

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова»

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

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук, доцент

Свинцов Геннадий Петрович

Чебоксары – 2016

Содержание

Введение	6
Раздел 1 Физическое моделирование статических электромагнитных характеристик клапанных электромагнитов постоянного тока с различной формой полюсных наконечников.....	14
1.1 Основные характеристики электромагнитов и магнитных систем. Методы расчета и способы представления.....	15
1.2 Описание разработанных физических моделей магнитных систем и установки для экспериментальных исследований	33
1.3 Выбор факторного пространства и разработка матриц эксперимента для моделирования статических электромагнитных характеристик	36
1.4 Экспериментальные обобщенные кривые намагничивания, нагрузочные характеристики и эпюры распределения магнитных потоков	41
1.4.1 Экспериментальные электромагнитные характеристики магнитных систем с круглыми полюсными наконечниками.....	42
1.4.2 Экспериментальные электромагнитные характеристики магнитных систем с сегментными полюсными наконечниками.....	43
1.4.3 Экспериментальные электромагнитные характеристики магнитных систем с прямоугольными полюсными наконечниками.....	45
1.5 Выводы по первому разделу.....	47
Раздел 2. Исследование влияния геометрических соотношений и магнитной индукции в основании сердечника на характеристики и параметры клапанной магнитной системы	49
2.1 Исследование границ линейности магнитных систем с различными формами полюсных наконечников	49
2.1.1 Определение границы линейности магнитных систем с круглыми полюсными наконечниками	49

2.1.2	Определение границы линейности магнитных систем с сегментными полюсными наконечниками	52
2.1.3	Определение границы линейности магнитных систем с прямоугольными полюсными наконечниками	56
2.2	Исследование доли магнитного потока под тыльной поверхностью полюсных наконечников, выходящего в рабочий воздушный зазор	58
2.2.1	Исследование доли магнитного потока под тыльной поверхностью круглых полюсных наконечников, выходящего в рабочий воздушный зазор	59
2.2.2	Исследование доли магнитного потока под тыльной поверхностью сегментных полюсных наконечников, выходящего в область рабочего воздушного зазора	61
2.2.3	Исследование доли магнитного потока под тыльной поверхностью прямоугольных полюсных наконечников, выходящего в рабочей воздушный зазор	63
2.3	Оценка возможных оптимальных соизмерностей полюсных наконечников различной формы	65
2.3.1	Влияние относительного диаметра круглого полюсного наконечника на величину электромагнитного момента	66
2.3.2	Влияние соизмерностей сегментного полюсного наконечника на величину электромагнитного момента	73
2.3.3	Влияние соизмерностей прямоугольного полюсного наконечника на величину электромагнитного момента.....	75
2.4	Выводы по второму разделу	81
Раздел 3	Проектирование клапанных электромагнитов с круглыми полюсными наконечниками.....	83
3.1	Обзор методик синтеза клапанных электромагнитов постоянного напряжения	83

3.1.1	Методика проектного расчета на основе использования конструктивного фактора	84
3.1.2	Модифицированная методика проектного расчета на основе использования конструктивного фактора.....	86
3.1.3	Методика расчета определяющих размеров клапанных электромагнитов.....	88
3.1.4	Методика синтеза клапанных электромагнитов на основе их усредненной безразмерной тяговой характеристики	90
3.1.5	Методика проектного расчета привода электромагнитного реле на основе эмпирических зависимостей	93
3.1.6	Методика синтеза клапанных электромагнитов на основе использования корректирующих функций.....	97
3.1.7	Методика синтеза клапанных электромагнитов при различных режимах работы	102
3.1.8	Методики проектирования оптимальных клапанных электромагнитов.....	111
3.2	Методики синтеза оптимальных электромагнитов с круглыми полюсными наконечниками на основе их обобщенных безразмерных характеристик.....	116
3.3	Исследование влияния исходных данных проектирования на оптимальные соразмерности и индукцию в клапанной магнитной системе ..	127
3.4	Обобщение результатов оптимизационных расчетов	131
3.4.1	Синтез клапанной магнитной системы, минимизированной по ее высоте	133
3.4.2	Синтез клапанной магнитной системы, минимизированной по потребляемой мощности.....	133
3.4.3	Синтез клапанной магнитной системы, минимизированной по стоимости.....	134
3.5	Методика «ручного» проектирования оптимальных клапанных электромагнитов постоянного тока.....	135

3.6 Выводы по третьему разделу.....	137
Заключение.....	139
Список использованных источников.....	141
Приложения.....	163

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследования темы. 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, которая достигается минимизацией габаритных размеров и потребляемой мощности. Эти условия являются определяющими при создании автономных объектов спецтехники. Весьма важным аспектом при улучшении отечественной электроаппаратуры является 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.

Трудность обобщенного описания электромагнитных характеристик и тепловых процессов 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. Эти допущения снижают качество проектных работ.

Исследованию магнитных систем различных электромагнитных преобразователей энергии, совершенствованию методов расчета и проектирования уделено внимание в работах Афанасьева А.А., Бугаева Г.А., Буля О.Б., Витенберга М.А., Гордон А.В., Кобленца М.Г., Ковалева О.В., Курбатова П.А., Иванова И.П., Лобова Б.Н., Любчика М.А., Могилевского Г.В., Нестерина В.А., Никитенко А.Г., Павленко А.В., Сливинской А.Г., Софронова Ю.В., Шоффы В.Н. 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 соразмерностей 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, позволяющая в отличие от известных существенно сократить количество недостаточно обоснованно выбираемых коэффициентов и соизмерностей, что обеспечило 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 обеспечить более высокое качество функционирования, а так же уменьшение затрат 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 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 и свидетельствует о необходимости уточненных методик расчета, базирующиеся 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 по диссертационной работе 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 энергосберегающих 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, планирования эксперимента, теории электрических и магнитных цепей, методов решения нелинейных уравнений, методов дифференциального исчисления, методов оптимального параметрического синтеза.

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

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, 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» (Ульяновск 22-25 мая 2012 г.); Второй Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Проблемы электротехники, электроэнергетики и электротехнологии (Тольятти 2007 г.); V Всероссийских научно-технических конференциях «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 имени И.Н. Ульянова» (Чебоксары, 2006-2010.г., 2014-2015 г.)

Достоверность результатов работы обеспечена:

- экспериментальными исследованиями, которые организованы и обработаны методами теорий подобия и планирования эксперимента;
- обоснованным выбором метода поиска оптимальных кратностей геометрических размеров в клапанных электромагнитах;

- использованием положений и методов математического анализа, погрешность аппроксимации результатов исследований полиномиальными зависимостями не превышает 15%.

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.

Раздел 1 Физическое моделирование статических электромагнитных характеристик клапанных магнитных систем постоянного тока с различной формой полюсного наконечника

В настоящее время клапанные магнитные системы (МС) самые распространенные и широко используемые во многих приводах электромагнитных электрических аппаратов (ЭМ), применяемых в различных областях промышленности [9, 18, 44, 120, 125, 132, 151, 176, и др.]. Термин «клапанные электромагниты» [44] подразумевает ЭМ с внешним поворотным якорем, который совершает движение в направлении линий магнитного потока и рабочий воздушный зазор находится вне катушки. Под клапанным имеется в виду электромагнит, описанный в трудах Бугаева Г.А., Гальперна, Н.К., Калленбаха Э.К., Курносова А.В., Лобова Б.Н., Никитенко А.Г., Шоффы В.Н и многих других [22, 40, 88, 99, 104, 112, 136, 176 и др.], содержащий скобу Г-образной формы, с закрепленным на нем сердечником круглого сечения, имеющий полюсный наконечник и обмотку (рисунок 1.1).

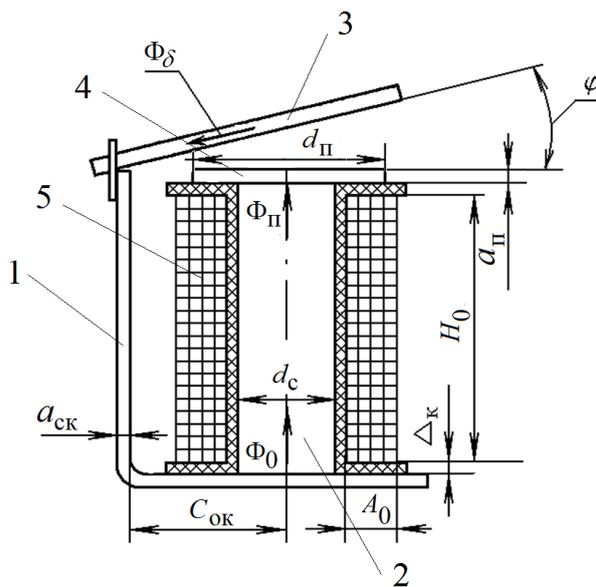


Рисунок 1.1 – Эскиз магнитной системы клапанного электромагнита постоянного тока
1-скоба, 2-сердечник, 3-якорь, 4-полюсный наконечник, 5-обмотка

В диссертации под «клапанными электромагнитами» подразумевается ЭМ с Г-образной скобой, круглым сердечником и полюсными наконечниками различной формы (круглой, прямоугольной, сегментной), с внешним поворотным якорем. Полюсный наконечник и скоба, в исследуемых образцах, крепятся к сердечнику с помощью винтов.

В качестве основных характеристик электромагнита [44 и др.] имеют в виду кривые намагничивания магнитной системы, нагрузочные характеристики, коэффициент

рассеяния магнитного потока, эпюры распределения магнитного потока вдоль сердечника [132, 136, 153, 158, 180 и др.].

Проведены исследования [9, 67, 70, 75] границ линейности магнитных систем с различной формой полюсного наконечника. Показано, что основные электромагнитные характеристики для линейных и нелинейных магнитных систем описывается одинаковыми по структуре математическими моделями, позволяющими упростить алгоритмы синтеза оптимальных приводных электромагнитов коммутационных электрических аппаратов.

Дана предварительная оценка [70, 74, 75, 84 и др.] оптимальных соизмерностей полюсных наконечников, обеспечивающих максимальное значение электромагнитного момента.

1.1 Основные характеристики электромагнитов и магнитных систем. Методы расчета и способы представления

В публикациях [20, 26, 44 и др.] под основными электромагнитными характеристиками подразумевают:

1) зависимость потокосцепления (Ψ) обмотки от магнитодвижущей силы (F), приведенной на рисунке 1.2, при фиксированном угловом положении якоря (φ_i) (кривая намагничивания магнитной системы – КНМС);

2) зависимость электромагнитного момента ($M_{эм}$) от магнитодвижущей силы при фиксированном угловом положении якоря приведена на рисунке 1.3 (нагрузочная или электромеханическая характеристика);

3) уравнение нагрева электромагнитной системы $\theta_y = f(P_{эл}, \text{размеры}, \theta_0)$, которая связывает установившуюся температуру нагрева (θ_y) с мощностью ($P_{эл}$), выделяющейся в обмотке с основными размерами МС и температурой (θ_0) окружающей среды и другими ее параметрами.

4) эпюра распределения магнитного потока по длине оси сердечника магнитной системы (МС).

5) коэффициент рассеяния магнитного потока (σ_0), определяемого как отношение магнитного потока (Φ_0) в основании сердечника к магнитному потоку (Φ_s) в рабочем воздушном зазоре (рисунок 1.1);

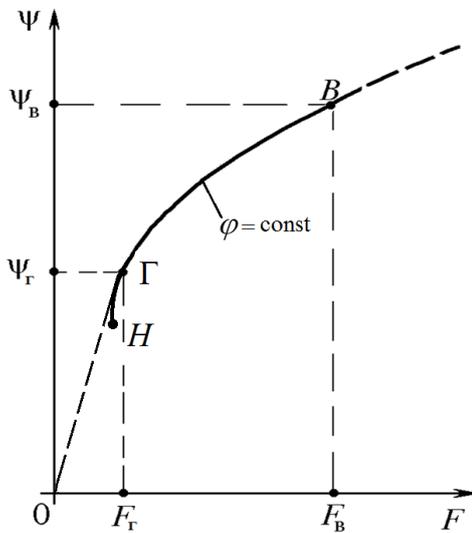


Рисунок 1.2 - К представлению кривой намагничивания магнитной системы

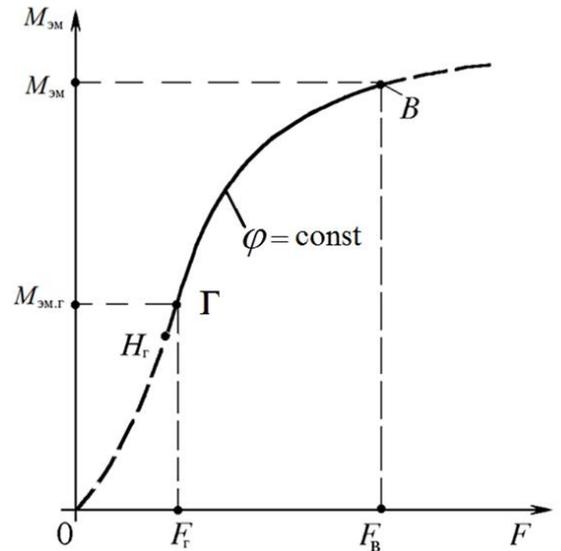


Рисунок 1.3 - К аппроксимации нагрузочной характеристики МС

За время включения обмотки магнитной системы происходит ее нагрев. Тепловые процессы, происходящие во время срабатывания ЭМ, не принимаются во внимание вследствие их кратковременности. Однако, например, при включении ЭМ форсировано управляемого, срабатывающего с большой частотой включения, нагрев пусковым током может быть существенным [168].

б) уравнение электрической цепи обмотки ЭМ

$$u = iR + \frac{d\Psi}{dt}, \quad (1.1)$$

или

$$i = f\left(u, \frac{d\Psi}{dt}\right) = \frac{u - \frac{d\Psi}{dt}}{R} \quad (1.2)$$

где Ψ - мгновенное потокосцепление обмотки;

i - мгновенное значение тока в обмотке;

u - напряжение на обмотке;

R - активное сопротивление обмотки;

t - время.

Эти уравнения (1.1) и (1.2) существенны для анализа процессов, происходящих в ЭМ на различных этапах его рабочего цикла. Уравнение (1.1) служит для анализа при неподвижном якоре первой стадии преобразования электрической энергии, которая поступает от источника и преобразуется в энергию магнитного поля.

7) уравнение движения

$$J \frac{d^2 \varphi}{dt^2} = M_{эм} - M_{мх}(\varphi) - M_{мх.с} \left(\frac{d\varphi}{dt} \right), \quad (1.3)$$

где J - момент инерции подвижных частей;

φ - положение якоря;

$M_{мх}(\varphi)$ - механическая характеристика, являющаяся функцией положения якоря;

$M_{мх.с}(d\varphi/dt)$ - момент сопротивления движению якоря со стороны связанных с ним элементов от угловой скорости движения.

Это уравнение дает возможность определить скорость и время движения, кинетическую энергию двигающихся частей и описывает механические переходные процессы, проходящие при срабатывании (или возврате) электромагнита.

При решении задач проектирования, необходимо рассчитать электрические, тепловые, магнитные характеристики [1, 12, 13-15, 21, 26, 27, 37-39, 40, 42, 44, и др.] с использованием цепных [179, 180 и др.] или полевых методов. Так же используются комбинированные методы, которые совместно используют эти два метода [45, 46, 51, 52, 63, 89, 90, 122, 130, 135-138, 142, 171 и др.].

Классификация методов расчета электромагнитных полей, основанная на известных публикациях [3-8, 27, 45, 46, 50-52, 62, 63, 98, 130, 138, 160, 180], приведена на рисунке 1.4



Рисунок 1.4 - Методы расчета электромагнитных полей

В настоящее время широко применяется полевые методы расчета.

В публикации [130] на примере расчета магнитных полей электрических аппаратов проведена оценка полевых методов.

При расчетах электромагнитных устройств используются метод конечных элементов (МКЭ), в том числе бесконечно протяженных; метод конечных разностей (МКР), так называемый сеточный метод; метод интегральных уравнений (МИУ); разделения переменных и др.

Приведенные ниже оценки в [130] сводится к следующему:

1) Методы МКР и МКЭ просты для реализации на ЭВМ. Используются для описания областей поля с четкими границами. В качестве недостатков этих

методов отмечается необходимость численного дифференцирования при определении векторов индукции и напряженности поля, а также построения новой сетки при изменении положения якоря электромагнита.

2) Метод интегральных уравнений применяется для ферромагнитных областей, граничных к их поверхностям и позволяет уменьшить размерность системы уравнений, исключая осложнения при расчете открытых МС, связанных перестраиванием расчетной сетки.

Эффективными оказались разновидности: метод вторичных источников (МВИ); метод интегрирования по источникам поля (МИИП); метод граничных элементов (МГЭ).

Согласно МВИ расчет поля в нелинейной, неоднородной и анизотропной среде сводится к расчету поля в однородной среде, которое создано токами обмоток (первичные источники) и объемными, поверхностными магнитными зарядами или фиктивными поверхностными токами (вторичные источники). Для линейных магнитных систем уменьшается размерность системы уравнений. Другими преимуществами МВИ являются: исключение искусственного ограничения объема поля; вектора индукции и напряженности, которые определяются непосредственно. Эффективность метода повышается при расчете двумерных и осесимметричных полей. Недостатком этого метода является необходимость обеспечения сходимости итерационных процессов счета.

Система уравнений МИИП имеет меньшую размерность [130], чем при использовании МВИ. В случае расчета нелинейных магнитных систем МГЭ использует большее количество неизвестных, чем МВИ.

Отмечается перспективность [130] комбинированных методов (МКЭ, МГЭ). Упрощается решение задач, связанных с учетом влияния вихревых токов, анизотропии материалов.

Метод конформных преобразований, базирующийся на интегральной формуле Коши для функции комплексных переменных, также является эффективным численно-аналитическим методом расчета полей. Численными методами с использованием интеграла Кристоффеля-Шварца может быть

выполнен расчет плоскопараллельных полей между многоугольными границами. Аналитическое описание функции преобразования области поля в верхнюю полуплоскость возможно, при количестве вершин многоугольной границы не превышающей 3-4. Решение нелинейной системы уравнений сопряжено с вычислением несобственных интегралов [3, 8], что приводит к росту затрат времени до 40 минут для случая одиннадцатиугольной области поля. Разработанная форма записи уравнения Кристоффеля-Шварца [5], исключая вычисление несобственных интегралов, незначительно сокращает время расчета.

На основе интегральной формулы Коши профессором А.А. Афанасевым разработан метод расчёта плоскопараллельных полей, названный [8] методом сопряжения (сшивания) конформных отображений (МСКО).

Приведенная сравнительная оценка [8] МСКО с известными МКР и МКЭ сводится к следующему:

1. Дискретизация расчетной области необходима только при многосвязанном ее характере, нелинейных свойствах магнитопровода. Однородные зоны МС (воздушные зазоры, линейные элементы магнитопровода) могут не разбиваться на элементарные участки (ЭУ), если определение постоянных в дифференциальном уравнении Кристоффеля-Шварца не встречает трудностей. Расчетная область может быть разбита на большеразмерные ЭУ (которые могут совпадать с функциональными частями МС) и малоразмерные ЭУ (нелинейные зоны). Это позволяет уменьшить порядок исходной системы уравнений при сохранности точности решения задачи.

2. Системы уравнений МКР, имеющие большую размерность, решаются итерационно с соблюдением условий сходимости. МСКО связан с уравнениями меньшей размерности и в случае линейной МС решается безинтегральным методом.

3. Во внутренних точках области неизвестная функция определяется без методической погрешности по ее граничным значениям.

4. МСКО ориентирован на решения более широкого круга задач, чем КМГЭ (краевые задачи Дирихле и Неймана, не требующих дискретизации расчетной области).

Известна попытка [7] расчета трехмерных магнитных полей с использованием интегральной формулы Коши (для функции двух комплексных переменных). Этот принцип расчета магнитных полей может стать основой комплексного метода граничных элементов применительно к трехмерным полям.

При решении задач параметрической оптимизации актуальна разработка «быстрых» [137] методов расчета электромагнитных и тепловых полей.

Широкое применение получили программные продукты, реализующие метод сеток и конечных элементов:

программа «Profi», решает задачу двухмерной динамики и трехмерной статики, имеет графический постпроцессор, ввод геометрии расчетной области производится вручную;

программа «ELCUT» решает двухмерные задачи электромагнитной статики тепловых процессов;

программа «FEMM» для расчета плоскопараллельных и плоскомеридианных магнитных и тепловых полей используется без ограничений по размерности решаемых задач;

программа «Maxwell», используется для расчета двух и трехмерных статических и динамических магнитных полей;

программа «ANSYS» позволяет рассчитать магнитные, тепловые, механические поля, в том числе с учетом их взаимного влияния;

программа «GMSH+GETDP», обладает возможностями «Profi», но требует программирования процесса вычисления;

программа «COSMOS» позволяет моделировать любые объекты, рассчитывать механические, магнитные, электрические, тепловые поля.

Способы расчета электромагнитных полей, сводится к определению электромагнитных характеристик, для которых следует отметить следующие моменты:

- под электромеханическими характеристиками подразумевается зависимость тягового электромагнитного момента ($M_{эм}$) или электромагнитного усилия ($P_{эм}$) от МДС обмотки (обмоток) при фиксированном положении якоря МС;

- разновидностью статической электромагнитной характеристики является тяговая характеристика, представляющая зависимость электромагнитного усилия (момента) от положения якоря при фиксированной МДС МС;

- тяговые и нагрузочные характеристики взаимосвязаны: имея одно семейство зависимостей, можно определить другое семейство зависимостей [121, 144, 180 и др.];

- статическая характеристика соответствует бесконечно медленному изменению во времени тока I или магнитодвижущей силы F обмоток ЭМ.

В тех случаях, когда динамические характеристики ЭМ являются не главными, в уравнение проектирования закладываются [12, 21, 28, 99, 104, 125, 114, 132, 143, 146, 180 и др.] статические кривые намагничивания и статические электромеханические характеристики. Их отдельное использование оправдано для обеспечения наглядности при решении задач анализа и синтеза приводных электромагнитов электрических аппаратов. В частности, КНМС, как будет показано ниже, удобны для определения «линейности» и «нелинейности» магнитной системы. Нагрузочные характеристики удобны для обобщенного представления и описания силовых характеристик электромагнитов.

Целесообразно сравнить и оценить известные методы представления электромагнитных характеристик с точки зрения их удобства использования при решении задач параметрического синтеза МС.

Известно [44 и др.], что электромагнитные характеристики в традиционном представлении (КНМС и статические нагрузочные характеристики СНХ (рис.1.2)) изменяется в зависимости от размеров электромагнита и условий функционирования в широких пределах. Это обстоятельство затрудняет их математическое описание в традиционном виде представления, в форме удобной для решения задач синтеза [1, 153 и др.].

Удачным способом для решения задач подобного рода является использование методов теории подобия [29-32, 47, 66, 106-111, 127, 145, 175, 177, и др.], позволяющие описать характеристики объектов в обобщенном безразмерном виде. Перспективность и целесообразность использования методов теории подобия неоднократно отмечалась [66, 127, 145, 177] во многих научных публикациях.

В статьях [143, 145] предложено и используется [132, 138] безразмерное выражение для электромагнитной силы

$$P_* = \frac{P_{эм} \cdot \rho_\tau}{\delta^3 \cdot \kappa_T \cdot \kappa_z \cdot \tau \cdot \mu_0}, \quad (1.4)$$

где ρ_τ - удельное электрическое сопротивление меди, соответствующее превышению τ температуры обмотки относительно температуры окружающего воздуха;

δ - рабочий зазор;

κ_z - коэффициент заполнения обмоточного окна магнитной системы;

κ_T - коэффициент теплопередачи;

τ - допустимое превышение температуры;

μ_0 - магнитная постоянная $\left(\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}} \right)$.

При использовании (для обобщенного электромагнитного усилия (P_*)) выражения (1.4) кроме непосредственного определения $P_{эм}$ и рабочего зазора (δ) необходимо измерить (определить) среднеповерхностную температуру обмотки, коэффициент ее заполнения, коэффициент теплопередачи, а также удельное электрическое сопротивление, которое не постоянно в толще обмотки. Определение тепловых параметров представляет собой специальное трудоемкое исследование [56].

Коэффициент теплопередачи зависит от превышения температуры, эффективной площади охлаждения обмотки и пространственного ее расположения [28 и др.]. Для решения задач синтеза выражение (1.4) необходимо

искать, как минимум, в виде функции от относительных размеров МС и ее режима работы. Таким образом, необходимо обеспечить одновременно три вида подобия: тепловое, магнитное и геометрическое.

Известно [180], что обеспечить одновременно геометрическое, магнитное и тепловое подобия невозможно. При использовании (1.4) для целей проектирования приходится без должного обоснования принимать, κ_T , κ_ν , что снижает доверие к точности результата проектного расчета.

Известен также метод [176, 177, 180] представления P_* в виде:

$$P_* = \frac{\sqrt{P_{эм} \cdot 10^4}}{2,24 \cdot F_{II}} = \varphi_3(\delta_{**}), \quad (1.5)$$

где $\delta_{**} = \delta/d_{II}$ - относительная величина воздушного зазора,

d_{II} - диаметр полюсного наконечника клапанного электромагнита;

F_{II} - магнитодвижущая сила обмотки, соответствующая ее сопротивлению по постоянному току при установившемся тепловом состоянии и минимальному напряжению источника питания.

Экспериментальная зависимость $\varphi_3(\delta_{**})$ представлена графически. Отклонения от усредненной кривой тяговых характеристик $\varphi_3(\delta_{**})$ достаточно велико [176], что свидетельствует о существенной зависимости электромеханических характеристик от геометрических соизмерностей в МС.

Выражение (1.5) получено для продолжительного режима работы и соответствует превышениям температуры ЭМ в диапазоне $(55-88)^\circ\text{C}$. Отсутствует обоснование возможности использования для проектных разработок форсированных электромагнитных приводов.

Известен также [127] параметрический способ описания статических электромагнитных характеристик в безразмерном обобщенном виде. Электромагнитный момент $M_{эм}$ рекомендовано описывать в виде:

$$M_{эм} = M(B_2, x_1 x_2 x_3 \dots),$$

где $x_1, x_2, x_3 \dots$ - размеры МС;

B - магнитная индукция.

Для ненасыщенной МС предложено выражение электромагнитного момента записывать в виде:

$$M_{\text{эм}} = B^2 \cdot x_1^3 \cdot f_1\left(\frac{x_2}{x_1}, \frac{x_3}{x_1}, \dots\right), \quad (1.6)$$

где x_1 - размер МС, принятый за базисный.

Магнитодвижущая сила определена [127]

$$F = B \cdot x_1 \cdot f_2\left(\frac{x_2}{x_1}, \frac{x_3}{x_1}, \dots\right). \quad (1.7)$$

Как утверждается в [127], в функции f_1, f_2 входят постоянные величины: коэффициент теплопередачи, магнитная проницаемость и т.д.

Таким образом, остается неясным, какой из размеров МС должен быть выбран в качестве базисного, включен ли в перечень рабочий воздушный зазор x_i , в каком поперечном сечении магнитной системы необходимо задавать магнитную индукцию B .

При проектировании современных электромагнитных аппаратов с ресурсосберегающими приводами, управляемых форсировано, необходимо задаваться повышенными значениями индукции [131 и др.]. Следовательно, в этом случае магнитные системы приводных электромагнитов нельзя рассматривать как линейные.

Известно [29, 32], что для выполнения подобия нелинейных МС необходимо обеспечить равенство их нелинейных безразмерных характеристик. Следовательно, функции f_1, f_2 должны быть представлены в безразмерном виде и по крайней мере должны включать магнитную индукцию B в одном из характерных сечений МС. Базисное значение магнитодвижущей силы $F_{\text{баз}}$ имеет размерность А (Ампер).

Известен также расчетный метод [44 и др.] определения нагрузочной характеристики на основе «энергетической» формулы электромагнитного момента

$$M_{\text{эм}} = -0,5F_{\delta}^2 \frac{d\Lambda_{\delta}}{d\varphi}, \quad (1.8)$$

где Λ_{δ} - магнитная проводимость рабочего воздушного зазора;

F_{δ} - падение магнитного напряжения на сопротивлении рабочего воздушного зазора;

φ - угловое положение якоря.

Падение магнитного напряжения в рабочем воздушном зазоре может быть измерено или определено [44] в результате расчета МС.

Выражение (1.8) учитывает изменение лишь части электромагнитной энергии, хотя и большей, запасаемой в МС в процессе срабатывания приводного ЭМ.

Экспериментальные способы определений силовых характеристик можно разделить на прямые и косвенные .

К косвенным способам относится определение электромагнитной силы $P_{\text{эм}}$, момента $M_{\text{эм}}$ через КНМС [121 и др.]. Согласно «энергетической» концепции теории электромагнитной силы она может быть определена в соответствии с выражением:

$$P_{\text{эм}} = P_{\text{эм}}(\psi, x) = \frac{dW_{\text{эм}}}{dx} = -\frac{1}{N} \cdot \frac{d}{dx} \int_0^{\psi} F d\psi, \quad (1.9)$$

где x - направление действия электромагнитной силы (выбран рабочий воздушный зазор, направленный вдоль оси сердечника магнитной системы);

$W_{\text{эм}}$ - электромагнитная энергия , запасаемая в магнитной системе;

N - число витков обмотки возбуждения.

Для расчета электромагнитных сил в МС возможно [121, 180] использование коэнергии W^* :

$$P_{\text{эм}} = P_{\text{эм}}(i, x) = \frac{dW^*}{dx} = \frac{d}{dx} \int_0^i \psi(i, x) di, \quad (1.10)$$

Аналогичные выражения могут быть записаны и для определения электромагнитного момента.

Общим недостатком этого способа является необходимость использования операции дифференцирования экспериментальных зависимостей в виде кривых намагничивания МС. Это может приводить к большим погрешностям определения нагрузочных характеристик ЭМ. Следовательно, для разработки математической модели нагрузочной характеристики лучше всего использовать методы измерения электромагнитной силы (момента).

Магнитные и тепловые поля в большинстве разновидностей магнитных систем, в том числе и клапанных приводных электромагнитов, являются трехмерными. Доступным для использования является лишь программные продукты расчета двухмерных полей. Как отмечается во многих литературных источниках, высокая стоимость программных продуктов, позволяющих анализировать и рассчитывать трехмерные поля, делает их недоступными для их практического применения.

Экспериментальные исследования статических электромагнитных характеристик являются компромиссом между высокой стоимостью программных продуктов, моделирующих трехмерные поля методами теории поля и недостаточной точностью методов, базирующихся на теории цепей. Результаты экспериментальных исследований целесообразно представить в безразмерной критериальной форме [175, 177] методами теории подобия. При этом эффективным инструментом математического описания результатов экспериментальных исследований является теория активного эксперимента [58, 64].

В работе [153] предложен способ представления статических кривых намагничивания МС и ее нагрузочных характеристик для нейтральных электромагнитов постоянного тока. В этом способе основная кривая намагничивания магнитномягкой стали и зависимость относительной магнитной проницаемости (μ_r), соответствующая ей, изображены на рисунке 1.5, сплошными линиями.

Относительная магнитная проницаемость μ_r при воздействии намагничивающего поля на ферромагнитные элементы магнитной системы изменяются от $\mu_{r.i}$ до $\mu_{r.max}$ (колени основной кривой намагничивания стали на рисунке 1.5, а) и соответствует возрастанию индукции от 0 до B_H . Дальнейшее увеличение индукции B приводит к существенному уменьшению μ_r .

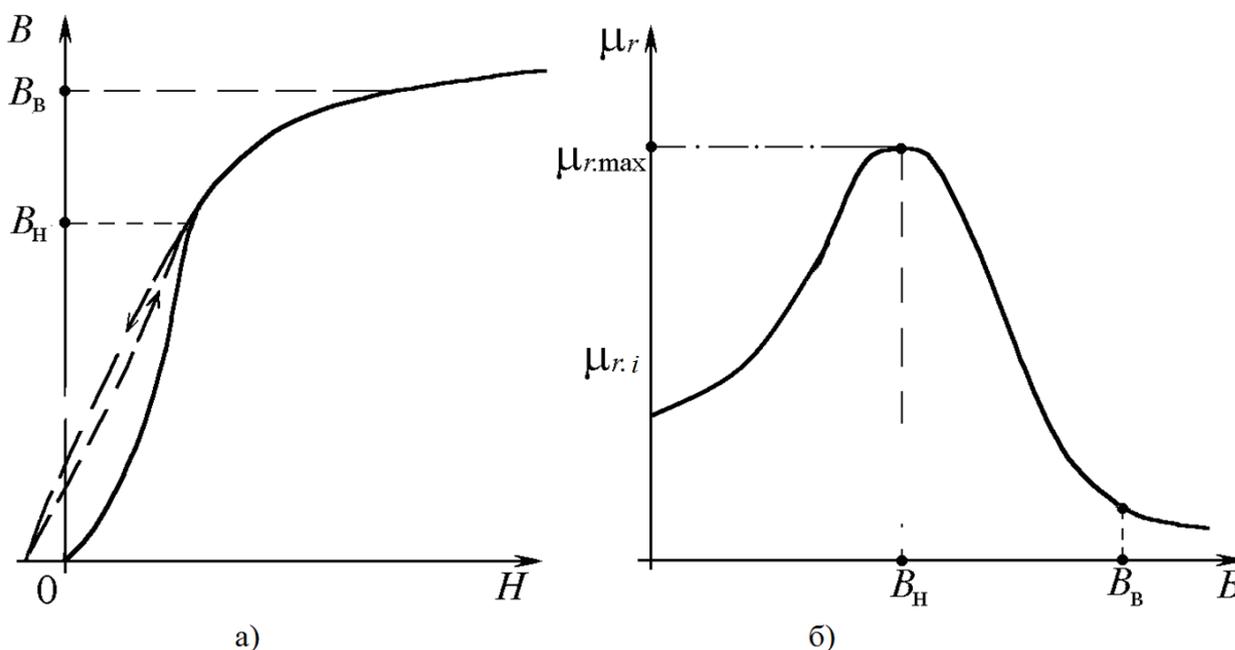


Рисунок 1.5 – К анализу перемагничивания ферромагнитных элементов МС электромагнитов

Известно, что размыкание цепи обмотки не вызывает полного размагничивания магнитной системы. При размагничивании ниспадающая ветвь кривой намагничивания стали на рисунке 1.5, а изображена пунктирной линией со стрелкой «вниз». Величиной остаточного магнитного потока можно пренебречь, так как коэрцитивная сила магнитномягких сталей [44] не превышает 100 А/м. При этом зазоры отлипания и паразитные зазоры по сравнению с рабочим зазором составляют заметную величину.

При очередном подключении обмотки к источнику питания кривая намагничивания (пунктирная линия со стрелкой «вверх» на рисунке 1.5, а) разместится между ниспадающей и основной кривыми намагничивания

(сплошная линия) и согласно [44, 146] приблизительно соответствует максимальному значению $\mu_{r, \max}$ относительной проницаемости (на рисунке 1.5, б).

На наиболее нагруженном сечении МС (на втором участке кривой намагничивания от B_H до B_B) магнитные сопротивления ферромагнитных элементов существенно зависят от значения магнитной индукции. Пренебрежение нелинейностью этой кривой вызывает большие расхождения. Например, величина B_B для марок стали 10895 и 20895, которые широко используются в МС приводных электромагнитов, составляет порядка 1,6Тл, а величина B_H равна $(0,8 \div 1)$ Тл.

На практике при реализации рассмотренного способа представления кривой намагничивания МС возникает трудность определения расположения наиболее нагруженного сечения МС, которая в основном зависит от соизмерностей в магнитной системе [69].

Здесь же отмечается, что в области своих максимальных значений μ_r изменяется незначительно, что позволяет контролировать и измерять индукцию B_0 в наиболее нагруженном сечении МС при относительно больших зазорах. При малых рабочих воздушных зазорах эпюра распределения магнитного потока несущественно отличается от потока Φ_0 .

По данным источников [131, 151] оба участка кривой намагничивания МС (начальный и нелинейный) представляют большой практический интерес при решении задач синтеза, выбор индукции в электротехнической стали при этом должна быть в пределах $(0,8 \div 1,5)$ Тл. Зависимость $\Psi = \Psi(F)$ на нелинейном участке КНМС рекомендуется устанавливать экспериментально [153].

Для математического описания КНМС в параметрической форме в виде безразмерных зависимостей [153] базисные значения потокосцепления $\Psi_{баз}$ и МДС $F_{баз}$ представлены:

$$\begin{cases} \Psi_* = \Psi / \Psi_{баз}, \\ F_* = F / F_{баз}, \end{cases} \quad (1.11)$$

$$(1.12)$$

где $\Psi_{\text{баз}} = B_0 \frac{\pi d_c^2}{4} N$; $F_{\text{баз}} = \frac{B_0 d_c}{\mu_0}$; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Г/м.

Согласно [116, 120, 132] диаметр сердечника d_c выбран как базовый размер магнитной системы. В безразмерные функции Ψ_* и F_* согласно теории подобия [29] нелинейных систем введена индукция B_0 и исключены коэффициент теплопередачи, магнитная проницаемость, превышение температуры нагрева обмотки, в отличие от источника [127].

При контроле усредненной магнитной индукции, изменяющийся в диапазоне от 0 до $B_{0\Gamma}$ в наиболее нагруженном сечении МС, магнитные сопротивления ферромагнитных элементов постоянны, что позволяет заменить первый участок КНМС (зависимости суммарного потокосцепления от МДС, при фиксированном положении элементов магнитной системы) уравнением прямой, которая проходит через начало координат.

Граница линейности КНМС (точка Γ , рисунок 1.2) может быть определена [70] из следующего выражения:

$$\frac{d\Psi}{dF} = \frac{\Psi_{\Gamma}}{F_{\Gamma}}, \quad (1.13)$$

где в соответствии с выражениями (1.11), (1.12)

$$\Psi = \Psi_* \cdot \Psi_{\text{баз}},$$

$$F = F_* \cdot F_{\text{баз}}$$

Из уравнения (1.13) возможно определение граничного значения усредненной магнитной индукции $B_{0\Gamma}$ в поперечном сечении сердечника, примыкающему к ярму магнитопровода.

КНМС в параметрической форме при изменении индукции B_0 в диапазоне от 0 до $B_{0\Gamma}$ может быть представлена в виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Psi = \Psi_*(B_{0\Gamma}) \Psi_{\text{баз}}; \\ F = F_*(B_{0\Gamma}) F_{\text{баз}}, \end{array} \right. \quad (1.14)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \Psi = \Psi_*(B_{0\Gamma}) \Psi_{\text{баз}}; \\ F = F_*(B_{0\Gamma}) F_{\text{баз}}, \end{array} \right. \quad (1.15)$$

В традиционной форме представления КНМС на линейном участке имеет вид:

$$\Psi = \frac{\Psi_{\Gamma}}{F_{\Gamma}} F. \quad (1.16)$$

Аналогично уравнениям (1.11) и (1.12) электромагнитный момент может быть представлен в виде:

$$M_* = M_{\text{ЭМ}} / M_{\text{баз}}, \quad (1.17)$$

где $M_{\text{баз}} = \frac{\pi d_c^3}{8\mu_0} B_0^2$ - базисное значение электромагнитного момента.

Таким образом, выражения (1.12) и (1.17) совместно определяют нагрузочную характеристику (рисунок 1.3).

Нагрузочные характеристики электромагнита в традиционной форме представления для линейных МС описываются параболой [44 и др.] (рисунок 1.3). Поэтому при $B_0 \leq B_{0\Gamma}$ можно записать

$$M_{\text{ЭМ}} = M_{\text{ЭМГ}} \cdot \left(\frac{F}{F_{\Gamma}} \right)^2 \quad (1.18)$$

где $M_{\text{ЭМГ}} = M_*(B_{0\Gamma}) \cdot B_{0\Gamma}^2 \cdot \frac{\pi d_c^3}{8\mu_0}$; $F_{\Gamma} = F_*(B_{0\Gamma}) \cdot B_{0\Gamma} \cdot \frac{d_c}{\mu_0}$.

Параметрическая форма представления нагрузочной характеристики электромагнита при его линейной МС ($B_0 \leq B_{0\Gamma}$) имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} M_{\text{ЭМГ}} = M_*(B_{0\Gamma}) \cdot B_{0\Gamma}^2 \cdot \frac{\pi d_c^3}{8\mu_0}; \end{array} \right. \quad (1.19)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} F = F_*(B_{0\Gamma}) \cdot B_0 \cdot \frac{d_c}{\mu_0} \end{array} \right. \quad (1.20)$$

При экспериментальном определении функций Ψ_* , F_* , M_* целесообразно не включать в перечень аргументов [153] координату, характеризующую положение якоря (φ), а проводить исследования для ряда фиксированных значений (φ_i). Связано это с тем, что статические электромагнитные

характеристики в существенной степени зависят [44, 116, 120 и др.] от положения якоря.

Коэффициент рассеяния магнитного потока σ_0 представляет собой отношение потока (Φ_0) в основании сердечника к потоку (Φ_δ) в воздушном зазоре. Эюра распределения магнитного потока по высоте (y_*) сердечника в относительном виде может быть аппроксимирована квадратичным трехчленом:

$$\Phi_*(y_*) = \Phi/\Phi_0 = 1 + \Phi_2 y_* + \Phi_3 y_*^2. \quad (1.21)$$

где Φ_2 , Φ_3 - безразмерные функции, полученные обработкой экспериментальных данных

Безразмерные электромагнитные характеристики Y_* (Ψ_* , F_* , M_* и др.) определяются в виде полиномиальных зависимостей [58, 64, 153]

$$Y_* = \left(a_0 + \sum a_i x_i + \sum a_{ii} x_i^2 + \sum a_{ij} x_i x_j + \dots \right)^k \quad (1.22)$$

где a_i , a_{ii} , a_{ij} - функции, зависящие от координаты φ положения якоря электромагнита;

x_i - кодированное значение факторов (относительных геометрических размеров МС и индукции B_0)

k - подбираемый показатель степени, используется для повышения точности аппроксимации [64] экспериментальных данных.

Коэффициент рассеяния магнитного потока в основании сердечника:

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

где Φ_δ - магнитный поток в рабочем воздушном зазоре.

Следовательно, экспериментальная установка должна допускать: установку на ней МС с различными соразмерностями; регулировать и измерять ток в обмотке возбуждения; измерять потокосцепление в ней; измерять магнитные

потоки в различных поперечных сечениях магнитной системы; измерять электромагнитное усилие (электромагнитный момент).

1.2 Описание разработанных физических моделей магнитных систем и установки для экспериментальных исследований

Исследуемые ЭМ реализованы в виде магнитных систем-трансформеров (рисунок 1.6), в которых при выбранных диаметрах $d_c = 20 \cdot 10^{-3}$ м сердечников и высоте (H_0) обмоток можно менять полюсные наконечники, A_0 , C (рисунок 1.1). Якорь выполнен съемным (рисунок 1.7.), поворачивающимся на «призме».

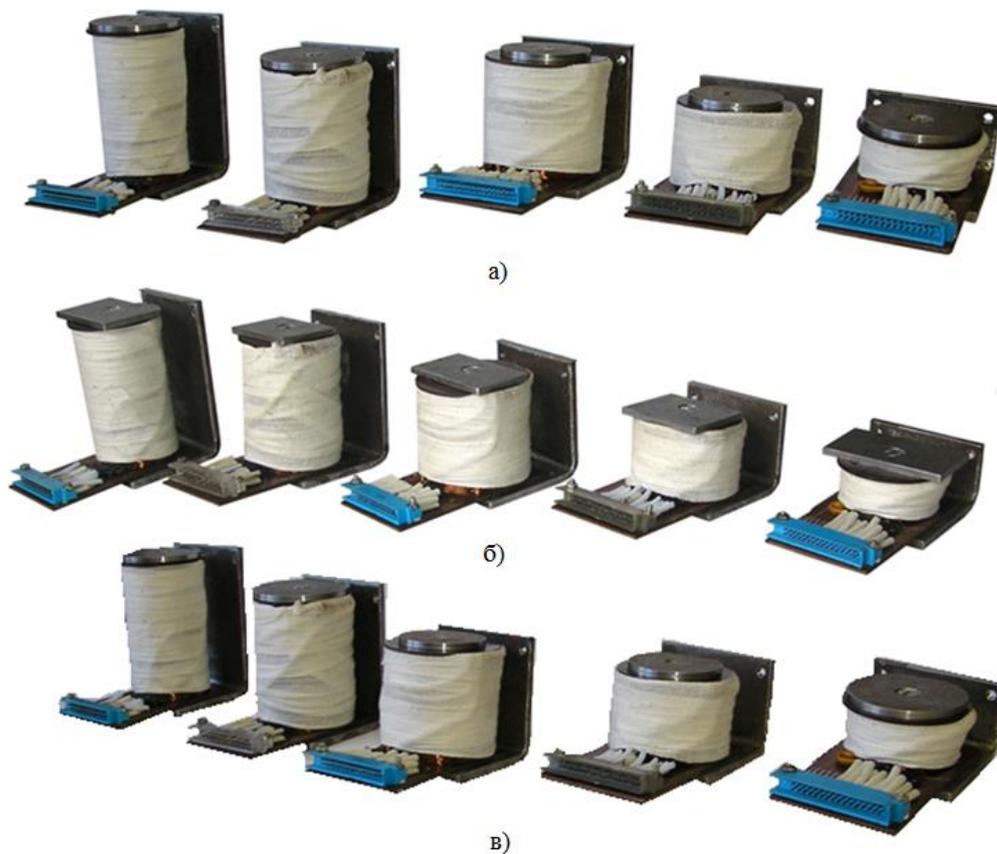


Рисунок 1.6 - Клапанные магнитные системы-трансформеры:
 а - с круглыми полюсными наконечниками; б - с прямоугольными полюсными наконечниками; в - с сегментными полюсными наконечниками

Собранная МС устанавливается на платформу (рисунок 1.8), позволяющую фиксировать угловые положения якоря.



