетов p , q , Q при различных значениях соизмерностей в магнитной системе и угловых положениях (φ) якоря свидетельствуют, что $Q < 0$ и уравнение (7) решается в тригонометрической форме. Из тех же расчетов видно, что корнем, соответствующим реальным значениям индукции B_{0r} , является

$$y = -2\sqrt{-\frac{p}{3}\cos\frac{(\alpha - \pi)}{3}}, \quad (8)$$

где $\alpha = \arccos\left\{-\frac{q}{2\sqrt{-\left(\frac{p}{3}\right)^3}}\right\}$.

Граничное значение B_{0r} определяется на основании кодированного выражения шестого фактора

$$B_{0r} = \frac{x_6 + 5,078}{3,906},$$

и изменяется в диапазоне от 1,16 Тл до 1,23 Тл.

Границы линейности магнитных систем с круглыми и прямоугольными наконечниками определены аналогично.

При изменении индукции B_0 в заданном диапазоне от 0 до B_{0r} безразмерные функции электромагнитных характеристик Ψ_* , F_* , M_* и др. не зависят от B_0 и должны соответствовать $B_0 = B_{0r}$.

Во многих методиках электромагнитных расчетов клапанных магнитных систем с полюсными наконечниками, базирующихся на теории цепей, принимается допущение, что магнитный поток Φ_n (рис. 4) равен Φ_δ .

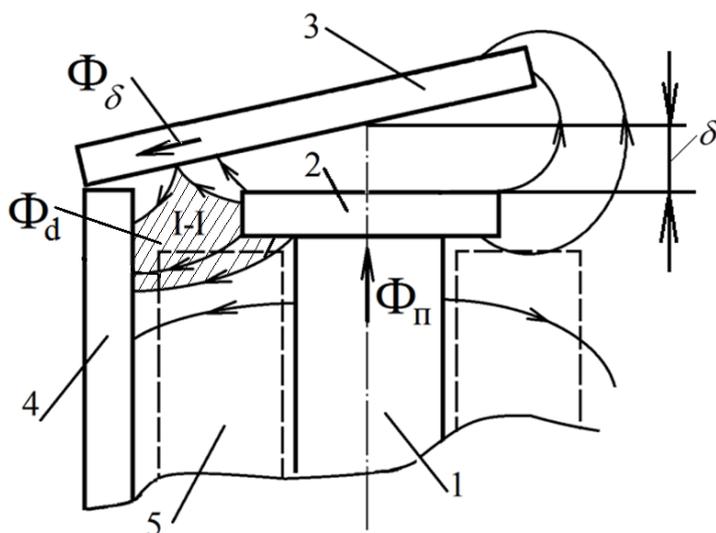


Рисунок 4 – Упрощенное схематичное изображение трубок магнитного потока вблизи полюсного наконечника:

1 – сердечник; 2 – полюсный наконечник; 3 – яркорь;
4 – скоба; 5 – обмотка

размеров электромагнита:

1 - $H_* = 1,757$; $d_* = 1,437$; $C_* = 1,533$; $A_* = 0,45$.

2 - $H_* = 1,757$; $d_* = 2,063$; $C_* = 1,533$; $A_* = 0,45$.

3 - $H_* = 1,757$; $d_* = 1,437$; $C_* = 1,987$; $A_* = 0,45$.

4 - $H_* = 1,757$; $d_* = 2,063$; $C_* = 1,987$; $A_* = 0,45$; $F_{15} = 958$ А .

5 - $H_* = 1,757$; $d_* = 1,437$; $C_* = 1,533$; $A_* = 0,75$; $F_{15} = 1212$ А .

6 - $H_* = 1,757$; $d_* = 2,063$; $C_* = 1,533$; $A_* = 0,75$; $F_{15} = 860$ А .