Рисунок 1.7 - Якорь и прижимная пластина



Рисунок 1.8 - Платформа для установки магнитных систем

Электрическая схема установки (рисунок 1.9) обеспечивает питание обмоток возбуждения ЭМ (N_1, N_2, N_3), измерение и реверс тока в них и позволяет:

-измерять потокосцепление электромагнитов и распределение магнитного

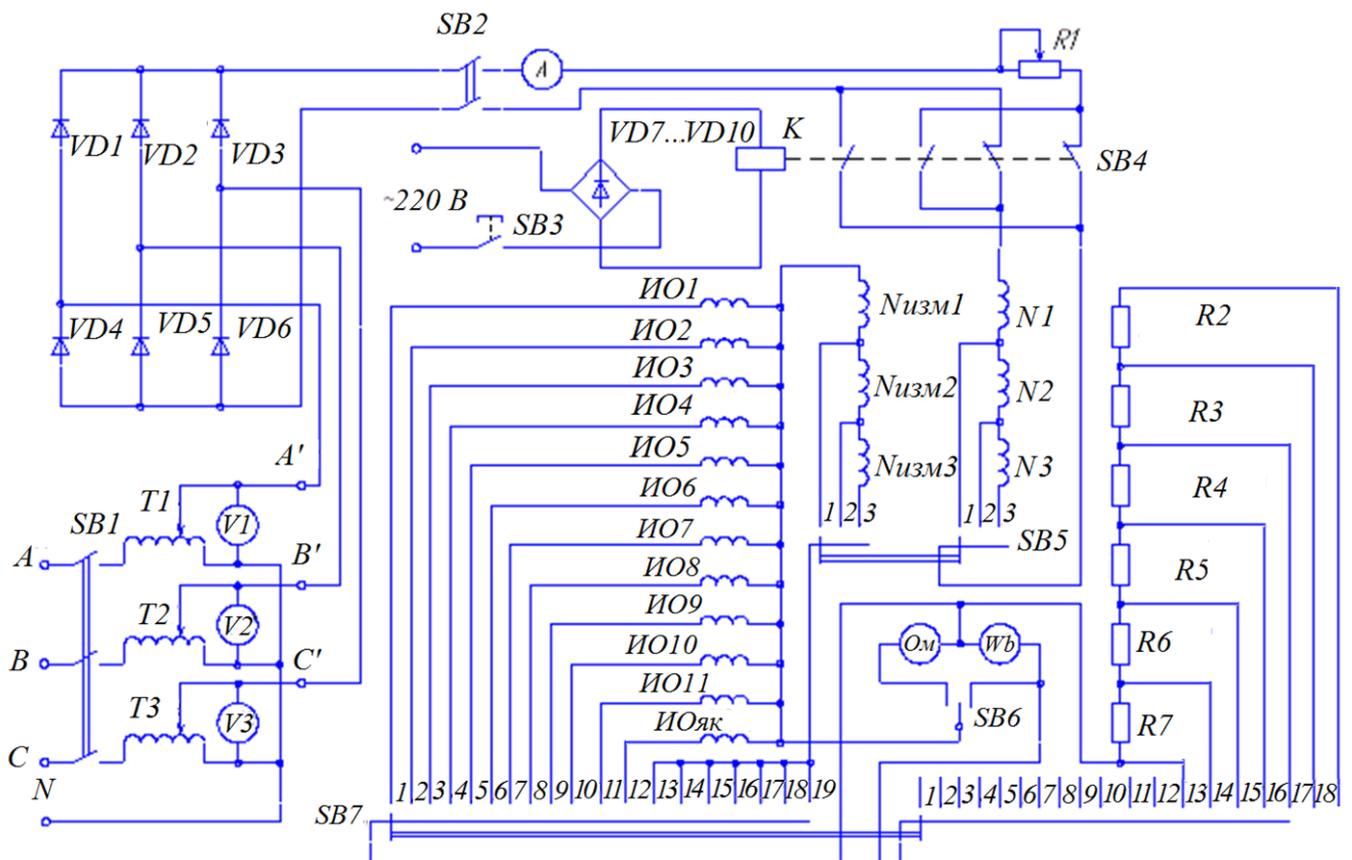


Рисунок 1.9 – Электрическая схема принципиальная

потока вдоль оси сердечников ЭМ;

-подключить к клеммам миллиамперметра резисторы R2-R7 для расширения его пределов измерения. Пульт управления (рисунок 1.10) упрощает процесс исследования, обеспечивая оперативное подключение к цепям питания, измерения и управления.

Для измерения магнитных потоков использовался стрелочный миллиамперметр и измерительные обмотки (рисунок 1.11), намотанные с шагом $0,1 H_0$.

При проведении экспериментальных исследований был выбран следующий порядок:

1. На платформе устанавливалась магнитная система с необходимыми

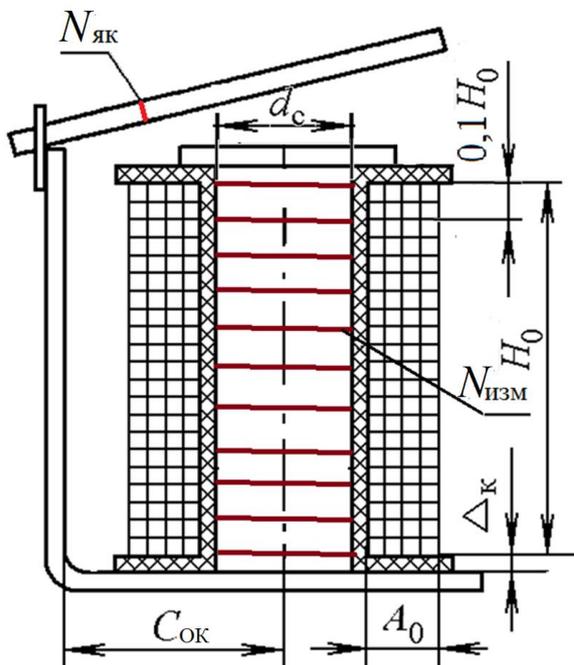


Рисунок 1.11- Схема размещения измерительных обмоток ($N_{изм}$) на сердечнике и якоре ($N_{як}$)

исключения возможного влияния на результат измерения остаточного магнитного потока в магнитной системе.



Рисунок 1.10 - Пульт управления

геометрическими размерами ($d_{п}$, H_0 , A_0 , c - на клапанной магнитной системе с круглыми полюсными наконечниками).

2. Устанавливался угол поворота якоря.

3. Подбирался ток в обмотке возбуждения, регулируя напряжение на обмотке, обеспечивающий необходимое значение индукции B_0 в основании сердечника (рисунок 1.3). При этом осуществлялся реверс тока в обмотке возбуждения для

4. Измерялись потокраспределение по высоте сердечника (рисунок 1.11), потокосцепление согласно методике [119], при этом фиксировались сопротивление измерительной обмотки, намотанной совместно с обмоткой возбуждения и используемой для корректировки влияния подогрева измерительной обмотки, ток, показание цифрового вольтметра постоянного тока, подключенного на сигнал, снимаемый с тензометрического датчика.

5. Рассчитывались МДС обмотки (по известному значению тока и числу витков), потокосцепление, электромагнитный момент по известному плечу приложения электромагнитной силы, измеренной экспериментально, эпюра распределения потока по высоте сердечника, коэффициент рассеяния магнитного потока, протекающего в основании сердечника.

6. Задается следующее угловое положение якоря с шагом 1° от одного до пятнадцати градусов, и для каждого из них проводится измерение, начиная с п. 2 по п.5 включительно.

7. В соответствии с выражениями (1.11), (1.12), (1.17), (1.21) подсчитываются безразмерные потокосцепление (Ψ_*), МДС (F_*), электромагнитный момент (M_*) и эпюра распределения потока $\Phi_* = \Phi_*(y_*)$.

1.3 Выбор факторного пространства и разработка матриц эксперимента для моделирования статических электромагнитных характеристик

При физическом моделировании электромагнитных характеристик клапанных электромагнитов с различной формой полюсных наконечников использована [153] методология многофакторного планирования эксперимента [64]. В качестве факторов использованы геометрические соразмерности в магнитной системе и индукция B_0 в ее характерном сечении.

Исследуемые функции потокосцепления, магнитодвижущей силы, электромагнитного момента, эпюра распределения магнитного потока по оси сердечника представлены в безразмерной форме в долях соответствующих базовых величин, сформированных в соответствии с теорией подобия. Таким образом, результаты анализируемых ниже исследований могут быть распространены на геометрически- и магнито-подобные магнитные системы.

Ферромагнитные элементы магнитных систем были изготовлены из низкоуглеродистой электротехнической стали (10895), наиболее широко используемых [44 и др.] в практике конструирования и производства приводных электромагнитов коммутационных электрических аппаратов. Эти элементы не подвергались термической обработке после изготовления, поэтому ниже полученные модели статических электромагнитных характеристик соответствуют неблагоприятному в процессе изготовления случаю. Как и для других исследованных типов электромагнитных систем [153] координата задающая положение якоря (φ) выведена из перечня факторов и фиксировалась на пятнадцати уровнях, соответствующих определенному угловому положению φ якоря от 1 до 15 градусов с шагом 1 градус. Несмотря на существенное увеличение объема экспериментальных исследований, оно оправдано с точки зрения обеспечения точности математического описания электромагнитных характеристик, существенным образом зависящих [153] от пространственного положения якоря. В качестве основных геометрических соизмерностей приняты (рисунок 1.11, 1.12) :

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

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

относительные расстояние от оси сердечника до скобы магнитопровода

$$c_* = \frac{c_{\text{ок}}}{d_c};$$

относительные размеры полюсного наконечника $d_* = \frac{d_{\text{п}}}{d_c}$ для

цилиндрического и сегментного наконечника;

относительная высота полюсного наконечника $h_{\text{п}*} = \frac{h_{\text{п}}}{d_{\text{п}}}$ для сегментного

полюсного наконечника (рисунок 1.12, а);

$$b_* = \frac{b_{\text{п}}}{b_{\text{як}}}, c_{\text{п}*} = \frac{c_{\text{п}}}{c_{\text{ок}}} - \text{ для прямоугольного полюсного наконечника (рисунок$$

1.12, б).

Выбор пределов варьирования геометрических соизмерностей в магнитной системе выполнен не только с учетом имеющихся [44, 99, 120, 132 и др.] рекомендаций по проектированию этого типа электромагнитов,

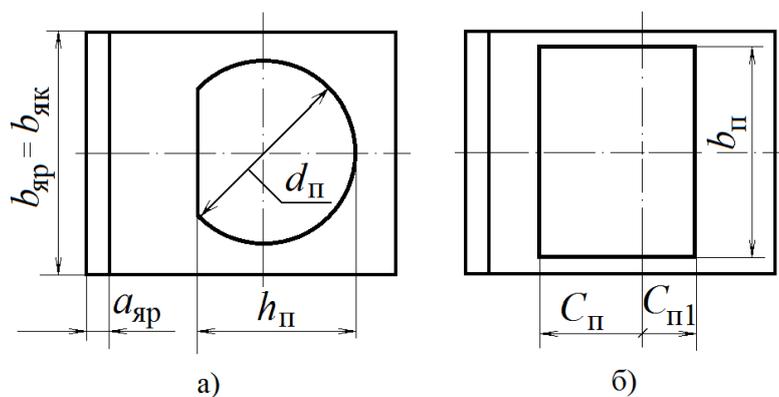


Рисунок 1.12 – Сегментный (а) и прямоугольный (б) полюсные наконечники клапанной магнитной системы

работающих в продолжительном режиме, но и для использования их в кратковременном, повторно-кратковременном и форсированном режимах работы.

Фиксированные уровни факторов при исследовании магнитных систем с цилиндрическим полюсным наконечником сведены в таблицу 1.1.

Разработанная по рекомендациям [64] матрица проведения эксперимента по исследованию магнитных систем с цилиндрическим полюсным наконечником из пяти факторов приведена в таблице 1.2, где справа в скобках приведены размерные величины фактора, а слева – их кодированные значения.

Таблица 1.1- Фиксированные уровни факторов для МС с цилиндрическим полюсным наконечником

X_i	x_i - кодированные уровни факторов				
	-1,596	-1	0	1	1,596
$X_1 = H_* = \frac{H_0}{d_c}$	1,165	1,757	2,75	3,743	4,335
$X_2 = d_* = \frac{d_п}{d_c}$	1,25	1,437	1,75	2,063	2,25
$X_3 = c_* = \frac{C_{ок}}{d_c}$	1,40	1,534	1,76	1,986	2,12
$X_4 = A_* = \frac{A_0}{d_c}$	0,361	0,45	0,6	0,75	0,839
$X_5 = B_0, (Тл)$	0,85	1,018	1,3	1,582	1,75

Таблица 1.2 - План эксперимента для исследования магнитных систем с цилиндрическим полюсным наконечником

Порядковый номер опыта	$x_1 (H_0)$, мм	$x_2 (d_{II})$, мм	$x_3 (C)$, мм	$x_4 (A_0)$, мм	$x_5 (B_0)$, Тл
1	-1 (35,1)	-1 (28,7)	-1 (30,6)	-1 (9)	-1 (1,018)
2	+1 (74,9)	-1 (28,7)	-1 (30,6)	-1 (9)	-1 (1,018)
3	-1 (35,1)	+1 (41,3)	-1 (30,6)	-1 (9)	-1 (1,018)
4	+1 (74,9)	+1 (41,3)	-1 (30,6)	-1 (9)	-1 (1,018)
5	-1 (35,1)	-1 (28,7)	+1 (30,7)	-1 (9)	-1 (1,018)
6	+1 (74,9)	-1 (28,7)	+1 (30,7)	-1 (9)	-1 (1,018)
7	-1 (35,1)	+1 (41,3)	+1 (30,7)	-1 (9)	-1 (1,018)
8	+1 (74,9)	+1 (41,3)	+1 (30,7)	-1 (9)	-1 (1,018)
9	-1 (35,1)	-1 (28,7)	-1 (30,6)	+1 (15)	-1 (1,018)
10	+1 (74,9)	-1 (28,7)	-1 (30,6)	+1 (15)	-1 (1,018)
11	-1 (35,1)	+1 (41,3)	-1 (30,6)	+1 (15)	-1 (1,018)
12	+1 (74,9)	+1 (41,3)	-1 (30,6)	+1 (15)	-1 (1,018)
13	-1 (35,1)	-1 (28,7)	+1 (30,7)	+1 (15)	-1 (1,018)
14	+1 (74,9)	-1 (28,7)	+1 (30,7)	+1 (15)	-1 (1,018)
15	-1 (35,1)	+1 (41,3)	+1 (30,7)	+1 (15)	-1 (1,018)
16	+1 (74,9)	+1 (41,3)	+1 (30,7)	+1 (15)	-1 (1,018)
17	-1 (35,1)	-1 (28,7)	-1 (30,6)	-1 (9)	-1 (1,582)
18	+1 (74,9)	-1 (28,7)	-1 (30,6)	-1 (9)	-1 (1,582)
19	-1 (35,1)	+1 (41,3)	-1 (30,6)	-1 (9)	-1 (1,582)
20	+1 (74,9)	+1 (41,3)	-1 (30,6)	-1 (9)	-1 (1,582)
21	-1 (35,1)	-1 (28,7)	+1 (30,7)	-1 (9)	-1 (1,582)
22	+1 (74,9)	-1 (28,7)	+1 (30,7)	-1 (9)	-1 (1,582)
23	-1 (35,1)	+1 (41,3)	+1 (30,7)	-1 (9)	-1 (1,582)
24	+1 (74,9)	+1 (41,3)	+1 (30,7)	-1 (9)	-1 (1,582)
25	-1 (35,1)	-1 (28,7)	-1 (30,6)	+1 (15)	-1 (1,582)
26	+1 (74,9)	-1 (28,7)	-1 (30,6)	+1 (15)	-1 (1,582)
27	-1 (35,1)	+1 (41,3)	-1 (30,6)	+1 (15)	-1 (1,582)
28	+1 (74,9)	+1 (41,3)	-1 (30,6)	+1 (15)	-1 (1,582)
29	-1 (35,1)	-1 (28,7)	+1(39,7)	+1 (15)	-1 (1,582)
30	+1 (74,9)	-1 (28,7)	+1(39,7)	+1 (15)	-1 (1,582)
31	-1 (35,1)	+1 (41,3)	+1(39,7)	+1 (15)	-1 (1,582)
32	+1 (74,9)	+1 (41,3)	+1(39,7)	+1 (15)	-1 (1,582)
33	-1,596 (23,3)	0(1,35)	0 (35,2)	0 (12)	0(1,30)
34	+1,596 (86,7)	0(1,35)	0 (35,2)	0 (12)	0(1,30)
35	0 (55)	-1,596 (25)	0 (35,2)	0 (12)	0(1,30)
36	0 (55)	+1,596 (45)	0 (35,2)	0 (12)	0(1,30)

Продолжение таблицы 1.2

Порядковый номер опыта	$x_1 (H_0)$, мм	$x_2 (d_{п})$, мм	$x_3 (C)$, мм	$x_4 (A_0)$, мм	$x_5 (B_0)$, Тл
37	0 (55)	0 (35)	-1,596 (27,9)	0 (12)	0(1,30)
38	0 (55)	0 (35)	+1,596 (42,4)	0 (12)	0(1,30)
39	0 (55)	0 (35)	0 (35,2)	-1,596 (7,2)	0(1,30)
40	0 (55)	0 (35)	0 (35,2)	+1,596 (16,8)	0(1,30)
41	0 (55)	0 (35)	0 (35,2)	0 (12)	-1,596(0,85)
42	0 (55)	0 (35)	0 (35,2)	0 (12)	+1,596 (1,75)
43	0 (55)	0 (35)	0 (35,2)	0 (12)	0(1,30)

Фиксированные уровни факторов при исследовании магнитных систем с сегментным полюсным наконечником приведены в таблице 1.3.

Разработанная матрица проведения эксперимента по исследованию магнитных систем с сегментным и прямоугольным полюсным наконечником приведена в приложении А1 (таблица А1) и А2 (таблица А2) соответственно.

Таблица 1.3- Фиксированные уровни факторов для МС с сегментным полюсным наконечником

X_i	x_i - кодированные уровни факторов				
	-1,761	-1	0	1	1,761
$X_1 = H_* = \frac{H_0}{d_c}$	1,165	1,85	2,75	3,65	4,335
$X_2 = d_* = \frac{d_{п}}{d_{с_{жк}}}$	1,70	1,94	2,25	2,56	2,8
$X_3 = h_{п*} = \frac{h_{п}}{d_{п}}$	0,75	0,804	0,875	0,946	1,0
$X_4 = C_* = \frac{C_{ок}}{d_c}$	1,36	1,533	1,76	1,987	2,16
$X_5 = A_* = \frac{A_0}{d_c}$	0,336	0,45	0,6	0,75	0,8641
$X_6 = B_0, (Тл)$	0,85	1,044	1,3	1,556	1,75

Фиксированные уровни факторов при исследовании магнитных систем с прямоугольными полюсными наконечниками приведены в таблице 1.4.

Таблица 1.4- Фиксированные уровни факторов для исследования МС с прямоугольными полюсными наконечниками

X_i	x_i - кодированные уровни факторов				
	-1,761	-1	0	+1	1,761
$X_1 = H_* = \frac{H_0}{d_c}$	1,165	1,85	2,75	3,65	4,335
$X_2 = b_* = \frac{b_n}{b_{жк}}$	0,5	0,608	0,75	0,892	1
$X_3 = C_{П*} = \frac{C_{П}}{C_{ок}}$	0,4	0,486	0,6	0,714	0,8
$X_4 = C_* = \frac{C_{ок}}{d_c}$	1,36	1,533	1,76	1,987	2,16
$X_5 = A_* = \frac{A_0}{d_c}$	0,336	0,45	0,6	0,75	0,864
$X_6 = B_0, (Тл)$	0,85	1,044	1,3	1,556	1,75

1.4 Экспериментальные обобщенные кривые намагничивания, нагрузочные характеристики и эпюры распределения магнитных потоков

Обработка результатов первичных измерений, позволило определить потокосцепление, магнитодвижущую силу, электромагнитный момент, функцию потокораспределения по высоте сердечников, коэффициент рассеяния магнитного потока. Далее эти величины (Ψ , F , $M_{эм}$ и др.) представлялись в долях соответствующих базисных величин в соответствии с выражениями (1.11), (1.12), (1.17), (1.21).

Безразмерные функции цели получены по методике [153] для пятнадцати фиксированных положений якоря. Коэффициенты этих функций цели рассматривались как степенные зависимости от углового положения якоря. Для повышения точности аппроксимации функций цели полиномиальными зависимостями применялись нелинейные преобразования [64]. По рекомендациям [64] коэффициентами, которые имеют величину менее одного процента от значений функции цели в центре факторного пространства, пренебрегали.

1.4.1 Экспериментальные электромагнитные характеристики магнитных систем с круглыми полюсными наконечниками

Для магнитных систем с рассматриваемыми полюсными наконечниками, экспериментально полученные электромагнитные характеристики представлены в виде:

$$\Psi_* = 10^{-2} \cdot A^2, \quad (1.23)$$

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

$$a_0 = 10,4 - 6,22\varphi + 14,5\varphi^2;$$

$$a_{11} = 0,01 - 2,23\varphi + 5,78\varphi^2;$$

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

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

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

$$F_* = 10^{-4} B^4, \quad (1.24)$$

где $B = b_0 + b_1x_1 - b_2x_2 + b_5x_5 + b_{55}x_5^2;$

$$b_0 = 4,15 + 7,04\varphi - 13,9\varphi^2;$$

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

$$b_2 = 0,096 + 0,783\varphi - 2,25\varphi^2;$$

$$b_5 = 0,204 - 0,953\varphi + 2,34\varphi^2;$$

$$b_{55} = 0,149 - 0,691\varphi + 1,59\varphi^2.$$

$$M_* = 10^{-6} C^6, \quad (1.25)$$

где $C = c_0 - c_1x_1 - c_2x_2 - 0,123x_1^2 - 0,237x_2^2 - c_{33}x_3^2 - 0,112x_4^2 - 0,125x_5^2;$

$$c_0 = 8,48 - 9,54\varphi;$$

$$c_1 = 0,342 - 6,48\varphi + 63,4\varphi^2 - 239\varphi_3 + 322\varphi^4;$$

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

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

$$\Phi_*(y_*) = 1 + \Phi_2 y_* + \Phi_3 y_*^2, \quad (1.26)$$

где $\Phi_2 = 10^{-8}(62,5 + 7,18x_1 - 1,82x_2 - 0,94x_3 - 1,03x_4 + 4,45x_5 - 2,17x_3^2 - 1,21x_4^2 - 1,04x_1x_3)^4$;

$\Phi_3 = -10^{-8}[(68,2 + 88,0\varphi + 177,6\varphi^2) + (7,85 - 9,07\varphi + 23,1\varphi^2)x_1 - (0,58 + 82,2\varphi - 713\varphi^2 + 2804\varphi^3 - 4126\varphi^4)x_2 + 1,39x_3 - 0,88x_1^2 + 1,1x_2^2]^4$;

$$\sigma_0 = \frac{\Phi_0}{\Phi_\delta}, \quad (1.27)$$

где Φ_0 - магнитный поток в основании сердечника;

Φ_δ - магнитный поток в рабочем воздушном зазоре;

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

$$x_1 = 1,007H_* - 2,769; \quad x_2 = 3,195d_* - 5,591;$$

$$x_3 = 4,405c_* - 7,753; \quad x_4 = 6,667A_* - 4;$$

$$x_5 = 3,546B_0 - 4,61.$$

1.4.2 Экспериментальные электромагнитные характеристики магнитных систем с сегментными полюсными наконечниками

Для магнитных систем с сегментными полюсными наконечниками, экспериментально полученные электромагнитные характеристики представлены в виде:

$$\Psi_{*c} = a_{0,c} + a_{1,c}x_1 + a_{2,c}x_2 + a_{6,c}x_6 + a_{22,c}x_2^2 + a_{33,c}x_3^2 + a_{44,c}x_4^2 + a_{55,c}x_5^2 + a_{66,c}x_6^2, \quad (1.28)$$

где $a_{0,c} = 1,058 - 0,461\varphi + 0,863\varphi^2$; $a_{1,c} = -(0,009 + 0,026\varphi - 0,041\varphi^2)$;

$$a_{2,c} = 0,009 + 0,009\varphi + 0,046\varphi^2; \quad a_{6,c} = 0,018 - 0,013\varphi + 0,031\varphi^2;$$

$$a_{22,c} = -(0,020 + 0,006\varphi); \quad a_{33,c} = -(0,022 - 0,012\varphi);$$

$$a_{44,c} = -(0,034 - 0,019\varphi); \quad a_{55,c} = -(0,021 - 0,017\varphi);$$

$$a_{66,c} = -(0,026 - 0,023\varphi).$$

$$F_{*,c} = 10^{-4} (b_{0,c} + b_{1,c}x_1 + b_{2,c}x_2 + b_{6,c}x_6 + b_{11,c}x_1^2 + b_{66,c}x_6^2)^4, \quad (1.29)$$

где $b_{0,c} = 3,919 + 6,062\varphi - 11,22\varphi^2$; $b_{1,c} = 0,273 + 1,758\varphi + 3,750\varphi^2$;
 $b_{2,c} = -(0,053 + 0,805\varphi - 2,019\varphi^2)$; $b_{6,c} = 0,124 - 0,476\varphi + 1,053\varphi^2$;
 $b_{11,c} = 0,039 + 0,293\varphi - 0,799\varphi^2$; $b_{66,c} = 0,065 - 0,259\varphi + 0,705\varphi^2$.
 $M_{*,c} = 10^{-4} (c_{0,c} + c_{1,c}x_1 + c_{2,c}x_2 + c_{3,c}x_3 + c_{4,c}x_4 + c_{6,c}x_6 + c_{11,c}x_1^2 + c_{22,c}x_2^2 +$
 $+ c_{33,c}x_3^2 + c_{44,c}x_4^2 + c_{55,c}x_5^2 + c_{66,c}x_6^2 + c_{12,c}x_1x_2 + c_{13,c}x_1x_3 + c_{14,c}x_1x_4 +$
 $+ c_{23,c}x_2x_3 + c_{123,c}x_1x_2x_3)^2, \quad (1.30)$

где $c_{0,c} = 63,3 - 481\varphi + 2681\varphi^2 - 6768\varphi^3 + 4460\varphi^4$;
 $c_{1,c} = -(3,52 - 23,6\varphi + 116\varphi^2 - 240\varphi^3)$;
 $c_{2,c} = -(6,7 - 94,4\varphi + 801\varphi^2 - 3361\varphi^3 + 5242\varphi^4)$;
 $c_{3,c} = -(1,91 - 32,3\varphi + 319\varphi^2 - 1476\varphi^3 + 2454\varphi^4)$;
 $c_{4,c} = 2,13 - 27,8\varphi + 242\varphi^2 - 1092\varphi^3 + 18380\varphi^4$;
 $c_{6,c} = 5,81$; $c_{11,c} = 0,443$;
 $c_{12,c} = 2,31 - 33,9\varphi + 326\varphi^2 - 1489\varphi^3 + 2413\varphi^4$;
 $c_{13,c} = 0,619$; $c_{14,c} = -0,137$; $c_{22,c} = -0,421$;
 $c_{23,c} = -0,579$; $c_{33,c} = -0,409$; $c_{44,c} = -0,31$;
 $c_{55,c} = -0,43$; $c_{66,c} = -0,173$; $c_{123,c} = -0,383$.

$$\Phi_{*,c} = 1 + \Phi_{2,c}y_* + \Phi_{3,c}y_*^2, \quad (1.31)$$

где $\Phi_{2,c} = (d_{0,c} + d_{1,c}x_1 + d_{4,c}x_4 + d_{6,c}x_6 + d_{11,c}x_1^2 + d_{66,c}x_6^2 + d_{16,c}x_1x_6)^6$;
 $d_{0,c} = 0,707 + 0,379\varphi + 0,922\varphi^2$; $d_{1,c} = 0,050 + 0,071\varphi$;
 $d_{4,c} = -(0,013 + 0,028\varphi - 0,045\varphi^2)$; $d_{6,c} = 0,024 + 0,053\varphi$;
 $d_{11,c} = -(0,017 - 0,030\varphi - 0,072\varphi^2)$; $d_{66,c} = 0,010 + 0,017\varphi - 0,136\varphi^2$;
 $d_{16,c} = -(0,004 + 0,033\varphi)$;
 $\Phi_{3,c} = -(e_{0,c} + e_{1,c}x_1 + e_{2,c}x_2 + e_{6,c}x_6 + e_{11,c}x_1^2 + e_{22,c}x_2^2 + e_{66,c}x_6^2)^6$;
 $e_{0,c} = 0,725 + 0,593\varphi - 1,329\varphi^2$; $e_{1,c} = 0,0755 - 0,066\varphi + 0,146\varphi^2$;

$$e_{2,c} = -(0,007 + 0,144\varphi - 0,330\varphi^2); e_{6,c} = 0,013 - 0,030\varphi + 0,078\varphi^2;$$

$$e_{11,c} = -(0,015 - 0,0004\varphi - 0,091\varphi^2); e_{22,c} = 0,014 - 0,015\varphi;$$

$$e_{66,c} = 0,012 - 0,015\varphi.$$

$$\sigma_{0,c} = \frac{\Phi_0}{\Phi_\delta}, \quad (1.32)$$

где $\sigma_{0,c} = s_{0,c} + s_{1,c}x_1 + s_{4,c}x_4 + s_{11,c}x_1^2 + s_{22,c}x_2^2 + s_{33,c}x_3^2 + s_{44,c}x_4^2 + s_{55,c}x_5^2;$

$$s_{0,c} = 1,123 + 2,450\varphi - 0,518\varphi^2; s_{1,c} = 0,050 + 0,449\varphi - 0,513\varphi^2;$$

$$s_{4,c} = -(0,008 - 0,091\varphi - 0,112\varphi^2); s_{11,c} = -(0,032 - 0,082\varphi + 0,313\varphi^2);$$

$$s_{22,c} = 0,016 + 0,126\varphi - 0,228\varphi^2; s_{33,c} = 0,013 + 0,090\varphi - 0,175\varphi^2;$$

$$s_{44,c} = 0,013 + 0,020\varphi + 0,156\varphi^2; s_{55,c} = 0,013 + 0,029\varphi - 0,044\varphi^2;$$

$$x_1 = 1,111H_* - 3,056; x_2 = 3,205d_* - 7,210; x_3 = 14,086h_{\Pi*} - 12,324;$$

$$x_4 = 4,405c_* - 7,750; x_5 = 6,667A_* - 4; x_6 = 3,906B_0 - 5,078.$$

1.4.3 Экспериментальные электромагнитные характеристики магнитных систем с прямоугольными полюсными наконечниками

Для магнитных систем с прямоугольными полюсными наконечниками, экспериментально полученные электромагнитные характеристики представлены в виде:

$$\Psi_{*,\Pi} = a_{0,\Pi} + a_{1,\Pi}x_1 + a_{6,\Pi}x_6 + a_{11,\Pi}x_1^2 + a_{22,\Pi}x_2^2 + a_{33,\Pi}x_3^2 + a_{44,\Pi}x_4^2 +$$

$$+ a_{55,\Pi}x_5^2 + a_{66,\Pi}x_6^2, \quad (1.33)$$

где $a_{0,\Pi} = 1,194 - 0,475\varphi + 1,012\varphi^2; a_{1,\Pi} = -(0,015 + 0,027\varphi);$

$$a_{6,\Pi} = 0,014 - 0,022\varphi^2; a_{11,\Pi} = -(0,041 - 0,090\varphi + 0,311\varphi^2);$$

$$a_{22,\Pi} = -(0,036 - 0,002\varphi); a_{33,\Pi} = -(0,040 - 0,086\varphi + 0,251\varphi^2);$$

$$a_{44,\Pi} = -(0,059 - 0,013\varphi); a_{55,\Pi} = -(0,026 - 0,006\varphi);$$

$$a_{66,\Pi} = -(0,041 - 0,026\varphi).$$

$$F_{*,\Pi} = 10^{-4} (b_{0,\Pi} + b_{1,\Pi}x_1 + b_{2,\Pi}x_2 + b_{3,\Pi}x_3 + b_{6,\Pi}x_6 + b_{11,\Pi}x_1^2 + b_{44,\Pi}x_4^2 + b_{55,\Pi}x_5^2)^4, \quad (1.34)$$

где $b_{0,\Pi} = 4,487 + 5,110\varphi - 9,525\varphi^2$; $b_{1,\Pi} = 0,239 - 1,189\varphi + 2,362\varphi^2$;
 $b_{2,\Pi} = -(0,030 + 0,521\varphi - 1,190\varphi^2)$; $b_{3,\Pi} = -(0,030 + 0,481\varphi + 1,028\varphi^2)$
 $b_{6,\Pi} = 0,136 - 0,513\varphi + 1,134\varphi^2$; $a_{11,\Pi} = -(0,193 - 0,498\varphi + 1,045\varphi^2)$;
 $b_{44,\Pi} = -(0,174 - 0,239\varphi + 0,4665\varphi^2)$; $b_{55,\Pi} = -(0,058 + 0,012\varphi)$.
 $M_{*\Pi} = 10^{-2} (c_{0,\Pi} + c_{1,\Pi}x_1 + c_{2,\Pi}x_2 + c_{3,\Pi}x_3 + c_{6,\Pi}x_6 + c_{11,\Pi}x_1^2 + c_{33,\Pi}x_3^2 + c_{55,\Pi}x_5^2 +$
 $+ c_{66,\Pi}x_6^2 + c_{12,\Pi}x_1x_2)^2$, (1.35)

где $c_{0,\Pi} = 5,722 - 40,77\varphi + 316,1\varphi^2 - 1335\varphi^3 + 2094\varphi^4$; $c_{1,\Pi} = -0,069$;
 $c_{2,\Pi} = -(0,477 - 5,433\varphi + 40,18\varphi^2 - 145,9\varphi^3 + 196,5^4)$;
 $c_{3,\Pi} = -(0,448 - 4,08\varphi + 19,09\varphi^2 - 33,69\varphi^3)$; $c_{6,\Pi} = 0,068$;
 $c_{11,\Pi} = -(0,274 - 1,647\varphi + 4,615\varphi^2)$; $c_{33,\Pi} = -0,042$;
 $c_{55,\Pi} = -0,210$; $c_{66,\Pi} = -0,032$; $c_{12,\Pi} = 0,026$.
 $\Phi_{*\Pi} = 1 + \Phi_{2,\Pi}y_* + \Phi_{3,\Pi}y_*^2$, (1.36)

где $\Phi_{2,\Pi} = (d_{0,\Pi} + d_{1,\Pi}x_1 + d_{4,\Pi}x_4 + d_{6,\Pi}x_6 + d_{11,\Pi}x_1^2 + d_{33,\Pi}x_3^2 + d_{44,\Pi}x_4^2 + d_{55,\Pi}x_5^2 +$
 $+ d_{66,\Pi}x_6^2 + d_{14,\Pi}x_1x_4)^6$;
 $d_{0,\Pi} = 0,909 - 0,076\varphi$; $d_{1,\Pi} = 0,038 + 0,067\varphi - 0,128\varphi^2$;
 $d_{4,\Pi} = -(0,016 + 0,036\varphi - 0,128\varphi^2)$; $d_{6,\Pi} = 0,013 + 0,019\varphi - 0,042\varphi^2$;
 $d_{11,\Pi} = -(0,069 + 0,180\varphi - 0,518\varphi^2)$; $d_{33,\Pi} = -(0,011 - 0,007\varphi)$;
 $d_{44,\Pi} = -(0,049 + 0,007\varphi)$; $d_{55,\Pi} = -(0,011 - 0,011\varphi)$;
 $d_{66,\Pi} = -(0,014 - 0,03\varphi + 0,081\varphi^2)$; $d_{14,\Pi} = 0,015 + 0,012\varphi$;
 $\Phi_{3,\Pi} = -(e_{0,\Pi} + e_{1,\Pi}x_1 + e_{2,\Pi}x_2 + e_{3,\Pi}x_3 + e_{4,\Pi}x_4 + e_{11,\Pi}x_1^2 + e_{44,\Pi}x_4^2)^6$;
 $e_{0,\Pi} = 0,843 + 0,285\varphi - 0,525\varphi^2$; $e_{1,\Pi} = 0,062 + 0,007\varphi$;
 $e_{2,\Pi} = -(0,008 + 0,008\varphi)$; $e_{3,\Pi} = -(0,008 + 0,004\varphi)$;
 $e_{4,\Pi} = -(0,011 + 0,009\varphi)$; $e_{11,\Pi} = -(0,050 + 0,021\varphi)$;
 $e_{44,\Pi} = -(0,022 + 0,015\varphi)$.

$$\sigma_{0,\Pi} = \frac{\Phi_0}{\Phi_\delta}, \quad (1.37)$$

где $\sigma_{0,\Pi} = s_{0,\Pi} + s_{1,\Pi}x_1 + s_{3,\Pi}x_3 + s_{4,\Pi}x_4 + s_{5,\Pi}x_5 + s_{6,\Pi}x_6 + s_{11,\Pi}x_1^2 + s_{22,\Pi}x_2^2 +$
 $+ s_{33,\Pi}x_3^2 + s_{44,\Pi}x_4^2 + s_{55,\Pi}x_5^2 + s_{66,\Pi}x_6^2$;

$$s_{0,\Pi} = 0,941 + 2,23\varphi - 0,742\varphi^2; s_{1,\Pi} = 0,034 + 0,402\varphi - 0,529\varphi^2;$$

$$s_{3,\Pi} = 0,010 + 0,017\varphi; s_{4,\Pi} = -(0,006 + 0,066\varphi) ;$$

$$s_{5,\Pi} = -(0,007 + 0,048\varphi); s_{6,\Pi} = 0,014 + 0,015\varphi;$$

$$s_{11,\Pi} = 0,022 + 0,074\varphi; s_{22,\Pi} = 0,018 + 0,328\varphi - 0,906\varphi^2;$$

$$s_{33,\Pi} = 0,041 + 0,037\varphi; s_{44,\Pi} = 0,056 + 0,098\varphi;$$

$$s_{55,\Pi} = 0,029 + 0,033\varphi; s_{66,\Pi} = 0,031 + 0,091\varphi;$$

$$x_1 = 1,111H_* - 3,056; x_2 = 7,042b_* - 5,282; x_3 = 8,802c_{\Pi*} - 5,281;$$

$$x_4 = 4,405c_* - 7,750; x_5 = 6,667A_* - 4; x_6 = 3,906B_0 - 5,078.$$

1.5 Выводы к первому разделу

1. Наиболее широко применяемый в качестве приводов реле, контакторов является разновидностью клапанных электромагнитов, состоящая из Г-образной скобы, на который крепится цилиндрический сердечник, с насаженной катушкой, полюсный наконечник и поворотный якорь.

2. Одним из перспективных направлений разработки адекватных математических моделей электромагнитных характеристик приводных электромагнитов является экспериментальное исследование, организованное в соответствии с теорией активного эксперимента, результаты которого обрабатываются методами теории подобия. Выбрана расширенная область факторного пространства, обеспечивающая распространение результатов исследования на электромагниты, работающие не только в продолжительном, но и в повторно-кратковременном, кратковременном и форсированном режиме работы.

3. Разработана установка, позволяющая исследовать кривые намагничивания магнитной системы, ее нагрузочные характеристики, коэффициенты рассеяния магнитного потока при различных кратностях основных

размеров клапанной магнитной системы с круглыми, сегментными, прямоугольными полюсными наконечниками с угловым положением якоря от 1^0 до 15^0 и в широком диапазоне изменения магнитной индукции (до 1,75 Тл) в основании сердечника.

4. Выбран параметрический способ описания статических электромагнитных характеристик, где в качестве параметра принята магнитная индукция, усредненная по площади поперечного сечения сердечника, примыкающего к Г-образной скобе магнитопровода. Способ позволяет без затруднений переходить к традиционной форме изображения исследуемых электромагнитных характеристик.

5. На основе экспериментальных исследований получены полиномиальные модели статистических кривых намагничивания магнитных систем, нагрузочных характеристик, эпюр распределения магнитного потока, коэффициентов рассеяния для клапанной магнитной системы с круглой, сегментной, прямоугольной формой полюсных наконечников. Проведенные преобразования экспериментальных данных и рассмотрение коэффициентов полиномов как функций углового положения якоря, позволило обеспечить погрешность аппроксимации экспериментальных данных не превышающую уровень $\pm 15\%$. Как предельная оценка она удовлетворяет современным требованиям, предъявляемые к математическим моделям, которые используются в практических задачах электромагнитов.

Раздел 2 Исследование влияния геометрических соизмерностей и магнитной индукции в основании сердечника на характеристики и параметры клапанной магнитной системы

2.1 Исследование границ линейности магнитных систем с различными формами полюсных наконечников

Как отмечалось в подразделе 1.1, при изменении в определенном диапазоне усредненной магнитной индукции в наиболее нагруженном поперечном сечении магнитопровода магнитные сопротивления ферромагнитных элементов магнитной системы остаются практически неизменными. Сохраняется прямая пропорциональная связь между потокосцеплением и магнитодвижущей силой обмотки. Магнитные системы, работающие в таком режиме, принято называть [44, 146 и др.] линейными. В клапанных магнитных системах поперечное сечение Г-образной скобы принимается [44, 160, 168] больше поперечного сечения сердечника, но не меньше. Поперечное сечение якоря определяется [44, 168] с учетом коэффициента рассеяния σ_0 и значения индукции, не превышающей индукции в сердечнике. Поэтому в клапанной магнитной системе наиболее нагруженным является сечение в основании сердечника (рисунок 1.1,а).

При решении уравнения (1.13), которое определяет координаты граничной точки $\Gamma(F_\Gamma, \Psi_\Gamma)$, следует принять во внимание, что кривая намагничивания магнитных систем описаны в параметрической форме (1.11) и (1.12).

2.1.1 Определение границы линейности магнитных систем с круглыми полюсными наконечниками

Заметим, что на рисунке 1.2 верхней точке «В» КНМС соответствует магнитная индукция в основании сердечника, равная, 1,75 Тл ($B_{0В} = 1,75\text{Тл}$), а «нижней» точке Н – индукция, равная 0,85 Тл ($B_{0Н} = 0,85\text{Тл}$). Точка Г («граничная») разделяет КНМС на два характерных участка [70]. Точке Г соответствует магнитная индукция в основании сердечника равная $B_{0Г}$ («граничная индукция»). Очевидно, что $0,85\text{Тл} \leq B_{0Г} \leq 1,75\text{Тл}$.

На основании выражений (1.11) и (1.12) и правила дифференцирования [147] функции, заданной параметрической форме уравнение (1.13) запишем в виде

$$\frac{d\Psi/dB_0}{dF/dB_0} = \frac{\Psi_* \cdot \Psi_{\bar{\delta}az}}{F_* \cdot F_{\bar{\delta}az}}. \quad (2.1)$$

В общем виде числитель и знаменатель левой части выражения (2.1) запишем в виде

$$\frac{d\Psi}{dB_0} = \Psi_{\bar{\delta}az} \frac{d\Psi_*}{dB_0} + \Psi_* \frac{d\Psi_{\bar{\delta}az}}{dB_0}, \quad (2.2)$$

$$\frac{dF}{dB_0} = F_{\bar{\delta}az} \frac{dF_*}{dB_0} + F_* \frac{dF_{\bar{\delta}az}}{dB_0}. \quad (2.3)$$

Как видно из выражения (1.23) для клапанной МС с круглым полюсным наконечником функция Ψ_* не зависит от B_0 . Следовательно, числитель в левой части выражения (2.1) может быть записан в виде

$$\frac{d\Psi}{dB_0} = N \frac{\pi d_c^2}{4} \cdot \Psi_*, \quad (2.4)$$

а знаменатель - в виде

$$\frac{dF}{dB_0} = \frac{B_0 \cdot d_c}{\mu_0} 10^{-4} \cdot 4 \cdot 3,546 B^3 (b_5 + 2b_{55} \cdot x_5) + 10^{-4} \cdot B^4 \cdot \frac{d_c}{\mu_0}. \quad (2.5)$$

Анализируя выражения (1.11), (1.13), (2.4), (2.5), запишем выражение (2.1) в виде

$$\frac{\Psi_* \cdot \frac{\pi d_c^2}{4} \cdot N}{\frac{B_{0\Gamma} \cdot d_c}{\mu_0} \cdot 10^{-4} \cdot 4 \cdot 3,546 B^3 (b_5 + 2b_{55} \cdot x_{5\Gamma}) + 10^{-4} \cdot B^4 \cdot \frac{d_c}{\mu_0}} = \frac{\Psi_* B_{0\Gamma} \cdot \frac{\pi d_c^2}{4} \cdot N}{10^{-4} \cdot B^4 \cdot \frac{B_{0\Gamma} d_c}{\mu_0}}. \quad (2.6)$$

Преобразовав выражение (2.6), представим кодированное значение в виде [70]:

$$x_{5\Gamma} = -\frac{b_5}{2b_{55}}. \quad (2.7)$$

Подставив выражение для кодированного значения пятого фактора в левую часть выражения (2.7), получим формулу для определения $B_{0\Gamma}$, в точке Γ (рисунок 1.2)

$$B_{0r} = \frac{x_{sr} + 4,61}{3,546}, \quad (2.8)$$

где B_{0r} - индукция в основании сердечника

В таблице 2.1 приведены результаты вычислений по выражениям (2.7) и (2.8).

Таблица 2.1 – Зависимость индукции на границе от положения якоря

φ°	1	3	5	7	9	11	13	15
$\varphi, \text{рад}$	0,01745	0,05236	0,08727	0,1222	0,1571	0,1920	0,2269	0,2618
B_{0r}, T	1,113	1,113	1,113	1,113	1,111	1,108	1,104	1,099

Данные таблицы 2.1 свидетельствуют, что в клапанных МС постоянного тока величина индукции у основания сердечника не зависит от геометрических соизмерностей и размеров в магнитных системах. Есть незначительная зависимость только от углового положения якоря.

Следовательно, граница (B_{0r}) линейности магнитной системы определяется кривой намагничивания стали. Ферромагнитные элементы магнитной системы изготовлены с использованием низкоуглеродистой электротехнической стали марки 10895.

На основании данных таблицы 2.1 при инженерных расчетах граничное значение магнитной индукции, которая определяет участок линейности клапанной магнитной системы с круглым полюсным наконечником, рекомендуется принять равным $B_{0r} = 1,11$ Тл.

Следовательно, кривая намагничивания для рассматриваемой МС на ее линейном участке, в параметрической форме может быть описана в виде

$$\begin{cases} \Psi = B_0 \cdot \frac{\pi d_c^2}{4} \cdot N \cdot \Psi_*(1,11), \\ F = \frac{B_0 d_c}{\mu_0} \cdot F_*(1,11), \\ 0 \leq B_0 \leq 1,11 \text{Тл.} \end{cases} \quad (2.9)$$

Необходимо отметить, что проведенные в [9] расчетные исследования

КНМС с круглыми полюсными наконечниками на их нелинейных участках (в выражениях (1.11), (1.12) рекомендуется использовать при $B_0 \leq 1,95\text{Тл}$).

2.1.2 Определение границы линейности магнитных систем с сегментными полюсными наконечниками

Преобразуем выражение (2.1) для МС сегментными полюсными наконечниками с учетом выражений (2.2), (2.3), (1.11), (1.12)

$$\frac{\frac{\pi d_c^2}{4} \cdot B_0 \cdot N \cdot 3,906(a_{6.c} + 2a_{66.c}x_6) + \Psi_{*c} \cdot \frac{\pi d_c^2}{4} \cdot N}{\frac{B_0 \cdot d_c}{\mu_0} \cdot 10^{-4} \cdot 4 \cdot 3.546 B^3 (b_{6.c} + 2b_{66.c} \cdot x_6) B^3 + 10^{-4} \cdot B^4 \cdot \frac{d_c}{\mu_0}} = \frac{\Psi_{*c} B_0 \cdot \frac{\pi d_c^2}{4} \cdot N}{10^{-4} \cdot B^4 \cdot \frac{B_0 d_c}{\mu_0}}, \quad (2.10)$$

где B – представляет собой выражение в круглых скобках в формуле (1.29).

Выполнив операцию сокращения общих множителей в выражении (2.10), получим

$$\frac{3,906 B_0 (a_{6.c} + 2a_{66.c} \cdot x_6) + \Psi_{*c}}{4 \cdot 3,906 B_0 (b_{6.c} + 1b_{66.c} x_6) + B} = \frac{\Psi_{*c}}{B}. \quad (2.11)$$

Выражение (2.11) после преобразования принимает вид

$$B(a_{6.c} + 2a_{66.c} \cdot x_6) = 4\Psi_{*c} (b_{6.c} + 2b_{66.c} x_6). \quad (2.12)$$

Представим выражения для B и Ψ_{*c} , выделив слагаемые, зависящие от индукции B_0

$$B = \bar{B} + b_{6.c} x_6 + b_{66.c} x_6, \quad (2.13)$$

$$\Psi_{*c} = \bar{\Psi}_{*c} + a_{6.c} x_6 + a_{66.c} x_6, \quad (2.14)$$

где $\bar{B} = b_{0.c} + b_{1.c} x_1 + b_{2.c} x_2 + b_{11.c} x_1^2$;

$$\bar{\Psi}_{*c} = a_{0.c} + a_{1.c} x_1 + a_{2.c} x_2 + a_{22.c} x_2^2 + a_{33.c} x_3^2 + a_{44.c} x_4^2 + a_{55.c} x_5^2.$$

Подставив выражения (2.13) и (2.14) в уравнение (2.12) и преобразовав его, получим

$$x_6^3 + a \cdot x_6^2 + b \cdot x_6 + \bar{c} = 0, \quad (2.15)$$

$$\text{где } a = \frac{7a_{6,c}b_{66,c} + 2a_{66,c}b_{6,c}}{6a_{66,c}b_{6,c}}; \quad b = \frac{3a_{6,c}b_{6,c} + 8\bar{\Psi}_*b_{66,c} - 2a_{66,c}\bar{B}}{6a_{66,c}b_{6,c}};$$

$$\bar{c} = \frac{4b_{6,c}\bar{\Psi}_* - a_{6,c}\bar{B}}{6a_{66,c}b_{6,c}}.$$

Для решения уравнения (2.15) относительно x_6 приведем его [95] к "неполному" виду:

$$y^3 + py + q = 0, \quad (2.16)$$

$$\text{где } y = x_6 + \frac{a}{3}; \quad p = \frac{-a^2}{3} + b; \quad q = 2\left(\frac{a}{3}\right)^3 - \frac{ab}{3} + \bar{c}; \quad Q = \left(\frac{p}{3}\right)^3 + \left(\frac{q}{2}\right)^2.$$

Множество расчетов p, q, Q , которые выполнены для различных соизмерностей в магнитной системе и угловых положениях (φ) якоря, показывают, что ($Q < 0$), ($p < 0$). Согласно [95], "неполное" уравнение (2.16) решается в тригонометрическом виде:

$$y_1 = 2\sqrt{-\frac{p}{3}\cos\alpha}; \quad y_2 = -2\sqrt{-\frac{p}{3}\cos\left(\frac{\alpha + \pi}{3}\right)};$$

$$y_3 = -2\sqrt{-\frac{p}{3}\cos\left(\frac{\alpha - \pi}{3}\right)}, \quad \cos\alpha = \frac{-q}{\sqrt[2]{\left(-\frac{p}{3}\right)^3}}.$$

Из тех же расчетов видно, что корнем соответствующим реальным значениям индукции $B_{0Г}$, является корень y_3 . Граничное значение $B_{0Г}$, по рассчитанному значению x_6 , вычисляется на основании выражения кодированного шестого фактора, представленного в разделе 1:

$$B_{0Г} = \frac{x_6 + 5,078}{3,906}. \quad (2.17)$$

В качестве примера в таблице 2.2 приведены результаты расчета $B_{0Г}$ при различных соразмерностях в магнитной системе для восьми угловых положениях якоря:

1. $H_* = 1,482$; $d_* = 1,81$; $h_{П*} = 0,775$; $c_* = 1,44$; $A_* = 0,5$;
2. $H_* = 1,799$; $d_* = 1,92$; $h_{П*} = 0,8$; $c_* = 1,52$; $A_* = 0,5$;
3. $H_* = 2,116$; $d_* = 2,03$; $h_{П*} = 0,825$; $c_* = 1,6$; $A_* = 0,5$;
4. $H_* = 2,433$; $d_* = 2,14$; $h_{П*} = 0,85$; $c_* = 1,68$; $A_* = 0,5$;
5. $H_* = 2,75$; $d_* = 2,25$; $h_{П*} = 0,875$; $c_* = 1,76$; $A_* = 0,5$;
6. $H_* = 3,067$; $d_* = 2,36$; $h_{П*} = 0,9$; $c_* = 1,84$; $A_* = 0,5$;
7. $H_* = 3,384$; $d_* = 2,47$; $h_{П*} = 0,925$; $c_* = 1,92$; $A_* = 0,5$;
8. $H_* = 3,701$; $d_* = 2,58$; $h_{П*} = 0,95$; $c_* = 2,0$; $A_* = 0,5$;
9. $H_* = 4,018$; $d_* = 2,69$; $h_{П*} = 0,975$; $c_* = 2,08$; $A_* = 0,5$;
10. $H_* = 4,335$; $d_* = 2,8$; $h_{П*} = 1,0$; $c_* = 2,16$; $A_* = 0,5$;

Таблица 2.2 – К оценке возможных значений индукции $B_{0Г}$ Тл при различных соразмерностях в магнитных системах клапанных электромагнитов с сегментными полюсными наконечниками

$\phi, ^\circ$ №, п/п	1	3	5	7	9	11	13	15
1	1,160	1,175	1,188	1,200	1,210	1,216	1,220	1,220
2	1,156	1,169	1,182	1,193	1,193	1,210	1,213	1,213
3	1,153	1,166	1,178	1,189	1,198	1,205	1,209	1,209
4	1,152	1,164	1,176	1,186	1,195	1,202	1,206	1,207
5	1,152	1,164	1,175	1,186	1,194	1,201	1,205	1,206
6	1,154	1,165	1,176	1,186	1,195	1,201	1,205	1,206
7	1,157	1,168	1,179	1,189	1,197	1,204	1,207	1,208
8	1,156	1,173	1,184	1,193	1,202	1,208	1,211	1,120
9	1,170	1,180	1,190	1,200	1,208	1,214	1,217	1,217
10	1,179	1,190	1,200	1,209	1,217	1,222	1,225	1,225

Из подобных расчетов, при варьировании A_* в диапазоне от 0,388 до 0,856 видно, что индукция $B_{0Г}$ изменяется незначительно (от 1,16Тл до 1,23Тл), поэтому для упрощения инженерных методик расчета ЭМ с сегментным

полюсным наконечником принимаем среднее значение $B_{0Г}$ равным 1,2Тл(для стали марки 10895).

В таблице 2.3 приведены результаты расчета граничных значений $\Psi_{Г}$, $F_{Г}$ для восьми положений якоря магнитной системы, в которой $d_c = 20 \cdot 10^{-3}$ м, $H_0 = 50 \cdot 10^{-3}$ м, $d_{II} = 44 \cdot 10^{-3}$ м, $h_{II} = 37,4 \cdot 10^{-3}$ м, $C_{ок} = 36 \cdot 10^{-3}$ м, $A_0 = 10 \cdot 10^{-3}$ м, $N=1000$ витков.

Таблица 2.3 – К расчету граничных значений потокосцепления ($\Psi_{Г}$), магнитодвижущей силы ($F_{Г}$)

$\varphi, ^\circ$ параметры	1	3	5	7	9	11	13	15
$\Psi_{Г}$, Вб	0,369	0,368	0,369	0,369	0,370	0,370	0,370	0,370
$F_{Г}$, А	433	539	645	744	830	897	939	954
$M_{ЭМГ}$, Нм	0,991	0,627	0,445	0,352	0,298	0,252	0,199	0,132

Проведены расчетные исследования с целью оценки возможности использования выражений (1.28), (1.29) при изменении индукции до 1,95Тл. При этом функции Ψ , F монотонно нарастают при увеличении B_0 до указанного значения и могут быть использованы при проведении проектных и проверочных расчетов для клапанных МС с сегментным полюсным наконечником.

Таким образом, на начальном, линейном, участке кривые намагничивания магнитной системы описываются в традиционной форме представления в виде выражения (1.16) в котором

$$\Psi_{Г} = \frac{B_0 \pi d_c^2}{4} N \Psi_{*c}(1,20), \quad (2.18)$$

$$F_{Г} = \frac{B_0 d_c}{\mu_0} F_{*c}(1,20). \quad (2.19)$$

В выражениях (2.1) и (2.19) $\Psi_{*c}(1,20)$, $F_{*c}(1,20)$ - значения функций (1.28) и (2.29) при $B_0 = 1,20$ Тл. В параметрической форме кривые намагничивания магнитной системы на линейном участке в данном случае описывается выражениями

$$\left\{ \begin{array}{l} \Psi = B_0 \frac{\pi d_c^2}{4} N \Psi_{*c}; \\ F = B_0 \frac{d_c}{\mu_0} F_{*c}; \\ 0 < B_0 \leq 1,20 \text{Тл} \end{array} \right. \quad (2.20)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} F = B_0 \frac{d_c}{\mu_0} F_{*c}; \\ 0 < B_0 \leq 1,20 \text{Тл} \end{array} \right. \quad (2.21)$$

Нагрузочная характеристика на линейном участке магнитной системы в традиционной форме представления описывается выражением (1.18), а в параметрической форме нагрузочная характеристика на линейном участке описывается выражениями

$$\left\{ \begin{array}{l} M_{\text{ЭМГ}} = M_*(1,20) B_0^2 \cdot \frac{\pi d_c^3}{8 \mu_0}, \\ F = F_*(1,20) B_0 \cdot \frac{d_c}{\mu_0}. \end{array} \right. \quad (2.22)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} F = F_*(1,20) B_0 \cdot \frac{d_c}{\mu_0}. \end{array} \right. \quad (2.23)$$

2.1.3 Определение границы линейности магнитных систем с прямоугольными полюсными наконечниками

Анализируя выражения (1.11), (1.12), (2.2), (2.3), запишем выражение (2.1) для МС с прямоугольными полюсными наконечниками в виде

$$\frac{\frac{\pi d_c^2}{4} N B_0 \cdot 3,906 (a_{6,\Pi} + 2a_{66,\Pi} x_6) + \Psi_{*\Pi} \cdot \frac{\pi d_c^2}{4} \cdot N}{B_0 \frac{d_c}{\mu_0} \cdot 10^{-4} \cdot 4 \cdot 3,906 \cdot b_{6\Pi} B_3 + 10^{-4} \cdot B^4 \cdot \frac{d_c}{\mu_0}} = \frac{\Psi_{*\Pi} B_0 \cdot \frac{\pi d_c^2}{4} \cdot N}{B_0 \frac{d_c}{\mu_0} \cdot 10^{-4} B^4}. \quad (2.22)$$

Аналогично, приведенным в подразделах 2.1.1 и 2.1.2 преобразованиям получим

$$x_6^2 + p x_6 + q = 0. \quad (2.23)$$

Решение уравнения (2.23) запишем в виде:

$$x_{6,\Gamma} = -0,5p \pm \sqrt{(0,5P)^2 - q}, \quad (2.24)$$

где $x_{6,\Gamma} > -1,761$; $B_{0,\Gamma} = \frac{x_{6,\Gamma} + 5,078}{3,906}$; $p = 1,5 \frac{a_{6,\Pi}}{a_{66,\Pi}} - \frac{\bar{B}}{b_{6,\Pi}}$;

$$q = 2 \frac{\Psi_{*П}}{a_{66,П}} - 0,5 \frac{a_{6,П}}{a_{66,П}} \cdot \frac{\bar{B}}{b_{6,П}};$$

$$\frac{\frac{\pi d_c^2}{4} N B_0 \cdot 3,906(a_{6,П} + 2a_{66,П} x_6) + \Psi_{*П} \cdot \frac{\pi d_c^2}{4} \cdot N}{B_0 \frac{d_c}{\mu_0} \cdot 10^{-4} \cdot 4 \cdot 3,906 \cdot b_{6П} B_3 + 10^{-4} \cdot B^4 \cdot \frac{d_c}{\mu_0}} = \frac{\Psi_{*П} B_0 \cdot \frac{\pi d_c^2}{4} \cdot N}{B_0 \frac{d_c}{\mu_0} \cdot 10^{-4} B^4};$$

$$\Psi_{*П} = \bar{\Psi}_{*П} + a_{6,П} x_6 + a_{66,П} x_6^2; \quad B = \bar{B} + b_{6,П} x_6.$$

Аналогично магнитным системам с сегментными полюсными наконечниками как пример, в таблице 2.4 приведены результаты расчета $B_{0Г}$ при предельных соизмерностях в магнитной системе для восьми угловых положениях якоря:

$$1. H_* = 1,165; d_* = 0,5; c_{П*} = 0,4; c_* = 1,36; A_* = 0,3359;$$

$$2. H_* = 4,335; d_* = 1,0; c_{П*} = 0,8; c_* = 2,16; A_* = 0,8641.$$

Таблица 2.4 – К оценке граничных значений индукции $B_{0Г}$ в магнитных системах клапанных электромагнитов с прямоугольными полюсными наконечниками

$\varphi, ^\circ$	1	3	5	7	9	11	13	15
№, п/п								
1	1,075	1,112	1,138	1,157	1,169	1,176	1,177	1,172
2	1,128	1,146	1,162	1,174	1,182	1,187	1,188	1,185

Усредненное значение индукции $B_{0Г}$ при использовании в упрощенных проектных расчетах ЭМ с прямоугольным полюсным наконечником составляет 1,16Тл.

Следовательно, кривые намагничивания магнитных систем с прямоугольными полюсными наконечниками на линейном участке, записанные в параметрической форме имеют вид

$$\left\{ \Psi = B_0 \frac{\pi d_c^2}{4} N \Psi_{*П} (1,16); \right. \quad (1.25)$$

$$\left\{ F = B_0 \frac{d_c}{\mu_0} F_{*П} (1,16); \right. \quad (1.26)$$

$$0 \leq B_0 \leq 1,16 \text{Тл.}$$

2.2 Исследование доли магнитного потока под тыльной поверхностью полюсных наконечников, выходящего в рабочий воздушный зазор

Известно [179], что существует сепаратриса (линия, поверхность) разделяющая магнитный поток Φ_δ в рабочем воздушном зазоре от магнитного потока рассеяния магнитной системы. Упрощенная картина рассеяния трубок магнитного потока в клапанной магнитной системе приведена на рисунке 2.1.

В известных методиках электромагнитных расчетов клапанных магнитных систем с полюсными наконечниками, где используется теория цепей [1, 2, 10, 20, 28, 160, 168 и др.], допускается, что магнитный поток Φ_Π (рисунок 2.1), который примыкает к полюсному наконечнику, «протекает» через рабочий зазор. Иными

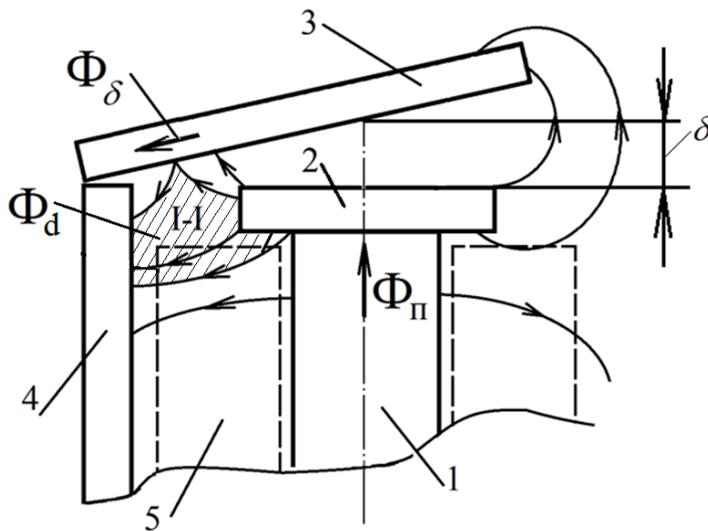


Рисунок 2.1 – Схематичное изображение растекания трубок магнитного потока вблизи полюсного наконечника клапанной магнитной системы. 1-сердечник; 2 полюсный наконечник; 3 – якорь; 4 – скоба; 5 – обмотка возбуждения

словами Φ_δ равен Φ_Π . Как видно из рисунка 2.1, в рабочий зазор «выходит» магнитный поток Φ_δ , составляющий лишь часть магнитного потока Φ_Π . Трубки магнитного потока, протекающие «ниже» сепаратисы I-I относятся к трубкам поля рассеяния магнитной системы. Важно оценить долю k_δ магнитного потока Φ_Π , протекающего через рабочий воздушный зазор.

Выражение коэффициента рассеяния магнитного потока $\sigma(y_*) = \Phi(y_*) / \Phi_\delta$ в сечении сердечника, удаленном от его основания на расстояние $y_* = y / H_0$ (рисунок 1.11) может быть представлен в виде

$$\sigma(y_*) = \Phi(y_*) \sigma_0, \quad (2.27)$$

где $\Phi_*(y_*) = \Phi(y_*) / \Phi_0$ - эпюра распределения магнитного потока вдоль оси сердечника, которая представлена в долях от потока у основания сердечника;

$\sigma_0 = \Phi_0 / \Phi_\delta$ - коэффициент рассеяния магнитного потока в поперечном сечении основания сердечника.

Таким образом [69]

$$k_\delta = \frac{1}{\sigma(1)} = \frac{1}{\sigma_0(1 + \Phi_2 + \Phi_3)}, \quad (2.28)$$

где Φ_2, Φ_3 - функции, полученные в результате обработки экспериментально исследованных эпюр распределения магнитного потока (см. подразделы 1.4.1, 1.4.2, 1.4.3).

2.2.1 Исследование доли магнитного потока под тыльной поверхностью круглых полюсных наконечников, выходящего в рабочий воздушный зазор

Первоначально оценим параметры эпюры распределения магнитного потока вдоль оси сердечника [69].

В качестве примера в таблице 2.5 приведены экспериментальные данные по эпюре распределения потока по сердечнику в безразмерном виде для трех угловых положений якоря, двух значений индукции B_0 для магнитной системы с геометрическими соразмерностями: $H_* = 2,75$; $d_* = 1,75$; $c_* = 1,76$; $A_* = 0,6$.

Таблица 2.5 – Безразмерная эпюра распределения магнитного потока вдоль сердечника магнитной системы

y_*		0	0,2	0,4	0,6	0,8	1
$\varphi = 1^\circ$	$B_0 = 0,85\text{Тл}$	1	1,009	1,005	0,984	0,958	0,913
	$B_0 = 1,75\text{Тл}$	1	1,058	1,081	1,078	1,046	0,987
$\varphi = 8^\circ$	$B_0 = 0,85\text{Тл}$	1	1,002	0,984	0,934	0,848	0,773
	$B_0 = 1,75\text{Тл}$	1	1,046	1,052	1,024	0,965	0,872
$\varphi = 15^\circ$	$B_0 = 0,85\text{Тл}$	1	1,007	0,958	0,925	0,820	0,719
	$B_0 = 1,75\text{Тл}$	1	1,056	1,049	1,001	0,921	0,819

Данные таблицы 2.5 свидетельствуют о том, что с ростом индукции B_0 независимо от положения якоря доля магнитного потока, достигающего тыльной стороны поверхности круглого полюсного наконечника, увеличивается. С ростом угла φ максимум потока, как это следует из теории магнитных систем [44 и др.] смещается к основанию сердечника. На основании свойств квадратичного трехчлена можно утверждать, что на удалении $y_{*max} = -0,5\Phi_2 / \Phi_3$ от основания сердечника магнитный поток достигает своего максимального значения $\Phi_{*max} = 1 - 0,25\Phi_2^2 / \Phi_3$. Анализируя данные таблицы 2.5 при индукции $B_0 = 0,85\text{Тл}$, можно утверждать, что максимальный поток в сердечнике Φ_{*max} отличается менее чем на 1% от потока Φ_0 в основании сердечника.

Оценим долю (k_δ) потока Φ_δ относительно потока Φ_Π в сердечнике под полюсным наконечником с учетом выражений (1.21) и (2.28).

В таблице 2.6 приведены значения k_δ в зависимости от угла φ при различных геометрических соизмерностях в МС, при $B_0 = 1,02\text{ Тл}$, $d_c = 20 \cdot 10^{-3}\text{ м}$, и соответствующие значения магнитодвижущей силы F_{15} при $\varphi = 15^\circ$.

$$1 - H_* = 1,757; d_* = 1,437; C_* = 1,533; A_* = 0,45; F_{15} = 1192\text{ А.}$$

$$2 - H_* = 1,757; d_* = 2,063; C_* = 1,533; A_* = 0,45; F_{15} = 851\text{ А.}$$

$$3 - H_* = 1,757; d_* = 1,437; C_* = 1,987; A_* = 0,45; F_{15} = 1294\text{ А.}$$

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

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

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

Таблица 2.6 Зависимость функции k_δ от положения якоря и основных кратностей вмагнитной системе

$\varphi,^\circ$ №, п/п	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

Данные таблицы 2.6 свидетельствуют о том, что независимо от соотношения геометрических размеров МС с увеличением угла φ доля потока Φ_{Π} , выходящего в рабочий зазор (протекающего через якорь) уменьшается. При угле 15° составляет только (72-78)%, что соответствует уменьшению электромагнитной силы (момента) примерно на (50-40)%, относительно расчетного по известным методикам [1, 120, 168 и др.]. При угле 7° электромагнитная сила составляет (80-86)%. И лишь при малых угловых положениях якоря ($\varphi=1^\circ$) электромагнитная сила (момент) составляет (88-95)% от расчетной, полученный по известным методикам [1, 20, 44 и др.]

2.2.2 Исследование доли магнитного потока под тыльной поверхностью сегментных полюсных наконечников, выходящего в область рабочего воздушного зазора

Относительные эпюры $\Phi_{*c}(y_*)$ распределения магнитного потока вдоль оси сердечника в центре факторного пространства, рассчитанные в соответствии с (1.21) (рисунок 2.2,а) и экспериментальной эпюрой магнитного потока (при $\varphi = 8^\circ$), для сравнения приведены на рисунке 2.2.б.

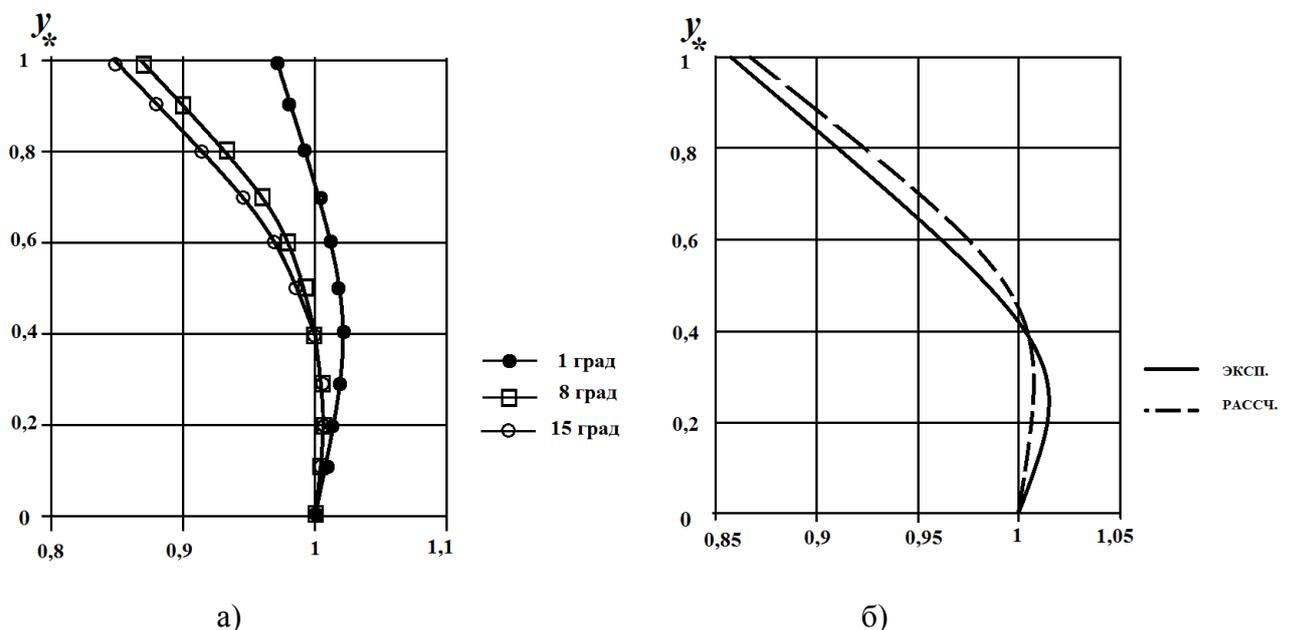


Рисунок 2.2 – Эпюры распределения магнитного потока вдоль сердечника с сегментным полюсным наконечником

Данные по функции k_{δ} , представленные в таблице 2.7, получены экспериментально путем измерения магнитных потоков Φ_{δ} и Φ_{Π} для различных соотношений размеров в магнитной системе и положений якоря при $d_c = 20 \cdot 10^{-3}$ м, $B_0 = 1,04$ Тл, $A_0 = 9 \cdot 10^{-3}$ м:

$$1 - H_* = 1,85; d_* = 1,94; h_* = 0,80; C_* = 1,53;$$

$$3 - H_* = 1,85; d_* = 2,56; h_* = 0,80; C_* = 1,53;$$

$$5 - H_* = 1,85; d_* = 1,94; h_* = 0,95; C_* = 1,53;$$

$$7 - H_* = 1,85; d_* = 2,56; h_* = 0,95; C_* = 1,53;$$

$$8 - H_* = 3,65; d_* = 2,56; h_* = 0,95; C_* = 1,53;$$

$$9 - H_* = 1,85; d_* = 1,94; h_* = 0,80; C_* = 1,99;$$

$$11 - H_* = 1,85; d_* = 2,56; h_* = 0,80; C_* = 1,99;$$

$$13 - H_* = 1,85; d_* = 1,94; h_* = 0,95; C_* = 1,99;$$

$$15 - H_* = 1,85; d_* = 2,56; h_* = 0,95; C_* = 1,99;$$

$$16 - H_* = 3,65; d_* = 2,56; h_* = 0,95; C_* = 1,99.$$

Значение магнитодвижущей силы обмотки при угловом положении 15° (F_{15}) задано в Амперах.

Таблица 2.7 - Зависимость функции k_{δ} от положения якоря и основных кратностей магнитной системы.

№ п/п \ $\varphi, ^\circ$	1	3	5	7	9	11	13	15	$F_{15}, \text{А}$
1	0,925	0,905	0,865	0,839	0,808	0,786	0,756	0,735	922
3	0,909	0,863	0,819	0,782	0,751	0,730	0,697	0,667	686
5	0,924	0,890	0,854	0,815	0,792	0,764	0,734	0,710	852
7	0,901	0,844	0,800	0,757	0,727	0,694	0,671	0,643	594
8	0,976	0,923	0,876	0,832	0,804	0,764	0,737	0,712	767
9	0,947	0,917	0,893	0,862	0,836	0,801	0,784	0,748	1000
11	0,920	0,878	0,832	0,799	0,762	0,735	0,702	0,673	751
13	0,931	0,907	0,866	0,837	0,808	0,781	0,751	0,725	927
15	0,905	0,862	0,817	0,783	0,746	0,715	0,689	0,663	685
16	0,993	0,946	0,905	0,871	0,832	0,798	0,769	0,749	827

Доля магнитного потока в рабочем зазоре при угловых положений якоря от 1 до 15 градусов может составить 64,3% от потока под полюсным наконечником. При этом доля потока возрастает при уменьшении угла. Это связано с влиянием магнитных потоков рассеяния и уменьшением сопротивления рабочего воздушного зазора. Сравнение данных опытов 1 и 3, 9 и 11 подтверждает уменьшение доли потока, который выходит в область рабочего воздушного зазора с увеличением диаметра полюсного наконечника при неизменном h_* . Увеличение расстояния C между осью сердечника и скобой вызывает нарастание потока в области рабочего воздушного зазора, независимо от увеличения его сопротивления. Сравнение опытных данных 1 и 5, 9 и 13 показывает уменьшение доли магнитного потока в области рабочего воздушного зазора с увеличением высоты сегмента полюсного наконечника. Анализ опытных данных 7 и 8, 15 и 16 показывает, что увеличение высоты обмотки вызывает рост потока в области рабочего воздушного зазора и связано с уменьшением потоков рассеяния, которые замыкаются с тыльной поверхности полюсного наконечника на ярмо магнитной системы.

Анализируя (1.21), можно утверждать, что при варьировании относительной высоты h_* для прочих равных условий, что полюсный наконечник обеспечивает минимальные значения σ_0 при $h_* = 0,875$ и не зависит от B_0 (с учетом погрешности эксперимента).

2.2.3 Исследование доли магнитного потока под тыльной поверхностью прямоугольных полюсных наконечников, выходящего в рабочий воздушный зазор

Зависимость (1.36) коэффициента рассеяния ($\sigma_{0П}$) магнитного потока от углового положения (φ) якоря при $H_* = 1,85$, $b_* = 1,608$, $C_{П*} = 0,4864$, $c_* = 1,533$, $A_* = 0,45$, $B_0 = 1,044T$, $d_c = 20 \cdot 10^{-3}$ м приведена [75] в таблице 2.8.

Таблица 2.8 – Зависимость коэффициента рассеяния магнитного потока ($\sigma_{оп}$)

$\varphi, ^\circ$	1	2	3	4	6	9	12	15
$\sigma_{оп}$	1,152	1,168	1,225	1,267	1,349	1,446	1,572	1,652

Эюра распределения магнитного потока (1.36) в относительном виде при тех же соотношениях и параметрах приведена в таблице 2.9.

Таблица 2.9 – Эюра распределения магнитного потока в относительных единицах

$\varphi, ^\circ \backslash y_*$	0	0,1	0,2	0,3	0,5	0,7	0,9	1
1	1	1,006	1,019	1,031	1,036	1,017	0,998	0,975
3	1	1,013	1,029	1,031	1,029	1,010	0,973	0,48
6	1	1,013	1,027	1,027	1,013	0,981	0,941	0,920
9	1	1,013	1,027	1,029	1,013	0,975	0,23	0,900
12	1	1,011	1,019	1,029	1,006	0,960	0,908	0,881
15	1	1,013	1,019	1,019	1,006	0,960	0,904	0,874

Функция $k_\delta = \Phi_\delta / \Phi_{II}$ в зависимости от углового положения (φ) якоря для рассматриваемого случая приведена в таблице 2.10.

Таблица 2.10 – Зависимость коэффициента $k_\delta = \Phi_\delta / \Phi_{II}$ от углового положения якоря

$\varphi, ^\circ$	1	3	5	7	9	11	13	15
k_δ	0.890	0.861	0.829	0.792	0.768	0.741	0.710	0.693

Как видно из данных таблицы 2.8 магнитный поток в поперечном сечении сердечника до половины его длины, отсчитываемый от основания сердечника изменяется примерно на 4 %. Следовательно при расчетах клапанных магнитных систем с прямоугольными полюсными наконечниками методом участков необходимо усреднять коэффициент рассеяния магнитного потока не на расчетной длине обмотки [168], на первой половине длины участка,

отсчитываемого от основания сердечника, и на двух-трех участках второй половины длины сердечника, примыкающий к полюсному наконечнику.

Магнитный поток Φ_δ в рабочем зазоре по данным таблицы 2.10 может составлять всего около 70% от потока Φ_Π под тыльной поверхностью прямоугольного полюсного наконечника.

2.3 Оценка возможных оптимальных соизмерностей полюсных наконечников различной формы

Упрощенная формула Максвелла электромагнитной силы [160, 168 и др.] может быть записана в виде

$$P_{\text{эм}} = \frac{\Phi_\delta^2}{2\mu_0 S_\Pi}, \quad (2.29)$$

где S_Π - площадь поверхности полюсного наконечника.

Если не учитывать сопротивление паразитных зазоров, потоки рассеяния и выпучивания значение магнитного потока можно представить, как функцию

$$\Phi_\delta = \frac{F}{R_\delta(1 + R_{\text{ст}}\Lambda_\delta)}, \quad (2.30)$$

где F - магнитодвижущая сила обмотки;

$R_\delta, R_{\text{ст}}$ - магнитные сопротивления рабочего зазора и стали магнитной системы;

Λ_δ - магнитная проводимость рабочего воздушного зазора.

Подставив выражение (2.30) в (2.29) с учетом, что $R_\delta = \frac{\delta}{\mu_0 S_\Pi} = \frac{1}{\Lambda_\delta}$ получим

$$\begin{aligned} P_{\text{эм}} &= \frac{F^2}{\left(\frac{\delta}{\mu_0 S_\Pi}\right)^2} \cdot \frac{1}{2\mu_0 S_\Pi} \cdot \frac{1}{(1 + R_{\text{ст}}\Lambda_\delta)^2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{F^2}{\delta} \cdot \frac{\Lambda_\delta}{(1 + R_{\text{ст}}\Lambda_\delta)^2} = \\ &= K \frac{\Lambda_\delta}{(1 + R_{\text{ст}}\Lambda_\delta)^2}. \end{aligned} \quad (2.31)$$

Если принять, что с ростом Λ_δ за счет увеличения S_Π , составляющая $R_{\text{ст}}$ остается неизменной, то исходя из выражения (2.31) при определенном Λ_δ можно получить наибольшую электромагнитную силу. В реальной магнитной системе с уменьшением расстояния между боковой поверхностью полюсного наконечника и скобой увеличивается поток рассеяния с поверхностями полюсного наконечника

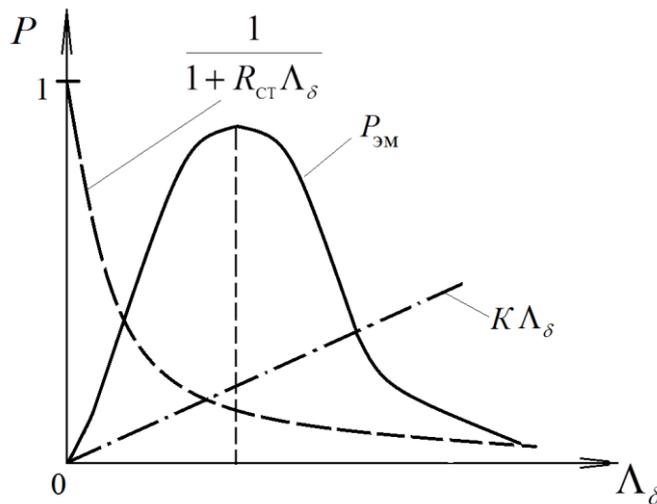


Рисунок 2.3 – К пояснению возможного максимума электромагнитной силы с ростом Λ_δ за счет увеличения

(рисунок 2.1), что приводит к уменьшению потока Φ_δ в соответствии с (2.30) и электромагнитной силы.

Ниже дана более подробная оценка этим зависимостям при различной форме наконечников.

2.3.1 Влияние относительного диаметра круглого полюсного наконечника на величину электромагнитного момента

Известно [44, 116, 120 и др.], что в МС с внешним якорем при определенной кратности $d_{*\text{опт}} = d_\Pi / d_c$ и неизменных диаметре d_c сердечника, угловом положении φ якоря и магнитодвижущей силы F обмотки обеспечивается максимальная электромагнитная сила $P_{\text{эм}}$, электромагнитный момент $M_{\text{эм}}$. Это при заданном противодействующем моменте $M_{\text{мх}}$ позволяет уменьшить расход обмоточного провода [44] и потребляемую электромагнитом мощность. В литературе [120 и др.] отмечается, что $d_{*\text{опт}}$ зависит от степени насыщения элементов магнитопровода, величины критического зазора $\delta_{\text{кр}}$ (угла $\varphi_{\text{кр}}$) и что эта зависимость наиболее выражена при больших F и малых $\delta_{\text{кр}}$. Так же приведены

экспериментальные зависимости $P_{ЭМ} = f(d_*)$, ($10H \geq P_{ЭМ} \leq 100H$), полученные на МС с Г-образной скобой и прямоходовым якорем ($d_c = 22 \cdot 10^{-3}$ м; $\delta = 3 \cdot 10^{-3}$ м; $5 \cdot 10^{-3}$ м; $8 \cdot 10^{-3}$ м; $F = 100$ А, 2000 А, 3000 А), из которых следует, что $1,55 \leq d_{*опт} \leq 1,80$.

При изменении $20 \cdot 10^{-3} \leq H \leq 80 \cdot 10^{-3}$ м, $0,3 \cdot 10^{-3} \leq \delta \leq 1,5 \cdot 10^{-3}$ м значение $d_{*опт}$ увеличивается пропорционально δ и уменьшается с увеличением магнитной индукции в сердечнике, которая находится в пределах $1,50 \div 2,00$.

В известной работе [120] утверждается, что для электромагнитных аппаратов крановых и металлургических приводов ($100H \leq P_{ЭМ} \leq 400H$) оптимальные значения находятся в диапазоне $1,50 \div 2,00$.

В публикации [94] контролировали МДС трогания и МДС, обеспечивающую электромагнитное усилие, равное противодействующей силе в момент замыкания главных контактов контактора (МДС «прохождения провала»). Диаметр полюсного наконечника $d_{п}$ вваривался в диапазоне от $30 \cdot 10^{-3}$ до $60 \cdot 10^{-3}$ м при $d_c = 25; 30; 35; 40; 50 \cdot 10^{-3}$ м при неизменном поперечном сечении скобы магнитной системы. МДС трогания монотонно уменьшается с ростом $d_{п}$ (исключение составляет случаи $d_c = 25 \cdot 10^{-3}$ и $d_c = 50 \cdot 10^{-3}$ м). МДС достигает своих минимальных значений при $1,10 \leq d_{*опт} \leq 1,43$; при этом $d_{*опт} = 1,10$ соответствует $d_c = 50 \cdot 10^{-3}$ м, а $d_{*опт} = 1,43 - d_c = 35 \cdot 10^{-3}$ м. При $d_c = 25 \cdot 10^{-3}$ м рост $d_{п}$ поводит к монотонному увеличению этой МДС.

Для силовых ЭМ устройств автоматики рекомендуется [116, 120] при предварительном расчете ядра (диаметра d_c , размеров обмотки A_0 , H_0) МС принимать $1,20 \leq d_{*опт} \leq 1,40$.

Результаты исследования влияния диаметров сердечника ($18 \cdot 10^{-3}$ м $< d_c <$ $27 \cdot 10^{-3}$ м) и полюсного наконечника ($23 \cdot 10^{-3}$ м $< d_{п} <$ $37 \cdot 10^{-3}$ м) на координаты

$(\varphi, A_{\text{MAX}})$ экстремума условий полезной работы $(A = P_{\text{ЭМ}} \cdot \delta)$ обсуждается в работе [22]. МДС обмотки принималась равной $F = 500; 1000; 2000$ А.

Контролировались и индукция в скобе МС, вблизи сечения ее изгиба. При варьировании d_c внутренний диаметр катушки оставался постоянным. Исследования приведены на магнитных системах электромагнитных реле РПУ-3, представляющей практически Ш-образную МС.

Приведенные рекомендации не являются однозначными, и требуется их уточнение. Ниже приведен вариант решения этой задачи на основе анализа обобщенных экспериментальных статических электромагнитных характеристик, которые получены комбинированным использованием планирования эксперимента [58, 64] и методов теории подобия [29, 32].

Нагрузочные характеристики [9], соответствующие нелинейному участку КНМС, описываются выражениями (1.25) и (1.24) при $1,11 \geq B_0 \geq 1,65$ Тл. На линейном участке магнитной системы при $B_0 < 1,11$ Тл электромагнитный момент пропорционален квадрату МДС:

$$M_{\text{ЭМ}} = M_{\text{ЭМГ}} \left(\frac{F}{F_{\Gamma}} \right)^2.$$

На основании выражений (1.24), (1.25) и (1.18) исследовано влияние диаметра полюсного наконечника на силовые характеристики ЭМ. Результаты расчета тяговых характеристик $M_{\text{ЭМ}} = f(\varphi)$ при постоянном F для четырех значений МДС и трех фиксированных относительных значениях d_* полюсного наконечника сведены в таблицу 2.11. Для выполнения расчетов заданы следующие значения:

$$d_c = 20 \cdot 10^{-3}; H_* = 3; A_* = 0,5; C_* = 1,6; a_{\text{П}} / d_c = 0,2; \Delta_{\text{К}} / d_c = 0,1;$$

$$a_{\text{СК}} / d_c = a_{\text{ЯК}} / d_c = 0,25; a_{\text{СК}} \cdot b_{\text{СК}} = a_{\text{ЯК}} \cdot b_{\text{ЯК}} = 3,14 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

Таблица 2.11 – К оценке возможной кратности d_* , обеспечивающий максимальное значение электромагнитного момента

F, A	d_*	$M_{\text{ЭМ}} (H \cdot m)$						
		$\varphi = 3^\circ$	$\varphi = 5^\circ$	$\varphi = 7^\circ$	$\varphi = 9^\circ$	$\varphi = 11^\circ$	$\varphi = 13^\circ$	$\varphi = 15^\circ$
500	1,25	0,2340	0,1192	0,0664	0,0395	0,0247	0,0162	0,0112
	1,75	0,3838	0,2208	0,1328	0,0836	0,0548	0,0372	0,0258
	2,25	0,2402	0,1516	0,0944	0,0598	0,0389	0,0256	0,0163
1000	1,25	0,9144	0,4864	0,2657	0,1580	0,0987	0,0646	0,0449
	1,75	1,2341	0,8510	0,5469	0,3343	0,2193	0,1489	0,1030
	2,25	0,5760	0,4583	0,3349	0,2336	0,1598	0,1073	0,0684
1500	1,25	1,2416	0,8307	0,5485	0,3555	0,2300	0,1520	0,1059
	1,75	1,4660	1,1220	0,8314	0,6029	0,4312	0,3053	0,2133
	2,25	0,6091	0,5066	0,3934	0,2953	0,2172	0,1546	0,1020
2000	1,25	1,3195	0,9268	0,6537	0,4556	0,3125	0,2128	0,1468
	1,75	*	*	0,8861	0,6632	0,4884	0,3527	0,2466
	2,25	*	*	*	*	*	*	0,1001

* $B_0 > 1,65$ Тл

Данные таблицы 2.11 свидетельствуют о том, что оптимальный относительный диаметр $d_{*\text{ОПТ}}$ полюсного наконечника, обеспечивающий максимальное значение электромагнитного момента $M_{\text{ЭМ, макс}}$, существует при любых значениях МДС обмотки, угловых положениях якоря. Поиск $d_{*\text{ОПТ}}$ проводился методом сканирования в диапазоне его варьирования от 1,25 до 2,25. Шаг изменения $d_{*\text{ОПТ}}$ составлял 0,05. При каждом фиксированном d_* рассчитывались F_Γ , $M_{\text{ЭМ, Г}}$ и решалось уравнение

$$F - F_* B_0 d_c / \mu_0 = 0 \quad (2.32)$$

относительно B_0 для ($1,11 \text{ Тл} < B_0 \leq 1,65 \text{ Тл}$).

Для расчета электромагнитного момента использовались значения B_0 и d_*

$$M_{\text{ЭМ}*} = M_* B_0^2 \pi d_c^3 / (8 \mu_0).$$

При неравенстве $F \leq F_r$ электромагнитный момент рассчитывался в соответствии с уравнением (1.18). В качестве примера на рисунке 2.4 приведены зависимости электромагнитного момента от относительного диаметра

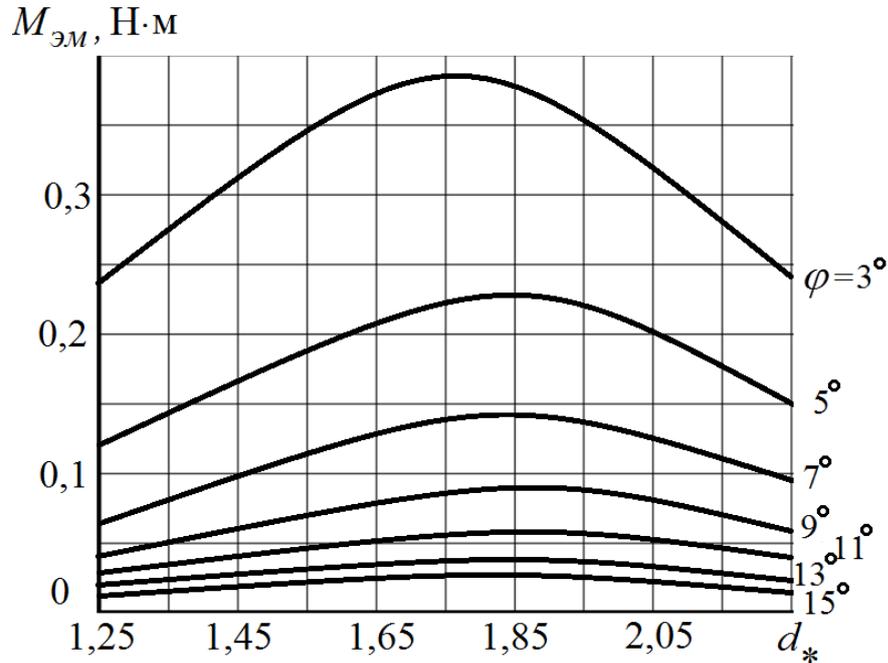


Рисунок 2.4 - Зависимость электромагнитного момента, развиваемого клапанным ЭМ постоянного тока с круглым полюсным наконечником при различных угловых положениях якоря при линейной МС

полюснонаконечника при $H_* = 3$; $A_* = 0,5$; $C_* = 1,6$; $F = 500$ А; $d_c = 20 \cdot 10^{-3}$ м.