Таблица 1 – Зависимость коэффициента k_δ от углового положения якоря и основных соотношений магнитной системы с круглыми полюсными наконечниками

№, п/п	$\varphi, ^\circ$	k_δ							
		1	3	5	7	9	11	13	15
1		0,949	0,916	0,829	0,818	0,779	0,763	0,758	0,729
2		0,920	0,881	0,841	0,815	0,773	0,731	0,722	0,721
3		0,875	0,885	0,879	0,863	0,816	0,808	0,783	0,776
4		0,928	0,896	0,858	0,820	0,778	0,734	0,730	0,718
5		0,889	0,875	0,861	0,850	0,801	0,789	0,783	0,770
6		0,934	0,893	0,861	0,798	0,772	0,758	0,747	0,721

На основе результатов экспериментального исследования потокораспределения получена математическая зависимость, позволяющая определить долю k_δ магнитного потока Φ_π , «протекающего» через рабочий воздушный зазор:

$$k_\delta = \frac{\Phi_\delta}{\Phi_\pi} = \frac{1}{\sigma_0(1 + \Phi_2 + \Phi_3)} \quad (9)$$

В табл. 1 приведены результаты расчета функции k_δ в зависимости от угла (φ) якоря при различных геометрических соотношениях в магнитной системе, где в строках 1-6 в столбце соответствует следующие значения относительных геометрических

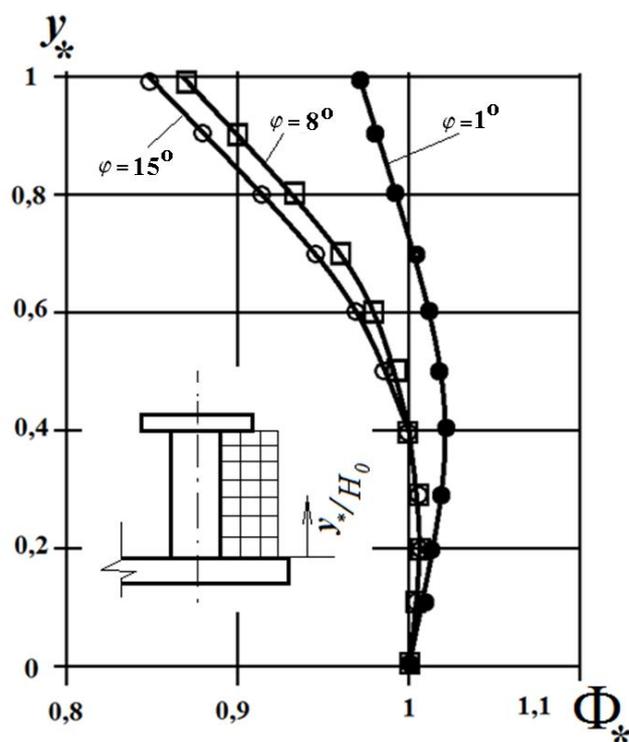


Рисунок 5 – Относительные эпюры распределения магнитного потока вдоль оси сердечника клапанной магнитной системы

паных магнитных систем, установлено, что при любых значениях МДС обмотки и угловых положений якоря для различных форм полюсного наконечника существуют соразмерности, обеспечивающие максимальное значение электромагнитного момента.

В **третьем разделе** рассмотрены вопросы проектирования клапанных электромагнитов с круглыми полюсными наконечниками. Произведен анализ известных методик проектного расчета: на основе использования «конструктивного фактора», его модифицированной версии, разработанной Г. А. Бугаевым и Ю. В. Софроновым; методика синтеза на основе усредненной тяговой характеристики, разработанная В. Н. Шоффой; методика расчета приводного электромагнита реле на основе эмпирических зависимостей М. И. Витенберга; методика на основе использования корректирующих функций, методика проектного расчета приводных электромагнитов, работающих в различных режимах, а так же методика проектирования оптимальных клапанных электромагнитов, разработанные М. А. Любчиком. Для объективной оценки достоинств и недостатков перечисленных методик выполнены расчеты на одинаковые исходные данные.

Предложена методика проектного расчета оптимальных клапанных электромагнитов с круглыми полюсными наконечниками на основе их обобщенных электромагнитных и тепловых характеристик. С использованием разработанной методики рассчитаны геометрические соразмерности в магнитной системе, обеспечивающие минимум частным критериям оптимальности: масса активных материалов, их объем, стоимость, установочная площадь, габаритный объем, высота электромагнита, потребляемая мощность.