Максимальные значения электромагнитного момента, d_{*OPT} и соответствующие значения B_0 сведены в таблицу 2.12.

Таблица 2.12 – Оптимальная кратность диаметров полюсного наконечника и сердечника

H_*	F, A	Расчетные параметры	$\varphi = 3^\circ$	$\varphi = 5^\circ$	$\varphi = 7^\circ$	$\varphi = 9^\circ$	$\varphi = 11^\circ$	$\varphi = 13^\circ$	$\varphi = 15^\circ$
1,7	500	d_{*OPT}	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80
		B_0, T	$< B_{0Г}$	$< B_{0Г}$	$< B_{0Г}$				
		$M_{эм, max}$, Н·м	0,4577	0,2204	0,1233	0,0763	0,0508	0,0361	0,0278

Продолжение таблицы 2.12

H_*	F, A	Расчетные параметры	$\varphi = 3^\circ$	$\varphi = 5^\circ$	$\varphi = 7^\circ$	$\varphi = 9^\circ$	$\varphi = 11^\circ$	$\varphi = 13^\circ$	$\varphi = 15^\circ$
1,7	1000	d_{*OPT}	1,65	1,70	1,80	1,85	1,90	1,90	1,90
		B_0, T	1,481	1,362	1,269	1,184	1,139	1,112	1,130
		$M_{\text{ЭМ.маx}}, H \cdot M$	1,2546	0,7854	0,4968	0,3151	0,2084	0,1465	0,1137
	1500	d_{*OPT}	1,55	1,65	1,70	1,70	1,75	1,75	1,75
		B_0, T	1,682	1,620	1,533	1,486	1,456	1,138	1,449
		$M_{\text{ЭМ.маx}}, H \cdot M$	1,4313	0,9933	0,7184	0,5240	0,3806	0,2791	0,2111
	2000	d_{*OPT}	-	-	1,65	1,65	1,70	1,70	1,65
		B_0, T	>1,75	>1,75	1,726	1,679	1,658	1,644	1,637
		$M_{\text{ЭМ.маx}}, H \cdot M$	-	-	0,7639	0,5771	0,4295	0,3165	0,2350
3,0	500	d_{*OPT}	1,75	1,80	1,85	1,85	1,85	1,85	1,85
		B_0, T	$< B_{0Г}$	$< B_{0Г}$	$< B_{0Г}$				
		$M_{\text{ЭМ.маx}}, H \cdot M$	0,3587	0,202	0,1198	0,0740	0,0476	0,0319	0,0223
	1000	d_{*OPT}	1,65	1,75	1,80	1,85	1,90	1,85	1,85
		B_0, T	1,396	1,318	1,232	1,163	1,118	$< B_{0Г}$	$< B_{0Г}$
		$M_{\text{ЭМ.маx}}, H \cdot M$	1,1798	0,7728	0,4902	0,3063	0,1933	0,1278	0,0893
	1500	d_{*OPT}	1,60	1,65	1,70	1,70	1,75	1,75	1,75
		B_0, T	1,629	1,576	1,528	1,471	1,442	1,411	1,400
		$M_{\text{ЭМ.маx}}, H \cdot M$	-	1,60	1,655	1,65	1,70	1,70	1,70
	2000	d_{*OPT}	1,75	1,80	1,85	1,85	1,85	1,85	1,80
		B_0, T	$< B_{0Г}$	$< B_{0Г}$	$< B_{0Г}$				
		$M_{\text{ЭМ.маx}}, H \cdot M$	-	1,0956	0,8037	0,5824	0,4155	0,2969	0,2123

Продолжение таблицы 2.12

H_*	F, A	Расчетные параметры	$\varphi = 3^\circ$	$\varphi = 5^\circ$	$\varphi = 7^\circ$	$\varphi = 9^\circ$	$\varphi = 11^\circ$	$\varphi = 13^\circ$	$\varphi = 15^\circ$
4,34	500	$d_{*опт}$	1,75	1,80	1,85	1,851	I	1,85	1,85
		B_0, T	$< B_{0Г}$	$< B_{0Г}$	$< B_{0Г}$				
		$M_{ЭМ.маx}, Н·м$	0,1981	0,1222	0,0735	0,0441	0,0268	0,0167	0,0105
	1000	$d_{*опт}$	1,65	1,75	1,80	1,85	1,85	1,85	1,85
		B_0, T	1,328	1,271	1,204	1,147	$< B_{0Г}$	$< B_{0Г}$	$< B_{0Г}$
		$M_{ЭМ.маx}, Н·м$	0,7264	0,4869	0,3039	0,1873	0,1074	0,0667	0,0421
	1500	$d_{*опт}$	1,60	1,65	1,70	1,70	1,75	1,75	1,75
		B_0, T	1,580	1,544	1,509	1,469	1,132	1,393	1,362
		$M_{ЭМ.маx}, Н·м$	0,9436	0,6909	0,4787	0,3199	0,2110	0,1387	0,0908
	2000	$d_{*опт}$	1,55	1,60	1,655	1,55	1,70	1,70	1,70
		B_0, T	1,724	1,706	1,688	1,655	1,638	1,605	1,579
		$M_{ЭМ.маx}, Н·м$	0,9875	0,7339	0,5190	0,3557	0,2397	0,1614	0,0801

Данные таблицы 2.12 свидетельствуют о том, что при линейной магнитной системе независимо от значения относительной высоты обмотки H_* оптимальные значения $d_{*опт}$ лежат в узком диапазоне 1,75 ÷ 1,85. При этом максимальные значения электромагнитного момента возрастают с уменьшением относительной высоты H_* обмотки. При средне нагруженных МС (при $1,5 Tл > B_0 \geq B_{0Г}$) оптимальное значение $d_{*опт}$ находится в диапазоне от 1,65 до 1,90. Верхняя граница этого диапазона уменьшается до 1,85 с ростом H_* . При изменении индукции B_0 в диапазоне от 1,5 до 1,65 Тл имеем $1,5 \leq d_{*опт} \leq 1,75$, при этом меньшие значения $d_{*опт}$ соответствуют большим значениям B_0 . С ростом угла φ значение B_0 , при котором достигается максимальное значение электромагнитного момента, уменьшается для всех H_* и F .

2.3.2 Влияние соизмерностей сегментного полюсного наконечника на величину электромагнитного момента

Расчеты электромагнитного момента в данном случае выполнены при $d_c = 20 \cdot 10^{-3}$ м; $A_* = 0,6$; $C_* = 1,76$; $H_* = 2,75$ на основании выражений:

$$F - F_{*c} B_0 d_c / \mu_0 = 0; \quad (2.33)$$

$$M_{\text{ЭМ}} = M_{*c} B_0^2 \pi d_c^3 / 8 \mu_0; \quad (2.34)$$

при $B_0 \geq 1,20$ Т,

$$\text{и } M_{\text{ЭМ}} = M_{\text{ЭМ.Г.С}} \left(\frac{F}{F_{\text{Г.С}}} \right)^2; \quad (2.35)$$

при $F \leq F_{\text{Г.С}}$.

Результаты расчётов электромагнитного момента представлены в таблице 2.13 в долях значений момента при круглом полюсном наконечнике при магнитодвижущей силе обмотки $F = 400, 800, 1200$ А; при относительном диаметре полюсного наконечника $d_* = 1,70, 2,80$, при относительной высоте сегмента $h_* = 1,75 \dots 1$; при угловых положениях $\varphi = 5, 5, 9, 11, 13, 15$ град. якоря.

При относительно большой кратности d_* ($d_* = 2,80$) наибольшее значение относительно электромагнитного момента имеет место при $h_* = 0,75$ независимо от F , при этом кратность электромагнитного момента уменьшается с увеличением F ($F = 1200$ А).

Таблица 2.13 – К оценке влияния соизмерностей сегментного полюсного наконечника на электромагнитный момент

F , А	d_*	h_*	$\varphi = 5^\circ$	$\varphi = 7^\circ$	$\varphi = 9^\circ$	$\varphi = 11^\circ$	$\varphi = 13^\circ$	$\varphi = 15^\circ$
400	1,70	0,75	1,007	0,988	0,963	0,921	0,889	0,889
		0,80	1,049	1,037	1,019	1,000	1,0963	1,000
		0,85	1,063	1,061	1,056	1,059	1,037	1,056
		0,90	1,063	1,061	1,055	1,053	1,037	1,056

Продолжение таблицы 2.13

F, A	d_*	h_*	$\varphi = 5^\circ$	$\varphi = 7^\circ$	$\varphi = 9^\circ$	$\varphi = 11^\circ$	$\varphi = 13^\circ$	$\varphi = 15^\circ$	
400	1,70	0,95	1,042	1,049	1,037	1,053	1,037	1,056	
		1	1	1	1	1	1	1	
	2,8	0,75	1,520	1,551	1,574	-	1,586	2,000	
		0,80	1,480	1,513	1,556	-	1,552	1,929	
		0,85	1,370	1,436	1,463	-	1,483	1,786	
		0,90	1,299	1,321	1,352	-	1,379	1,571	
		0,95	1,165	1,165	1,185	-	1,207	1,286	
		1	1	1	1	-	1	1	
	800	1,70	0,75	1,003	0,985	0,958	0,922	0,898	0,901
			0,80	1,045	1,034	1,019	0,993	0,981	1,00
			0,85	1,066	1,061	1,051	1,039	1,028	1,056
			0,90	1,064	1,064	1,060	1,052	1,056	1,085
			0,95	1,042	1,046	1,042	1,039	1,046	1,056
1			1	1	1	1	1	1	
2,80		0,75	-	1,447	1,487	-	1,585	1,931	
		0,80	-	1,422	1,465	-	1,569	1,897	
		0,85	-	1,359	1,398	-	1,504	1,770	
		0,90	-	1,266	1,297	-	1,382	1,569	
		0,95	-	1,146	1,160	-	1,211	1,310	
		1	-	1	1	-	1	1	
F, A		d_*	h_*	$\varphi = 5^\circ$	$\varphi = 7^\circ$	$\varphi = 9^\circ$	$\varphi = 11^\circ$	$\varphi = 13^\circ$	$\varphi = 15^\circ$
1200	1,70	0,75	1,004	0,987	0,964	0,931	0,895	0,900	
		0,80	1,038	1,031	1,020	0,997	0,977	1,00	
		0,85	1,056	1,054	1,051	1,040	1,031	1,059	
		0,90	1,055	1,057	1,058	1,055	1,054	1,076	
		0,95	1,036	1,039	1,042	1,043	1,043	1,059	
		1	1	1	1	1	1	1	
	2,8	0,75	1,333	1,355	1,367	1,225	1,384	1,534	
		0,80	1,311	1,338	1,348	1,237	1,377	1,515	
		0,85	1,265	1,286	1,301	1,219	1,331	1,448	
		0,90	1,196	1,213	1,225	1,173	1,251	1,336	
		0,95	1,107	1,117	1,124	1,099	1,140	1,183	
		1	1	1	1	1	1	1	

2.3.3 Влияние соизмерностей прямоугольного полюсного наконечника на величину электромагнитного момента

При принятых основных соизмерностях (H_* , A_* , c_* , c_{II*} , b_*) в магнитной системе, углом (φ) положении якоря и диаметра (d_c) сердечника рассчитываются по выражениям (2.24), (1.34), (1.35) координаты граничной точки $G(F_{ГР}, M_{ГР})$ на нагрузочной характеристике.

При заданном значении магнитодвижущей силы выбирается путь расчета электромагнитного момента. Если магнитная система линейна ($F < F_{ГР}$), то $M_{ЭМ}$ рассчитывается по выражению (1.18). Если же магнитная система нелинейна, то решается численное уравнение (2.34) относительно B_0 , которое подставляется в выражение (1.17).

В качестве примера в таблицах А3...А8 приложения А, приведены результаты расчета $M_{ЭМ}$ по описанному выше алгоритму для магнитной системы со следующими основными соизмерностями:

$$H_* = 2,75; A_* = 0,60; c_* = 1,76$$

при $d_c = 0,02$ мм, $b_{СК} = b_{ЯК} = 0,062$ мм.

При этих значениях H_* , A_* , c_* и изменении углового положения якоря φ расчетным путем исследованы влияния соизмерностей полюсного наконечника c_{II*} и b_* на относительную величину электромагнитного момента $M_{ЭМ}^*$. Исследования проводились при фиксированных значениях МДС.

Ниже в таблицах 2.14-2.22 сведены результаты расчетов по оценке возможных оптимальных значений параметров полюсных наконечников на основании статических тяговых характеристик, представленных в таблицах А3...А8 при $b_* = 0,5$, $b_* = 0,7$, $b_* = 1$.

Таблица 2.22 – Расчет $M_{эм}^*$ при $F = 1200$ А и $b_* = 1$

$\varphi, ^\circ$	5	7	9	11	13	15
$c_{п*}$	$M_{эм}^*$ (представлен в относительных величинах)					
0,40	1,205	1,071	0,991	0,946	0,901	0,836
0,45	1,223	1,103	1,037	0,996	0,962	0,900
0,50	1,227	1,128	1,070	1,039	1,009	0,955
0,55	1,221	1,140	1,092	1,069	1,047	1,00
0,60	1,203	1,138	1,101	1,085	1,071	1,030
0,65	1,171	1,125	1,101	1,089	1,080	1,050
0,70	1,127	1,096	1,083	1,077	1,071	1,050
0,75	1,070	1,054	1,049	1,050	1,042	1,030
0,80	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000

На основании полученных данных можно сделать вывод, что для разных МДС и угловых положениях якоря значение электромагнитного момента достигает максимума при относительных размерах полюсного наконечника $b_* = 0,9...1$ и $c_{п*} = 0,6...0,7$.

2.4 Выводы ко второму разделу

1. Сформулированное условие линейности магнитных систем позволило определить в основании сердечника граничное значение магнитной индукции клапанных электромагнитов с круглой, сегментной, прямоугольной формой полюсных наконечников. Так для магнитных систем, выполненных из низкоуглеродистой электротехнической стали марки 10895, с круглыми полюсными наконечниками, граничное значение индукции не зависит от геометрических соотношений и может быть принято равным 1,11 Тл. Математическая модель кривых намагничивания этой разновидности магнитной системы может быть использована при индукции в основании сердечника до 1,95Тл. При различных соизмерностях в магнитных системах клапанных

электромагнитов с сегментными полюсными наконечниками граничное значение индукции находится от 1,11 Тл до 1,23 Тл. В среднем в этом случае граничное значение индукции целесообразно принять равным 1,2 Тл. В магнитных системах с прямоугольными полюсными наконечниками граничное значение индукции принимаем равным 1,16 Тл.

2. Экспериментально установлено, что в клапанных электромагнитах с полюсным наконечником магнитный поток, замыкающийся через якорь составляет лишь часть потока, пронизывающего поперечное значение сердечника, прилегающего к тыльной поверхности полюсного наконечника. На основе обобщенных математических моделей коэффициентов рассеяния и эпюр распределения магнитного потока вдоль оси сердечника установлена математическая зависимость, позволяющая оценить долю потока, замыкающего через рабочий воздушный зазор.

Независимо от формы полюсного наконечника эта доля потока уменьшается с увеличением угла положения якоря, составляющего при угле 15 градусов лишь 72-78% при круглой форме полюсов, 64-75% при сегментной форме полюсов и 70% при прямоугольной форме полюсов.

3. Для повышения точности существующих методик проектных и проверочных расчетов клапанных электромагнитов постоянного тока, базирующиеся на теории магнитных цепей, целесообразно внести в них поправочную функцию, учитывающую потоки рассеяния, сходящие с поверхностей полюсного наконечника на скобу магнитопровода.

4. На основе экспериментальных исследований клапанных электромагнитов с круглыми полюсными наконечниками установлено, что при любых значениях магнитодвижущих сил, не приводящих к значениям магнитной индукции в основании сердечника превышающих $B_0 > 1,75\text{Тл}$ и угловых положениях якоря в диапазоне от 3° до 15° существует относительный диаметр полюсного наконечника, обеспечивающий максимум электромагнитного момента.

При магнитной индукции в основании сердечника в пределах от 1,11 Тл до 1,50 Тл оптимальное значение относительного диаметра полюсного наконечника

изменяется в диапазоне от 1,65 до 1,90. При этом верхняя граница этого диапазона с ростом относительной высоты обмотки уменьшается до 1,85.

При изменении усредненной по поперечному сечению в основании сердечника индукции в диапазоне от 1,50Тл до 1,65Тл относительный диаметр полюсного наконечника круглой формы, обеспечивающий максимум электромагнитного момента, находится в диапазоне от 1,50 до 1,75. При этом меньшие значения соответствуют большим значениям индукции.

При всех в исследованном диапазоне относительных высот обмотки и ее магнитодвижущей силы с увеличением угла, определяющего положения якоря, значение индукции, при котором достигается максимум электромагнитного момента, уменьшается.

5. Максимальный относительный электромагнитный момент, достигаемый в клапанной магнитной системе с сегментной формой полюсного наконечника при кратности 1,80 диаметра полюсного наконечника в долях диаметра сердечника ($d_c = 20 \cdot 10^3$ м), при относительной высоте полюсного наконечника равной 0,75, независимо от величины магнитодвижущей силы обмотки, варьируется от 400А до 1200А. При этом с увеличением МДС кратность электромагнитного момента уменьшается.

6. Максимальное значение относительного электромагнитного момента в клапанной электромагнитной системе с прямоугольной формой полюсного наконечника достигается при его относительной длине $b_* = 0,9 \div 1$ и относительной ширине его активной части $C_{n*} = C_n / C_{ок} = 0,6 \div 0,7$.

Раздел 3 Проектирование клапанных электромагнитов с круглыми полюсными наконечниками

Вопросы разработки методик проектного расчета клапанных электромагнитов с круглым полюсным наконечником затронуты в работах многих авторов [20, 21, 34, 35, 44, 60, 94, 99, 100, 104, 105, 112, 114, 116, 120, 125, 131, 132, 140, 151, 160, 168, 175, 176 и др.].

Во многих публикациях предлагаются методики проектного расчета на основе статических характеристик клапанных электромагнитов [19, 20, 34, 35 и др.], но также известны работы [130, 138 и др.] , в которых рассматриваются вопросы учета динамических процессов в электромагнитных системах, в частности, реле времени [116, 140].

В публикациях [10-12, 34, 35, 44, 99-101, 104, 105, 114, 116, 123, 132-134 и др.] рассматриваются вопросы выбора предпочтительных соизмерностей в клапанных магнитных системах с круглым полюсным наконечником.

Широкое применение клапанной магнитной системы в качестве основы привода электромагнитных реле, контакторов по-прежнему сохраняет актуальность разработок оптимальных магнитных систем, которые позволяют минимизировать потребляемую мощность и массо-габаритные размеры коммутационных аппаратов. При проектировании оптимальных систем важен сравнительный анализ результатов проектных расчетов, выполненных по известным методикам.

3.1 Обзор методик проектного расчета клапанных электромагнитов постоянного напряжения

В подразделе рассматривается методики параметрического синтеза на основе статических характеристик (по условиям статики). Методики проиллюстрированы в виде примеров расчета, в приложении Б.

3.1.1 Методика проектного расчета на основе использования конструктивного фактора

Понятие конструктивного фактора (показателя) введено Ротерсом [201]. В отечественной инженерной практике проектных расчетов эта методика получила широкое применение после публикации [44]. Конструктивный фактор определен в виде

$$K_{\phi} = \sqrt{P_{\text{МХ}}} / \delta, \quad (3.1)$$

где $P_{\text{МХ}}$ - механическая сила (кГ), которую должен преодолеть приводной электромагнит в области рабочего воздушного зазора (δ).

Магнитная индукция (B_{δ}) в области рабочего воздушного зазора зависит от $P_{\text{МХ}}$, δ и режима работы ЭМ. Для магнитных систем больших размеров рациональное значение B_{δ} больше [44], чем для МС малых размеров.

На рисунке 3.1 приведены зависимости B_{δ} и коэффициента рассеяния (σ_0)

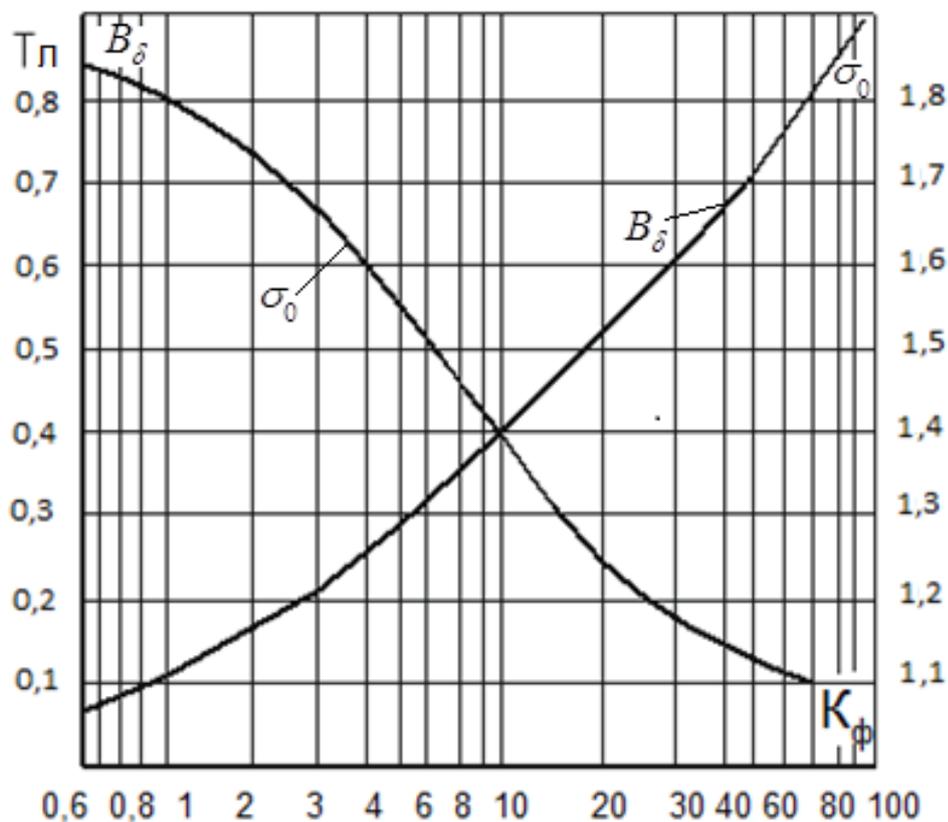


Рисунок 3.1 – Зависимость коэффициента рассеяния σ_0 и магнитной индукции B_{δ} в рабочем зазоре от величины K_{ϕ}

магнитного потоков магнитной системе от величины K_ϕ , полученное для продолжительного режима работы, превышения температуры нагрева (τ) обмотки 70°C и условно- полезной работе

$$A_{y,\Pi} = 0,6 \text{ кГ} \cdot \text{см} [44].$$

Для определения площади поперечного сечения (S_Π) полюсного наконечника рекомендуется [44] упрощенная формула Максвелла для электромагнитной силы, которая в критической точке должна быть равна P_{MX}

$$P_{\text{MX}} = \frac{1,2B_\delta^2 S_\Pi}{2\mu_0}, \quad (3.2)$$

где коэффициент 1,2 учитывает [44] влияние неравномерности поля в зазоре и выпучивание линий индукции.

На основании (3.2) получаем

$$S_\Pi = \frac{\mu_0 P_{\text{ЭМ.МХ}}}{0,6B_\delta^2}, \quad (3.3)$$

или

$$d_\Pi = 2\sqrt{S_\Pi / \pi}. \quad (3.4)$$

Площадь поперечного сечения сердечника (S_c) определяется

$$S_c = \frac{\sigma_0 S_\Pi B_\delta}{B_0}, \quad (3.5)$$

где B_0 - индукция в сердечнике .

Рекомендации по выбору B_0 в публикациях: [44] находится в пределах $1,4\text{Тл} \leq B_0 \leq 1,7\text{Тл}$ (в среднем которая равна $1,5\text{Тл}$); в [168] и $1,0\text{Тл} \leq B_0 \leq 1,45\text{Тл}$ и в [138] $1,27\text{Тл} \leq B_0 \leq 1,45\text{Тл}$, а так же в [131] - $1,0\text{Тл} \leq B_0 \leq 1,2\text{Тл}$.

Диаметр сердечника определяется в соответствии с выражением

$$d_c = 2\sqrt{S_c / \pi}. \quad (3.6)$$

Толщина (a_n) полюсного наконечника

$$a_n \geq 0,25d_c [1 - (d_c / d_\Pi)^2]. \quad (3.7)$$

Сечение якоря определяется выражением

$$S_{\text{як}} = (0,5 \div 0,8)S_c. \quad (3.8)$$

При неизменном внешнем диаметре обмотки, изменяя величину d_c можно достичь наименьшее значение потребляемой обмоткой мощности при

$$A_0 / d_c = 0,306.$$

Рациональная длина обмотки лежит [44] в пределах $4 \leq H_0 / d_c \leq 7$.

Ширина скобы ($b_{\text{СК}}$) по этой методике берется равной внешнему диаметру (D_0) обмотки

$$b_{\text{СК}} = D_0 = 3d_c. \quad (3.9)$$

Следовательно при $S_{\text{СК}} = S_c$ толщина скобы $a_{\text{СК}} = d_c / 4$.

Так же считаем, что ширина якоря $b_{\text{як}} = d_{\text{П}} = 2d_c$ и отсюда толщина якоря $a_{\text{як}} \geq d_c / 5$.

Пример Б1 расчета по этой методике приведен в приложении Б.

3.1.2 Модифицированная методика проектного расчета на основе использования конструктивного фактора

При этой методике определяется расчетная критическая точка [38, 168] на механической характеристике

$$P_{\text{МХ},i} \delta_i^2 \max \Rightarrow K_{\phi} = \frac{\sqrt{P_{\text{МХ},\text{кр}}}}{\delta_{\text{кр}}} \Rightarrow B_{\delta}, \sigma_0.$$

Рассчитываются: $S_{\text{П}} = P_{\text{МХ},\text{кр}} / 4B_{\delta}^2 \cdot 10^5$; $d_{\text{П}} = 2\sqrt{S_{\text{П}} / \pi}$; $S_c = \frac{\sigma_0 B_{\delta} S_{\text{П}}}{B_0}$;

$$0,7\text{Тл} \leq B_0 \leq 1,2\text{Тл}; d_c = 2\sqrt{S_{\text{П}} / \pi}; S_{\text{як}} = \frac{B_{\delta} S_{\text{П}}}{B_0}.$$

Определяется магнитодвижущая сила [168]

$$F = K_{\text{зап}} K_{\text{П}} \frac{B_{\delta}}{\mu_0} \delta_{\text{кр}}, \quad (3.10)$$

где $K_{\text{зап}}$ -коэффициент запаса по МДС ($1,4 \leq K_{\text{зап}} \leq 2$);

K_{Π} - коэффициент потерь, который учитывает падение магнитного напряжения в ферромагнитных элементах и паразитных зазорах ($1,2 \leq K_{\Pi} \leq 1,5$).

Размеры (H_0, A_0) обмотки определяются выражениями:

$$\begin{cases} H_0 = F \left(\frac{U_{\max}}{U_{\min}} \right) \sqrt{\frac{\rho_{\Gamma}}{2K_{\text{тн}}K_3\tau_{\text{доп}}n_p\alpha_m d_0}}; \\ A_0 = m d_0; m = \frac{A_0}{d_0} = \frac{A_0}{d_c} \frac{1}{(1+2\Delta_*)} = \frac{A_*}{1+2\Delta_*}; 0,25 \leq m \leq 0,80; \\ \alpha_m = m \left(m + \frac{1+\beta}{2} \right) / (m+1), \end{cases}$$

где $\rho_{\Gamma} = \rho_0(1 + \alpha\Theta_{\text{доп}})$ - удельное электрическое сопротивление обмоточного провода при допустимой температуре нагрева обмотки;

$$\Theta_{\text{доп}} = \tau_{\text{доп}} + T_0;$$

$$K_{\text{тн}} = 10 \div 20 \frac{Вт}{м^2 \cdot град} - \text{коэффициент теплопередачи наружной поверхности}$$

обмотки;

m – отношение толщины намотки к внутреннему диаметру обмотки;

K_3 - коэффициент заполнения обмоточного окна;

n_p - коэффициент перегрузки по мощности;

U_{\max} - максимальное напряжение на обмотке;

U_{\min} - минимальное напряжение на обмотке;

$\Delta_* = \Delta_k / d_c$ - относительная толщина каркаса катушки;

$$\beta = \begin{cases} 0,9 - \text{бандажированная обмотка}; \\ 1,0 - \text{каркасная катушка тонкостенная, плотно насаженная на сердечник}; \\ 1,7 - \text{обмотка, намотанная на металлическую изолированную гильзу}; \\ 2,4 - \text{обмотка, намотанная на изолированный сердечник}; \end{cases}$$

$S = S_{\text{н}} + \beta S_{\text{в}}$ - эффективная площадь охлаждения обмотки;

$$K_{\text{тн}} = \begin{cases} \frac{2,1[1 + 0,005(\Theta_{\text{доп}} - T_0)]}{S^{1/3}}, & \text{при } 10^{-4} \text{ м}^2 \leq S \leq 100 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2; \text{ [28]} \\ \frac{3,6[1 + 0,005(\Theta_{\text{доп}} - T_0)]}{S^{1/5}}, & \text{при } 100 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \leq S \leq 500 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2; \end{cases}$$

$$n_p = \begin{cases} T/t_n & \text{- кратковременный;} \\ 100/\text{ПВ}\% & \text{- повторно-кратковременный режим;} \\ 1 & \text{- продолжительный режим.} \end{cases}$$

Пример Б2 расчета приведен в Приложении Б.

3.1.3 Методика расчета определяющих размеров клапанных электромагнитов [20]

Основными размерами клапанной магнитной системы (рисунок 1.1), как уже отмечалось ранее, является диаметр сердечника (d_c), толщина обмотки (A_0), высота обмотки (H_0), толщина каркаса катушки (Δ_k), позволяющая определить внутренний (d_0) и наружный (D_0) диаметры обмотки.

$$d_0 = d_c + 2\Delta_k; D_0 = d_0 + 2A_0.$$

Площадь поперечного сечения сердечника (S_c) и его диаметр (d_c) определяют по известному потоку в рабочем воздушном зазоре, коэффициенту рассеяния магнитного потока (σ_0) и индукции в основании сердечника.

Размеры окна обмотки и магнитопровода определяют после расчета МДС обмотки (F). Определить эти размеры возможно различными подходами. Например, по описанной выше в подразделе 3.1.2 методике, где задача решается при одном заданном отношении $m = A/d_0$. Так же можно задаться отношением H_0/A_0 , если же при этом учесть существующее различие условий теплоотдачи с наружной и внутренней поверхностей обмотки, то необходимо задаться [20] двумя соотношениями: A_0/d_c и H_0/d (в методике 3.1.2 эта задача решается при одном заданном отношении: $m = A_0/d_0$). Это позволяет не только определить

размеры окна, но и учесть в функции заданных величин диаметр сердечника (d_c). Ниже обоснована возможность уточнения d_c уже на этапе проектного расчета по условиям нагрева, который изначально определялся по индукции B_0 . Расчет ведется по известным формулам:

$$X = d_0/D_0 ; Y = H_0/D_0 . \quad (3.11)$$

$$\frac{\rho_r F_{\max}^2}{K_3 K_{\text{тн}} \tau_{\text{доп}}} = \frac{A_0 H_0 S_{\text{охл}}}{l_{\text{ср}}} , \quad (3.12)$$

где ρ_r - удельное электрическое сопротивление материала провода;

F_{\max} - МДС обмотки, соответствующая максимальному продолжительно приложенному к обмотке напряжению;

K_3 - коэффициент заполнения обмоточного окна;

$K_{\text{тн}}$ - коэффициент теплопередачи с наружной поверхности обмотки;

$\tau_{\text{доп}} = \theta_{\text{доп}} - T_0$ - превышение температуры нагрева ($\theta_{\text{доп}}$) поверхности обмотки над температурой (T_0) окружающей среды;

$S_{\text{охл}}$ - эффективная площадь поверхности охлаждения обмотки;

$l_{\text{ср}}$ - средняя длина витка обмотки.

Выразив в формуле (3.12) величины через размеры обмотки, с учетом выражения (3.11) получим

$$\frac{\rho_r F_{\max}^2}{K_3 K_{\text{тн}} \tau_{\text{доп}}} = \frac{(1-X)(1+\beta X)Y^2}{1+X} D_0^3 . \quad (3.13)$$

Решение этого выражения с учетом первого частного в формуле (3.11) определяет

$$d_0 = X \sqrt[3]{\frac{1+X}{(1-X)(1+\beta X)Y^2} \frac{\rho_r F_{\max}^2}{k_3 k_{\text{тн}} \tau_{\text{доп}}}} . \quad (3.14)$$

Полученные значения из выражения (3.14) сопоставляют с d_c , вычисленным из магнитных расчетов. При существенном расхождении этих

значений, изменив магнитные величины, повторяют расчет. Рекомендуемые величины значений X и Y приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1. Рекомендуемые значения X и Y

Критерий оптимальности	X	Y
Минимальные габариты	0,62 - 0,69	1,0
Минимум стоимости активных материалов	0,65 - 0,80	1,8 - 1,9

Пример БЗ расчета по рассмотренной методике приведен в приложении Б.

3.1.4 Методика синтеза клапанных электромагнитов на основе их усредненной безразмерной тяговой характеристики

Согласно источникам [176, 180] выполняются следующие действия.

1. Ввод исходных данных:

а) относительные размеры магнитной системы (рисунок 1.1)

$$d_* = \frac{d_{\text{п}}}{d_{\text{с}}}; C_* = \frac{C}{d_{\text{с}}}; A_* = \frac{A_0}{d_{\text{с}}}; H_* = \frac{H_0}{d_{\text{с}}}; D_* = \frac{D_0}{d_{\text{с}}}; .$$

б) электромагнитную силу ($P_{\text{эм}}$); рабочий зазор (δ); коэффициент, характеризующий пределы изменения напряжения на обмотке $k_3 = U_{\text{min}}/U_{\text{max}}$; допустимое превышение ($\tau_{\text{доп}}$) температуры нагрева обмотки; расчетная температура окружающей среды (T_0); коэффициент заполнения обмоточного окна (K_3); магнитную индукцию (B_{δ}) в рабочем воздушном зазоре. Следует отметить, что B_{δ} на последующих этапах «автоматически» уточняется.

2. Расчет площади ($S_{\text{п}}$) торцевой поверхности полюсного наконечника и его диаметра ($d_{\text{п}}$):

$$S_{\text{п}} = \frac{2\mu_0 P_{\text{эм}}}{B_{\delta}^2}; d_{\text{п}} = 2\sqrt{\frac{S_{\text{п}}}{\pi}} .$$

3. Определение относительного рабочего зазора

$$\delta^{**} = \frac{\delta}{d_{\text{п}}}$$

4. По усредненной тяговой характеристике (рисунок 3.2) определить $P_{\text{эм}}^{**}$. Характеристики приведены при нормальном атмосферном давлении, $T_0 = (40 \div 60)^\circ \text{C}$, $\Theta = (55 \div 90)^\circ \text{C}$, $k_3 = (0,75 \div 0,81)$.

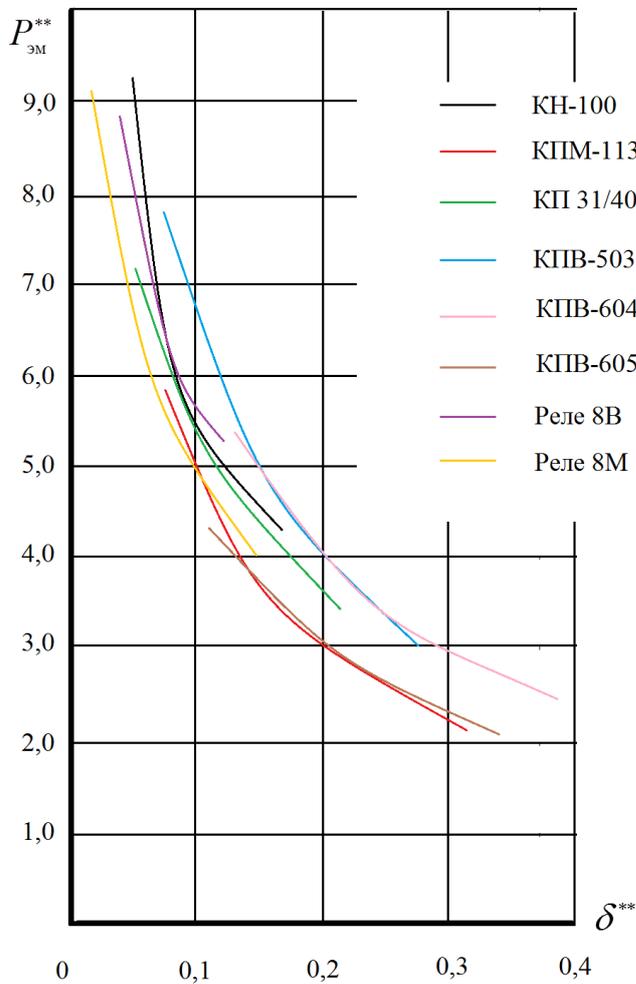


Рисунок 3.2 – Тяговые характеристики электромагнитов клапанного типа в безразмерных величинах

5. Определение наименьшей величины магнитодвижущей силы обмотки при быстром уменьшении напряжения на обмотке до U_{min} и после ее нагрева до установившегося теплового состояния при U_{max}

$$F_{\text{min}} = 2\sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \frac{1}{P_{\text{эм}}^{**}} \cdot \sqrt{\frac{P_{\text{эм}}}{\mu_0}} \quad (3.15)$$

6. Нахождение $F_{\text{max}(1)} = F_{\text{min}}/k_3$ и $d_c = d_{\text{п}}/d_*$.

7. Возможность корректировки $K_{\text{зап}}$.

8. По данным зависимостей рисунка 3.3 определяется N_{c1} . На рисунке О и Δ - это результаты экспериментов на различных электромагнитах (О-обмотки,

намотанные на сердечник, изолированной лакотканью; Δ - бандажные компаундированные обмотки, намотанные на стальную трубу, надеваемую на сердечник, или так же надеваемые на сердечник при воздушном зазоре 0,25-0,5 мм между внутренней поверхностью катушки и сердечником). Эксперименты проводились при температуре окружающей среды 40°C и превышении

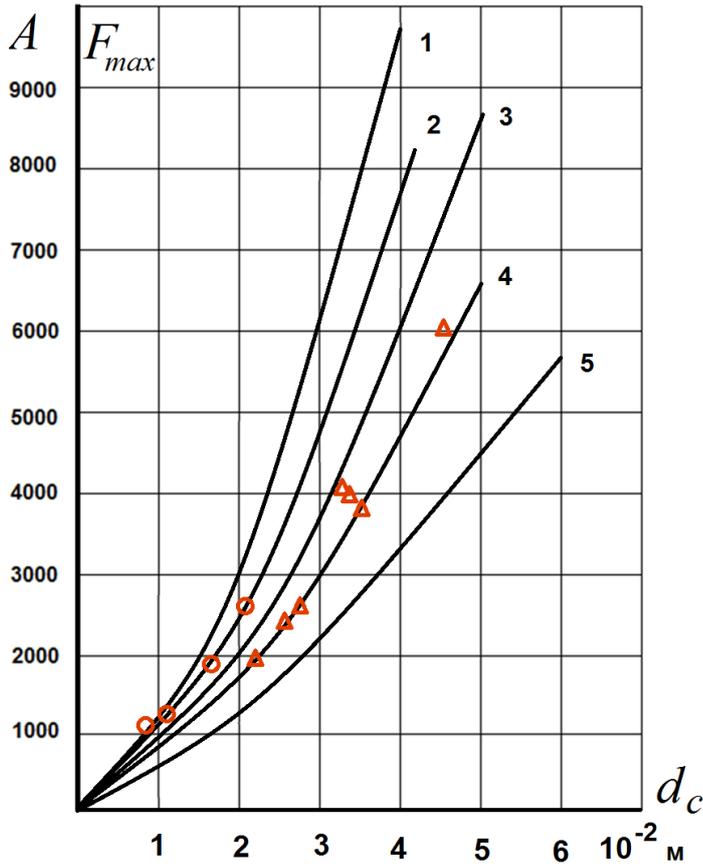


Рисунок 3.3 – Зависимости максимальной МДС обмотки от диаметра сердечника МС при различных значениях коэффициента N_{c1}

значениями $d_{п}$ и проводим расчет по пунктам 3-9 (исключение п.7 и п.8, коэффициент N_{c1} остается примерно постоянным). Достаточно привести два варианта расчета с конечными результатами: когда $F_{max(2)} < F_{max(1)}$, $F_{max(1)} < F_{max(2)}$ и с любым одним из этих соотношений. По результатам этих вариантов строятся на одной координатной плоскости зависимости $F_{max(1)} = f_1(d_{п})$ и $F_{max(2)} = f_2(d_{п})$. Точка пересечения этих зависимостей определяет наибольшую F_{max} при заданном $d_{п}$.

11. Определяется окончательное значение d_c и F_{min} .

12. Находятся абсолютные размеры МС.

температуры обмотки $80^{\circ}C$. Значения N_{c1} , соответствующие зависимостям, обозначенные цифрами (рисунок 3.3), приведены ниже:

$$1 - N_{c1} = 1,2 \cdot 10^6 \text{ A/м}^{3/2};$$

$$2 - N_{c1} = 1,0 \cdot 10^6 \text{ A/м}^{3/2};$$

$$3 - N_{c1} = 0,8 \cdot 10^6 \text{ A/м}^{3/2};$$

$$4 - N_{c1} = 0,6 \cdot 10^6 \text{ A/м}^{3/2};$$

$$5 - N_{c1} = 0,4 \cdot 10^6 \text{ A/м}^{3/2}.$$

9. Рассчитывается

$$F_{max(2)} = N_{c1} \sqrt{d_c^3}.$$

10. Если $F_{max(2)} < F_{max(1)}$, то размеры МС следует увеличить, и соответственно наоборот. Так при $F_{max(1)} < F_{max(2)}$ задаемся большими

13. Производится расчет диаметра обмоточного провода (d) и числа витков (N):

$$d = 2 \sqrt{\frac{\rho_{\Gamma} (d_{\epsilon^*} + D_*) N_{c1} \sqrt[4]{d_c^5}}{U_{\max}}}; \quad (3.16)$$

$$N = \frac{2K_{\text{зап}} H_* A_*}{\pi \rho_{\Gamma} (d_{\epsilon^*} + D_*) N_{c1} \sqrt{d_c}} \frac{U_{\max}}{\sqrt{d_c}}; \quad (3.17)$$

$$\rho_{\Gamma} = \rho_0 (1 + d(\tau_{\text{доп}} + T_0)); \quad d_{\epsilon^*} = 1 + 2\Delta_*; \quad D_* = d_{\epsilon^*} + 2A_*; \quad U_{\max} = k_{\max} U_{\text{ном}}.$$

Пример Б4 проектного расчета приведен в приложении Б.

3.1.5 Методика проектного расчета привода электромагнитного реле на основе эмпирических зависимостей

Одним из известных [34, 35] электромагнитных реле, получивших широкое применения в системах связи, автоматики, управления, является реле типа РКН, выполненное на базе клапанной магнитной системы (рисунок 3.4).



Рис. 3.4 - Реле типа РКН.

Магнитная система данного реле состоит [34] из скобы Г-образной формы, согнутого из листовой стали толщиной 4 мм, сердечника диаметром 9 мм и якоря Г-образной формы.

Для уменьшения магнитного сопротивления стыка скобы с якорем конец скобы снабжен «ножевой» опорой для якоря в виде трехгранной призмы. Ширина скобы 20,6 мм, высота «ножевой» опоры 8,2 мм.

Передний конец сердечника имеет полюсный наконечник диаметром 15 мм, расчетная длина сердечника 70 мм. Сердечник крепится к скобе специальной гайкой цилиндрической формы.

Якорь согнут из листовой стали толщиной 2 мм; он снабжен латунным штифтом отлипания и двумя эбонитовыми стопочками для передачи усилий движущим штифтам контактных групп.

К лезвию ножевой опоры якорь прижимается стальной цилиндрической пружиной с помощью специального винта. Регулировка хода производится путем изгибания якоря в специальном приспособлении.

Детали магнитопровода изготовлены из стали марки ЭА и покрыты никелем.

Для поглощения колебаний якоря и устранения вибрации контактных пружин при работе реле передняя щека катушки изготовлена из красной меди (толщина щеки 1,6 мм).

Обмотка изолирована от медной щеки дополнительной гетинаксовой щекой.

Задняя щека катушки изготовлена из гетинакса толщиной 3 мм, в эту щеку запрессовано от двух до пяти выводных штифтов для подпайки концов обмотки.

Согласно данной методики (методика Витенберга М.И.), для выполнения проектного расчета магнитной системы необходимыми исходными данными является механическая (противодействующая) характеристика, приводимого в движение механизма, допустимая температура нагрева обмоточного провода катушки в оговоренном режиме работы ЭМ.

Рекомендуемые [34] значения магнитной индукции в магнитопроводе реле не должны превышать $1 \div 1,2$ Тл, а индукция B_δ в рабочем воздушном зазоре не должна превышать значений $B_\delta \leq 0,5 - 0,8$ Тл.

Диаметр сердечника клапанной МС без полюсного наконечника при известной длине сердечника может быть рассчитан по выражению

$$d_c \approx 0,223 \sqrt[3]{P_{\text{мк}}} \sqrt[4]{\delta(H_0 + 2\Delta_k)}, \quad (3.18)$$

где $P_{\text{мх}}$ - противодействующее усилие (мН), приведенное к оси сердечника.

Если известна кратность $n = H_0/d_c$, которая составляет [35] от 3,7 до 6 для малогабаритных реле и от 6 до 8 для реле, применяемые в телефонии, диаметр сердечника рассчитывается по выражению:

$$d_c \approx 0,17 P_{\text{мх}}^{4/9} (\delta_n)^{1/3}. \quad (3.19)$$

В клапанных магнитных системах с полюсным наконечником диаметр сердечника рассчитывается [35] по выражениям:

$$d_c \approx 0,333 \sqrt[3]{P_{\text{мх}}^4 \delta (H_0 + 2\Delta_{\text{к}})}, \quad (3.20)$$

$$d_c \approx 0,17 P_{\text{мх}}^{2/5} (\delta_h)^{1/5}. \quad (3.21)$$

Площадь торца полюсного наконечника клапанной МС приводного электромагнита реле [35] в 2,5-4 раза больше площади сечения сердечника ($d_* = d_{\text{п}}/d_c = 1,6 \div 2$). Соотношение (кратность) d_* , обеспечивающее максимум электромагнитной силы, увеличивается пропорционально рабочему воздушному зазору (δ) и уменьшается с увеличением индукции в сердечнике (рисунок 3.5). При больших индукциях в сердечнике увеличение $d_{\text{п}}$ приводит к росту МДС срабатывания ($F_{\text{ср}}$). Расчётное выражение для $d_{*\text{опт}}$ [34, 35], полученное Вишнековским В.В на основе экспериментальных исследований, может быть представлена в виде

$$d_{*\text{опт}} = 0,85 + \delta(1 - 0,001 F_{\text{ср}}), \quad (3.22)$$

в диапазоне $200 \text{ А} \leq F_{\text{ср}} \leq 600 \text{ А}$.

Например, при $F_{\text{ср}} = 600 \text{ А}$ и $\delta = 1,1 \text{ мм}$ оптимальный расчетный диаметр, а при $F_{\text{ср}} = 200 \text{ А}$ и $\delta = 1,1 \text{ мм}$ имеем $d_{*\text{опт}} = 0,85 + 1,1(1 - 0,001 \cdot 200) = 1,73$.

Длина (l_c) сердечника определяется [34, 35] размерами (H_0, A_0) обмотки, которое зависит от чувствительности ($F_{\text{ср}} = \sqrt{P_{\text{ср}}}$) и допустимого превышения ($\tau_{\text{доп}}$) температуры нагрева обмотки. Оптимальная толщина (A_0) обмотки не

превышает d_c [35]. Увеличение площади ($S_{\text{охл}}$) обмотки может быть обеспечено [35] за счет увеличения длины обмотки.

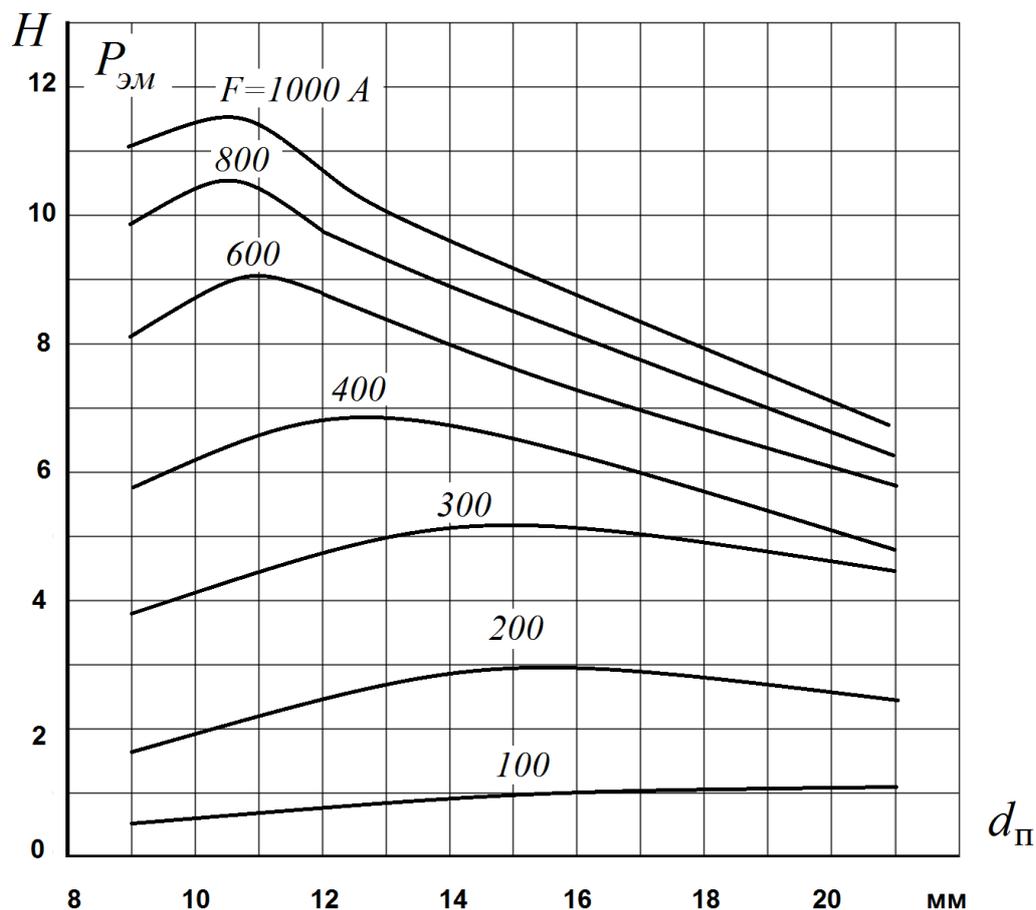


Рисунок 3.5 – Зависимости силы притяжения якоря реле типа РКН от диаметра полюсного наконечника при различной МДС и ходе якоря 0,8 мм ($\delta = 1,1$ мм, $d_c = 9$ мм, $l_c = 70$ мм)

Длина сердечника должна быть на $1 \div 5$ мм [35] больше длины (H_0) обмотки.

Длина обмотки реле без кожуха и с кожухом определяется выражениями соответственно

$$H_0 = \frac{207}{d_c} \sqrt{\frac{P^3}{\tau_s^3}} \text{ (см)}, \quad (3.23)$$

$$H_0 = \frac{285}{d_c} \sqrt{\frac{P^3}{\tau_s^3}} \text{ (см)}, \quad (3.24)$$

где P - потребляемая мощность в (Вт);

τ_s - среднеповерхностное превышение температуры нагрева обмотки ($^{\circ}\text{C}$);

d_c - диаметр сердечника (см).

При фиксированном значении наружного диаметра обмотки мощность срабатывания (P_{cp}) минимальна при [35] при

$$A_* = A_0/d_c = 0,435. \quad (3.25)$$

Варьирование A_* от 0,25 до 0,75 вызывает увеличение P_{cp} в пределах 10% [35]. Рекомендуется [35] выбирать A_* в диапазоне $0,25 \leq A_* \leq 0,50$ для реле больших габаритных размеров, а для малогабаритных и миниатюрных реле диапазон находится $0,50 \leq A_* \leq 1,00$.

Поперечное сечение ($S_{ск}$) скобы магнитопровода выбирается не менее $S_c = \pi d_c^2/4$. Ширина ($b_{ск}$) зависит от наружного диаметра обмотки, от конструкции контактной системы [35] реле, целесообразности уменьшения потока рассеяния между боковой поверхностью сердечника и скобы. Толщина ($a_{ск}$) скобы должна обеспечить жесткость конструкции и рассчитывается по выражению

$$a_{ск} = S_{ск}/b_{ск}, \quad (3.25)$$

округляется до размера по сортаменту и проверяется на условие ($a_{ск*} = a_{ск}/d_c = 0,25$), обеспечивающее индукцию в месте перехода магнитного потока от сердечника к скобе, не превышающую (B_0) индукцию в основании сердечника.

Сечение ($S_{як}$) соответствует [35] неравенству

$$0,6S_c \leq S_{як} \leq S_c. \quad (3.26)$$

3.1.6 Методика синтеза клапанных магнитных систем на основе использования корректирующих функций

Решения задач анализа и синтеза магнитных систем с приемлемой точностью для конкретного случая сопряжена с большими трудностями. Прежде

всего это связано необходимостью учета большого числа переменных проектирования, влияющих на характеристики функционирования, параметров, свойств используемых материалов в магнитной системе, условий эксплуатации электромагнитов. Таким образом, имеется совокупность переменных параметров

$$Z = \{Z_1, Z_2, \dots, Z_m\}, \quad (3.27)$$

которая влияет на названные выше функции [116].

Для преодоления трудностей при решении задач синтеза магнитной системы электромагнита необходимо определиться с приемлемой точностью решения задачи и связанное с этим целесообразное ограничение числа переменных и параметров проектирования, рациональное упрощение математических моделей, описывающих физические процессы в магнитной системе и ЭММ. В совокупности это должно обеспечить и наглядность результатов проектирования [116, 120].

С целью рационализации уравнений проектирования, функций цели (критериев оптимальности) предлагается [116] объединение ряда параметров и переменных в комплексы (корректирующие функции), подлежащие совместному исследованию с целью упрощения аналитических связей, а также определение минимального достаточного числа варьируемых переменных и параметров.

Допустим, высокая точность количественной оценки функционирования МС, ЭММ достигается сложной зависимостью

$$Z = Z(z_1, z_2, \dots, z_m). \quad (3.28)$$

Упрощение модели процесса, состояния дает использование рационализированных зависимостей, названных базовыми функциями

$$Z_\delta = Z_\delta(z_1, z_2, \dots, z_n), \quad (3.29)$$

где $n < m$.

Учитывая, что базовая функция должна отражать основные закономерности явлений, процессов, характеристик, функцию можно представить в виде

$$Z(z) = Z_\delta + \Delta Z. \quad (3.30)$$

Подставив в формулу выражения (3.28) и (3.29) получим

$$Z(z) = kZ_{\delta}(z) = Z(z_1, z_2, \dots, z_k). \quad (3.31)$$

В некоторых случаях в сложные зависимости входят ряд корректирующих функций, которые могут быть объединены в комплексы корректирующих коэффициентов:

$$K = K(k_1, k_2, \dots, k_t). \quad (3.32)$$

Тогда зависимость (3.28) может быть представлена в виде:

$$Z(z, k) = Z(z_1, z_2, \dots, z_n, k_1, k_2, \dots, k_t), \quad (3.33)$$

где $n + t < m$.

Применительно к проектированию МС ЭММ основными (достаточными) является требования создания необходимой электромагнитной силы ($P_{\text{эм}}$) или момента ($M_{\text{эм}}$) при заданном положении якоря МС и условия нагрева и охлаждения ее элементов (в основном обмотки). Проектирование по этим условиям принято называть «по условиям статики».

Размеры обмотки (A_0, H_0), диаметры полюсного наконечника ($d_{\text{п}}$), сердечника (d_c) клапанной МС (рисунок 1.3) существенным образом влияют на ее характеристики. Оправдано [116] введение понятия: ядро МС, под которым будем иметь в виду часть магнитопровода, охваченную обмоткой. Определяющим размером МС является диаметр (d_c) сердечника, от которого зависят остальные размеры МС и часто задаются в долях от него. Эти отношения названы коэффициентами кратности [120], соразмерностями геометрии МС [120]. Отметим, что целесообразные относительные размеры МС изменяются в гораздо узких диапазонах, чем абсолютные их размеры при различных исходных данных проектирования. Элементом ядра МС присвоены следующие обозначения:

$$A_* = A_0/d_c; \quad H_* = H_0/d_c; \quad \Delta_* = \Delta_k/d_c; \quad d_* = d_{\text{п}}/d_c; \quad \delta_* = \delta/d_c; \quad a_{\text{п}*} = a_{\text{п}}/d,$$

первые три значения принято называть основными коэффициентами кратности.

Коэффициенты, уточняющие проектный расчет, как правило, зависят от положения якоря и позволяют [116, 120] упростить аналитическое описание взаимосвязей. В частности, для упрощения представления формул магнитной

проводимости рабочего воздушного зазора вводится коэффициент выпучивания в общей (ε_0^2) или в дифференциальной (ε_δ^2) форме:

$$\varepsilon_0^2 = \frac{\Lambda_\delta}{\Lambda_T}; \quad \varepsilon_\delta^2 = \frac{\left| \frac{d\Lambda_\delta}{\alpha_\delta} \right|}{\left| \frac{d\Lambda_T}{\alpha_\delta} \right|}, \quad (3.34)$$

где Λ_δ - полная проводимость рабочего воздушного зазора;

Λ_T - торцевая составляющая проводимости рабочего воздушного зазора.

Величина падения магнитного напряжения на сопротивлении паразитных зазоров и на сопротивлениях ферромагнитных элементов магнитопровода учитывается коэффициентом относительного падения магнитного напряжения на сопротивлении воздушного зазора.

$$\varphi_0 = F_\delta / F, \quad (3.35)$$

где F_δ - падение магнитного напряжения на сопротивлении воздушного зазора;

F - магнитодвижущая сила обмотки.

Учет рассеяния магнитного потока (Φ) на каком-то участке магнитопровода оценивается коэффициентом рассеяния по потоку

$$\sigma = \Phi / \Phi_\delta, \quad (3.36)$$

где Φ_δ - магнитный поток в рабочем воздушном зазоре.

Под критическими условиями работы ЭМ понимают сочетание наиболее тяжелых условий его работы:

1) критическое напряжение (U_{\min}) на обмотке:

$$U_{\min} = K_{U_{\min}} U_H, \quad (3.37)$$

где U_H - номинальное напряжение;

$K_{U_{\min}}$ - критический коэффициент запаса по напряжению

$$0,8 \leq K_{U_{\min}} \leq 0,85$$

2) критическая (P_0) сила:

$$P_0 = k_0 P_{\text{мх.кр}}, \quad (3.38)$$

где k_0 - коэффициент запаса по силе;

$P_{\text{мх.кр}}$ - расчетное противодействующее усилие;

$$k_0 = \begin{cases} 3 \div 4 - \text{для быстродействующих реле;} \\ 2 \div 3 - \text{для маломощных реле;} \\ 1,5 \div 2 - \text{для реле управления;} \\ 1,2 \div 1,5 - \text{для контакторов, пускателей;} \\ 1,1 \div 1,2 - \text{для удерживающих ЭМ.} \end{cases} \quad (3.39)$$

1) критическое допустимое превышение (τ_0) температуры нагрева обмотки

$$\tau_0 = \xi_0 \tau_3, \quad (3.39)$$

где τ_3 - максимальное превышение температуры обмотки;

ξ_0 - коэффициент запаса по нагреву; $\xi_0 = 0,8 \div 0,95$.

Исходя, из этих условий можно получить, следующие комплексы коэффициентов

$K_{\text{зап}}$ - комплекс коэффициентов запаса:

$$K_{\text{зап}} = \frac{k_0}{K_{U_{\text{min}}} \xi_0}, \quad (3.40)$$

$K_{\text{ф.п}}$ - комплекс физических параметров:

$$K_{\text{ф.п}} = \frac{\rho_r}{\mu_0 \tau_0 K_{\text{тн}}}, \quad \text{м}^3/\text{Н} \quad (3.41)$$

$K_{\text{кр}}$ - комплекс коэффициентов кратностей:

$$K_{\text{кр}} = \frac{l_{\text{ср}*}}{\lambda_{\text{ох}} \lambda_{\text{ок}} \lambda_{\text{п}}}, \quad (3.42)$$

где $l_{\text{ср}*}$ - кратность длины среднего витка обмотки;

$\lambda_{\text{ох}}$ - кратность эффективной площади поверхности охлаждения обмотки;

$\lambda_{\text{ок}}$ - кратность площади окна обмотки;

$\lambda_{\text{п}}$ - кратность площади поверхности торца полюсного наконечника.

Комплекс коэффициентов, уточняющих проектный расчет вычисляется по выражению:

$$K_y = \varphi_0^2 \varepsilon_{\partial 0}^2 \Psi_0 n_p^2, \quad (3.43)$$

где Ψ_0 - коэффициент, уточняющий реальные условия нагрева и охлаждения;

n_p - коэффициент перегрузки по мощности.

K_c - комплекс коэффициентов, которые учитывают дополнительные слагаемые электромагнитной силы (для КМС $K_c = 0$):

$$K_c = \frac{2}{K_3}, \quad (3.44)$$

где K_3 - коэффициент заполнения обмоточного окна.

Так же вводится переменная $x = d_c / \delta_{кр}$ и графически решается уравнение:

$$x^5 D_x = D_c, \quad (3.44)$$

где $D_x = K_y(x)[1 + K_c(x)]$; $D_0 = K_0 K_{зап} K_{фп} K_{кр}$; $D_c = D_0 P_{про} / \delta_{кр}^3$.

Для построения зависимости (3.44) (ее левой части) необходимо привести расчеты в диапазоне изменения x от 2 до 10.

Пример Бб расчета по методике приведен в приложении Б.

3.1.7 Методика синтеза клапанных электромагнитов при различных режимах работы

Рассмотренные выше методики проектного расчета [44, 168,20], основаны на использовании понятия «конструктивный фактор» для определения площади поперечного сечения полюсного наконечника $S_{п}$ и сердечника S_c используется магнитная индукция (B_δ) в рабочем воздушном зазоре, в стали (B_0) магнитопровода и коэффициента рассеяния $\sigma_0 = B_0 S_c / B_\delta S_{п}$ магнитного потока. Строго говоря, рекомендации сформулированные на основе конструктивного фактора справедливы для продолжительного режима работы электромагнита, когда превышение температуры (τ) нагрева обмотки составляет $\tau = 70^\circ \text{C}$, а условно-полезная работа ($P_{эм} \cdot \delta$) равна $5,89 \cdot 10^{-2} \text{ Н} \cdot \text{м}$. В [131] упомянутая зависимость $0,06 \cdot \text{Тл} \leq B_\delta \leq 0,9 \cdot \text{Тл}$ проанализирована по рекомендуемым значениям B_δ в различных публикациях, где отмечается ее изменение в широких

пределах, верхняя граница которых достигает 1,6 Тл, что затрудняет выбор индукции.

При этом магнитные системы, работающие в кратковременном, повторно-кратковременном режимах не рассматриваются.

По методике [176, 180] для определения ($S_{\text{п}}$) и диаметра полюсного наконечника также первоначально задается индукция B_{δ} , но это делается для нахождения решения первого приближения и не является ее методологической сутью. В методиках, основанных на «конструктивном факторе», приходится задаваться величиной коэффициента теплопередачи ($K_{\text{т.н}}$) с наружной поверхности обмотки, не учитывая его зависимость от эффективной площади ($S_{\text{охл}}$) охлаждения обмотки и превышения (τ) температуры его нагрева. В методике [20] не учитывается зависимость $K_{\text{т.н}}$ от $S_{\text{охл}}$.

В публикации [180] предложенная методика, базируется на экспериментально полученной обобщенной усредненной тяговой характеристике линейных клапанных магнитных систем, работающих только в продолжительном режиме в диапазоне ($55^{\circ}\text{C} \div 88^{\circ}\text{C}$) превышений температуры обмоток. Диаметр ($d_{\text{п}}$) полюсного наконечника, определяется графическим решением системы двух уравнений. Цель проектной методики [120] – введение безразмерных корректирующих функций, которые позволяют свести задачу определения «ядра» (в данном случае диаметра сердечника $d_{\text{с}}$) к графическому решению уравнения.

Обращаем внимание, что в методиках [120, 176] индукция (B_{δ}) является только промежуточной, внутренней (не контролируемой) переменной вычислительной процедуры этих параметров.

Известно [120 и др.], что соразмерности вычисляются:

$A_* = A/d_{\text{с}}$; $H_* = H/d_{\text{с}}$; $d_* = d_{\text{п}}/d_{\text{с}}$; $C_* = C/d_{\text{с}}$; $\Delta_* = \Delta_{\text{к}}/d_{\text{с}}$ в МС во многом определяют характеристики и параметры (массу, габариты, стоимость, и пр.).

Так в [44, 120, 132] даны рекомендации по выбору основных соразмерностей в клапанных магнитных системах. При неизменном внешнем

диаметре обмотки для $A_* = 0,522$ и $\Delta_* = 0,1$ потребляемая ее мощность минимальна. При увеличении A_* для фиксированного d_c потребляемая мощность уменьшается.

В случае намотки обмотки непосредственно на металлическую гильзу и расстоянии воздушного зазора между сердечником и каркасом катушки (0,25 ÷ 0,50 мм) рекомендуется выбирать в пределах:

$$A_* = \begin{cases} 0,25 \div 0,33 & \text{- минимальный объем МС;} \\ 0,25 \div 0,50 & \text{- минимальный вес МС.} \end{cases}$$

Относительная высота H_* обмотки :

$$H_* = \begin{cases} 3,0 \div 5,6 & \text{- для малогабаритных МС;} \\ 1,0 \div 3,0 & \text{- для крупногабаритных МС.} \end{cases}$$

Относительный диаметр d_* полюсного наконечника рекомендуется [120] выбирать из диапазона:

$$d_* = \begin{cases} 1,5 \div 2,2 & \text{при } 100 \text{ Н} \leq P_{\text{энт}} \leq 400 \text{ Н;} \\ 1,4 \div 1,7 & \text{при } 10 \text{ Н} \leq P_{\text{энт}} \leq 100 \text{ Н;} \\ 1,1 \div 2,5 & \text{при } 1 \text{ Н} \leq P_{\text{энт}} \leq 10 \text{ Н.} \end{cases}$$

Для серии контакторов постоянного тока МДС срабатывания (F_{cp}) в диапазоне $1,1 \leq d_* \leq 1,4$ минимальна. Известно [35], что кратность d_* , которая обеспечивает наибольшее значение $P_{\text{энт}}$, увеличивается линейно с ростом рабочего воздушного зазора.

Для выбора оптимальной величины $d_{*\text{опт}}$ на стадии проектного расчета клапанной МС, обеспечивающего максимальный электромагнитный момент с учетом ее режимов работы и питания, допустимого превышения температуры нагрева, геометрических соразмерностей (при $A_* = 0,6$; $C_* = 1,76$; $T_0 = 40^\circ \text{C}$) рекомендована [9] зависимость

$$\begin{aligned} d_{*\text{опт}} = & 10^{-2} (205,5 - 7,63 \cdot Z_1 - 4,27 \cdot Z_3 - 5,32 \cdot Z_4 - 9,69 \cdot Z_5 - 3,40 \cdot Z_6 - \\ & - 4,16 \cdot Z_1^2 - 3,92 \cdot Z_2^2 + 2,99 \cdot Z_1 \cdot Z_4 + 6,89 \cdot Z_1 \cdot Z_6 + 6,16 \cdot Z_3 \cdot Z_6 + 6,67 \cdot Z_4 \cdot Z_6 + (3.46) \\ & + 9,56 \cdot Z_5 \cdot Z_6 - 2,99 \cdot Z_1 \cdot Z_3 \cdot Z_4 - 4,51 \cdot Z_1 \cdot Z_4 \cdot Z_6 - 4,17 \cdot Z_1 \cdot Z_5 \cdot Z_6 - \end{aligned}$$

$$-4.45 \cdot Z_3 \cdot Z_5 \cdot Z_6 - 3.55 \cdot Z_4 \cdot Z_5 \cdot Z_6),$$

где $Z_1 = 2,22H_* - 4,369$; $Z_2 = 8,803K_{\max} - 13,644$;

$Z_3 = 1,409n_p - 43,17$; $Z_4 = 7,042(\tau_{\text{доп}}/100) - 4,577$;

$Z_5 = 0,1174d_c - 2,9343$; $Z_6 = 0,2935\varphi - 2,3481$,

$1,17 \leq H_* \leq 2,75$, $1,3 \leq K_{\max} \leq 1,75$, $40^\circ \text{C} \leq \tau_{\text{доп}} \leq 90^\circ \text{C}$,

$10\text{мм} \leq d_c \leq 40\text{мм}$, $2^\circ \leq \varphi \leq 14^\circ$;

$K_{\max} = K_{U_{\max}} K_{U_{\text{cp}}} / K_{U_{\min}}$ - отношение максимального напряжения на обмотке к напряжению срабатывания при нагретой обмотке;

$K_{U_{\max}}$ - отношение максимального напряжения на обмотке к номинальному;

$K_{U_{\min}}$ - отношение минимального напряжения на обмотке к номинальному;

$K_{U_{\text{cp}}}$ - коэффициент запаса по напряжению срабатывания (отношение минимального напряжения на обмотке к напряжению срабатывания при нагретой обмотке);

n_p - коэффициент перегрузки по мощности;

$\tau_{\text{доп}}$ - допустимое превышение температуры нагрева обмотки;

H_* - относительная высота обмотки;

φ - угол, определяющий положение якоря.

Рекомендуемая [120] относительная толщина $a_{\text{п*}}$ полюсного наконечника находится в следующих пределах

$$a_{\text{п*}} = \begin{cases} 1,13 \div 0,22 & \text{при } 8^\circ \leq \varphi \leq 10^\circ; \\ 0,25 \div 0,35 & \text{при } \varphi \leq (8 \div 10)^\circ; \\ 0,10 \div 0,20 & \text{при } 1,2 \leq d_* \leq 1,4. \end{cases}$$

Для клапанных МС [120] относительную толщину каркаса, воздушной прослойки рекомендуется выбирать в диапазоне $0,06 \leq \Delta_* \leq 0,1$.

Можно выбирать соразмерности в клапанных МС приводных ЭМ из [176], представленных в таблице 3.2.

Таблица 3.2-Основные соизмерности в приводных электромагнитных коммутационных аппаратах.

Тип аппарата	d_c , мм	A_*	H_*	d_o	C_*	Δ_*	$a_{п*}$	$a_{ск*}$
КН-100	16	1,0	3,37	1,25	1,56	0	0,22	0,25
КПМ-113	26	0,52	2,94	1,46	1,40	0,115	0,14	0,346
КПЗ1/40	22	0,775	2,91	1,60	1,50	0,025	0,21	0,27
КПВ-503	27,5	0,635	2,91	1,37	1,51	0,065	0,127	0,36
КПВ604	33,5	0,70	3,34	1,34	1,55	0,085	0,10	0,30
КПВ-605	44	0,74	3,29	1,41	1,41	0,07	0,136	0,25
Реле 8В	11	0,865	4,0	1,46	1,57	0	0,45	0,245
Реле 8М	9	0,87	4,21	1,34	1,56	0	0,47	0,28

Размер «С» магнитной системы выбирается с учетом радиуса скобы магнитопровода, которое определяет поток рассеяния с полюсного наконечника на скобу и с сердечника на скобу. Жесткость конструкции определяет толщину $a_{ск}$ скобы. Условие, что площадь поперечного сечения скобы не должна быть меньше площади поперечного сечения сердечника и исключение возможности механического повреждения катушки определяют ширину $b_{ск}$, где $(b_{ск} \geq d_c + 2\Delta_k + 2A_0)$.

Уравнениями проектирования в рассматриваемой методике являются выражение тяговой электромагнитной силы и нагрева [151]. На основании формулы Максвелла эта сила равна:

$$P_{эм} = \frac{B_{\delta}^2}{2\mu_0} S_{пр}, \quad (3.47)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Г/м – магнитная постоянная;

$S_{пр}$ - расчетная площадь поперечного сечения полюсного наконечника, которая определена из условия сведения неравномерного поля в рабочем зазоре к равномерному [151].

$$\Lambda_{\delta} = \frac{\mu_0 S_{пр}}{\delta} = \mu_0 \pi d_{п} \lambda, \quad (3.48)$$

где λ - удельная геометрическая проводимость рабочего зазора, относительно длины окружности реального полюсного наконечника [42]:

$$\lambda = 2 \left(R_* - \sqrt{R_*^2 - (0,5d_*)^2} \right) / (d_* \varphi) + 0,5568 + 0,4R_* \operatorname{tg} \varphi / d_* + \frac{2}{\pi} \ln \left(1 + \frac{a_{п*}}{R_* \operatorname{tg} \varphi} \right) + \frac{8}{\pi^2} \frac{a_{п*}}{d_*} \right)$$

Преобразовав правую часть (3.48) получено:

$$S_{пр} = \pi \delta_* X d_c^2, \quad (3.49)$$

где $\delta_* = \delta / d_c = R_* \operatorname{tg} \varphi$; $R_* = C_* + a_{ск}$;

$$X = 2 \left(R_* - \sqrt{R_*^2 - (0,5d_*)^2} \right) / \varphi + 0,5568 d_* + 0,4R_* \operatorname{tg} \varphi + 2d_* \ln(1 + a_{п*} / (R_* \operatorname{tg} \varphi)) / \pi + 8a_{п*} / \pi^2 .$$

На основании (3.48) и (3.49) записано:

$$d_c^2 = \frac{2\mu_0 P_{эм}}{\pi \delta_* X B_\delta^2}. \quad (3.50)$$

Падение магнитного напряжения F_δ на сопротивления рабочего зазора:

$$F_\delta = \frac{B_\delta S_{пр}}{\Lambda_\delta} = \frac{B_\delta S_{пр}}{\mu_0 S_{пр} / \delta} = \frac{B_\delta}{\mu_0} \delta .$$

Магнитодвижущая сила срабатывания может быть определена [44 и др.] как

$$F_{ср} = K_{п} F_\delta ,$$

где $K_{п}$ - коэффициент, учитывающий падение магнитного напряжения в стали МС и в нерабочих зазорах, рекомендуется выбрать [168 и др.] из диапазона $1,2 \div 1,5$.

Магнитодвижущая сила F при максимальном напряжении в сети питания:

$$F = K_{зап} F_{ср} = KF_\delta, \quad (3.51)$$

где $K = K_{п} K_{зап}$;

$K_{зап}$ - коэффициент запаса по магнитодвижущей силе определен по коэффициенту (K_0) запаса по тяговому электромагнитному усилию:

$$K_{зап} = \sqrt{K_0} ,$$

который рекомендуется [120] выбирать из диапазонов:

$$K_0 = \begin{cases} 3 \div 4 & - \text{магнитные системы быстродействующих реле;} \\ 2 \div 3 & - \text{магнитные системы реле малой мощности;} \\ 1,5 \div 2 & - \text{МС управляющих реле, электрических клапанов;} \\ 1,2 \div 1,5 & - \text{МС контакторов; тянущих, толкающих электромагнитов;} \\ 1,1 \div 1,2 & - \text{МС удерживающих электромагнитов.} \end{cases}$$

Магнитодвижущая сила обмотки выражена через плотность (j) тока в обмотке:

$$F = H \cdot A \cdot K_3 \cdot j, \quad (3.52)$$

где K_3 - коэффициент заполнения обмоточного окна.

Магнитодвижущая сила обмотки также выражена с помощью уравнения нагрева [44]:

$$\tau = \frac{I^2 R}{K_{т.н} S_{охл} n_p}, \quad (3.53)$$

где I, R - ток в обмотке и ее сопротивление соответственно;

$K_{т.н}$ - эквивалентный коэффициент теплопередачи с наружной поверхности обмотки;

$S_{охл}$ - эффективная площадь охлаждения обмотки;

n_p - коэффициент перегрузки по мощности.

Выразив R через число витков (N), удельное электрическое сопротивление (ρ_τ) обмоточного провода и геометрические размеры МС, выражение (3.53) записано в виде:

$$(IN)^2 = F^2 = \frac{\tau K_{т.н} S_{охл} n_p K_3 A H}{\pi \rho_\tau d_c (1 + 2\Delta_* + A_*)}. \quad (3.54)$$

На основании выражений (3.51) и (3.54) записано:

$$K^2 \frac{B_\delta^2}{\mu_0^2} \delta^2 = \frac{\tau K_{т.н} S_{охл} n_p K_3 A H}{\pi \rho_\tau d_c (1 + 2\Delta_* + A_*)}. \quad (3.55)$$

Эффективную площадь охлаждения обмотки $S_{охл}$, как и в [132, 168 и др.] можно записать в виде:

$$S_{\text{охл}} = S_{\text{н}} + \beta S_{\text{в}},$$

где $S_{\text{н}}$ - площадь наружной боковой поверхности обмотки;

$S_{\text{в}}$ - площадь внутренней боковой поверхности обмотки, примыкающий к сердечнику;

β - коэффициент, учитывающий различие условий теплопередачи с наружной и внутренней боковых поверхностей обмотки.

Известно [28 и др.], что коэффициент теплоотдачи зависит от эффективной площади $S_{\text{охл}}$ и τ обмотки. В публикации [28] рекомендуется эмпирически установленные зависимости:

$$K_{\text{т.н}} = \begin{cases} \frac{2,1(1+0,005\tau)}{\sqrt[3]{S_{\text{охл}}}} & \text{при } 10^{-4} \text{ м}^2 < S_{\text{охл}} < 100 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2, \\ \frac{3,6(1+0,005\tau)}{\sqrt[5]{S_{\text{охл}}}} & \text{при } 10^{-4} \text{ м}^2 < S_{\text{охл}} < 100 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2, \end{cases}$$

Оценено [151], что произведение $K_{\text{т.н}} S_{\text{охл}}$ при $S_{\text{охл}} = 100 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ и $\tau = 100^\circ \text{С}$:

$$\text{а) } \frac{2,1(1+0,005\tau)}{\sqrt[3]{S_{\text{охл}}}} S_{\text{охл}} = 2,1(1+0,005\tau) \sqrt[3]{S_{\text{охл}}^2} = 2,1(1+0,005\tau) \sqrt[3]{0,01^2} = 0,1462 \frac{\text{Вт}}{^\circ \text{С}};$$

$$\text{б) } \frac{3,6(1+0,005\tau)}{\sqrt[5]{S_{\text{охл}}}} S_{\text{охл}} = 3,6(1+0,005\tau) S_{\text{охл}}^{0,8} = 3,6(1+0,005\tau) 0,01^{0,8} = 0,1356 \frac{\text{Вт}}{^\circ \text{С}}.$$

Отсюда видно, что произведение $K_{\text{т.н}} S_{\text{охл}}$ претерпевает разрыв («скачок»). Определена «точка согласования» ($S_{\text{охл.гр}}$), где приведенное произведение стало бы непрерывным:

$$2,1 S_{\text{охл.гр}}^{2/3} = 3,6 S_{\text{охл}}^{4/5}.$$

Таким образом $S_{\text{охл}} = 175,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$. Полагается в публикации [151]:

$$K_{\text{т.н}} S_{\text{охл}} = \begin{cases} 2,1(1+0,005\tau) \sqrt[3]{S_{\text{охл}}^2} & \text{при } S_{\text{охл}} \leq 175,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2, \\ 3,6(1+0,005\tau) S_{\text{охл}}^{0,8} & \text{при } S_{\text{охл}} > 175,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2. \end{cases}$$

В соответствии с рисунком 1.3 в [151] записано

$$S_{\text{охл}} = \pi d_c^2 S, \tag{3.56}$$

где $S = H_* [(1 + 2\Delta_*)(1 + \beta) + 2A_*]$.

Подставив в правую часть (3.55) выражение для $K_{т.н} S_{охл}$ и , проведя преобразования, получено:

$$B_\delta^2 = Y_1 d_c^{1/3}, \quad (3.57)$$

$$\text{где } Y_1 = \frac{2,1\mu_0^2}{\sqrt[3]{\pi}} \cdot \frac{\tau(1+0,005\tau)}{\rho_\tau} \cdot \frac{K_3 n_p}{K^2} \cdot \frac{A_* H_* \sqrt[3]{[H_* [(1+2\Delta_*)(1+\beta) + 2A_*]]^2}}{(R_* \operatorname{tg} \varphi)^2 (1+2\Delta_* + A_*)}.$$

На основании (3.57):

$$d_c^2 = \frac{B_\delta^{12}}{Y_1^6}. \quad (3.58)$$

Приравняв правые части выражений (3.50) (3.58), полученное уравнение решено

$$B_\delta = \left(\frac{2\mu_0 P_{эм} Y_1^6}{\pi X \delta_*} \right). \quad (3.59)$$

Диаметр сердечника определяется на основании (3.50):

$$d_c = \frac{1}{B_\delta} \sqrt{\frac{2\mu_0 P_{эм}}{\pi X \delta_*}}. \quad (3.60)$$

Для случая $S_{охл} > S_{охл.гр}$, подставив в правую часть (3.55) соответствующее выражение для $K_{т.н} S_{охл}$, после несложных преобразований получено:

$$B_\delta^2 = Y_2 d_c^{0,6}, \quad (3.61)$$

$$\text{где } Y_2 = \frac{3,6\mu_0^2}{\sqrt[5]{\pi}} \cdot \frac{\tau(1+0,005\tau)}{\rho_\tau} \cdot \frac{K_3 n_p}{K^2} \cdot \frac{A_* H_* \{H_* [(1+2\Delta_*)(1+\beta) + 2A_*]\}^{0,8}}{(R_* \operatorname{tg} \varphi)^2 (1+2\Delta_* + A_*)}.$$

На основании (3.61)

$$d_c^2 = \frac{B_\delta^{20/3}}{Y_2^{10/3}}. \quad (3.63)$$

Приравняв правые части выражений (3.62) и (3.59) определено:

$$B_\delta = \left(\frac{2\mu_0 P_{эм} Y_2^{10/3}}{\pi X \delta_*} \right). \quad (3.64)$$

Пример Бб расчета по этой методике приведен в приложении Б.

3.1.8 Методики проектирования оптимальных клапанных электромагнитов

В настоящее время надежность в эксплуатации и высокий срок службы электромагнитов, их низкая потребляемая мощность и стоимость остаются актуальными. Это возможно при применении эффективных методик и алгоритмов, а в качестве уравнений проектирования используются достоверные математические модели характеристик магнитных систем.

Оптимальной магнитной системой в рамках заданной ее конфигурации называют [132 и др.] ту из них, кратности в которой и состояние материалов обеспечивают наилучшее значение показателю качества. Под оптимизацией имеется в виду выбор одного из множества вариантов, удовлетворяющих условиям проектирования, соответствующих лучшему значению показателя (критерия) оптимальности.

Вид записи критерия оптимальности, системы уравнений, описывающих ограничения, число переменных проектирования, которые подлежат определению, часто влияют на выбор алгоритма решения задачи, поиска оптимальных значений переменных проектирования, уменьшения затраты времени на проектирование [116, 132].

При выборе критерия оптимальности существуют два пути. В первом случае предъявленных к ЭМ совокупностей требований выбирается главный, который описывается математическим выражением в виде критерия, по которому ведется проектирование. Другие требования, включаются и формируются в виде системы ограничений.

Во втором случае составляется обобщенный критерий, объединяющий ряд важных требований и условий. Однако, сформулировать математическую связь между приоритетными требованиями не всегда удается. Поэтому интегральный критерий формируется [133 и др.] в виде либо аддитивной, либо мультипликативной, либо минимаксной математической структуры. Важность

определенного требования не редко учитывается весовыми коэффициентами, установленными, например, методом экспертных оценок [133 и др.].

Следующим условием, которому должен удовлетворять критерий, является [133] то, что он должен выражаться через исходные данные проектирования, в качестве которых используются характеристики материалов, параметры окружающей среды, и другие данные. При этом нужно допускать их максимизацию или минимизацию в зависимости от физической сущности критериев и условий проектирования.

Рекомендуемые в литературных источниках критерии оптимальности (качества) могут быть разделены [130, 138] на группы: частные, удельные, комплексные .

1. Частные критерии оптимальности:

а) суммарный объем обмотки ($V_{\text{обм}}$), стали ($V_{\text{ст}}$) магнитопровода (объем активных материалов (V_a)) $V_a = V_{\text{обм}} + V_{\text{ст}}$;

б) суммарная масса (M_a) обмотки ($m_{\text{обм}}$) и магнитопровода ($m_{\text{ст}}$):

$$m_{\text{обм}} = K_3 V_{\text{обм}} \gamma_{\text{пр}}, m_{\text{ст}} = V_{\text{ст}} \gamma_{\text{ст}}, M_a = m_{\text{обм}} + m_{\text{ст}}, \quad (3.65)$$

где K_3 - коэффициент заполнения обмоточного окна МС;

$\gamma_{\text{пр}}$, $\gamma_{\text{ст}}$ - плотность материала обмоточного провода и стали магнитопровода соответственно.

в) Стоимость (C_a) активных материалов:

$$C_a = m_{\text{обм}} \Pi_{\text{пр}} + m_{\text{ст}} \Pi_{\text{ст}}, \quad (3.66)$$

где $\Pi_{\text{пр}}$, $\Pi_{\text{ст}}$ - стоимость единицы массы обмоточного провода и стали магнитопровода соответственно.

г) мощность потребляемая обмоткой приравняется рассеиваемой

$$P = \tau K_{\text{т.н}} S_{\text{охл}}. \quad (3.67)$$

2. Удельные критерии:

а) добротность МС

$$D = q M_a / A_{\text{уп}},$$

где $A_{уп} = P_{эм.п} \delta_n$;

б) экономичность МС

$$\mathcal{E} = P/A_{уп},$$

где P - потребляемая мощность;

в) коэффициент использования МС по механической энергии:

$$\chi = A_{пол}/A_{уп},$$

где $A_{пол} = \int_{\delta_k}^{\delta_n} P_{мх} d\delta$;

г) коэффициент магнитной эффективности:

$$\eta_{маг} = A_{эм}/(\Psi_y I_y);$$

где $A_{эм} = \int_{\delta_k}^{\delta_n} P_{мх.ст} d\delta$;

Ψ_y, I_y - потокосцепление при δ_k и установившийся ток в обмотке;

$$\chi_{маг} = A_{уп}/(\Psi_y I_y);$$

$$\eta = A_{уп}/PM_a ;$$

д) при анализе МС грузоподъемных ЭМ:

потребляемая мощность;

$$K_1 = P_{эм}/(qM_a); K_2 = P_{эм}/P; K = A_{эм}/\sqrt{P}.$$

Рассмотренные выше (п.2) удельные показатели, зависят от абсолютных размеров МС и поэтому рекомендуются [130, 138] для сравнения относительных и близких по размерам МС. Так же [138] они могут быть применены в качестве целевых функций и функций ограничений.

Комплексные показатели (агрегированные, интегральные). в качестве такого можно назвать критерий предложенный в [17].

В методике синтеза оптимальных приводных электромагнитов реле [35], минимизированных на массогабаритных показателях, где рекомендуется расчетные формулы, полученные на основе обработки экспериментальных данных для диаметра ($d_{с.опт}$) и длины ($l_{с.опт}$) сердечника:

$$d_{c.опг} = 0,693 P_{\text{мх}}^{0,424} \delta^{0,394} / P_{\text{ср}}^{0,182}, \quad (3.68)$$

$$l_{c.опг} = 0,935 P_{\text{мх}}^{0,545} \delta^{1,362} / P_{\text{ср}}^{1,09}, \quad (3.69)$$

$$M_{a.min} = 0,0292 P_{\text{мх}}^{1,393} \delta^{2,15} / P_{\text{ср}}^{1,454}, \quad (3.70)$$

где $P_{\text{ср}}$ - мощность срабатывания, Вт;

$P_{\text{мх}}$ - механическое (противодействующее) усилие, мН;

δ - рабочий воздушный зазор, мм;

$d_{c.опг}$, $l_{c.опг}$ диаметр и длина сердечника, мм;

$M_{a.min}$ - суммарная масса меди и стали.

Отсутствуют рекомендации по выбору или расчету размеров полюсного наконечника, толщины обмотки, расстояния от оси сердечника до скобы магнитопровода.

В известной методике [112] проектирования на заданную статическую тяговую характеристику осуществляется одновременно минимизация суммарной массы обмоточного провода и ферромагнитных элементов магнитной системы. Математические модели проектирования разработаны на основе теории цепей, с присущими им недостатками.

В методике синтеза клапанной магнитной системы с минимизацией массы активных материалов, которая построена с использованием корректирующих функций [116] учитываются магнитное сопротивление ферромагнитных элементов при ограничении магнитной индукции стали ($B_0 \leq 1,2 \text{ Тл}$). Относительная толщина обмотки находится в пределах $0,25 \div 0,80$, отношение высоты обмотки к ее толщине – в диапазоне $0,5 \div 10$, отношение диаметра полюсного наконечника к сердечнику - в диапазоне $1,0 \div 2,0$. Поиск наименьшей массы активных материалов проведен градиентным методом [116 и др.] при $2 \cdot 10^{-3} \leq \delta_{\text{кр}} \leq 10 \cdot 10^{-3}$; $2 \text{ Н} \leq P_{\text{мх.кр}} \leq 20 \text{ Н}$.

Для случая $d_* = 1$ в литературе [116] получено:

$$A_* = 0,732 - 0,0056 P_{\text{мх.кр}}; \quad (3.71)$$

$$H_0/A_0 = 5,339 + 0,437/P_{\text{мх.кр}} ; \quad (3.72)$$

Изменение кратности диаметра полюсного наконечника в диапазоне $1,0 \div 2,0$ влияет [116] только на отношение H_0/A_0 . В нашем случае для точности расчетов предложена корректировка выражения (3.72) в виде:

$$H_0/A_0 = \frac{5,339 + 0,437/P_{\text{мх.кр}}}{d_*^{1.084}} ; \quad (3.73)$$

Пример Б7 расчета по оптимизационной методике Любчика приведен в приложении Б.

В методике синтеза по частным критериям оптимальности [132] не учтено магнитное сопротивление ферромагнитных элементов магнитной системы. Для исключения получения нереально малых размеров МС, без какого либо обоснования, максимальное значение магнитной индукции в сердечнике принимается равным $B_0 = 1,65 - 1,75 \text{ Тл}$. Приходится задаваться коэффициентом теплопередачи. Геометрические соразмерности в магнитной системе получены методом сканирования области возможного изменения, и представлены в виде графических зависимостей как функция от относительных безразмерных величин механической силы, индукции.

Общими недостатками методик проектного расчета оптимизированных и неоптимизированных электромагнитов с круглым полюсным наконечником, построенных на математических моделях статических электромагнитных и тепловых характеристик, полученных на основе теории цепей, являются:

- 1) не учёт потоков рассеяния полюсных наконечников;
- 2) трехмерная картина магнитного поля рассеяния заменяется плоскопараллельной;
- 3) не учитывается разница температуры на наружной поверхности обмотки и в ее толще.