Результаты этих расчетов обобщены и описаны методами теории подобия и планирования эксперимента. В качестве примера приведены результаты оптимизации расчетов по критерию минимальной высоты электромагнита и представлены в виде:

Данные табл. 1 свидетельствуют о том, что с увеличением угла φ якоря независимо от соотношения геометрических размеров магнитной системы, доля потока от $\Phi_{\text{н}}$, протекающего через рабочий воздушный зазор, уменьшается до 72 – 78 % при угле 15°. Относительные эпюры распределения магнитного потока, построены на основе экспериментальных данных (рис. 5), позволяющие заключить, что для повышения точности результатов электромагнитного расчета магнитной системы при использовании метода участков целесообразно участки разбивать на более короткие промежутки, на половине сердечника и скобы, прилегающих к рабочему воздушному зазору. Аналогичные выводы и рекомендации сформулированы по результатам исследования магнитных систем с сегментными и прямоугольными полюсными наконечниками.

Опираясь на анализ полиномиальных моделей нагрузочной характеристики кла-

$$\delta_{\text{опт.н}}^* = 10^{-2} (21,4 + 6,25 z_1 - 1,81 z_2 - 0,71 z_1^2 + 0,46 z_2^2 - 0,39 z_1 z_2 - 0,85 z_3 - 0,26 z_1 z_3 + 0,93 z_4 + 0,30 z_1 z_4 + 1,34 z_5 + 0,42 z_1 z_5 - 0,23 z_2 z_5) ; \quad (10)$$

$$H_{\text{опт.н}}^* = 1,165 ; \quad (11)$$

$$d_{\text{опт.н}}^* = 10^{-2} (184,3 - 5,57 z_1 - 5,94 z_2 - 3,18 z_1^2 + 3,02 z_2^2 + 2,53 z_3 - 3,07 z_4 - 4,15 z_5 + 2,27 z_5^2 + 2,18 z_2 z_5) ; \quad (12)$$

$$C_{\text{опт.н}}^* = 10^{-2} (185,2 - 2,33 z_2 - 1,88 z_5) ; \quad (13)$$

$$A_{\text{опт.н}}^* = 10^{-2} (77,3 - 2,40 z_2 + 1,28 z_2^2 + 1,31 z_3 - 1,28 z_4 - 2,39 z_5 + 0,89 z_5^2 + 0,93 z_2 z_5) . \quad (14)$$

$$Z_1 = 0,319 \delta - 2,236 ; Z_2 = 0,159 P_{\text{мх}} - 2,392 ; Z_3 = 8 \cdot K_{\text{мх}} - 12,4 ; Z_4 = 0,0798 \theta_{\text{доп}} - 8,778 ;$$

$$Z_5 = 8 \cdot K_3 - 4 .$$

$$2 \text{ мм} \leq \delta \leq 12 \text{ мм} ; 5 \text{ Н} \leq P_{\text{мх}} \leq 25 \text{ Н} ; 1,35 \leq K_{\text{мх}} \leq 1,75 ; 90^\circ \text{C} \leq \theta_{\text{доп}} \leq 130^\circ \text{C} ; 0,30 \leq K_3 \leq 0,70 ,$$

где $P_{\text{мх}}$ - противодействующее усилие;

$K_{\text{мх}}$ - отношение максимального напряжения на обмотке к напряжению срабатывания;

$\theta_{\text{доп}}$ - допустимая температура нагрева в толще обмотки;

K_3 - коэффициент заполнения обмоточного окна.

Ниже приведены зависимости геометрических соразмерностей от исходных данных проектирования. Показано, что оптимальные соразмерности (рис. 6 – 11) (за исключением относительного рабочего зазора) в магнитной системе изменяется в более узких пределах, чем абсолютные размеры.

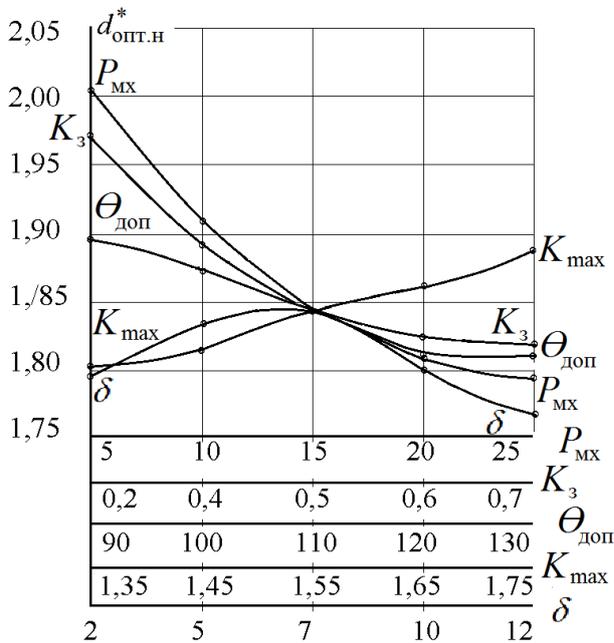


Рисунок 6 – Зависимость относительного диаметра полюсного наконечника от исходных данных проектирования