Все это снижает достоверность результатов проектирования, что вызывает необходимость изготовления дополнительных опытных образцов, приводящих к дополнительным затратам времени, финансов и пр.

Ниже излагается предлагаемая методика проектного расчета электромагнита постоянного тока с круглым полюсным наконечником, где отсутствуют отмеченные недостатки.

3.2 Методики синтеза оптимальных клапанных электромагнитов с круглыми полюсными наконечниками на основе их обобщенных безразмерных характеристик

В соответствии с основным своим функциональным назначением электромагнит обеспечивает срабатывание при неблагоприятных сочетаниях условий эксплуатации: сопротивление ($R_{\text{тор}}$) обмотки соответствует значению, когда максимальная температура (Θ_{max}) в толще обмотки равна допустимой ($\Theta_{\text{доп}}$), напряжение источника равно минимальному допустимому своему значению (U_{min}), определяемому нагревостойкостью обмоточного провода, сроком его службы при максимальном напряжении (U_{max}) на обмотках. Максимальная температура обмотки контролируется при оговоренных условиях и режимах эксплуатации ЭМ согласно технического задания к проектному расчету. Уравнения электромагнитной силы и нагрева используются [120, 132 и др.] в качестве основы любой методики проектного расчета электромагнита. Когда не требуется высокой износостойкости, не накладывается ограничения на форму тяговой характеристики. Расчет проводится по одной («критической» [44, 168 и др.]) точке на механической характеристике $P_{\text{мх}} = P_{\text{мх}}(\delta)$. Таким образом исходными для синтеза ЭМ в этом случае являются: $P_{\text{мх.кр}}$ и $\delta_{\text{кр}}$ иногда вся механическая характеристика электромагнита; диапазон изменения температуры (T_0), $U_{\text{ном}}$ и пределы его изменения ($U_{\text{min}} \div U_{\text{max}}$); атмосферное давление, а также иные условия эксплуатации (например, потребляемая мощность (P)); основные электротехнические материалы. Могут быть оговорены некоторые из геометрических размеров (например, проектирование на требуемую установочную площадь; относительный диаметр полюсного наконечника в долях

диаметра сердечника, когда он изготавливается методом «высадки» из материала заготовки сердечника) и т.п.

Методика синтеза разработана на базе экспериментальных зависимостей нагрузочных характеристик (момента $M_{эм}$ от магнитодвижущей силы при фиксированном положении якоря [64]), а также на математических моделях тепловых параметров магнитной системы, которые получены с учетом неравномерности распределения температурного поля в толще обмотки [164, 165, 166] и отдельного определения составляющих конвективного теплообмена и передачи тепла излучением [154, 155, 28].

Связь между индукцией (B_0) и МДС (F) обмотки при линейной МС представлено в виде

$$B_0/B_r = F / F_r . \quad (3.74)$$

Уравнение электромагнитной силы при $B_0 \leq B_r$ может быть выражено в виде зависимости:

$$P_{эм} = P_{эм.г} (B_0/B_r)^2 . \quad (3.75)$$

Для линейной магнитной системы, учитывая (3.74) выражение примет вид

$$P_{эм} = P_* (B_r) \cdot P_{эм.баз} , \quad (3.76)$$

где $P_* (B_r)$ - сила, выраженная в безразмерной величине, в верхней границе КНМС для линейного участка;

$P_{эм.баз}$ - базисная электромагнитная сила, для текущей индукции B_0 .

Таким образом, единая структура расчетной формулы электромагнитной силы P_* при $B_0 < B_r$ остается неизменной и равна $P_* (B_r)$.

Рассуждения и математические выкладки МДС магнитной системы при $B_0 < B_r$ приводят к расчетной формуле

$$F = F_* (B_r) \cdot F_{баз} , \quad (3.77)$$

где $F_{баз}$ - базисное значение МДС, соответствующее текущей индукции B_0 , А.

Ниже используется нагрузочная характеристика клапанной МС, представлена в параметрической форме (1.24), (1.25).

Уравнение для определения превышения τ_s температуры поверхности тела (Θ_s) относительно температуры (T_0) окружающей среды записывается в виде формулы Ньютона

$$P = (\Theta_s - T_0) \cdot K_{\text{т.экв}} \cdot S_0, \quad (3.78)$$

где Θ_s - усредненная температура наружной поверхности обмотки.

Для горизонтального расположения обмотки в пространстве получено [85].

$$K_* = \frac{K_{\text{т.экв}} S}{K_{\text{т.баз}} S_c} = (8,57 + 1,02a_{11} + 0,399a_{22} + 0,345a_{55} + 0,459a_{66} - 0,129a_{66}^2)^2, \quad (3.79)$$

$$\Theta_{s*} = \frac{\Theta_s}{T_0} = (1,37 - 0,018a_{22} + 0,3130a_{55} - 0,161a_{66} - 0,039a_{66}^2 - 0,021a_{55}a_{66})^2, \quad (3.80)$$

$$\Theta_{v*} = \frac{\Theta_v}{T_0} = (1,44 + 0,154a_{55} - 0,184a_{66} + 0,043a_{66}^2 - 0,024a_{55}a_{66})^2. \quad (3.81)$$

где K_* - коэффициент, оценивающий теплопередачу МС;

Θ_{s*} - относительная величина среднеповерхностной температуры катушки;

Θ_v - относительная величина среднеобъемной температуры в толще обмотки;

$$a_{11} = 1,003H_* - 3,01; a_{22} = 7,044A_* - 3,522; a_{55} = 3,202(0,01 \cdot \Theta_{\text{max}}) - 4,163;$$

$$a_{66} = 6,667(0,01 \cdot T_0) - 3,667;$$

$$1,245 \leq H_* = H_0/d_c \leq 4,775; 0,25 \leq A_* = A_0/d_c \leq 0,75; 75^\circ C \leq \Theta_{\text{max}} \leq 185^\circ C;$$

$$28,6^\circ C \leq T_{\text{max}} \leq 81,4^\circ C;$$

$$S_c = \pi d_c^2 / 4 - \text{площадь поперечного сечения};$$

Θ_{max} - максимальная температура в толще обмотки;

T_0 - температура окружающей среды;

$$K_{\text{к.баз}} = 5,67(2,73 + 0,01 \cdot T_0)^4 / T_0 - \text{базисное значение коэффициента}$$

теплопередачи.

В соответствии известного [44 и др.] выразим мощность тепловых потерь в обмотке при максимальном значении напряжения источника питания на

основании соотношения, в котором МДС обмотки взаимосвязаны с мощностью (P) тепловых потерь в ней:

$$(F_{\text{ср}} \cdot K_{U_{\text{ср}}} \cdot K_U)^2 = \frac{P \cdot N^2}{R_{\text{гор}}}, \quad (3.82)$$

где $K_U = U_{\text{max}} / U_{\text{min}}$ - кратность изменения напряжения питания при эксплуатации;

$K_{U_{\text{ср}}}$ - коэффициент запаса по напряжению срабатывания, который учитывает неблагоприятные влияния возможных технологических отклонений в процессе изготовления магнитной системы МС, а также отклонения параметров обмоточного провода при поставке и в процессе намотки обмоток;

$F_{\text{ср}}$ - МДС срабатывания;

N - число витков обмотки МС, А;

$R_{\text{гор}}$ - сопротивление обмотки, соответствующее среднеобъемной температуре нагрева (Θ_v), Ом:

$$R_{\text{гор}} = \rho_{\text{гор}} \cdot N \cdot l_{\text{ср}} / q_{\text{м}}, \quad (3.83)$$

где $l_{\text{ср}}$ - средняя длина витков обмотки, м:

$$l_{\text{ср}} = \pi \cdot (d_c + 2\Delta_k + A_0);$$

$q_{\text{м}}$ - площадь поперечного сечения меди провода, м²;

$\rho_{\text{гор}}$ - удельное электрическое сопротивление металла обмоточного провода, Ом·м, определяется как

$$\rho_{\text{гор}} = \rho_0 (1 + \alpha \Theta_v),$$

где α - температурный коэффициент удельного электрического сопротивления меди обмоточного провода.

Среднеобъемная (Θ_v) температура в толще обмотки зависит от тех же переменных, что и среднеповерхностная температура катушки (Θ_s). Подставив в выражение (3.82) уравнение (3.83) с учетом (3.79) получим формулу

$$(F_{cp} \cdot K_{U_{cp}} \cdot K_U)^2 = \frac{(\Theta_s - T_0) \cdot K_* \cdot K_{T_{баз}} \cdot S_c \cdot K_3 \cdot A_0 \cdot H_0 \cdot k_{атм}}{\rho_{гор} l_{cp}}, \quad (3.84)$$

где K_3 - коэффициент заполнения (обмоточное окно с размерами A_0 и H_0);

$k_{атм}$ - коэффициент изменения теплопередачи при снижении давления воздуха ($P_{атм}$) относительно нормального (760 мм рт.ст.) [33]

$$k_{атм} = 0,57 + 0,00973 \cdot P_{атм}^{0,57}. \quad (3.85)$$

Приведенное выражение (3.84) зависит от исходных данных проектирования, геометрических соизмерностей МС, базисного линейного размера МС, а также коэффициента $K_{U_{cp}}$, который принимает проектировщик и коэффициента K_3 , который выбирает проектировщик в зависимости от марки и диаметра обмоточного провода [96, 168 и др.].

Поэтому удобнее пользоваться формой записи уравнения (3.84) в виде

$$\frac{\rho_{гор} \cdot F_{cp}^2}{T_0 \cdot K_{T_{баз}} \cdot d_c^3} - \frac{(\Theta_{s*} - 1) \cdot K_* \cdot S_* \cdot A_* \cdot H_* \cdot k}{l_{cp}} = 0, \quad (3.86)$$

где $k = \frac{K_3 \cdot k_{атм}}{(K_{U_{cp}} \cdot K_U)}$; $S_* = \frac{S_c}{d_c^2} = \frac{\pi}{4}$; $A_* = \frac{A_0}{d_c}$; $H_* = \frac{H_0}{d_c}$; $l_{cp*} = \frac{l_{cp}}{d_c}$.

Поэтому целесообразнее пользоваться формой записи приведенной ниже для уравнения (3.84)

$$\frac{\rho_{гор} \cdot F_{cp}^2}{T_0 \cdot K_{T_{баз}} \cdot d_c^3} - \frac{(\Theta_{s*} - 1) \cdot K_* \cdot S_* \cdot A_* \cdot H_* \cdot k}{l_{cp*}} = 0, k = \frac{K_3 \cdot k_{атм}}{(K_{U_{cp}} \cdot K_U)}; S_* = \frac{S_c}{d_c^2} = \frac{\pi}{4}; A_* = \frac{A_0}{d_c};$$

$$H_* = \frac{H_0}{d_c}; l_{cp*} = \frac{l_{cp}}{d_c}.$$

Относительная величина средней длины витка l_{cp*} вычисляется по формуле

$$l_{cp*} = \pi \cdot (1 + 2\Delta_{k*} + A_*), \quad (3.87)$$

где Δ_{k*} - относительная толщина каркаса обмотки, которая вычисляется как

$$\Delta_{k*} = \Delta_k / d_c.$$

Подставив выражение (3.87) в уравнение (3.86) получим

$$\frac{\rho_{\text{гор}} \cdot F_{\text{ср}}^2}{T_0 \cdot K_{\text{Тбаз}} \cdot d_c^3} - \frac{(\Theta_{s^*} - 1) \cdot K_* \cdot A_* \cdot H_* \cdot k}{4(1 + 2\Delta_* + A_*)} = 0. \quad (3.88)$$

Выразим отношение $F_{\text{ср}}^2/d_c^3$ из уравнения (3.88) получим

$$\frac{F_{\text{ср}}^2}{d_c^3} = \frac{(\Theta_{s^*} - 1) \cdot T_0 \cdot K_{\text{Тбаз}} \cdot K_* \cdot A_* \cdot H_* \cdot k}{\rho_{\text{гор}} \cdot 4(1 + 2\Delta_* + A_*)} = 0. \quad (3.89)$$

Для упрощения введем новую переменную

$$\frac{(\Theta_{s^*} - 1) \cdot T_0 \cdot K_{\text{Тбаз}} \cdot K_* \cdot A_* \cdot H_* \cdot k}{\rho_{\text{гор}} \cdot 4(1 + 2\Delta_* + A_*)} = m_d. \quad (3.90)$$

Тогда

$$\frac{F_{\text{ср}}^2}{d_c^3} = m_d. \quad (3.91)$$

Согласно с выражением (1.24)

$$F_{\text{ср}} = \frac{F_* \cdot d_c \cdot B_0}{\mu_0}. \quad (3.92)$$

Подставив выражение (3.91) в (3.92) получим

$$d_c = \frac{F_*^2 \cdot B_0^2}{m_d \mu_0^2}. \quad (3.93)$$

Выразив $d_c = \delta_{\text{кр}}/\delta_*$ получим

$$\delta_* = \frac{m_d \mu_0^2 \cdot \delta_{\text{кр}}}{F_*^2 \cdot B_0^2}. \quad (3.94)$$

Выражение (3.94) можно представить как функцию

$$f(\delta_*) = \delta_* - \frac{m_d \mu_0^2 \cdot \delta_{\text{кр}}}{F_*^2 \cdot B_0^2} = 0. \quad (3.95)$$

Решив уравнение (3.95) численным методом (например, методом деления отрезка пополам [206 и др]) можно определить значение, δ_* и в дальнейшем – геометрические размеры МС.

Механическая сила ($P_{\text{мх.кр}}$) в критической точке равна электромагнитной силе ($P_{\text{эм}}$), которая вычисляется как

$$P_{\text{мх.кр}} = \frac{M_{\text{эм}}}{a_{\text{ск}} + c}. \quad (3.96)$$

Представим выражение (3.96) в безразмерной форме записи

$$P_* = \frac{M_*}{0,25 + c_*}. \quad (3.97)$$

Выразив из выражения (3.97) величину M_* и подставив в полученное выражение значения параметрически заданных нагрузочных характеристик, (1.25) получим

$$\begin{aligned} c_0 - c_1x_1 - c_2x_2 - 0,123x_1^2 - 0,237x_2^2 - c_{33}x_3^2 - 0,112x_4^2 - 0,125x_5^2 = \\ = 10 \cdot [P_*(0,25 + c_*)]^{1/6}. \end{aligned} \quad (3.98)$$

Из последнего выражения определим x_4^2 , что позволяет найти величину A_* как функцию относительного зазора.

В итоге получим

$$\begin{aligned} \frac{1}{0,112} \left\{ -10 \cdot [P_*(0,25 + c_*)]^{1/6} + c_0 - c_1x_1 - c_2x_2 - 0,123x_1^2 - 0,237x_2^2 - \right. \\ \left. - c_{33}x_3^2 - 0,112x_4^2 - 0,125x_5^2 \right\} = x_4^2. \end{aligned} \quad (3.99)$$

Для упрощения выражения (3.99) введем обозначение z_a

$$\begin{aligned} z_a = \frac{1}{0,112} \left\{ -10 \cdot [P_*(0,25 + c_*)]^{1/6} + c_0 - c_1x_1 - c_2x_2 - 0,123x_1^2 - 0,237x_2^2 - \right. \\ \left. - c_{33}x_3^2 - 0,112x_4^2 - 0,125x_5^2 \right\}. \end{aligned}$$

Тогда

$$x_4 = \pm \sqrt{z_a} = 6,667 A_* - 4. \quad (3.100)$$

На основании этого выражения можно записать

$$\begin{cases} A_{*1} = -0,15\sqrt{z_a} + 0,60 \\ A_{*2} = +0,15\sqrt{z_a} + 0,60. \end{cases} \quad (3.101)$$

Так же необходимо учесть, что величина z_a не может быть отрицательной. Поэтому следует предусмотреть сужение диапазона угла поворота якоря (φ) до тех значений, при которых z_a будет положительным. Ниже представлена блок-схема сужения диапазона угла поворота якоря (рисунок 3.6) для верхней границы φ_{\max} , аналогично корректируется нижняя границы φ_{\min} .

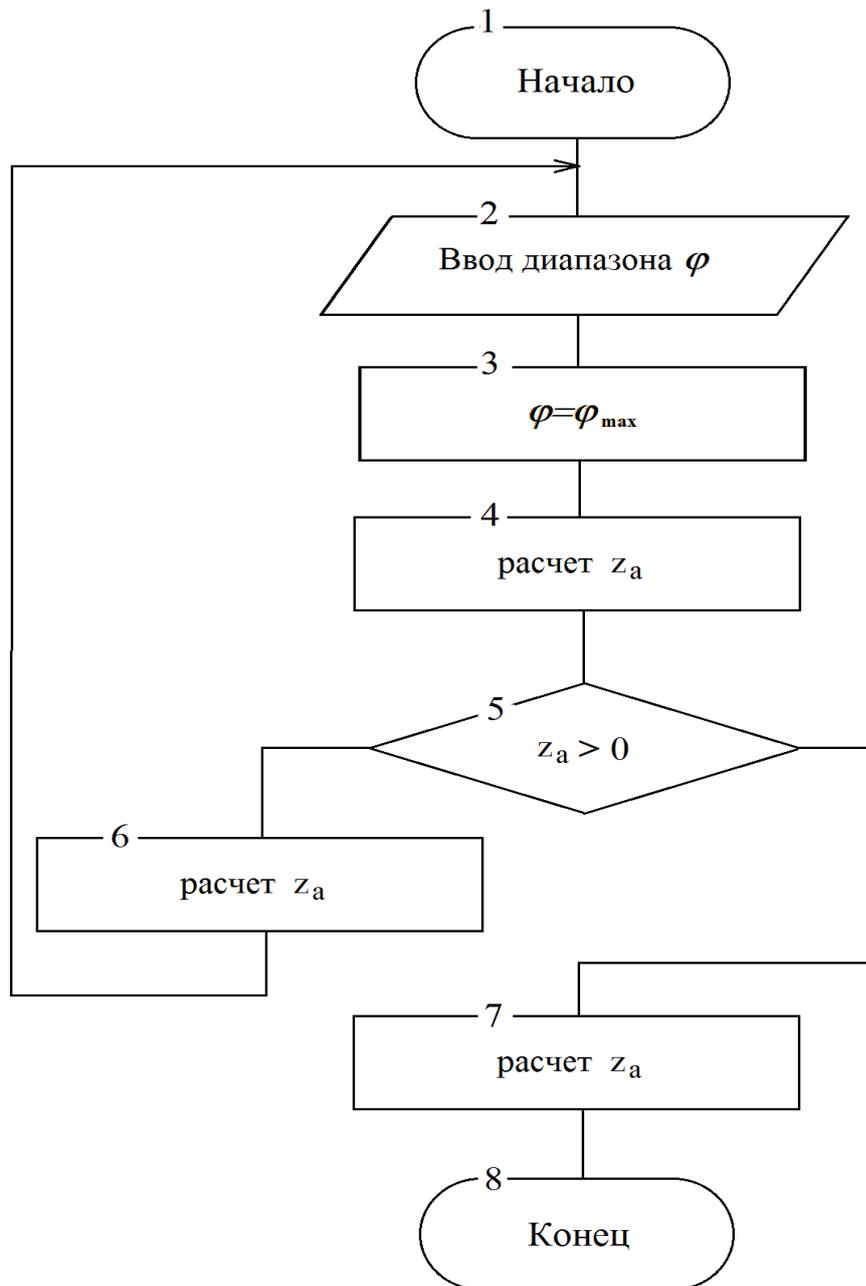


Рис. 3.6 – Блок-схема корректировки верхней границы диапазона угла поворота якоря φ .

Составим выражение для определения относительной механической силы P_* .

$$P_* = P_{\text{мх.кр}} / P_{\text{баз}}, \quad (3.102)$$

где $P_{\text{баз}}$ - базисная величина силы, которая равна

$$P_{\text{баз}} = \frac{B_0^2 \cdot S_c}{2\mu_0}. \quad (3.103)$$

Подставив выражение (3.103) в (3.102) получим

$$P_* = \frac{P_{\text{мх.кр}} 8\mu_0}{B_0^2 \cdot \delta_{\text{кр}}^2}. \quad (3.105)$$

Составляется частный критерий оптимальности (масса активных материалов – M_a , установочная площадь – S_y , мощность – $P_{\text{эл}}$, габаритный объем – V_{Γ} , высота МС – H , стоимость активных материалов – c_a и т.д.), которые можно выразить основными соизмерностями МС, кратностями и коэффициентами.

$$M_a = m_c + m_m, \quad (3.106)$$

$$m_c = 7,8 \cdot 10^3 \cdot \frac{4}{\pi} \left[d_c^2 (2C_{0\text{к}} - 1,356a_{\text{яр}} + l_2 + l_{\text{в}} + 2H_0 + 4\Delta_{\text{к}} + a_{\text{п}}) + d_{\text{п}}^2 a_{\text{п}} \right],$$

$$m_m = 8,9 \cdot 10^3 \cdot \pi (d_c + 2\Delta_{\text{к}} + A_0) A_0 \cdot H_0 \cdot k_3,$$

$$S_y = b_{\text{яр}} (C_{0\text{к}} + a_{\text{яр}} + 0,5d_c + 2\Delta_{\text{к}} + A_0), \quad (3.107)$$

$$V_{\Gamma} = b_{\text{яр}} (C_{0\text{к}} + a_{\text{яр}} + l_{\text{в}}) H, \quad (3.108)$$

$$H = H_0 + 2\Delta_{\text{к}} + a_{\text{п}} + 2a_{\text{яр}}, \quad (3.109)$$

$$C_0 = \Pi_c m_c + \Pi_m m_m, \quad (3.110)$$

$$P = (\Theta_s - T_0) K_{\text{т.э.кв}} S_k, \quad (3.111)$$

где m_c , m_m – масса ферромагнитной стали и обмоточной меди соответственно; Π_c , Π_m – стоимость единицы массы ферромагнитной стали и обмоточной меди соответственно.

Из выражений (3.101), с учетом уравнений (3.105) и (3.99), видно что они являются функцией относительного критического зазора δ_* . Совместное решение

уравнений (3.95) и (3.101) позволяет определить δ_* , диаметр сердечника и текущее значение критерия оптимальности.

Для определения магнитной индукции B_0 , геометрических соизмерностей в МС, которые вычисляют минимальные значения критерий оптимальности, (3.105), (3.107), (3.108), (3.109), (3.110), (3.111) применяется метод сканирования [132, 136]. Блок-схема алгоритма поиска $B_{0, \text{опт}}$ и оптимальных кратностей в МС приведена на рисунке 3.7.

Представленный на рисунке 3.7 алгоритм синтеза получает результат вычисления в следующей последовательности:

а) ввод исходных данных проектирования. Критерий оптимальности принимает максимально большое значение ($M_{\text{опт}} = 10^{10}$).

б) геометрические соизмерности перебираются с определенным шагом во вложенных циклах, во внешнем цикле при этом изменяется B_0 , решаются уравнения совместно (3.95) и (3.101) относительно δ_* (с предварительной проверкой существования решения).

в) каждый раз внутренний цикл просчитывается два раза, вначале с A_{*1} , а второй раз с A_{*2} .

г) проверяется условие размещения обмоток в окне магнитопровода (если обмотка не размещается в окне, то переменной H_* присваивается очередное значение).

д) вычисляется текущее значение критерия оптимальности и сравнивается с текущим оптимальным его значением. Меньшее значение запоминается в качестве оптимального варианта. Программа перебирает все узловые точки факторного пространства.

е) определяется точка предварительно определенного минимума расширением на шаг «влево» и на шаг «вправо» от точки. Проводится повторное сканирование уточнений области с уменьшенным шагом.

ж) выводятся исходные данные, результаты оптимизационного расчета (МДС срабатывания, потребляемая мощность, индукция, критерии оптимальности, геометрические соизмерности МС).

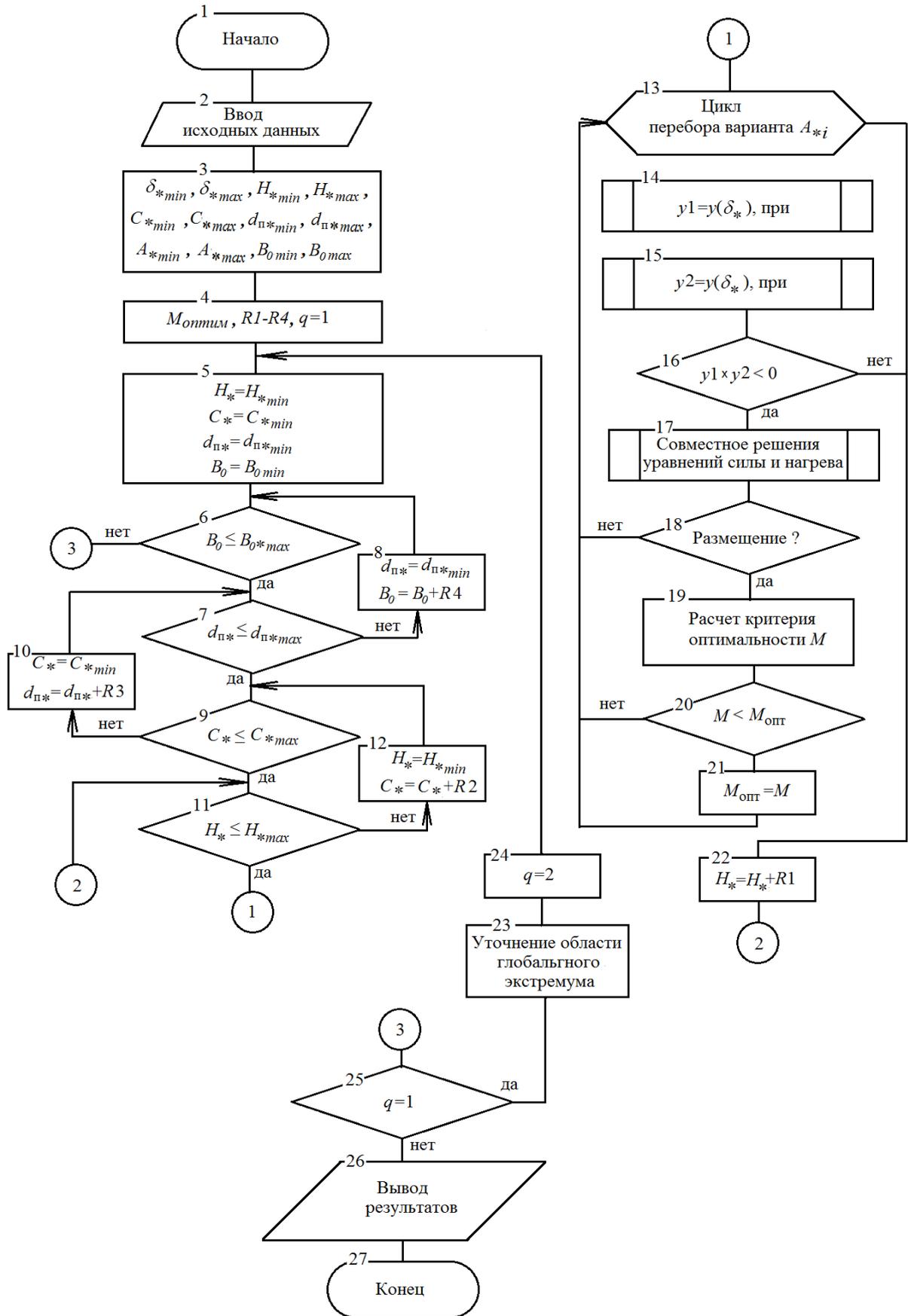


Рис. 3.7 – Блок-схема алгоритма синтеза оптимальных клапанных электромагнитов с круглыми полюсными наконечниками.

3.3 Исследование влияния исходных данных проектирования на оптимальные соизмерности и индукцию в клапанной магнитной системе

Индукция $B_{\text{опт}}^*$ представлена ниже в долях комплекса проектирования $B_{\text{кп}}$, сформированного [80] в виде

$$B_{\text{кп}} = \sqrt{\mu_0 P_{\text{мх.кп}}} / \delta_{\text{кр}} \quad (3.112)$$

Из формулы видно, что значение $B_{\text{кп}}$ зависит от исходных данных проектирования и пропорционален конструктивному фактору.

Отсюда,

$$B_{\text{опт}}^* = B_{0,\text{опт}} / B_{\text{кп}} \quad (3.113)$$

1. Минимизация потребляемой мощности:

а) влияния величины критического зазора ($\delta_{\text{кр}}$) при $P_{\text{мх.кп}} = 10\text{Н}$, $\Theta_{\text{max}} = 105^\circ\text{C}$, $T_0 = 40^\circ\text{C}$, $P_{\text{атм}} = 760 \text{ мм.рт.ст.}$, $K_3 = 0,5$.

Результаты оптимизационного расчёта сведены в таблицы 3.3 и 3.4. В последней таблице результаты приведены в именованных величинах.

Таблица 3.3. К минимизации потребляемой мощности. Влияние критического значения рабочих воздушных зазоров

$\delta_{\text{кр}}$, мм	$\delta_{\text{опт}}^*$	$H_{\text{опт}}^*$	$d_{\text{опт}}^*$	$C_{\text{опт}}^*$	$A_{\text{опт}}^*$	$B_{\text{опт}}^*$
2	0,139	2,884	1,757	1,771	0,620	0,670
4	0,229	3,102	1,832	1,771	0,623	1,357
6	0,291	2,914	1,832	1,778	0,616	1,934
8	0,351	3,019	1,862	1,816	0,621	2,659
10	0,401	3,019	1,847	1,816	0,630	3,350
12	0,438	2,787	1,87	1,846	0,637	3,901

Таблица 3.4. Влияние на размеры электромагнита минимизированного по потребляемой мощности критического значения рабочего воздушного зазора

$\delta_{\text{кр}}$, мм	$d_{\text{с,опт}}$, мм	$H_{0,\text{опт}}$, мм	$d_{\text{п,опт}}$, мм	$C_{\text{опт}}$, мм	$A_{0,\text{опт}}$, мм	$B_{0,\text{опт}}$, Тл
2	14,4	41,5	25,3	25,5	8,93	1,19
4	17,5	54,3	32,1	31,0	10,9	1,21
6	20,6	60,0	37,7	36,6	12,7	1,14
8	22,8	62,2	42,5	41,4	14,2	1,18
10	24,9	75,2	46,0	45,2	15,7	1,19
12	27,4	76,4	50,6	50,6	17,5	1,15

Из сопоставления представленных данных таблицы 3.3 и таблицы 3.4 видно, что оптимальные относительные размеры магнитной системы изменяются в узких пределах (за исключением относительного рабочего зазора $\delta_{\text{опт}}^*$).

б) влияние противодействующего усилия ($P_{\text{мх.кр}}$) в критической точке при $\delta_{\text{кр}} = 5 \text{ мм}$, $\Theta_{\text{max}} = 105^\circ \text{C}$, $T_0 = 40^\circ \text{C}$, $P_{\text{атм}} = 760 \text{ мм.рт.ст.}$, $K_3 = 0,5$.

Результаты оптимизационных расчетов приведены в таблице 3.5 и в таблице 3.6.

Таблица 3.5. К минимизации потребляемой мощности

$P_{\text{мх.кр}}, \text{ Н}$	$\delta_{\text{опт}}^*$	$H_{\text{опт}}^*$	$d_{\text{опт}}^*$	$C_{\text{опт}}^*$	$A_{\text{опт}}^*$	$B_{\text{опт}}^*$
5	0,301	2,997	1,832	1,778	0,615	2,070
10	0,263	3,079	1,847	1,786	0,608	1,675
15	0,239	2,944	1,817	1,771	0,623	1,414
20	0,217	2,614	1,802	1,763	0,617	1,204
25	0,209	2,787	1,757	1,771	0,616	1,131

Таблица 3.6. Влияние на размеры электромагнита, минимизированного по потребляемой мощности критического значения противодействующего усилия

$P_{\text{мх.кр}}, \text{ Н}$	$d_{\text{с,опт}}, \text{ мм}$	$H_{0,\text{опт}}, \text{ мм}$	$d_{\text{п,опт}}, \text{ мм}$	$C_{\text{опт}}, \text{ мм}$	$A_{0,\text{опт}}, \text{ мм}$	$B_{0,\text{опт}}, \text{ Тл}$
5	16,6	49,8	30,4	29,5	10,2	1,04
10	19,0	58,5	35,1	34,0	11,6	1,19
15	20,9	61,6	38,0	37,1	13,0	1,23
20	23,0	60,2	41,5	40,6	14,2	1,21
25	23,9	66,7	42,0	42,4	14,7	1,27

Данные таблицы 3.6 показывают, что увеличением противодействующего усилия в выбранном диапазоне приводит к увеличению геометрических размеров магнитной системы, но в меньшей степени, чем при увеличении критического значения рабочего воздушного зазора.

в) влияние максимальной допустимой температуры нагрева (Θ_{max}) обмотки при $\delta_{\text{кр}} = 5 \text{ мм}$, $P_{\text{мх.кр}} = 10 \text{ Н}$, $T_0 = 40^\circ \text{C}$, $P_{\text{атм}} = 760 \text{ мм.рт.ст.}$, $K_{\text{max}} = 1,35$, $K_3 = 0,5$.

Результаты оптимизационных расчетов приведены в таблице 3.7 и в таблице 3.8.

Таблица 3.7

$\Theta_{\max}, ^\circ\text{C}$	$\delta_{\text{опт}}^*$	$H_{\text{опт}}^*$	$d_{\text{опт}}^*$	$C_{\text{опт}}^*$	$A_{\text{опт}}^*$	$B_{\text{опт}}^*$
90	0,251	3,102	1,772	1,778	0,627	1,548
105	0,263	3,079	1,847	1,786	0,608	1,675
120	0,269	2,787	1,832	1,771	0,633	1,682
135	0,281	2,982	1,765	1,778	0,624	1,774

Таблица 3.8

$\Theta_{\max}, ^\circ\text{C}$	$d_{\text{с, опт}}, \text{мм}$	$H_{0, \text{опт}}, \text{мм}$	$d_{\text{п, опт}}, \text{мм}$	$C_{\text{опт}}, \text{мм}$	$A_{0, \text{опт}}, \text{мм}$	$B_{0, \text{опт}}, \text{Тл}$
90	19,9	61,8	35,3	35,4	12,5	1,10
105	19,0	58,5	35,1	34,0	11,6	1,19
120	18,6	51,8	34,1	32,9	11,8	1,19
135	17,8	53,1	31,4	31,6	11,1	1,26

По данным таблицы 3.8 видно, что рост максимальной допустимой температуры нагрева обмотки приводит к снижению геометрических размеров магнитной системы.

г) влияние расчетной температуры (T_0) окружающего воздуха при $\delta_{\text{кр}} = 5$ мм, $P_{\text{мх.кр}} = 10\text{Н}$, $\Theta_{\text{max}} = 105^\circ\text{C}$, $P_{\text{атм}} = 760$ мм.рт.ст., $K_{\text{max}} = 1,35$, $K_3 = 0,5$.

Результаты оптимизационных расчетов приведены в таблице 3.9 и в таблице 3.10.

Таблица 3.9

$T_0, ^\circ\text{C}$	$\delta_{\text{опт}}^*$	$H_{\text{опт}}^*$	$d_{\text{опт}}^*$	$C_{\text{опт}}^*$	$A_{\text{опт}}^*$	$B_{\text{опт}}^*$
40	0,263	3,079	1,847	1,7786	0,608	1,675
55	0,243	3,075	1,817	1,786	0,577	1,492
70	0,227	3,184	1,802	1,763	0,8563	1,358

Таблица 3.10

$T_0, ^\circ\text{C}$	$d_{\text{с, опт}}, \text{мм}$	$H_{0, \text{опт}}, \text{мм}$	$d_{\text{п, опт}}, \text{мм}$	$C_{\text{опт}}, \text{мм}$	$A_{0, \text{опт}}, \text{мм}$	$B_{0, \text{опт}}, \text{Тл}$
40	19,0	58,5	35,1	34,0	11,6	1,19
55	20,6	63,3	37,4	36,7	11,9	1,06
70	22,0	70,0	39,6	38,8	12,4	0,936

Из данных таблицы 3.10 видно, что рост температуры окружающей среды воздуха приводит к необходимости увеличения всех геометрических размеров магнитной системы при снижении индукции $B_{0, \text{опт}}$ в основании сердечника.

д) влияние кратности максимального напряжения на обмотке (K_{max}) к напряжению срабатывания при $\delta_{\text{кр}} = 5$ мм, $P_{\text{мх.кр}} = 10\text{Н}$, $\Theta_{\text{max}} = 105^\circ\text{C}$, $T_0 = 40^\circ\text{C}$, $P_{\text{атм}} = 760$ мм.рт.ст., $K_3 = 0,5$.

Результаты оптимизационных расчетов приведены в таблице 3.11 и в таблице 3.12.

Таблица 3.11

K_{max}	$\delta_{\text{опт}}^*$	$H_{\text{опт}}^*$	$d_{\text{опт}}^*$	$C_{\text{опт}}^*$	$A_{\text{опт}}^*$	$B_{\text{опт}}^*$
1,05	0,283	2,899	1,817	1,786	0,571	1,809
1,35	0,263	3,079	1,847	1,786	0,608	1,675
1,70	0,237	2,997	1,847	1,801	0,620	1,449

Таблица 3.12

K_{max}	$d_{\text{с, опт}},$ мм	$H_{0, \text{опт}},$ мм	$d_{\text{п, опт}},$ мм	$C_{\text{опт}},$ мм	$A_{0, \text{опт}},$ мм	$B_{0, \text{опт}},$ Т
1,05	17,7	51,2	32,1	31,6	10,1	1,28
1,35	19,0	58,5	35,1	34,0	11,6	1,19
1,70	21,1	63,2	39,0	38,0	13,1	1,03

Как видно из данных таблицы 3.12, при уменьшении колебаний напряжения на обмотке, и чем стабильнее технологический процесс изготовления электромагнита ($K_{U_{\text{ср}}} \rightarrow 1$), тем меньше его размеры.

г) влияние атмосферного давления при $\delta_{\text{кр}} = 5$ мм, $P_{\text{мх.кр}} = 10\text{Н}$, $\Theta_{\text{max}} = 105^\circ\text{C}$, $K_{\text{max}} = 1,35$, $K_3 = 0,5$.

Результаты оптимизационных расчетов приведены в таблице 3.13 и в таблице 3.14. С ростом атмосферного давления улучшаются условия отдачи тепла с поверхностей магнитной системы. Это определяет уменьшение необходимых ее размеров.

Таблица 3.13

$P_{\text{атм}},$ мм.рт.ст	$\delta_{\text{опт}}^*$	$H_{\text{опт}}^*$	$d_{\text{опт}}^*$	$C_{\text{опт}}^*$	$A_{\text{опт}}^*$	$B_{\text{опт}}^*$
600	0,252	2,787	1,780	1,786	0,648	1,534
760	0,263	3,079	1,847	1,786	0,608	1,675
900	0,267	3,109	1,802	1,801	0,622	1,689

Таблица 3.14

$P_{\text{атм}},$ мм.рт.ст	$d_{\text{с,опт}},$ мм	$H_{\text{0,опт}},$ мм	$d_{\text{п,опт}},$ мм	$C_{\text{опт}},$ мм	$A_{\text{0,опт}},$ мм	$B_{\text{0,опт}},$ Тл
600	19,8	55,3	35,3	35,4	12,9	1,09
760	19,0	58,5	35,1	34,0	11,6	1,19
900	18,7	58,2	33,7	33,7	11,6	1,20

3.4 Обобщение результатов оптимизационных расчетов

На практике в процессе разработки приводного электромагнита приходится составлять и оценивать большое количество вариантов его реализации. Для сокращения временных и экономических затрат проектировщик должен использовать рационализированные модели оптимальных соразмерностей магнитной системы и ее параметров: индукция в основании сердечника, МДС срабатывания, необходимые для расчета обмоточных данных и уточнения коэффициента заполнения обмотки. Такими являются модели, полученные обобщением результатов вычислительного эксперимента над алгоритмом параметрического синтеза оптимальных магнитных систем методами планирования эксперимента. Для этого выбираются пределы варьирования исходных данных проектирования и составляется матрица вычислительного эксперимента по рекомендациям [64], в соответствии с которым проводится вычислительный эксперимент, результаты которого представлены в полиномиальном виде.

Рассмотрим результаты оптимизационных расчетов по различным критериям для продолжительного режима работы клапанных электромагнитов,

представленные в виде полиномов. На основе анализа результатов расчёта (раздел 3.3) в качестве факторов выбраны следующие параметры:

$\delta_{кр}$ - критический рабочий воздушный зазор;

$P_{мх.кк}$ - механическое (противодействующее) усилие при критическом зазоре;

$K_{max} = U_{max} / U_{ср}$ - отношение максимального напряжения питания на обмотке к напряжению срабатывания;

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

K_3 - коэффициент заполнения обмоточного окна. Выбран предел варьирования факторов (таблица 3.15) и ортогонально-композиционный план второго порядка [58, 64].

Таблица 3.15 - Факторы и пределы их измерения

Факторы Z_i	Кодированные уровни факторов (Z_i)				
	-1,596	-1	0	1	1,596
$Z_1 = \delta_{кр}, \text{ мм}$	2	3,87	7	10,13	12
$Z_2 = P_{мх.кк}, \text{ Н}$	5	8,73	15	21,27	25
$Z_3 = K_{max}$	1,35	1,425	1,55	1,675	1,75
$Z_4 = \Theta_{доп}, \text{ }^\circ\text{C}$	90	97,5	110	122,5	130
$Z_5 = K_3$	0,3	0,375	0,5	0,625	0,7

Кодированные значения факторов рассчитываются [64] по известным выражениям, которые в данном случае имеют вид:

$$z_1 = 0,319\delta_{кр} - 2,236; \quad z_2 = 0,159 \cdot P_{мх.кк} - 2,392; \quad z_3 = 8 \cdot K_{max} - 12,4; \quad (3.114)$$

$$z_4 = 0,0798 \cdot \Theta_{доп} - 8,778; \quad z_5 = 8 \cdot K_3 - 4.$$

Оптимальным соразмерностям и параметрам магнитной системы присвоен дополнительный символ, указывающий на критерий оптимизации.

Результаты оптимизационных расчетов минимизации: высоты приведены в форме таблицы в приложении В.

3.4.1 Синтез клапанной магнитной системы, минимизированной по ее высоте

Математическое выражение высоты (H) магнитной системы (рисунок 1.1) имеет вид

$$H = H_0 + 2\Delta_{\kappa} + a_{\Pi} + 2a_{\text{як}}. \quad (3.115)$$

Результаты оптимизированных расчетов представлены в виде:

$$\delta_{\text{опт.Н}}^* = 10^{-2} (21,4 + 6,25z_1 - 1,81z_2 - 0,71z_1^2 + 0,46z_2^2 - 0,39z_1z_2 - 0,85z_3 - 0,26z_1z_3 + 0,93z_4 + 0,30z_1z_4 + 1,34z_5 + 0,42z_1z_5 - 0,23z_2z_5); \quad (3.116)$$

$$H_{\text{опт.Н}}^* = 1,165; \quad (3.117)$$

$$d_{\text{опт.Н}}^* = 10^{-2} (184,3 - 5,57z_1 - 5,94z_2 - 3,18z_1^2 + 3,02z_2^2 + 2,53z_3 - 3,07z_4 - 4,15z_5 + 2,27z_5^2 + 2,18z_2z_5); \quad (3.118)$$

$$c_{\text{опт.Нонт.С}}^* = 10^{-2} (185,2 - 2,33z_2 - 1,88z_5); \quad (3.119)$$

$$A_{\text{опт.Н}}^* = 10^{-2} (77,3 - 2,40z_2 + 1,28z_2^2 + 1,31z_3 - 1,28z_4 - 2,39z_5 + 0,89z_5^2 + 0,93z_2z_5); \quad (3.120)$$

$$B_{\text{опт.Н}}^* = 10^{-4} (118,6 + 27,2z_1 - 11,6z_2 - 3,89z_1^2 + 4,61z_2^2 - 3,40z_1z_2 - 1,21z_3 + 1,30z_4 + 1,76z_5)^2; \quad (3.121)$$

3.4.2 Синтез клапанной магнитной системы, минимизированной по потребляемой мощности

Математическое выражение мощности тепловых потерь ($P_{\text{эл}}$) может быть записано в виде:

$$P_{\text{эл}} = \frac{\rho_{\Gamma} \pi (d_c + 2\Delta_{\kappa} + A_0)}{A_0 H_0 K_3} (K_{\text{max}} F_{\text{сп}})^2, \quad (3.122)$$

где $\rho_{\Gamma} = 1,62 \cdot 10^{-8} (1 + 0,0048 \cdot \Theta_V)$, Ом м.

Результаты оптимизированных расчетов представлены в виде:

$$\delta_{\text{опт.Р}_{\text{эл}}}^* = 10^{-8} (72 + 5,5z_1 - 1,7z_2 + 0,9z_5 - 1,7z_1^2)^4; \quad (3.123)$$

$$H_{\text{опт.Р}_{\text{эл}}}^* = 10^{-4} (156,1 - 4,5z_1^2 + 1,7z_1z_2)^2; \quad (3.124)$$

$$d_{\text{опт.Р}_{\text{эл}}}^* = 1,848 + 0,027z_1; \quad (3.125)$$

$$c_{\text{опт.Р}_{\text{эл}}}^* = 1,836; \quad (3.126)$$

$$A_{\text{опт.Р}_{\text{эл}}}^* = 0,655; \quad (3.127)$$

$$B_{\text{опт.Р}_{\text{эл}}}^* = 10^{-6} (11 + 0,83z_1 - 0,22z_1^2 - 0,28z_2 + 0,12z_5)^6. \quad (3.128)$$

Полученные выражения свидетельствуют, что оптимальные значения расстояния от оси сердечника до скобы магнитопровода ($c_{\text{опт.Р}_{\text{эл}}}^*$) и относительной толщины обмотки ($A_{\text{опт.Р}_{\text{эл}}}^*$) практически не зависят от исходных данных проектирования. Влияние K_{max} , Θ_{max} на оптимальные параметры магнитной системы в указанных диапазонах не сказывается.

Анализ результатов оптимизационных расчетов показывает, что рациональные значения усредненной магнитной индукции (B_0) по сечению сердечника в его основании находятся в диапазоне от 0,85 до 1,23 Тл при длительном режиме работы электромагнита. Значит, магнитная система в области проведенного вычислительного эксперимента может быть как линейной ($B_0 \leq 1,1 \text{ Тл}$), так и нелинейной.

3.4.3 Синтез клапанной магнитной системы, минимизированной по стоимости

Математическое выражение стоимости (C_a) может быть записано в виде:

$$C_a = C_M m_M + C_C m_C \quad (3.129)$$

где C_M , C_C - цена 1 кг обмоточной меди и стали соответственно;

m_M , m_C - масса обмоточной меди и ферромагнитной стали;

Результаты оптимизационных расчетов представлены в виде:

$$\delta_{\text{опт.С}_a}^* = 10^{-4}(51,1 + 7,53z_1 - 2,38z_2 - 1,71z_1^2 + 0,69z_2^2 - 0,80z_3 + 0,83z_4 + 0,87z_5)^2; \quad (3.130)$$

$$H_{\text{опт.С}_a}^* = (1,662 + 0,017z_3^2 + 0,017z_4^2 - 0,024z_5 - 0,017z_5^2)^2; \quad (3.131)$$

$$d_{\text{опт.С}_a}^* = 1,838 + 0,020z_1; \quad (3.132)$$

$$c_{\text{опт.С}_a}^* = 1,825 + 0,021z_1; \quad (3.133)$$

$$A_{\text{опт.С}_a}^* = 0,484 - 0,011z_1 + 0,006z_1^2 - 0,022z_5; \quad (3.134)$$

$$B_{\text{опт.С}_a}^* = (1,305 + 0,289z_1 - 0,098z_2 - 0,041z_1^2 + 0,027z_2^2 - 0,023z_1z_2 - 0,030z_3 + 0,030z_4 + 0,036z_5)^2. \quad (3.135)$$

3.5 Методика «ручного» проектирования оптимальных клапанных электромагнитов постоянного тока

Результаты параметрического синтеза, обобщенные в виде безразмерных полиномиальных зависимостей позволяют, не прибегая к прямым оптимизационным расчетам, получить «ручными» средствами расчета оптимальные размеры клапанных магнитных систем. Для чего достаточно по исходным данным проектирования подсчитать:

- 1) напряжение срабатывания $U_{\text{ср}} = K_{U_{\text{мин}}} U_{\text{н}} / K_{U_{\text{ср}}}$,

где $U_{\text{н}}$ - номинальное напряжение питания;

- 2) значения z_1, z_2, z_3, z_4, z_5 по выражениям (3.14);

- 3) оптимальные значения $\delta_{\text{опт}}^*, H_{\text{опт}}^*, d_{\text{опт}}^*, c_{\text{опт}}^*, A_{\text{опт}}^*, B_{\text{опт}}^*$ по выражениям:

- а) начиная с (3.116) по (3.121) – при минимизации высоты магнитной системы (3.115);

- б) начиная с (3.123) по (3.128) – при минимизации потребляемой мощности;

4) определяющие размеры магнитной системы:

$$d_{c,опт} = \delta_{кр} / \delta_{опт}^*; H_{0,опт} = H_{опт}^* d_{c,опт}; d_{л,опт} = d_{опт}^* d_{c,опт}; c = c_{опт}^* d_c; A_{0,опт} = A_{опт}^* d_{c,опт}$$

и магнитную индукцию

$$B_{0,опт} = B_{опт}^* B_{кп},$$

где $B_{кп} = \sqrt{\mu_0 P_{мх,кр}} / \delta_{кр}$ - комплекс исходных данных проектирования;

5) кодирование значения факторов x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 согласно выражениям, приведенными в подразделе 1.4 (при $B_0 \leq 1,11 \text{Тл}$ принять $x_5 = -0,674$);
угловое положение якоря

$$\varphi = \arctg \frac{\delta_{опт}^*}{0,25 + c_{опт}^*};$$

6) МДС срабатывания $F_{ср} = F_* B_{0,опт} d_{c,опт} / \mu_0$ по выражениям(1.24);

7) значения a_{55}, a_{66}, Θ_v по выражениям (3.81) $a_{55} = 3,202(0,01\Theta_{\max}) - 4,161$;
 $a_{66} = 6,667(0,01\tau_0) - 3,667$;

8) удельное электрическое сопротивление медного обмоточного провода нагретой магнитной системы $\rho_{гор} = 1,62 \cdot 10^{-8} (1 + 0,0043 \cdot \Theta_v)$;

9) диаметр обмоточной меди $d'_м = 2\sqrt{\rho_{гор}(d_c + 2\Delta_k + A_0)F_{ср}/U_{ср}}$ и уточнить ($d'_м$) по сортаменту;

10) уточнить по величине $d'_м$ коэффициент заполнения (K_3) и сечение провода $q_м = \frac{\pi d'^2_м}{4}$;

11) если K_3 в п.2 и в п.10 отличаются более, чем на 5%, то следует повторить расчет п.2- п.10;

12) число витков (N) обмотки $N = A_{0,опт} H_{0,опт} K_3 / q_м$.

Пример Б8 расчета клапанной магнитной системы минимизированной по потребляемой мощности приведен в приложениях Б.

3.6 Выводы к разделу 3

1. Область применения методик проектного расчета клапанных электромагнитов постоянного тока, базирующихся на «конструктивном факторе», ограничена условиями: продолжительный режим работы; превышение температуры нагрева обмотки на 70°C ; условно-полезная работа – 0,6 кГ см. рекомендуется без достаточного обоснования широкий диапазон выбора магнитной индукции в элементах магнитопровода.

2. В части известных методик синтеза, магнитная индукция в рабочем зазоре, в магнитопроводе выбирается на начальном этапе и уточняется на последующих.

В методике с использованием усредненной тяговой характеристики, полученной на основе экспериментальных исследований существовавших конструкций приводных электромагнитов контакторов, реле не учитывается влияние на тяговое усилие соразмерностей в их магнитных системах.

3. Результаты проектных расчетов приводных клапанных электромагнитов реле, использовавшихся в системах связи и телефонии, могут быть распространены лишь на электромагниты с размерами достаточно близкими к прототипу. Для распространения результатов таких расчетов они должны быть обработаны и представлены в соответствии с теорией подобия.

4. В методике синтеза клапанных магнитных систем на основе использования корректирующих функций также принимается плоскопараллельная картина поля потоков рассеяния замыкающихся между скобой и сердечником магнитопровода; не учитываются потоки рассеяния, замыкающиеся между скобой и поверхностями полюсного наконечника.

Определение диаметра сердечника сводится к графическому решению нелинейного уравнения.

5. Предпочтительны методики проектного расчета оптимальных электромагнитов, позволяющих определить (выбрать) основные соразмерности, обеспечивающие, например, минимум массы активных материалов, габаритного

объема и установочной площади; высоты электромагнита; потребляемой мощности, стоимости и т.д. Однако и оптимизационные методики построены на основе обычных для теории цепей упрощенной картины магнитных и тепловых полей, что снижает достоверность результатов таких расчетов.

6. Методика синтеза оптимальных клапанных электромагнитов с круглыми полюсными наконечниками на основе обобщенных безразмерных электромагнитных и тепловых их характеристик, полученных на основе методов теории подобия, которая позволяет существенно сократить число необоснованно применяемых коэффициентов и соизмерностей, что обеспечивает достоверность результатов проектных расчетов.

7. Результаты вычислительного эксперимента над алгоритмом синтеза оптимальных клапанных электромагнитов с круглыми полюсными наконечниками позволяют существенно сократить затраты на проектирование, уменьшить время проектных работ, повысить качество функционирования приводных устройств электромагнитных аппаратов.

Оптимальные соизмерности в электромагните зависят не только от исходных данных проектирования, но от критерия оптимальности. Оптимальные соизмерности изменяются в более узких диапазонах, чем абсолютные размеры электромагнита, поэтому первые предпочтительны при математическом описании результатов оптимизационных расчетов.

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, позволившая установить граничное значение индукции в основании сердечника клапанных электромагнитных систем, элементы магнитопровода которых выполнены из низкоуглеродистой стали марки 10895 с:

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 заключить 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 случая работы в продолжительном режиме, на основании обобщенных электромагнитных и тепловых их 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, работающие в кратковременном, повторно-кратковременном, в том числе форсированном режимах работы, с учетом динамических характеристик.

Список литературы

1. Александров, Г. Н. Проектирование электрических аппаратов: учебник для вузов / Г.Н. Александров, В.В. Борисов, Г.С.Каплан [и др.]. – Л.: Энергоатомиздат., 1985. – 448 с.
2. Атабеков, Г. И. Основы теории цепей. Учебник для вузов / Г.И. Атабеков. – М.: Энергия, 1969. – 424 с.
3. Афанасьев, А. А. Новый метод расчета плоскопараллельных магнитных полей / А.А. Афанасьев, А.Н. Воробьев // Труды Академии электротехнических наук Чувашской республики. – 1993. – № 12. – С. 141-148.
4. Афанасьев, А. А. Расчет намагничивания постоянных магнитов электродвигателя методом сопряжения конформных отображений / А.А. Афанасьев, В.А. Нестерин, А.Н. Воробьев // Электричество. – 1993. – № 10. – С. 37-43.
5. Афанасьев, А. А. Новые подходы к расчету постоянных конформного преобразования в задачах электромеханики /А.А. Афанасьев, В.Э. Степанов // Электричество. – 1997. – № 9. – С. 32-36.
6. Афанасьев, А. А., Расчет трехмерных магнитных полей на основе дигармонических функций / А.А. Афанасьев, М.Ю. Уточкин // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике: Материалы II Всерос. науч.-техн. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 1998. – С. 12-14.
7. Афанасьев, А. А. Новый метод расчета трехмерных магнитных полей / А.А. Афанасьев // Труды Академии электротехнических наук Чувашской республики. – 1998. – № 1-2. – С. 141-148.
8. Афанасьев, А.А. Метод сопряжения конформных отображений в задачах электромеханики / А.А. Афанасьев. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. Ун-та, 2011. – 390 с.
9. Афанасьев, В. В. Обобщенные экспериментальные статические нагрузочные характеристики клапанных электромагнитов постоянного тока с круглыми полюсными наконечниками. Способ представления / В.В. Афанасьев,

А.В. Приказчиков, Н.В. Руссова, Г.П.Свинцов // Электротехника. – 2011. – № 5. – С. 39-45.

10. Ахазов, И. З. Выбор размеров полюсов Ш-образного электромагнита постоянного тока / И.З. Ахазов, Г.П. Свинцов // Известия вузов. Электромеханика – 1994. – № 3. – С. 24-30.

11. Батищев, Д. И. Применение методов нелинейного программирования для определения оптимальных параметров электромагнитных реле / Д.И. Батищев // Автоматика и телемеханика – 1965. – № 1. – С. 140-148.

12. Батищев, Д. И. О расчете электромагнитов оптимальных размеров / Д.И. Батищев // Электротехника. – 1968. – № 3. – С. 54-55.

13. Бахвалов, Ю. А. Моделирование магнитных проводимостей воздушных промежутков электромагнитных систем / Ю.А. Бахвалов, В.П. Гринченков, А.Г. Никитенко, В.В. Пахомов, В.Г. Щербаков, Е. Калленбах // Известия вузов. Электромеханика. – 1996. – № 6. – С. 17-21.

14. Бахвалов, Ю. А. К определению магнитных проводимостей электромагнитных систем / Ю.А. Бахвалов, В.П. Гринченков, А.Г. Никитенко, В.В. Пахомов, А.В. Шипулин, Е. Калленбах // Известия вузов. Электромеханика. – 1997. – № 3. – С. 29-32.

15. Бахвалов, Ю. А. Численное моделирование магнитного поля и силовых взаимодействий электромагнитного захвата корпусосборочных устройств комбинированным методом / Ю.А. Бахвалов, А.Г. Никитенко, Б.Н. Лобов, В.Г. Щербаков // Известия вузов. Электромеханика. – 1997. – № 10. – С. 37-40.

16. Бронштейн, И. Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов / И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев. – М.:Наука, 1986. 13 е изд., исправл. – 544 с.

17. Бугаев, Г. А. О критериях для оценки электромагнитов / Г.А. Бугаев // Электричество. – 1966. – № 11. – С. 51-55.

18. Бугаев, Г. А., Экспериментальное сопоставление клапанных электромагнитов постоянного тока / Г.А. Бугаев, Л.А. Пушкарев // Низковольтная аппаратура (разработка и исследование). – 1968. – Вып. 1. – С. 56-68.
19. Бугаев, Г. А. К расчету катушек электромагнитов постоянного тока / Г.А. Бугаев // Электротехника. – 1973. – № 10. – С. 18-22.
20. Бугаев, Г. А. Расчет основных размеров клапанных электромагнитов постоянного тока / Г. А. Бугаев // Электротехническая промышленность. Сер. Аппараты низкого напряжения. – 1981. – Вып. 6 (97). – С. 10-11.
21. Бугаев, Г.А. К расчету электромагнитов постоянного тока / Г.А. Бугаев // Тр. ВНИИР. Низковольтная аппаратура управления. – 1983. – С. 3-5.
22. Бугаев, Г. А. Экспериментальное исследование электромагнита клапанного типа / Г.А. Бугаев // Электротехническая промышленность. Сер. Аппараты низкого напряжения. – 1984.– Вып. 3 (112). – С. 4-6.
23. Бугаев Г. А. Расчет проводимости рабочего зазора и электромагнитного момента клапанного электромагнита / Г.А. Бугаев // Электротехника. – 1984. – № 9. – С. 61-63.
24. Буль, Б. К. Основы теории и расчета магнитных цепей / Б.К.Буль. – М.- Л.: Энергия, 1964. – 464 с.
25. Буль, Б. К. К расчету магнитных проводимостей и электромагнитных сил несимметричных магнитных цепей / Б.К. Буль // Электричество. – 1977. – № 9. – С. 82-84.
26. Буль, Б. К. Электромеханические аппараты автоматики / Б.К. Буль, О.Б. Буль, В.А. Азанов, В.Н. Шоффа. – М.: Высш. шк., 1988. – 302 с.
27. Буль, О. Б. Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов: Магнитные цепи, поля и программа FEMM: Учебное пособие для студ. высш. учеб. заведений / О.Б. Буль. – М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 336 с.
28. Буткевич, Г. В. Задачник по электрическим аппаратам / Г.В. Буткевич, В.Г. Дегтярь, А.Г. Сливинская. – М.: Высш. шк., 1987. – 232 с.

29. Веников, В. А. Теория подобия и моделирования / В.А. Веников. – М.: Высш. шк., 1976. – 479 с.
30. Веников, Г. В. Подобие при изменяющихся масштабах параметров моделируемых электромеханических систем / В.А. Веников // Известия вузов. Электромеханика. – 1980. – № 4. – С. 338-346.
31. Веников, Г. В. Реальная точность моделирования электромеханических процессов / В.А. Веников // Известия вузов. Электромеханика. – 1982. – № 12. – С. 1409-1414.
32. Веников, В. А. Теория подобия и моделирования / В.А. Веников, Г.В. Веников. – М.: Высш. шк., 1984. 439 с.
33. Витенберг, М. И. Определение нагрева обмоток электромагнитных реле / М.И. Витенберг // Автоматика и телемеханика. – 1958. – Т. XIX. – №9.
34. Витенберг, М. И. Расчет электромагнитных реле для аппаратуры автоматики и связи реле / М.И. Витенберг. – М.- Л.: Энергия, 1966. – 724 с.
35. Витенберг, М. И. Расчет электромагнитных реле / М.И. Витенберг. – Л.: Энергия, 1975. – 416 с.
36. Вожевский, С. М. Определение “критической” точки противодействующей характеристики при предварительном расчете электромагнитов постоянного тока / С.М. Вожевский // Электротехника. – 1971. – № 8. – С. 42.
37. Вундер, Я. Ю. Метод расчета температуры нагрева обмотки, работающей в импульсном режиме / Я.Ю. Вундер // Тр. ВНИИР. Низковольтная аппаратура. – 1974. – Вып. 3. – С.110-116.
38. Вундер, Я. Ю. Расчет максимальной и среднеобъемной температуры обмоток электрических аппаратов / Я.Ю. Вундер // Электричество. – 1976. – № 12. – С. 77-81.
39. Вундер, Я. Ю. Тепловой расчет обмоток низковольтных аппаратов с защитным кожухом / Я.Ю. Вундер // Электротехника. – 1976. – № 1. – С. 16-19.

40. Гальперн, Н. К. Определение магнитной проводимости воздушного зазора для электромагнитных устройств клапанного типа / Н.К.Гальперн // Тр. ЛПИ. – 1953. – №3. – С. 275-280.
41. Глузман, П. Л. Метод определения потокоцепления в магнитных цепях устройств с неравномерно распределенными параметрами / П.Л. Глузман // Электричество. – 1980. – № 2. – С. 54-56.
42. Глухенький, Г. Т. К расчету магнитной проводимости зазора между цилиндрическим полюсным наконечником и плоским поворотным якорем / Г.Т. Глухенький, В.Ф. Кычкин, Г.П. Свинцов // Электротехника. – 1998. – № 4. – С. 31-36.
43. Глухенький, Г. Т. Расчетно-экспериментальный способ определения силовых характеристик электромагнитов постоянного тока с внешним якорем / Г.Т. Глухенький, В.Ф. Кычкин, Г.П. Свинцов // Электротехника. – 1998. – № 5. – С. 34-38.
44. Гордон, А. В. Электромагниты постоянного тока / А.В. Гордон, А.Г. Сливинская. – М.: Госэнергоиздат, 1960. – 447 с.
45. Горбатенко, Н. И. Комбинированный метод магнитных цепей и граничных элементов для определения магнитных характеристик материалов изделий / Н. И. Горбатенко, В. В. Гричихин // Известия вузов. Электромеханика. – 2000. – № 1. – С. 15-20.
46. Гричихин, В. В. Моделирование магнитных полей разомкнутых магнитных систем с малыми воздушными зазорами модифицированным методом интегральных уравнений / В.В. Гричихин, Ю.В. Юфанова // Известия вузов. Электромеханика. – 2001. – № 4-5. – С. 5-8.
47. Гурницкий, В. Н. К теории приближенного подобия электромагнитов постоянного тока / В.Н. Гурницкий // Электричество. – 1968. – № 12. – С. 34-38.
48. Гурницкий, В. Н. О выборе электромагнитов постоянного тока / В.Н. Гурницкий // Электричество. – 1972. – № 9. – С. 66-71.
49. Дегтярь, В. Г. Излучение и теплопроводность в электрических аппаратах / В.Г. Дегтярь, А.Г. Годжелло. – М.: Изд-во МЭИ, 1980. – 80 с.

50. Демирчян, К. С. Машинные расчеты электромагнитных полей / К.С. Демирчян, В.П. Чечурин. – М.: Высш. шк., 1986. – 240 с.
51. Демирчян, К. С. Моделирование магнитных полей / К.С. Демирчян. – Л.: Энергия, 1974.– 285 с.
52. Демирчян, К. С. Расчет вихревых магнитных полей на основе использования скалярного магнитного потенциала / К.С. Демирчян, В.Л. Чечурин // Электричество. – 1982. – № 1. – С. 7-14.
53. Дульнев, Г. Н. Применение ЭВМ для решения задач теплообмена: учеб. пособие для теплофизич. и теплоэнергетич. спец. вузов / Г.Н. Дульнев, В.Г. Парфенов, А.В. Сигалов. – М.: Высш. шк., 1990. – 207 с.
54. Загороднюк, В. Т. Расчет магнитных полей с большими воздушными зазорами методом эквивалентных соленоидов / В.Т. Загороднюк, Р.С. Вострилов // Известия вузов. Электромеханика. – 1971. – № 8. – С. 825-831.
55. Загороднюк, В.Т. Расчет магнитных систем методом пропорциональных токов / В.Т. Загороднюк, Р.С. Вострилов // Известия вузов. Электромеханика. – 1972. – № 9. – С. 935-940.
56. Залесский, А. М. Тепловые расчеты электрических аппаратов / А.М. Залесский, Г.А. Кукеков. – Л.: Энергия, 1967. – 380 с.
57. Зевеке, Г. В. Основы теории цепей / Г.В. Зевеке, П.А. Ионкин, А.В. Нетушил, С.В. Страхов. – М.: Энергия, 1975. – 752 с.
58. Зедгинидзе, И. Г. Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных систем / И.Г. Зедгинидзе. – М.: Наука, 1976. – 399 с.
59. Зекцер, Д.М. Уточненное выражение для магнитных проводимостей выпучивания поля / Д.М. Зекцер, М.Д. Зекцер // Электричество. – 1982. – № 8. – С. 69-70.
60. Зекцер, Д. М. Исследование сегментно-срезанной электромагнитной системы / Д.М.Зекцер // Известия вузов. Электромеханика. – 1989. – № 7. – С. 67-71.
61. Иванов, И. П. Проектный расчет герконовых реле / И.П. Иванов // Тр. ВНИИР, – 1980. – Вып. 11. – С. 12-16.

62. Иванов-Смоленский, А. В. Численные методы отыскания постоянных уравнений Кристоффеля-Шварца / А.В. Иванов-Смоленский, Ю.В. Абрамкин, М.А. Аванесов // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1978. – № 1. – С. 70-87.
63. Иванов-Смоленский, А. В. Универсальный численный метод моделирования электромеханических преобразователей и систем / А.В. Иванов-Смоленский, В.А. Кузнецов // Электричество. – 2000. – № 7. – С. 24-33.
64. Ивоботенко, Б. А. Планирование эксперимента в электромеханике / Б.А. Ивоботенко, Н.Ф. Ильинский, И.П. Копылов. – М.: Энергия, 1975. – 184 с.
65. Ильинский, Н. Ф. Модели электромеханических устройств и систем в задачах синтеза / Н.Ф. Ильинский, Б.А. Ивоботенко, И.П. Копылов, А.И. Бертинов, Дж.А. Аветисян, В.С. Соколов, В.Х. Хан. // Электричество. – 1973. – № 3. – С. 36-40.
66. Ильинский, Н. Ф. Теория подобия в электромеханике (обзор) / Н.Ф. Ильинский, М.А. Попов // Электричество. – 1988. – № 5. – С. 1-7.
67. Кадыков, В. К. Потокраспределение в клапанных электромагнитных системах постоянного тока с сегментными полюсными наконечниками / В.К. Кадыков // Вестник Чувашского университета. – 2006. – № 2. – С. 236-243.
68. 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.
69. 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.
70. 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.
71. 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.

72. 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.

73. 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: Сборник научных трудов. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, – 2008. – С. 96-101.

74. 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.

75. Кадыков, В. К. Экспериментальные зависимости распределения магнитного потока и магнитодвижущей силы в клапанных электромагнитных системах с прямоугольными полюсными наконечниками / Ю.М. Зайцев, Н.В. Руссова, Г.П. Свинцов, В.К. Кадыков // Труды Академии электротехнических наук ЧР. – 2013. –№1. – С.40-45.

76. Кадыков, В.К. К моделированию статических электромагнитных характеристик электромагнита постоянного тока, элементы которого выполнены из различных марок магни-томягких 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.

77. 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.

78. 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.

79. Кадыков, В. К. Моделирование и синтез симметричных П-образных двухкатушечных электромагнитов постоянного напряжения с цилиндрическими сердечниками по частным критериям оптимальности / В.К. Кадыков, Н.В. Руссова, Г.П. Свинцов // Релейная защита, низковольтная аппаратура управления, регулируемый электропривод: материалы науч.-техн. конф., посвященной 40-летию ОАО «ВНИИР». – Чебоксары, 2001. – С. 153-158.

80. 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.

81. Кадыков, В. К. Обобщенные статические электромагнитные характеристики симметричных П-образных двухкатушечных электромагнитов постоянного тока с призматическими сердечниками и поступательно перемещающимися якорями / В.К. Кадыков, Н.В. Руссова, Г.П. Свинцов // Труды Академии электротехнических наук Чувашской республики. – 2000. – № 1. – С. 29-36.

82. Кадыков, В. К. Оптимальные соизмерности в П-образных магнитных системах приводных электромагнитов постоянного напряжения магнитных пускателей / В.К. Кадыков, Н.В. Руссова, Г.П. Свинцов // Элмаш-2002: труды симпозиума, Москва, 7-11 окт. 2002. – М.: МА «Интерэлектромаш», 2002. – С. 158-161.

83. 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.

84. 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.

85. 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 Всерон. науч.-техн. конф. с международным участием. – Тольятти, 2007. – Часть II. – С. 243-245.

86. 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).

87. 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.

88. Калленбах, Э. К расчету силы тяги электромагнита постоянного тока с учетом нелинейности магнитной цепи / Э. Калленбах, А.Г. Никитенко // Известия вузов. Электромеханика. – 1978. – № 10. – С. 1083-1086.

89. Клименко, Б. В. Асимметричный нагрев обмоток в стационарном режиме / Б.В. Клименко // Известия вузов. Электромеханика. – 1971. – № 9. – С. 99-100.

90. Клименко, Б. В. Применение численных методов к расчету проводимостей немагнитных зазоров для трехмерных полей / Б.В. Клименко, А.А. Чепелюк // Вестник НТУ ХПИ. – 2001. – № 17. – С. 80-82.
91. Ковалев, О. Ф. Синтез оптимальных электромагнитных механизмов с заданной потребляемой мощностью / О.Ф. Ковалев, В.П. Гринченков // Электротехника. – 2000. – № 7. – С. 22-24.
92. Костюкова, Т. П. Многокритериальная оптимизация и проектирование индуктивных элементов вторичных источников питания / Т.П. Костюкова // Электротехника. – 1997. – № 7. – С. 25-27.
93. Костюкова, Т. П. Обоснование проектных решений при многокритериальной оптимизации параметров высоковольтных трансформаторов для электротехнологии / Т.П. Костюкова, Ю.И. Махин, Л.Э. Рогинская // Электричество. – 1998. – № 8. – С. 15-18.
94. Кобленц, М. Г. Выбор оптимальных соотношений меди и стали в аппаратах постоянного тока / М.Г. Кобленц // Вести электропромышленности. – 1961. – № 11. – С. 46-50.
95. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1974. – 831 с.
96. Коробков, Ю. С. Расчет электромеханических устройств электромагнитного типа / Ю.С. Коробков. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – 52 с.
97. Кузнецов, В.А. Направления развития электромеханики на рубеже двух тысячелетий / В.А. Кузнецов // Промышленная энергетика. – 2000. – № 5. – С. 14-20.
98. Курбатов, П. А. Численный расчет электромагнитных полей / П.А. Курбатов, С.А. Аринчин. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 167 с.
99. Курносов, А. В. К выбору оптимальных соизмерностей основных размеров электромагнитов постоянного тока клапанного типа / А.В. Курносов, Д.В. Орлов // Известия вузов. Электромеханика. – 1966. – № 1. – С. 68-74.

100. Крылов, А. Ю. Синтез оптимальных клапанных магнитных систем с круглыми полюсными наконечниками для приводных электромагнитов постоянного напряжения, работающих в продолжительном режиме / А.Ю. Крылов, Н.В. Руссова, Г.П. Свинцов, А.В. Приказчиков // Электрические аппараты и электротехнические комплексы и системы: материалы междунар. науч.-практ. конф., Ульяновск, 22-25 мая 2012. – Ульяновск: УЛГТУ, 2011. – Т. 1. – С. 63-66.
101. Казаков, Л. А. Оптимальные соотношения размеров магнитопровода силовых электромагнитов постоянного тока / Л.А. Казаков, В.Ю. Кончаловский // Электричество. – 1964. – № 10. – С. 20-26.
102. Казаков, Л. А. Расчет размеров катушки силовых электромагнитов постоянного тока на заданный тепловой режим / Л.А. Казаков // Электричество. – 1966. – № 2. – С. 87-88.
103. Казаков, Л. А. Электромагнитные устройства РЭА: Справочник / Л.А. Казаков. – М.: Радио и связь, 1991. – 352 с.
104. Курносков, А. В. К выбору оптимальных соразмерностей основных размеров электромагнитов постоянного тока клапанного типа / А.В. Курносков, Д.В. Орлов // Известия вузов. Электромеханика. – 1966. – № 1. – С. 68-74.
105. Курносков, А. В. О проектировании электромагнитов постоянного тока с оптимальным соотношением меди и стали / А.В. Курносков // Тр. Моск. энерг. ин-та. – М., 1964. – Вып. 56. – С. 341-351.
106. Лебедев, А. Н. О формулировке π -теоремы теории подобия / А.Н. Лебедев // Известия вузов. Энергетика. – 1972. – № 10. – С. 46-50.
107. Лебедев, А. Н. Простейший формальный метод определения критериев подобия при анализе размерностей / А.Н. Лебедев // Известия вузов. Энергетика. – 1977. – № 4. – С. 8-12.
108. Лебедев, А. Н. Простейший формальный метод определения критериев подобия при анализе размерностей / А.Н. Лебедев // Известия вузов. Энергетика. – 1977. – № 4. – С. 8-12.

109. Лебедев, А. Н. Теория моделирования и ее методы / А.Н. Лебедев // Электронное моделирование. – 1980. – № 3. – С. 3-11.
110. Лебедев, А. Н. Методы определения критериев подобия путем анализа размерностей определяющих величин / А.Н. Лебедев // Электронное моделирование. – 1983. – № 5. – С. 3-8.
111. Лебедев, А. Н. Простейший метод определения критериев подобия путем анализа размерностей / А.Н. Лебедев // Известия вузов. Электромеханика. – 1984. – № 8. – С. 122-123.
112. Лобов, Б. Н. Проектирование электромагнита с заданной тяговой характеристикой / Б.Н. Лобов, А.Г. Никитенко // Известия вузов. Электромеханика. – 1981. – № 8. – С. 315-319.
113. Лобов, Б. Н. Расчет стационарного температурного поля электромагнита П-образного типа постоянного тока / Б.Н. Лобов // Известия вузов. Электромеханика. – 1979. – № 6. – С. 536-540.
114. Лысов, Н. Е. Об оптимальных геометрических соотношениях основных размеров электромагнитов постоянного тока / Н.Е. Лысов, А.В. Курносков // Электричество. – 1965. – № 8. – С. 33-35.
115. Любчик, М. А. К расчету проводимости рабочего зазора электромагнитов постоянного тока с внешним якорем / М.А. Любчик // Вестник электропромышленности. – 1963. – №6.
116. Любчик, М. А. Оптимальное проектирование силовых электромагнитных механизмов / М. А. Любчик. – М. : Энергия, 1974. – 392 с.
117. Любчик, М. А. Оптимизация электромагнитов по ограниченному числу параметров / М.А. Любчик, С.Л. Дун // Электротехническая промышленность. Сер. Аппараты низкого напряжения. – 1970. – Вып. 3. – С. 8-10.
118. Любчик, М. А. Анализ особенностей процессов теплоотдачи обмоток электрических аппаратов и устройств автоматики / М.А. Любчик, Б.В. Клименко, Б.Г. Грищенко // Известия вузов. Электромеханика. – 1971. – № 8. – С. 893-899.

119. Любчик, М. А. Определение потокосцепления силовых электромагнитов / М.А. Любчик, Б.В. Клименко // Электротехника. – 1971. – № 9. – С. 57-58.
120. Любчик, М. А. Силовые электромагниты аппаратов и устройств автоматики постоянного тока (Расчет и элементы проектирования) / М.А. Любчик. – М.: Энергия, 1968. – 152 с.
121. Макарычев, Ю. М. Электромагнитные силы в электрических аппаратах / Ю.М. Макарычев, С.Ю. Рыжов. – М.: МЭИ, 1984. – 88 с.
122. Макарычев, Ю. М. Проектирование электромагнитов: этапы, методы, модели / Ю.М. Макарычев, С.Ю. Рыжов, Т.П. Жидарева // Электричество. – 1994. – № 2. – С. 46-51.
123. Максимов, А. И. Оптимальные размеры цилиндрических катушек для электромагнитов постоянного тока / А.И. Максимов // Электротехника. – 1968. – № 4. – С. 52-54.
124. Михеев, М. А. Основы теплопередачи / М.А. Михеев, И.М. Михеева. – М.: Энергия, 1977. – 344 с.
125. Могилевский, Г. В. К расчету электромагнитов с внешним поворотным якорем / Г.В. Могилевский // Известия вузов. Электромеханика. – 1956. – № 12. – С. 40-42.
126. Могилевский, Г. В. К расчету электромагнитов / Г.В. Могилевский // Известия вузов. Электромеханика. – 1959. – № 8. – С. 71-78.
127. Могилевский, Г. В. Применение теории подобия к проектированию электромагнитов / Г.В. Могилевский // Вестник электропромышленности. – 1959. – № 4. – С. 34-38.
128. Некрасов, С. А. Интервальные методы и алгоритмы глобальной нелинейной оптимизации и их применение в области проектирования электротехнических устройств / С.А. Некрасов // Электричество. – 2001. – № 8. – С. 43-49.

129. Некрасов, С. А. Применение интервальных и двусторонних методов для решения задачи оптимизации электромагнитов в случае неточно заданных исходных данных / С.А. Некрасов // *Электричество*. – 2002. – № 7. – С. 54-58.

130. Никитенко, А. Г. Математическое моделирование и автоматизация проектирования тяговых электрических аппаратов / А.Г. Никитенко, В.Г. Щербаков, Б.Н. Лобов, Л.С. Лобанова; Под ред. А.Г. Никитенко, В.Г. Щербакова. – М.: Высш. школа, 1996. – 544 с.

131. Никитенко, А. Г. О выборе расчетных значений индукции при проектировании электромагнитов постоянного тока / А.Г. Никитенко // *Известия вузов. Электромеханика*. – 1974. – № 3. – С. 278-284.

132. Никитенко, А. Г. Проектирование оптимальных электромагнитных механизмов / А.Г. Никитенко. – М.: Энергия, 1974. – 135 с.

133. Никитенко, А. Г. Критерии оптимальности и классификация электромагнитных механизмов / А.Г. Никитенко // *Электротехническая промышленность. Сер. Аппараты низкого напряжения*. – 1979. – Вып. 7 (83). – С. 10-11.

134. Никитенко, А. Г. Автоматизированное проектирование электрических аппаратов / А. Г. Никитенко. – М.: Высш. шк., 1983. – 192 с.

135. Никитенко, А. Г. Расчет температурных полей электрических аппаратов методом конечных элементов / А.Г. Никитенко, В.П. Гринченков, О.Ф. Ковалев // *Известия вузов. Электромеханика*. – 1984. – № 5. – С. 86-92.

136. Никитенко, А. Г. Расчет электромагнитных механизмов на вычислительных машинах / А.Г. Никитенко, И.И. Пеккер. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 216 с.

137. Никитенко, А. Г. Аналитический обзор методов расчета магнитных полей электрических аппаратов / А.Г. Никитенко, Ю.А. Бахвалов, В.Г. Щербаков // *Электротехника*. – 1997. – № 1. – С. 15-19.

138. Никитенко, А. Г. Электромагнитные механизмы. Анализ и синтез / А.Г. Никитенко, Ю.А. Бахвалов, Н.И. Горбатенко. – М.: Высш. шк., 1998. – 330 с.

139. Никитенко, А. Г. Аналитический обзор критериев качества и эффективности электромагнитных механизмов / А.Г. Никитенко // Известия вузов. Электромеханика. – 1984. – № 5. – С. 86-92.
140. Орлов, Д. В. О проектировании электромагнитного реле времени минимального веса и стоимости / Д.В. Орлов // Известия вузов. Электромеханика. – 1965. – № 11. – С. 1286-1293.
141. Пашковский, А. В. Двухфазная модель в идентификации процессов теплообмена в элементах электрических машин и аппаратов / А.В. Пашковский // Известия вузов. Электромеханика. – 1988. – № 7. – С. 30-33.
142. Пашковский, А. В. Комбинированный метод конечных элементов для расчета температурных полей электрических машин и его программная реализация / А.В. Пашковский // Известия вузов. Электромеханика. – 1988. – № 8. – С. 10-15.
143. Пеккер, И.И. Безразмерные характеристики для расчета броневого электромагнита, работающего в кратковременном режиме / И.И. Пеккер // Известия вузов. Электромеханика. – 1959. – № 7. – С. 45-47.
144. Пеккер, И. И. Экспериментальные способы нахождения зависимости потокосцепления тягового электромагнита от зазора // Известия вузов. Электромеханика. – 1961. – № 2. – С. 159-161.
145. Пеккер, И. И. Физическое моделирование электромагнитных механизмов / И.И. Пеккер. – М.: Энергия, 1969. – 64 с.
146. Пик, Р. Расчет коммутационных реле / Р. Пик и Г. Уэйгар ; Пер. с англ. под ред. М.И. Витенберга и А.В. Гордона. – М.- Л.: Госэнергоиздат, 1961. – 584 с.
147. Пискунов, Н. С. Дифференциальное и интегральное исчисление для вузов / Н.С. Пискунов. – М.: Наука, 1965. – Т. I. – 584 с.
148. Поспелов, Е. П. Применение сплайнов для расчета характеристик электромагнитных механизмов / Е.П. Поспелов // Известия вузов. Энергетика. – 1982. – № 1. – С. 92-94.

149. Пульников, А. А. Метод решения систем уравнений нелинейных электрических и магнитных цепей / А.А. Пульников // Электричество. – 1998. – № 3. – С. 47-57.

150. Приказчиков, А. В. Расчет проводимостей воздушных промежутков полей рассеяния клапанных электромагнитов / А.В. Приказчиков, Н.В. Руссова, Г.П. Свинцов // Электрические и электронные аппараты: Сборник научных трудов. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2008. – С. 114-119.

151. Приказчиков, А. В. К проектному расчету клапанных электромагнитов постоянного напряжения с круглыми полюсными наконечниками / А.В. Приказчиков, Н.В. Руссова, Г.П. Свинцов // Труды Академии электротехнических наук Чувашской Республики. – 2009. – № 1. – С. 59-66.

152. Романов, Г. М. Применение генетических алгоритмов в численных исследованиях электрических аппаратов / Г.М. Романов // Вестник НТУ ХПИ. – 2001. – № 17. – С. 123-126.

153. Руссова, Н. В. Экспериментальные обобщенные электромагнитные характеристики П-образных двухкатушечных электромагнитов постоянного тока с внешним прямоходовым якорем / Н.В. Руссова, Г.П. Свинцов // Известия вузов. Электромеханика. – 1998. – № 5. – С. 5-6.

154. Руссова, Н. В. Математическое моделирование тепловых параметров электромагнитов постоянного тока и напряжения / Н.В. Руссова // Информационные технологии в электро-технике и электроэнергетике: Материалы IV Всерос. науч.-техн. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2002. – С. 145–149.

155. Руссова, Н. В. Моделирование тепловых параметров симметричных двухкатушечных П-образных электромагнитов / Н.В. Руссова // Известия Тульского государственного университета. Серия Проблемы управления электротехническими объектами. – 2002. – Вып. 2. – С. 23-24.

156. Руссова, Н. В. Синтез оптимальных симметричных П-образных двухкатушечных электромагнитов с цилиндрическими сердечниками / Н.В. Руссова // Известия вузов. Электромеханика. – 2002. – № 3. – С. 30-34.

157. Руссова, Н. В. Синтез оптимальных симметричных П-образных двухкатушечных электромагнитов постоянного напряжения с призматическими сердечниками при повторно-кратковременном режиме работы / Н.В. Руссова, Г.П. Свинцов, В.Н. Шоффа // Электротехника. – 2002. – № 2. – С. 55-60.

158. Руссова, Н.В. Моделирование и синтез П-образных электромагнитов постоянного тока и напряжения: учеб. пособие / Н.В. Руссова, Г.П. Свинцов. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2003. – 228 с.

159. Руссова, Н. В. К расчету геометрических размеров обмотки электромагнитных аппаратов постоянного тока / Н.В. Руссова, Ю.В. Софронов // Труды Академии электротехнических наук Чувашской Республики. – 2003. – № 4. – С. 62-66.

160. Сахаров, П. В. Проектирование электрических аппаратов / П.В. Сахаров. – М.: Энергия, 1971. – 560 с.

161. Свинцов, Г. П. Модернизированный метод вероятных путей потока Ротерса / Г.П. Свинцов // Известия вузов. Электромеханика. – 1995. – № 5-6. – С. 47-56.

162. Свинцов, Г. П. Расчет проводимости плоскопараллельных магнитных полей в воздушных зазорах модифицированным методом Ротерса / Г.П. Свинцов // Известия вузов. Электромеханика. – 1996. – № 1-2. – С. 38-47.

163. Свинцов, Г. П. Электромагнитные контакторы и пускатели: учеб. пособие / Г.П. Свинцов. – Чебоксары: Изд. Чуваш. ун-та, 1998. – 260 с.

164. Смирнов, Ю. В. Об эквивалентном тепловом сопротивлении электромагнитных устройств малой мощности / Ю.В. Смирнов // Электротехника. – 1971. – № 6. – С. 31-34.

165. Смирнов, Ю. В. Тепловой расчет обмоток постоянного тока с учетом изменения их сопротивления при нагреве / Ю.В. Смирнов // Электричество. – 1982. – № 8. – С. 70-71.

166. Смирнов, Ю. В. Тепловой расчет электромагнитных устройств малой мощности / Ю.В. Смирнов // Электротехника. – 1975. – № 12. – С. 52-55.
167. Сотсков, Б. С. Основы расчета и проектирования электромеханических элементов автоматических и телемеханических устройств / Б.С. Сотсков. – М.-Л.: Энергия, 1965. – 576 с.
168. Софронов, Ю. В. Проектирование электромеханических аппаратов автоматики : учеб. пособие / Ю.В. Софронов, Г.П. Свинцов, Н.Н. Николаев. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 1986. – 88 с.
169. Справочник по электротехническим материалам. Т. 3 / Под ред. Ю.В. Корицкого, В.В. Пасынкова, Б.М. Тареева. – Л.: Энергоатомиздат, 1988.– 728 с.
170. Теория электрических аппаратов: учебник для вузов / Г.Н. Александров и [др.]; Под ред. проф. Г.Н. Александрова. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2000. – 540 с.
171. Тихонов, Д. Ю. Комбинированный метод расчета нестационарных плоскопараллельных электромагнитных полей / Д.Ю. Тихонов, А.Н. Ткачев, Й. Центнер // Известия вузов. Электромеханика. – 2002. – № 4. – С. 39-48.
172. Турчак, Л. И. Основы численных методов : учеб. пособие / Л.И. Турчак, П.В. Плотников. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Физматлит, 2003. – 304 с.
173. Ушаков, А. Н. О развитии метода вторичных источников для расчета электромагнитного поля / А.Н. Ушаков, Н.Ю. Ушакова // Электричество. – 1998. – № 9. – С. 68-72.
174. Холланд, Д. Генетические алгоритмы / Джон Х. Холланд // В мире науки. - 1992. – № 9-10. – С. 32-40.
175. Шоффа, В. Н. Критерии для проектирования электромагнитов постоянного тока. // Доклады научно-технической конференции по итогам научно-исследовательских работ за 1964-65 гг. Секция электромеханическая. Подсекция электроаппаратостроения / В.Н. Шоффа. – М.: МЭИ, 1965. – С. 165-178.

176. Шоффа В. Н. Проектный метод расчета электромагнитов постоянного тока клапанного типа / В.Н. Шоффа // Электротехника. – 1968. – № 5. – С. 41-45.
177. Шоффа, В. Н. Применение теории подобия и физического моделирования при проектировании герконов / В.Н. Шоффа // Электротехника. – 1972. – № 11. – С. 42-47.
178. Шоффа, В. Н. К расчету разомкнутых магнитных систем методами теории цепей / В.Н. Шоффа // Электричество. – 1982. – № 1. – С. 14-19.
179. Шоффа, В. Н. Анализ полей магнитных систем электрических аппаратов / В.Н. Шоффа. – М.: МЭИ, 1994. – 112 с.
180. Шоффа, В. Н. Методы расчета магнитных систем постоянного тока / В.Н. Шоффа. – М.: МЭИ, 1998. – 40 с.
181. Софронов, Ю. В. Расчет и проектирование электромагнитов переменного тока / Ю.В. Софронов. – Чебоксары: Изд-во. Чуваш. ун-та, 1980. – 72 с.
182. Софронов, Ю. В. Электромеханические аппараты автоматики / Ю.В. Софронов. – Чебоксары: Изд-во. Чуваш. ун-та, 1982. – 104 с.
183. Софронов, Ю. В. Тепловой расчет катушек электрических аппаратов постоянного тока: Руководство по выполнению курсовых и дипломных проектов / Ю.В. Софронов, Н.В. Руссова – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2005. – 48 с.
184. Ротерс, Г. Электромагнитные механизмы / Г. Ротерс; Пер. с англ. А.В. Гордона, А.Г. Сливинской под ред. А.Я. Буйлова – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1949. – 523 с.
185. Афанасьев, В. В. Расчет оптимального диаметра полюсного наконечника и обмоточных данных клапанных электромагнитов постоянного тока с круглыми полюсными наконечниками / В.В. Афанасьев, А.В. Приказчиков, Н.В. Руссова, Г.П. Свинцов // Электротехника. – 2012. – № 5. – С. 34-38.
186. Павленко, А. В. Проектирование электромагнитов с заданными динамическими параметрами / А.В. Павленко, В.П. Гринченков, Н.П. Беляев, Э. Калленбах // Известия вузов. Электромеханика. – 2002. – № 4. – С. 76-80.

187. Павленко, А. В. Комплексное проектирование электромагнитных приводов с заданными динамическими характеристиками / А.В. Павленко, В.П. Гринченков, А.А. Гуммель, И.А. Павленко, Э. Калленбах // Известия вузов. Электротехника. – 2007. – № 4. – С. 22-30.
188. Дьяконов, В. П. Справочник по алгоритмам и программам на языке Бейсик для персональных ЭВМ / В.П. Дьяконов. – М.: Наука, 1987. – 240 с.
189. LOVATO S.P.A. Componenti e sistemi per automazione: General catalogue. – 1993.
190. SIEMENS. Niederspannungs-Schaltgerate und-Systeme: Der Katalog. – 2000-2001.
191. TELEMECANIQUE. Industrial Control and Automation Components. – 1994-1995.
192. Birli, O. Grobdimensionierung magnetischer antriebssysteme mit dem programmsystem seam / O. Birli, E. Kallenbach // Известия вузов. Электромеханика, 2002. – № 4. – С. 7-14.
193. Kallenbach, E. Sturgeon – an existing software system for the completely CAD of elec-tromagnets / E. Kallenbach, O. Birli, F. Dronszyk, K. Feindt, S. Spiller, R. Walter // International Conference on engineering design (ICED 97). Tampere Finland, 19-21 Aug. – 1997.
194. Goldberg, D. E. Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning / D.E. Goldberg. – Addison-Wesley, Reading, MA, 1989. – 105 p.
195. Каталог Siemens LV 03 2010. Коммутационные аппараты – контакторы и контакторные сборки.
196. CHINT Fuse. Travel switch. Combination switch/ Wiring terminal board. Controller. Thruster. Catalogue 2003/2004 ZT.No.2004066E.
197. Основной каталог ABB ISBC100122C0201 Контактторы. Аппараты защиты электродвигателей. Аксессуары.
198. Rade Koncar Low-Voltage Switchgear Catalogue 2010-2011 8(01.2010).
199. GF Industrial Systems Section 5 Rainbow Catalog.