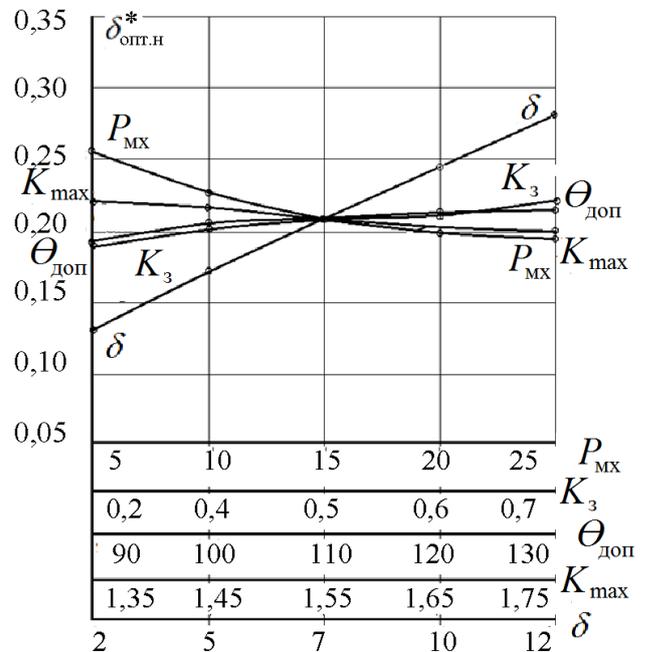


Рисунок 7 – Зависимость относительного зазора от исходных данных проектирования

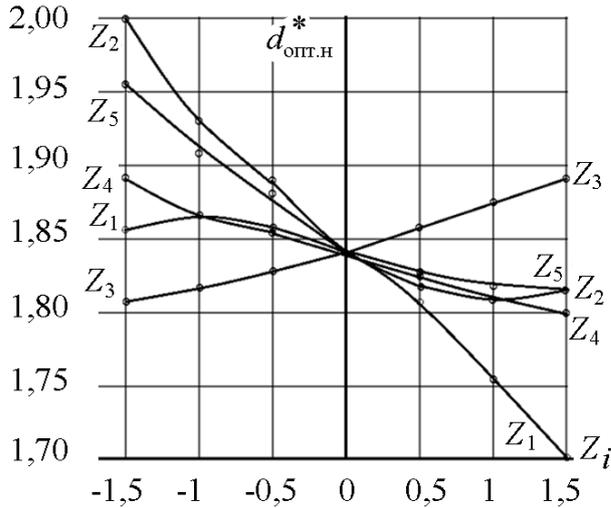


Рисунок 8 – Влияние кодированных значений факторов в центре факторного пространства на относительный диаметр полюсного наконечника

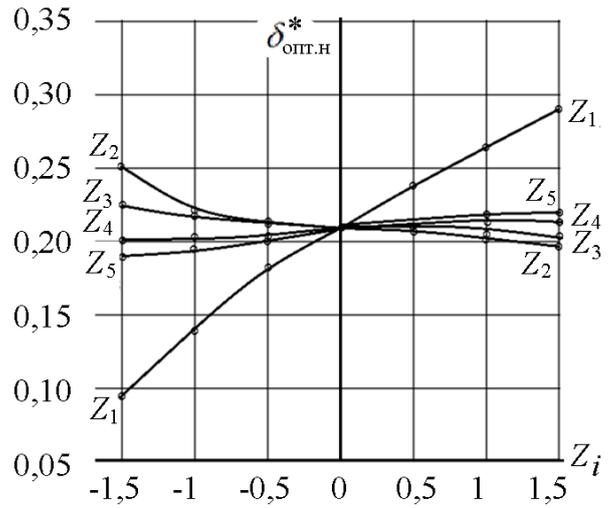


Рисунок 9 – Влияние кодированных значений факторов в центре факторного пространства на относительный рабочий зазор

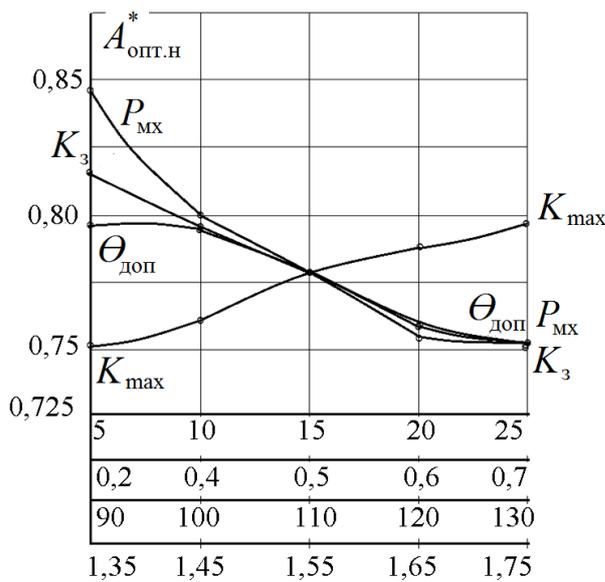


Рисунок 10 – Зависимость относительной толщины обмотки от именованных исходных данных

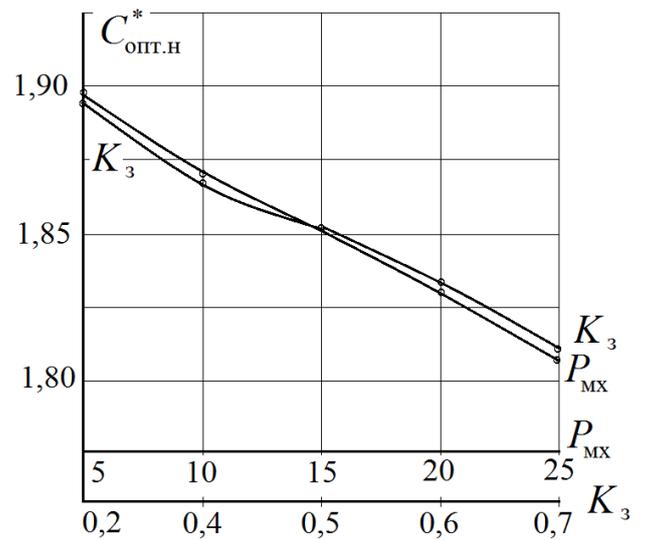


Рисунок 11 – Зависимость относительного расстояния от сердечника до скобы от именованных исходных данных

В предложенной методике существенно сокращено число недостаточно обоснованно применяемых коэффициентов, соизмерностей, что обеспечивает достоверность расчетов по предложенным полиномиальным зависимостям.

Предложенные полиномиальные зависимости оптимальных соизмерностей позволяют существенно сократить финансовые затраты на проектирование, уменьшить время проектных работ, повысить их качество.

В приложениях приведены результаты проектных расчетов по известным методикам различных авторов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты, полученные в диссертационной работе, сводятся к следующему:

1. Альтернативным способом получения адекватных математических моделей электромагнитных характеристик приводных электромагнитов с круглой, сегментной и прямоугольной формой полюсных наконечников в форме удобной для решения задач синтеза являются экспериментальные исследования, проведенные и обработанные с применением теории подобия и планирования эксперимента. Описание электромагнитных характеристик в параметрической форме с использованием усредненной по поперечному сечению в основании сердечника магнитной индукции обеспечивает погрешность не превышающую 15%.

2. Впервые получены обобщенные математические модели статических кривых намагничивания, нагрузочных характеристик, эпюры распределения магнитного потока вдоль оси сердечника, коэффициента рассеяния магнитного потока в основании сердечника для клапанных магнитных систем приводных электромагнитов постоянного тока с круглыми, сегментными и прямоугольными полюсными наконечниками, которые позволяют описывать характеристики линейных и нелинейных магнитных систем математическими выражениями, представленными и в традиционной форме.

3. Разработана методика определения границы линейности магнитных систем, позволяющая установить граничное значение индукции в основании сердечника клапанных электромагнитных систем, элементы магнитопровода которых выполнены из низкоуглеродистой стали марки 10895:

1,16 Тл – для электромагнитов с прямоугольными полюсными наконечниками;

1,23 Тл – для магнитных систем с сегментными полюсными наконечниками;

1,11 Тл - для магнитных систем с круглыми полюсными наконечниками.

Полученные результаты позволяют прийти к выводу о преимущественном влиянии на граничное значение индукции свойств материала магнитопровода.

4. На основании экспериментальных исследований установлены функциональные зависимости, позволяющие учесть потоки рассеяния, замыкающиеся между полюсными наконечниками круглой, сегментной, прямоугольной форм и скобой клапанных магнитных систем. Доля этих потоков при максимальном угле положения якоря составляет до 30-35% от потока пронизывающего сечение сердечника, примыкающее к тыльной стороне поверхности полюсных наконечников. Эти зависимости позволяют скорректировать известные методики расчета, базирующие на теории цепей.

5. На основе анализа нагрузочных характеристик показано, что существуют соразмерности полюсных наконечников в клапанных магнитных системах, обеспечивающие наибольшее значение электромагнитного момента при любом значении магнитодвижущей силы.

6. Методика синтеза оптимальных клапанных электромагнитов с круглыми полюсными наконечниками, разработанная для работы в продолжительном режиме, на основании обобщенных электромагнитных и тепловых характеристик, полученных методами теории планирования эксперимента, и обработанных методами теории подобия позволяет существенно сократить количество недостаточно обоснованно принимаемых коэффициентов, соразмерностей, что обеспечивает достоверность результатов проектных расчетов. Результаты

вычислительного эксперимента с использованием алгоритма синтеза оптимальных клапанных электромагнитов позволяют существенно сократить затраты на проектирование, уменьшить время проектных работ, повысить качество функционирования приводных устройств электромагнитных аппаратов.

Полученные в диссертационной работе результаты позволят в дальнейшем перейти к разработке методик проектирования клапанных приводов электрических аппаратов, работающих в кратковременном, повторно-кратковременном, а также и в форсированном режимах работы, с учетом динамических характеристик.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1 Кадыков, В. К. Потокораспределение в клапанных электромагнитных системах постоянного тока с сегментными полюсными наконечниками / В. К. Кадыков // Вестник Чувашского университета. – 2006. – № 2. – С. 236-243.

2 Кадыков, В. К. К расчету размеров обмотки электромагнита постоянного напряжения / И. З. Ахазов, В. К. Кадыков, Н. В. Руссова, Г. П. Свинцов // Вестник Чувашского университета. – 2006. – № 2. – С. 211-216.

3 Кадыков, В. К. Обобщенные экспериментальные зависимости потораспределения, потокосцепления и магнитодвижущей силы в клапанных электромагнитных системах постоянного тока с круглыми полюсными наконечниками / В. К. Кадыков, Н. В. Руссова, Г. П. Свинцов, А. В. Сизов // Электротехника. – 2007. – № 4. – С. 41-47.

4 Кадыков, В. К. К выбору диаметра полюсного наконечника клапанной магнитной системы постоянного тока / В. К. Кадыков, А. В. Кузмин, Н. В. Руссова, Г. П. Свинцов // Известия вузов. Электромеханика. – 2009. – № 3. – С. 63-68.

5 Кадыков, В. К. Методика расчета энергосберегающих клапанных электромагнитов постоянного напряжения / В. В. Афанасьев, В. К. Кадыков, А. В. Приказчиков, Н. В. Руссова, Г. П. Свинцов // Вестник Чувашского университета. – 2013. – № 3. – С. 164-169.

6 Кадыков, В. К. Сравнительный анализ методик и результатов проектного расчета клапанных электромагнитов постоянного напряжения / В. К. Кадыков, О. А. Никитина, Н. В. Руссова, Г. П. Свинцов // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 2 (URL: www.science-education.ru/122-20883).

Публикации в других изданиях:

7 Кадыков, В. К. Обобщенное представление исходных данных и результатов синтеза электромагнитов постоянного напряжения / В. К. Кадыков, Н. В. Руссова, Г. П. Свинцов // Электротехніка і електромеханіка. – 2002. – № 3. – С. 45-46.

8 Кадыков, В. К. Синтез оптимальных приводных электромагнитов коммутационных аппаратов систем управления автоматизированными электроприводами в повторно-кратковременном режиме / В. К. Кадыков, Н. В. Руссова, Г. П. Свинцов // Автоматизация и прогрессивные технологии: труды III Межотрасл. науч.-техн. конф., Новоуральск, 11-13 ноябр. 2002. – Новоуральск: Изд-во НГТИ, 2002. – С. 199-202.

9 Кадыков, В. К. К моделированию и синтезу клапанных электромагнитов с Г-образным ярмом и цилиндрическим сердечником / В. К. Кадыков, Н. В. Руссова, Г. П. Свин-

цов // Труды Академии электротехнических наук Чувашской Республики. – 2003. – № 4. – С. 57-62.

10 Кадыков, В. К. Проектирование электромагнитов, удовлетворяющих интегральному критерию качества / В. К. Кадыков, Н. В. Руссова, Г. П. Свинцов // Состояние и перспективы развития электроподвижного состава: тезисы докладов IV Междунар. науч.-техн. конф., Новочеркасск, 17-19 июня 2003. – Новочеркасск, 2003. – С. 297-298.

11 Кадыков, В. К. К синтезу оптимальных приводных электромагнитов контакторов для низковольтных комплектных устройств / В. К. Кадыков, Н. В. Руссова, Г. П. Свинцов // Электротехника 2010: сборник докладов VII симпозиума, Московская обл., 27 - 29 мая 2003. – М., 2003. – Т. 2. – С. 237-240.

12 Кадыков, В. К. К моделированию статических электромагнитных характеристик электромагнита постоянного тока, элементы которого выполнены из различных марок магнитомягких материалов / С. В. Ашмарина, Е. С. Береснева, В. К. Кадыков, Н. В. Руссова, Г. П. Свинцов // Труды Академии электротехнических наук Чувашской Республики. – 2004. – № 1. – С. 15-19.

13 Кадыков, В. К. К расчетному моделированию электромагнитных характеристик электромагнитов / С. В. Ашмарина, В. И. Тимофеев, Е. С. Береснева, Н. В. Руссова, Г. П. Свинцов, Е. В. Чигурнов, В. К. Кадыков // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике: Материалы V Всерос. науч.-техн. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2004. – С. 106-110.

14 Кадыков, В. К. Математическое моделирование тепловых параметров клапанных электромагнитов / В. К. Кадыков, Н. В. Руссова, Г. П. Свинцов // Проблемы электротехники, электроэнергетики и электротехнологии: Тр. II Всерос. науч.-техн. конф. с международным участием. – Тольятти, 2007. – Часть II. – С. 243-245.

15 Кадыков, В. К. К анализу методов расчета статических электромагнитных характеристик клапанных электромагнитов / В. К. Кадыков, Н. В. Руссова, Г. П. Свинцов // Электрические и электронные аппараты: сб. науч. тр. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2008. – С. 96-101.

16 Кадыков, В. К. О выборе диаметра полюсного наконечника клапанной магнитной системы / А. В. Кузьмин, А. В. Приказчиков, Н. В. Руссова, Г. П. Свинцов, В. К. Кадыков // Электротехника, электротехнология, электротехнические материалы и компоненты: труды XII Междунар. конф., Крым, Алушта, 29 сентября – 4 октября 2008. – Крым, 2008. – С. 304.

17 Кадыков, В. К. Обобщенные экспериментальные статические силовые характеристики клапанных электромагнитных систем с прямоугольным полюсным наконечником / А. В. Григорьева, В. К. Кадыков, Н. В. Руссова, Г. П. Свинцов // Электрические аппараты и электротехнические комплексы и системы: материалы междунар. науч.-практ. конф., Ульяновск, 22-25 мая 2012. – Ульяновск: УЛГТУ, 2011. – Т. 1. – С. 42-44.

18 Кадыков, В. К. Экспериментальные зависимости распределения магнитного потока и магнитодвижущей силы в клапанных электромагнитных системах с прямоугольными полюсными наконечниками / В. К. Кадыков, Ю. М. Зайцев, Н. В. Руссова, Г. П. Свинцов // Труды Академии электротехнических наук Чувашской Республики. – 2013. – № 2. – С. 40-45.

Кадыков Вилор Константинович

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ
КЛАПАННЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА
С РАЗЛИЧНОЙ ФОРМОЙ ПОЛЮСНЫХ НАКОНЕЧНИКОВ**

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 19.10.2016 г. Формат 60x84 1/16.

Бумага офсетная. Печать оперативная.

Печ. л. 1,0. Тираж 100 экз.

Отпечатано с готового оригинал-макета
в типографии «Крона».

428000, г. Чебоксары, ул. М. Павлова, 19 Б.