200. Hubbell Industrial controls, Inc. DC Magnetic Contactor 5210. Crane and Mill Duty. Catalog & Price List 5210. April 2013, Replaces Aug. 1012.
201. Instructions Hubbell contactors 5210. Service and Repair Parts. Publication Number: 101. January 1988. Repl: March 1983.
202. Yukawa control. Low-voltage clapper type magnetic contactors type HU-e. Printed in Japan Joule 2005 75-5 0.3 WA.
203. Каталог Eaton CA08105001T F Motor Control Electrical Aftermarket Products and Services . June 2008. Aftermarket Solutions, Ref. No. [243].
204. Volume 5- Motor Control and Protection CA08100006E-September 2012.
205. Каталог Fuji Electric FA Components & Systems Co., Ltd./D & C Catalog Magnetic contactors and starters. Solid-state contactors. Printed in Japan 2007-9/10 FIS DEC1901b.
206. Schaltbau. Multipole DC and AC cam contactors Series C152 ... C159. B 90. en. B1927/0905/1.0 Printed in Germany. Issued 05-2009.
207. Schaltbau. Double pole NO contactors C294 Series. B 294. tn. B1894 / 0804 / 1.0 Printed in Germany. Issued 06-2010.
208. ISBC104112C0201 ABB. Low Voltage Products. Main catalogue. R., Series Contactors.
209. Elsfaer, A. Schnelle magnetische Aktoren für die Impulsauf-ladung von Hobkolben-motoren / A. Elsfaer, W. Schilling, J. Schmidt // 47th Wissenschaftliches Kolloquium. – Technische Universität Ilmenau. – 23-26 september 2002.

Приложение А

Таблица А.1 - План эксперимента для исследования магнитных систем с сегментным полюсным наконечником

Порядковый номер опыта	$X_1(H_0)$, мм	$X_2(d_{\text{п}})$, мм	$X_3(h_{\text{п}})$, мм	$X_4(c)$, мм	$X_5(A_0)$, Тл	$X_6(B_0)$, Тл
1	-1 (37)	-1 (38,76)	-1 (31,16)	-1 (30,66)	-1 (9)	-1 (1,044)
2	+1 (73)	-1 (38,76)	-1 (31,16)	-1 (30,66)	-1 (9)	-1 (1,044)
3	-1 (37)	+1 (51,24)	-1 (41,20)	-1 (30,66)	-1 (9)	-1 (1,044)
4	+1 (73)	+1 (51,24)	-1 (41,20)	-1 (30,66)	-1 (9)	-1 (1,044)
5	-1 (37)	-1 (38,76)	+1 (36,66)	-1 (30,66)	-1 (9)	-1 (1,044)
6	+1 (73)	-1 (38,76)	+1 (36,66)	-1 (30,66)	-1 (9)	-1 (1,044)
7	-1 (37)	+1 (51,24)	+1 (48,47)	-1 (30,66)	-1 (9)	-1 (1,044)
8	+1 (73)	+1 (51,24)	+1 (48,47)	-1 (30,66)	-1 (9)	-1 (1,044)
9	-1 (37)	-1 (38,76)	-1 (31,16)	+ (39,74)	-1 (9)	-1 (1,044)
10	+1 (73)	-1 (38,76)	-1 (31,16)	+ (39,74)	-1 (9)	-1 (1,044)
11	-1 (37)	+1 (51,24)	-1 (41,20)	+ (39,74)	-1 (9)	-1 (1,044)
12	+1 (73)	+1 (51,24)	-1 (41,20)	+ (39,74)	-1 (9)	-1 (1,044)
13	-1 (37)	-1 (38,76)	+1 (36,66)	+ (39,74)	-1 (9)	-1 (1,044)
14	+1 (73)	-1 (38,76)	+1 (36,66)	+ (39,74)	-1 (9)	-1 (1,044)
15	-1 (37)	+1 (51,24)	+1 (48,47)	+ (39,74)	-1 (9)	-1 (1,044)
16	+1 (73)	+1 (51,24)	+1 (48,47)	+ (39,74)	-1 (9)	-1 (1,044)
17	-1 (37)	-1 (38,76)	-1 (31,16)	-1 (30,66)	+1 (15)	-1 (1,044)
18	+1 (73)	-1 (38,76)	-1 (31,16)	-1 (30,66)	+1 (15)	-1 (1,044)
19	-1 (37)	+1 (51,24)	-1 (41,20)	-1 (30,66)	+1 (15)	-1 (1,044)
20	+1 (73)	+1 (51,24)	-1 (41,20)	-1 (30,66)	+1 (15)	-1 (1,044)
21	-1 (37)	-1 (38,76)	+1 (36,66)	-1 (30,66)	+1 (15)	-1 (1,044)
22	+1 (73)	-1 (38,76)	+1 (36,66)	-1 (30,66)	+1 (15)	-1 (1,044)
23	-1 (37)	+1 (51,24)	+1 (48,47)	-1 (30,66)	+1 (15)	-1 (1,044)
24	+1 (73)	+1 (51,24)	+1 (48,47)	-1 (30,66)	+1 (15)	-1 (1,044)
25	-1 (37)	-1 (38,76)	-1 (31,16)	+ (39,74)	+1 (15)	-1 (1,044)
26	+1 (73)	-1 (38,76)	-1 (31,16)	+ (39,74)	+1 (15)	-1 (1,044)
27	-1 (37)	+1 (51,24)	-1 (41,20)	+ (39,74)	+1 (15)	-1 (1,044)
28	+1 (73)	+1 (51,24)	-1 (41,20)	+ (39,74)	+1 (15)	-1 (1,044)
29	-1 (37)	-1 (38,76)	+1 (36,66)	+ (39,74)	+1 (15)	-1 (1,044)
30	+1 (73)	-1 (38,76)	+1 (36,66)	+ (39,74)	+1 (15)	-1 (1,044)
31	-1 (37)	+1 (51,24)	+1 (48,47)	+ (39,74)	+1 (15)	-1 (1,044)
32	+1 (73)	+1 (51,24)	+1 (48,47)	+ (39,74)	+1 (15)	-1 (1,044)
33	-1 (37)	-1 (38,76)	-1 (31,16)	-1 (30,66)	-1 (9)	+1 (1,556)
34	+1 (73)	-1 (38,76)	-1 (31,16)	-1 (30,66)	-1 (9)	+1 (1,556)
35	-1 (37)	+1 (51,24)	-1 (41,20)	-1 (30,66)	-1 (9)	+1 (1,556)
36	+1 (73)	+1 (51,24)	-1 (41,20)	-1 (30,66)	-1 (9)	-1 (1,044)
37	-1 (37)	-1 (38,76)	+1 (36,66)	-1 (30,66)	-1 (9)	-1 (1,044)
38	+1 (73)	-1 (38,76)	+1 (36,66)	-1 (30,66)	-1 (9)	-1 (1,044)
39	-1 (37)	+1 (51,24)	+1 (48,47)	-1 (30,66)	-1 (9)	-1 (1,044)
40	+1 (73)	+1 (51,24)	+1 (48,47)	-1 (30,66)	-1 (9)	-1 (1,044)

Продолжение таблицы А.1

Порядковый номер опыта	$X_1(H_0)$, мм	$X_2(d_{II})$, мм	$X_3(h_{II})$, мм	$X_4(c)$, мм	$X_5(A_0)$, Тл	$X_6(B_0)$, Тл
41	-1 (37)	-1 (38,76)	-1 (31,16)	+ (39,74)	-1 (9)	-1 (1,044)
42	+1 (73)	-1 (38,76)	-1 (31,16)	+ (39,74)	-1 (9)	-1 (1,044)
43	-1 (37)	+1 (51,24)	-1 (41,20)	+ (39,74)	-1 (9)	-1 (1,044)
44	+1 (73)	+1 (51,24)	-1 (41,20)	+ (39,74)	-1 (9)	-1 (1,044)
45	-1 (37)	-1 (38,76)	+1 (36,66)	+ (39,74)	-1 (9)	-1 (1,044)
46	+1 (73)	-1 (38,76)	+1 (36,66)	+ (39,74)	-1 (9)	-1 (1,044)
47	-1 (37)	+1 (51,24)	+1 (48,47)	+ (39,74)	-1 (9)	-1 (1,044)
48	+1 (73)	+1 (51,24)	+1 (48,47)	+ (39,74)	-1 (9)	-1 (1,044)
49	-1 (37)	-1 (38,76)	-1 (31,16)	-1 (30,66)	-1 (9)	-1 (1,044)
50	+1 (73)	-1 (38,76)	-1 (31,16)	-1 (30,66)	-1 (9)	-1 (1,044)
51	-1 (37)	+1 (51,24)	-1 (41,20)	-1 (30,66)	-1 (9)	-1 (1,044)
52	+1 (73)	+1 (51,24)	-1 (41,20)	-1 (30,66)	+1 (15)	-1 (1,044)
53	-1 (37)	-1 (38,76)	+1 (36,66)	-1 (30,66)	+1 (15)	-1 (1,044)
54	+1 (73)	-1 (38,76)	+1 (36,66)	-1 (30,66)	+1 (15)	-1 (1,044)
55	-1 (37)	+1 (51,24)	+1 (48,47)	-1 (30,66)	+1 (15)	-1 (1,044)
56	+1 (73)	+1 (51,24)	+1 (48,47)	-1 (30,66)	+1 (15)	-1 (1,044)
57	-1 (37)	-1 (38,76)	-1 (31,16)	+ (39,74)	+1 (15)	-1 (1,044)
58	+1 (73)	-1 (38,76)	-1 (31,16)	+ (39,74)	+1 (15)	-1 (1,044)
59	-1 (37)	+1 (51,24)	-1 (41,20)	+ (39,74)	+1 (15)	-1 (1,044)
60	+1 (73)	+1 (51,24)	-1 (41,20)	+ (39,74)	+1 (15)	-1 (1,044)
61	-1 (37)	-1 (38,76)	+1 (36,66)	+ (39,74)	+1 (15)	-1 (1,044)
62	+1 (73)	-1 (38,76)	+1 (36,66)	+ (39,74)	+1 (15)	-1 (1,044)
63	-1 (37)	+1 (51,24)	+1 (48,47)	+ (39,74)	+1 (15)	-1 (1,044)
64	+1 (73)	+1 (51,24)	+1 (48,47)	+ (39,74)	+1 (15)	-1 (1,044)
65	-1,761 (23,3)	0 (45)	0 (39,8)	0 (35,2)	0 (12)	0 (1,3)
66	+1,761 (86,7)	0 (45)	0 (39,8)	0 (35,2)	0 (12)	0 (1,3)
67	0 (55)	-1,761 (34)	0 (29,75)	0 (35,2)	0 (12)	0 (1,3)
68	0 (55)	+1,761 (56)	0 (49)	0 (35,2)	0 (12)	0 (1,3)
69	0 (55)	0 (45)	-1,761 (33,75)	0 (35,2)	0 (12)	0 (1,3)
70	0 (55)	0 (45)	+1,761 (45)	0 (35,2)	0 (12)	0 (1,3)
71	0 (55)	0 (45)	0 (39,8)	-1,761 (27,2)	0 (12)	0 (1,3)
72	0 (55)	0 (45)	0 (39,8)	+1,761 (43,2)	0 (12)	0 (1,3)
73	0 (55)	0 (45)	0 (39,8)	0 (35,2)	-1,761 (6,72)	0 (1,3)
74	0 (55)	0 (45)	0 (39,8)	0 (35,2)	+1,761(17,28)	0 (1,3)
75	0 (55)	0 (45)	0 (39,8)	0 (35,2)	0 (12)	-1,761 (0,85)
76	0 (55)	0 (45)	0 (39,8)	0 (35,2)	0 (12)	+1,761 (1,75)
77	0 (55)	0 (45)	0 (39,8)	0 (35,2)	0 (12)	0 (1,3)

В таблице А.1 в скобках приведены истинные значения величины геометрических размеров электромагнита и индукции в основании сердечника.

Таблица А.2 - План эксперимента для исследования магнитных систем с прямоугольным полюсным наконечником

Порядковый номер опыта	$X_1(H_0)$, мм	$X_2(b_{II})$, мм	$X_3(C_{II})$, мм	$X_4(c)$, мм	$X_5(A_0)$, Тл	$X_6(B_0)$, Тл
1	-1 (37)	-1 (38,3)	-1 (14,9)	-1 (30,6)	-1 (9)	-1 (1,04)
2	+1 (73)	-1 (38,3)	-1 (14,9)	-1 (30,6)	-1 (9)	-1 (1,04)
3	-1 (37)	+1 (56,2)	-1 (14,9)	-1 (30,6)	-1 (9)	-1 (1,04)
4	+1 (73)	+1 (56,2)	-1 (14,9)	-1 (30,6)	-1 (9)	-1 (1,04)
5	-1 (37)	-1 (38,3)	+1 (21,8)	-1 (30,6)	-1 (9)	-1 (1,04)
6	+1 (73)	-1 (38,3)	+1 (21,8)	-1 (30,6)	-1 (9)	-1 (1,04)
7	-1 (37)	+1 (56,2)	+1 (21,8)	-1 (30,6)	-1 (9)	-1 (1,04)
8	+1 (73)	+1 (56,2)	+1 (21,8)	-1 (30,6)	-1 (9)	-1 (1,04)
9	-1 (37)	-1 (38,3)	-1 (19,3)	+ (39,7)	-1 (9)	-1 (1,04)
10	+1 (73)	-1 (38,3)	-1 (19,3)	+ (39,7)	-1 (9)	-1 (1,04)
11	-1 (37)	+1 (56,2)	-1 (19,3)	+ (39,7)	-1 (9)	-1 (1,04)
12	+1 (73)	+1 (56,2)	-1 (19,3)	+ (39,7)	-1 (9)	-1 (1,04)
13	-1 (37)	-1 (38,3)	+1 (28,3)	+ (39,7)	-1 (9)	-1 (1,04)
14	+1 (73)	-1 (38,3)	+1 (28,3)	+ (39,7)	-1 (9)	-1 (1,04)
15	-1 (37)	+1 (56,2)	+1 (28,3)	+ (39,7)	-1 (9)	-1 (1,04)
16	+1 (73)	+1 (56,2)	+1 (28,3)	+ (39,7)	-1 (9)	-1 (1,04)
17	-1 (37)	-1 (38,3)	-1 (14,9)	-1 (30,6)	+1 (15)	-1 (1,04)
18	+1 (73)	-1 (38,3)	-1 (14,9)	-1 (30,6)	+1 (15)	-1 (1,04)
19	-1 (37)	+1 (56,2)	-1 (14,9)	-1 (30,6)	+1 (15)	-1 (1,04)
20	+1 (73)	+1 (56,2)	-1 (14,9)	-1 (30,6)	+1 (15)	-1 (1,04)
21	-1 (37)	-1 (38,3)	+1 (21,8)	-1 (30,6)	+1 (15)	-1 (1,04)
22	+1 (73)	-1 (38,3)	+1 (21,8)	-1 (30,6)	+1 (15)	-1 (1,04)
23	-1 (37)	+1 (56,2)	+1 (21,8)	-1 (30,6)	+1 (15)	-1 (1,04)
24	+1 (73)	+1 (56,2)	+1 (21,8)	-1 (30,6)	+1 (15)	-1 (1,04)
25	-1 (37)	-1 (38,3)	-1 (19,3)	+ (39,7)	+1 (15)	-1 (1,04)
26	+1 (73)	-1 (38,3)	-1 (19,3)	+ (39,7)	+1 (15)	-1 (1,04)
27	-1 (37)	+1 (56,2)	-1 (19,3)	+ (39,7)	+1 (15)	-1 (1,04)
28	+1 (73)	+1 (56,2)	-1 (19,3)	+ (39,7)	+1 (15)	-1 (1,04)
29	-1 (37)	-1 (38,3)	+1 (28,3)	+ (39,7)	+1 (15)	-1 (1,04)
30	+1 (73)	-1 (38,3)	+1 (28,3)	+ (39,7)	+1 (15)	-1 (1,04)
31	-1 (37)	+1 (56,2)	+1 (28,3)	+ (39,7)	+1 (15)	-1 (1,04)
32	+1 (73)	+1 (56,2)	+1 (28,3)	+ (39,7)	+1 (15)	-1 (1,04)
33	-1 (37)	-1 (38,3)	-1 (14,9)	-1 (30,6)	-1 (9)	+1 (1,55)
34	+1 (73)	-1 (38,3)	-1 (14,9)	-1 (30,6)	-1 (9)	+1 (1,55)
35	-1 (37)	+1 (56,2)	-1 (14,9)	-1 (30,6)	-1 (9)	+1 (1,55)
36	+1 (73)	+1 (56,2)	-1 (14,9)	-1 (30,6)	-1 (9)	+1 (1,55)
37	-1 (37)	-1 (38,3)	+1 (21,8)	-1 (30,6)	-1 (9)	+1 (1,55)
38	+1 (73)	-1 (38,3)	+1 (21,8)	-1 (30,6)	-1 (9)	+1 (1,55)
39	-1 (37)	+1 (56,2)	+1 (21,8)	-1 (30,6)	-1 (9)	+1 (1,55)
40	+1 (73)	+1 (56,2)	+1 (21,8)	-1 (30,6)	-1 (9)	+1 (1,55)

Продолжение таблицы А.2

Порядковый номер опыта	$X_1(H_0)$, мм	$X_2(b_{II})$, мм	$X_3(C_{II})$, мм	$X_4(c)$, мм	$X_5(A_0)$, Тл	$X_6(B_0)$, Тл
41	-1 (37)	-1 (38,3)	-1 (19,3)	+ (39,7)	-1 (9)	+1 (1,55)
42	+1 (73)	-1 (38,3)	-1 (19,3)	+ (39,7)	-1 (9)	+1 (1,55)
43	-1 (37)	+1 (56,2)	-1 (19,3)	+ (39,7)	-1 (9)	+1 (1,55)
44	+1 (73)	+1 (56,2)	+1 (28,3)	+ (39,7)	-1 (9)	+1 (1,55)
45	-1 (37)	-1 (38,3)	+1 (28,3)	+ (39,7)	-1 (9)	+1 (1,55)
46	+1 (73)	-1 (38,3)	+1 (28,3)	+ (39,7)	-1 (9)	+1 (1,55)
47	-1 (37)	+1 (56,2)	+1 (28,3)	+ (39,7)	-1 (9)	+1 (1,55)
48	+1 (73)	+1 (56,2)	-1 (14,9)	+ (39,7)	-1 (9)	+1 (1,55)
49	-1 (37)	-1 (38,3)	-1 (14,9)	-1 (30,6)	-1 (9)	+1 (1,55)
50	+1 (73)	-1 (38,3)	-1 (14,9)	-1 (30,6)	-1 (9)	+1 (1,55)
51	-1 (37)	+1 (56,2)	-1 (14,9)	-1 (30,6)	-1 (9)	+1 (1,55)
52	+1 (73)	+1 (56,2)	+1 (21,8)	-1 (30,6)	+1 (15)	+1 (1,55)
53	-1 (37)	-1 (38,3)	+1 (21,8)	-1 (30,6)	+1 (15)	+1 (1,55)
54	+1 (73)	-1 (38,3)	+1 (21,8)	-1 (30,6)	+1(15)	+1 (1,55)
55	-1 (37)	+1 (56,2)	+1 (21,8)	-1 (30,6)	+1 (15)	+1 (1,55)
56	+1 (73)	+1 (56,2)	+1 (21,8)	-1 (30,6)	+1(15)	+1 (1,55)
57	-1 (37)	-1 (38,3)	-1 (19,3)	+ (39,7)	+1 (15)	+1 (1,55)
58	+1 (73)	-1 (38,3)	-1 (19,3)	+ (39,7)	+1(15)	+1 (1,55)
59	-1 (37)	+1 (56,2)	-1 (19,3)	+ (39,7)	+1 (15)	+1 (1,55)
60	+1 (73)	+1 (56,2)	-1 (19,3)	+ (39,7)	+1 (15)	+1 (1,55)
61	-1 (37)	-1 (38,3)	+1 (28,3)	+ (39,7)	+1 (15)	+1 (1,55)
62	+1 (73)	-1 (38,3)	+1 (28,3)	+ (39,7)	+1 (15)	+1 (1,55)
63	-1 (37)	+1 (56,2)	+1 (28,3)	+ (39,7)	+1 (15)	+1 (1,55)
64	+1 (73)	+1 (56,2)	+1 (28,3)	+ (39,7)	+1 (15)	+1 (1,55)
65	-1,761 (23,3)	0 (47,2)	0 (21,1)	0 (35,2)	0 (12)	0 (1,3)
66	+1,761 (86,7)	0 (47,2)	0 (21,1)	0 (35,2)	0 (12)	0 (1,3)
67	0 (55)	-1,761 (31,5)	0 (21,1)	0 (35,2)	0 (12)	0 (1,3)
68	0 (55)	+1,761 (63)	0 (21,1)	0 (35,2)	0 (12)	0 (1,3)
69	0 (55)	0 (47,2)	-1,761 (14,1)	0 (35,2)	0 (12)	0 (1,3)
70	0 (55)	0 (47,2)	+1,761 (28,2)	0 (35,2)	0 (12)	0 (1,3)
71	0 (55)	0 (47,2)	0 (16,3)	-1,761 (27,2)	0 (12)	0 (1,3)
72	0 (55)	0 (47,2)	0 (25,9)	+1,761 (43,2)	0 (12)	0 (1,3)
73	0 (55)	0 (47,2)	0 (21,1)	0 (35,2)	-1,761 (6,72)	0 (1,3)
74	0 (55)	0 (47,2)	0 (21,1)	0 (35,2)	+1,761(17,3)	0 (1,3)
75	0 (55)	0 (47,2)	0 (21,1)	0 (35,2)	0 (12)	-1,761 (0,85)
76	0 (55)	0 (47,2)	0 (21,1)	0 (35,2)	0 (12)	+1,761 (1,75)
77	0 (55)	0 (47,2)	0 (21,1)	0 (35,2)	0 (12)	0 (1,3)

В таблице А.2 в скобках приведены истинные значения величины геометрических размеров электромагнита и индукции в основании сердечника.

Таблица А.3 – Статические тяговые характеристики клапанного электромагнита с прямоугольным полюсным наконечником при $b_* = b_{\Pi} / b_{\text{як}} = 1$

Параметры			Электромагнитный момент $M_{\text{эм}}$, Нм					
b_*	$c_{\Pi*}$	F , А	$\varphi = 5^\circ$	$\varphi = 7^\circ$	$\varphi = 9^\circ$	$\varphi = 11^\circ$	$\varphi = 13^\circ$	$\varphi = 15^\circ$
1	0,4	400	0,075	0,051	0,036	0,036	0,021	0,019
		800	0,3	0,203	0,146	0,146	0,85	0,074
		1200	0,605	0,436	0,324	0,324	0,191	0,168
	0,45	400	0,077	0,053	0,039	0,039	0,023	0,02
		800	0,31	0,212	0,154	0,154	0,091	0,08
		1200	0,614	0,449	0,339	0,339	0,204	0,181
	0,5	400	0,079	0,055	0,04	0,04	0,024	0,021
		800	0,317	0,22	0,161	0,161	0,096	0,086
		1200	0,616	0,459	0,35	0,35	0,214	0,192
	0,55	400	0,08	0,056	0,041	0,041	0,025	0,023
		800	0,32	0,225	0,166	0,166	0,1	0,09
		1200	0,613	0,464	0,357	0,357	0,222	0,201
	0,6	400	0,08	0,057	0,042	0,042	0,026	0,023
		800	0,318	0,227	0,169	0,169	0,103	0,094
		1200	0,604	0,463	0,36	0,36	0,227	0,207
	0,65	400	0,079	0,057	0,043	0,043	0,026	0,024
		800	0,312	0,227	0,17	0,17	0,104	0,096
		1200	0,588	0,458	0,36	0,36	0,229	0,211
	0,7	400	0,077	0,056	0,042	0,042	0,026	0,024
		800	0,301	0,224	0,169	0,169	0,104	0,096
		1200	0,566	0,446	0,354	0,354	0,227	0,211
	0,75	400	0,073	0,054	0,041	0,041	0,026	0,024
		800	0,287	0,217	0,165	0,165	0,102	0,095
		1200	0,537	0,429	0,343	0,343	0,221	0,207
	0,8	400	0,069	0,052	0,04	0,04	0,025	0,023
		800	0,27	0,208	0,159	0,159	0,098	0,093
		1200	0,502	0,407	0,327	0,327	0,212	0,201

Таблица А.4 – Статические тяговые характеристики клапанного электромагнита с прямоугольным полюсным наконечником при $b_* = b_{\Pi}/b_{\text{як}} = 0,9$

Параметры			Электромагнитный момент $M_{\text{эм}}$, Нм					
b_*	$c_{\Pi*}$	F , А	$\varphi = 5^\circ$	$\varphi = 7^\circ$	$\varphi = 9^\circ$	$\varphi = 11^\circ$	$\varphi = 13^\circ$	$\varphi = 15^\circ$
0,9	0,4	400	0,076	0,051	0,036	0,027	0,021	0,018
		800	0,305	0,202	0,144	0,107	0,083	0,073
		1200	0,62	0,439	0,322	0,24	0,187	0,164
	0,45	400	0,079	0,053	0,038	0,028	0,022	0,02
		800	0,314	0,212	0,152	0,113	0,089	0,078
		1200	0,63	0,453	0,337	0,255	0,199	0,177
	0,5	400	0,08	0,055	0,04	0,03	0,023	0,021
		800	0,321	0,219	0,159	0,119	0,094	0,084
		1200	0,634	0,463	0,349	0,266	0,21	0,188
	0,55	400	0,081	0,056	0,041	0,031	0,024	0,022
		800	0,325	0,224	0,164	0,124	0,098	0,088
		1200	0,632	0,469	0,357	0,274	0,218	0,197
	0,6	400	0,081	0,57	0,042	0,032	0,025	0,023
		800	0,325	0,227	0,167	0,127	0,1	0,091
		1200	0,624	0,469	0,361	0,279	0,223	0,203
	0,65	400	0,08	0,057	0,042	0,032	0,025	0,023
		800	0,32	0,227	0,169	0,128	0,102	0,093
		1200	0,609	0,456	0,361	0,28	0,225	0,207
	0,7	400	0,078	0,056	0,042	0,032	0,025	0,023
		800	0,31	0,225	0,168	0,128	0,102	0,094
		1200	0,588	0,45	0,356	0,278	0,224	0,207
	0,75	400	0,075	0,055	0,041	0,031	0,025	0,023
		800	0,297	0,219	0,165	0,126	0,1	0,093
		1200	0,56	0,44	0,347	0,271	0,22	0,204
	0,8	400	0,071	0,053	0,04	0,03	0,024	0,023
		800	0,281	0,21	0,159	0,121	0,097	0,091
		1200	0,527	0,419	0,332	0,261	0,211	0,199

Таблица А.5 – Статические тяговые характеристики клапанного электромагнита с прямоугольным полюсным наконечником при $b_* = b_{\text{п}}/b_{\text{як}} = 0,8$

Параметры			Электромагнитный момент $M_{\text{эм}}$, Нм					
b_*	$c_{\text{п*}}$	F , А	$\varphi = 5^\circ$	$\varphi = 7^\circ$	$\varphi = 9^\circ$	$\varphi = 11^\circ$	$\varphi = 13^\circ$	$\varphi = 15^\circ$
0,8	0,4	400	0,077	0,05	0,036	0,026	0,02	0,018
		800	0,307	0,201	0,142	0,105	0,081	0,071
		1200	0,634	0,441	0,32	0,236	0,182	0,159
	0,45	400	0,079	0,053	0,037	0,028	0,022	0,019
		800	0,317	0,21	0,15	0,111	0,086	0,076
		1200	0,644	0,456	0,335	0,251	0,195	0,172
	0,5	400	0,081	0,054	0,039	0,029	0,023	0,02
		800	0,324	0,218	0,156	0,117	0,091	0,081
		1200	0,65	0,466	0,347	0,262	0,205	0,183
	0,55	400	0,082	0,056	0,04	0,03	0,024	0,021
		800	0,328	0,223	0,162	0,121	0,095	0,085
		1200	0,649	0,473	0,355	0,27	0,214	0,192
	0,6	400	0,082	0,057	0,041	0,031	0,024	0,022
		800	0,329	0,226	0,165	0,124	0,098	0,088
		1200	0,642	0,474	0,36	0,275	0,219	0,198
	0,65	400	0,081	0,057	0,042	0,031	0,025	0,023
		800	0,326	0,227	0,167	0,126	0,099	0,091
		1200	0,629	0,471	0,36	0,277	0,221	0,202
	0,7	400	0,08	0,056	0,042	0,031	0,025	0,023
		800	0,318	0,224	0,166	0,126	0,1	0,091
		1200	0,609	0,462	0,357	0,276	0,221	0,203
	0,75	400	0,077	0,055	0,041	0,031	0,025	0,023
		800	0,306	0,219	0,163	0,124	0,098	0,091
		1200	0,583	0,448	0,348	0,27	0,217	0,201
	0,8	400	0,073	0,053	0,04	0,03	0,024	0,022
		800	0,29	0,211	0,158	0,12	0,095	0,089
		1200	0,55	0,428	0,335	0,261	0,21	0,196

Таблица А.6 – Статические тяговые характеристики клапанного электромагнита с прямоугольным полюсным наконечником при $b_* = b_{\Pi} / b_{\text{як}} = 0,7$

Параметры			Электромагнитный момент $M_{\text{эм}}$, Нм					
b_*	$c_{\Pi*}$	F , А	$\varphi = 5^\circ$	$\varphi = 7^\circ$	$\varphi = 9^\circ$	$\varphi = 11^\circ$	$\varphi = 13^\circ$	$\varphi = 15^\circ$
0,7	0,4	400	0,077	0,05	0,035	0,026	0,02	0,017
		800	0,307	0,199	0,14	0,102	0,079	0,069
		1200	0,646	0,442	0,314	0,23	0,177	0,212
	0,45	400	0,079	0,052	0,037	0,027	0,021	0,019
		800	0,318	0,394	0,147	0,108	0,084	0,074
		1200	0,657	0,457	0,331	0,244	0,189	0,167
	0,5	400	0,081	0,054	0,038	0,028	0,022	0,02
		800	0,325	0,215	0,154	0,114	0,089	0,079
		1200	0,663	0,468	0,345	0,256	0,2	0,177
	0,55	400	0,082	0,055	0,04	0,03	0,023	0,021
		800	0,33	0,221	0,159	0,118	0,092	0,083
		1200	0,664	0,475	0,353	0,266	0,208	0,186
	0,6	400	0,083	0,56	0,041	0,03	0,024	0,021
		800	0,331	0,224	0,162	0,121	0,095	0,086
		1200	0,658	0,477	0,358	0,272	0,214	0,193
	0,65	400	0,082	0,056	0,041	0,031	0,024	0,022
		800	0,328	0,225	0,164	0,123	0,097	0,088
		1200	0,645	0,474	0,359	0,274	0,209	0,189
	0,7	400	0,08	0,56	0,041	0,031	0,024	0,022
		800	0,322	0,223	0,163	0,123	0,097	0,089
		1200	0,627	0,467	0,356	0,273	0,217	0,199
	0,75	400	0,078	0,055	0,04	0,03	0,024	0,022
		800	0,312	0,216	0,161	0,121	0,096	0,088
		1200	0,603	0,455	0,349	0,268	0,214	0,197
0,8	400	0,074	0,053	0,039	0,03	0,023	0,022	
	800	0,298	0,211	0,157	0,118	0,093	0,086	
	1200	0,572	0,436	0,337	0,26	0,207	0,192	

Таблица А.7 – Статические тяговые характеристики клапанного электромагнита с прямоугольным полюсным наконечником при $b_* = b_{II}/b_{ЯК} = 0,6$

Параметры			Электромагнитный момент $M_{эм}$, Нм					
b_*	c_{II*}	F , А	$\varphi = 5^\circ$	$\varphi = 7^\circ$	$\varphi = 9^\circ$	$\varphi = 11^\circ$	$\varphi = 13^\circ$	$\varphi = 15^\circ$
0,6	0,4	400	0,077	0,049	0,037	0,025	0,019	0,017
		800	0,306	0,196	0,137	0,1	0,077	0,067
		1200	0,656	0,441	0,307	0,224	0,172	0,015
	0,45	400	0,079	0,051	0,036	0,026	0,02	0,018
		800	0,316	0,205	0,144	0,106	0,082	0,072
		1200	0,667	0,456	0,324	0,238	0,184	0,162
	0,5	400	0,081	0,053	0,038	0,028	0,022	0,019
		800	0,324	0,212	0,15	0,111	0,086	0,076
		1200	0,675	0,468	0,338	0,249	0,194	0,172
	0,55	400	0,082	0,054	0,039	0,029	0,022	0,02
		800	0,329	0,217	0,155	0,115	0,09	0,08
		1200	0,676	0,476	0,349	0,259	0,202	0,18
	0,6	400	0,083	0,055	0,04	0,029	0,023	0,021
		800	0,33	0,221	0,159	0,118	0,092	0,083
		1200	0,672	0,479	0,337	0,266	0,208	0,187
	0,65	400	0,082	0,056	0,046	0,03	0,024	0,021
		800	0,328	0,222	0,16	0,12	0,094	0,085
		1200	0,643	0,477	0,322	0,269	0,212	0,191
	0,7	400	0,081	0,055	0,04	0,03	0,024	0,022
		800	0,323	0,221	0,16	0,12	0,094	0,086
		1200	0,643	0,471	0,354	0,269	0,212	0,194
	0,75	400	0,078	0,054	0,04	0,03	0,023	0,021
		800	0,313	0,217	0,158	0,119	0,093	0,086
		1200	0,621	0,459	0,348	0,265	0,21	0,193
0,8	400	0,075	0,052	0,039	0,029	0,023	0,021	
	800	0,3	0,21	0,154	0,116	0,091	0,084	
	1200	0,591	0,442	0,338	0,258	0,204	0,189	

Таблица А.8 – Статические тяговые характеристики клапанного электромагнита с прямоугольным полюсным наконечником при $b_* = b_{\Pi} / b_{\text{як}} = 0,5$

Параметры			Электромагнитный момент $M_{\text{эм}}$, Нм					
b_*	$c_{\Pi*}$	F , А	$\varphi = 5^\circ$	$\varphi = 7^\circ$	$\varphi = 9^\circ$	$\varphi = 11^\circ$	$\varphi = 13^\circ$	$\varphi = 15^\circ$
0,5	0,4	400	0,076	0,048	0,033	0,024	0,019	0,016
		800	0,303	0,192	0,133	0,097	0,074	0,065
		1200	0,663	0,498	0,299	0,218	0,167	0,145
	0,45	400	0,078	0	0,035	0,026+	0,02	0,017
		800	0,313	0,201	0,14	0,103	0,079	0,069
		1200	0,677	0,482	0,315	0,231	0,178	0,156
	0,5	400	0,08	0,052	0,037	0,027	0,021	0,018
		800	0,321	0,208	0,146	0,108	0,083	0,074
		1200	0,684	0,467	0,329	0,242	0,188	0,166
	0,55	400	0,082	0,053	0,038	0,028	0,022	0,019
		800	0,326	0,213	0,151	0,112	0,087	0,077
		1200	0,686	0,475	0,34	0,251	0,196	0,174
	0,6	400	0,082	0,054	0,039	0,029	0,022	0,02
		800	0,328	0,217	0,155	0,115	0,09	0,08
		1200	0,684	0,479	0,348	0,258	0,201	0,181
	0,65	400	0,082	0,055	0,039	0,029	0,023	0,021
		800	0,327	0,218	0,157	0,116	0,091	0,082
		1200	0,673	0,478	0,352	0,262	0,205	0,185
	0,7	400	0,08	0,054	0,039	0,029	0,023	0,021
		800	0,322	0,217	0,157	0,117	0,092	0,083
		1200	0,658	0,473	0,352	0,263	0,206	0,187
	0,75	400	0,078	0,053	0,039	0,029	0,023	0,021
		800	0,313	0,214	0,155	0,116	0,091	0,083
		1200	0,636	0,462	0,346	0,261	0,204	0,187
0,8	400	0,075	0,052	0,038	0,028	0,022	0,02	
	800	0,301	0,208	0,152	0,113	0,089	0,082	
	1200	0,609	0,447	0,337	0,255	0,2	0,184	

Приложение Б

Пример Б.1 расчета по методике Ротерса Г.-Гордона А.В. [44]

Исходные данные: $P_{\text{мх}} = 8\text{кГ} = 78,5\text{Н}$; $\delta = 3,9 \cdot 10^{-3}\text{м} = 3,9\text{см}$; $T_0 = 40^\circ\text{C}$; $\tau_{\text{доп}} = 80^\circ\text{C}$;

$U_{\text{н}} = 220\text{В}$; $U_{\text{мак}} = 1,05U_{\text{н}}$; $U_{\text{мин}} = 0,85U_{\text{н}}$; катушка бандажированная, компаундированная с намоткой на стальную трубу. Режим работы продолжительный. Конструктивный фактор:

$$K_{\phi} = \sqrt{P_{\text{эм}}} / \delta = \sqrt{8} / 0,39 = 7,25 \text{КГ}^{0,5} / \text{см}.$$

На основании рисунка 3.1 определяем: $B_{\delta} = 0,35\text{Т}$; $\sigma_0 = 1,48$.

В соответствии с (3.3) и (3.4) получим:

$$S_{\text{п}} = \frac{\mu_0 P_{\text{эм}}}{0,6 B_{\delta}^2} = \frac{12,56 \cdot 10^{-7} \cdot 78,5}{0,6 \cdot 0,35^2} = 13,41 \cdot 10^{-4} \text{м}^2;$$

$$d_{\text{п}} = 2\sqrt{S_{\text{п}}/\pi} = 2 \cdot \sqrt{13,41/3,14} \cdot 10^{-2} = 41,3 \cdot 10^{-3} \text{м}.$$

Выбираем $B_0 = 1,5\text{Тл}$ и по (3.5)

$$S_c = \sigma_0 S_{\text{п}} B_{\delta} / B_0 = 1,48 \cdot 13,41 \cdot 10^{-4} \cdot 0,35 / 1,5 = 4,63 \cdot 10^{-4} \text{м}^2.$$

Определим диаметр сердечника

$$d_c = 2\sqrt{S_c/\pi} = 2 \cdot \sqrt{4,63/3,14} \cdot 10^{-2} = 24,3 \cdot 10^{-3} \text{м}$$

и площадь поперечного сечения якоря

$$S_{\text{як}} = 0,8 S_c = 0,8 \cdot 4,63 \cdot 10^{-4} = 3,70 \cdot 10^{-4} \text{м}^2.$$

Рассчитаем толщину полюсного наконечника:

$$a_{\text{п}} \geq 0,25 d_c [1 - (d_c/d_{\text{п}})^2] = 0,25 \cdot 24,3 \cdot 10^{-3} [1 - (24,3/41,3)^2] = 3,97 \cdot 10^{-3} \text{м}.$$

Принимаем $a_{\text{п}} = 4 \cdot 10^{-3} \text{м}$.

Толщина намотки обмотки $A_0 = 0,75 \cdot 24,3 \cdot 10^{-3} = 18,2 \cdot 10^{-3} \text{м}$.

Высота обмотки $H_0 = 4d_c = 4 \cdot 24,3 \cdot 10^{-3} = 97,2 \cdot 10^{-3} \text{м}$.

Ширина скобы магнитопровода $b_{\text{ск}} = 3d_c = 3 \cdot 24,3 \cdot 10^{-3} = 73 \cdot 10^{-3} \text{м}$.

Толщина скобы магнитопровода $a_{\text{ск}} = d_c/4 = 24,3 \cdot 10^{-3}/4 = 6,0 \cdot 10^{-3} \text{м}$.

Принимаем ширину якоря $b_{\text{як}} = b_{\text{ск}} = 73 \cdot 10^{-3} \text{м}$, тогда толщина якоря

$$a_{\text{як}} = S_{\text{як}} / b_{\text{як}} = 3,7 \cdot 10^{-4} / 73 \cdot 10^{-3} = 5,07 \cdot 10^{-3} \text{м}. \text{ Принимаем } a_{\text{як}} = 5 \cdot 10^{-3} \text{м}.$$

Принимаем суммарную толщину изоляционных прокладок, банджа и стальной трубы $\Delta_k = 2,5 \cdot 10^{-3}$ м; $\beta = 1,7$.

Внутренний диаметр обмотки: $d_0 = d_c + 2\Delta_k = (24 + 2 \cdot 2,5)10^{-3} = 29 \cdot 10^{-3}$ м.

Наружный диаметр обмотки: $D_0 = d_0 + 2A_0 = (29 + 2 \cdot 18,2)10^{-3} = 65,4 \cdot 10^{-3}$ м.

Эффективная площадь охлаждения катушки:

$$S_{\text{охл}} = \pi H_0 (D_0 + \beta d_0) = 3,14 \cdot 97,2 \cdot 10^{-3} (65,4 + 1,7 \cdot 29)10^{-3} = 350,1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

Коэффициент теплоотдачи [28 и др.]

$$K_{\text{т.н}} = \frac{3,6(1 + 0,005 \cdot 80)}{(350 \cdot 10^{-4})^{0,2}} = 9,85 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{град}}.$$

Рассеиваемая мощность:

$$P_{\text{отд}} = \tau_{\text{доп}} K_{\text{т.н}} S_{\text{охл}} = 80 \cdot 9,85 \cdot 350 \cdot 10^{-4} = 27,6 \text{ Вт};$$

Удельное электрическое сопротивление обмоточной меди:

$$\rho_r = \rho_u (1 + \alpha(\tau_{\text{доп}} + T_0)) = 1,65 \cdot 10^{-8} (1 + 0,0043 \cdot 120) = 2,50 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}.$$

Средняя длина витков:

$$l_{\text{cp}} = 148,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Максимально допустимый МДС обмотки:

$$F_{\text{max}} = \sqrt{P_{\text{отд}}} \sqrt{\frac{A_0 H_0 K_3}{\rho_r l_{\text{cp}}}} = \sqrt{27,6} \cdot \sqrt{\frac{18,2 \cdot 97,2 \cdot 10^{-6} \cdot 0,5}{2,50 \cdot 10^{-8} \cdot 148,2 \cdot 10^{-3}}} = 5,25 \cdot 489 = 2565 \text{ А}.$$

$$\text{Необходимая МДС: } F = k_{\text{зап}} K_{\text{п}} \frac{B_{\delta}}{\mu_0} = 1,7 \cdot 1,3 \frac{0,35 \cdot 3,9 \cdot 10^{-3}}{12,56 \cdot 10^{-7}} = 2402 \text{ А}.$$

Таким образом $F < F_{\text{max}}$ и ожидаемая температура нагрева катушки равна:

$$\Theta = \tau + T_0 < 120^\circ \text{ C}.$$

Пример Б.2 расчета по методике Софронова Ю.В. [159]

Исходные данные: $P_{\text{мк}} = 8\text{кГ} = 78,5\text{Н}$; $\delta = 3,9 \cdot 10^{-3}\text{м} = 3,9\text{см}$; $T_0 = 40^\circ\text{C}$; $\tau_{\text{доп}} = 80^\circ\text{C}$;

$U_{\text{max}} = 1,05U_{\text{н}}$; $U_{\text{н}} = 220\text{В}$; $U_{\text{min}} = 0,85U_{\text{н}}$; катушка бандажированная, компаундированная с намоткой на стальную трубу. Режим работы продолжительный. Конструктивный фактор

$$K_{\phi} = \sqrt{P_{\text{эм}}} / \delta = \sqrt{8} / 0,39 = 7,25\text{КГ}^{0,5} / \text{см}.$$

По графическим зависимостям (рис. 3.1) определяем:

$$B_{\delta} = 0,35\text{ Тл}; \sigma_0 = 1,48.$$

Рассчитываются:

$$S_{\text{н}} = \frac{P_{\text{мк.кр}}}{4B_{\delta}^2 10^5} = \frac{78,5}{4 \cdot 0,35^2 \cdot 10^5} = 16 \cdot 10^{-4}\text{ м}^2;$$

$$d_{\text{н}} = 2\sqrt{S_{\text{н}} / \pi} = 2\sqrt{\frac{16}{3,14}} \cdot 10^{-2} = 45,1 \cdot 10^{-3}\text{ м};$$

$$S_{\text{с}} = \frac{\sigma_0 B_{\delta} S_{\text{н}}}{B_0} = \frac{1,48 \cdot 0,35 \cdot 16 \cdot 10^{-4}}{1,2} = 6,91 \cdot 10^{-4}\text{ м}^2;$$

$$d_{\text{с}} = 2\sqrt{S_{\text{с}} / \pi} = 2\sqrt{\frac{6,91}{3,14}} \cdot 10^{-2} = 29,7 \cdot 10^{-3}\text{ м}.$$

Принимаем $d_{\text{н}} = 45 \cdot 10^{-3}\text{ м}$; $d_{\text{с}} = 30 \cdot 10^{-3}\text{ м}$; $S_{\text{н}} = 15,9 \cdot 10^{-4}\text{ м}^2$;

$$S_{\text{с}} = 7,07 \cdot 10^{-4}\text{ м}^2.$$

Определяем

$$S_{\text{як}} = B_{\delta} S_{\text{н}} / B_0 = 0,35 \cdot 15,9 \cdot 10^{-4} / 1,2 = 4,64 \cdot 10^{-4}\text{ м}^2.$$

Рассчитывается

$$F = K_{\text{зап}} K_{\text{н}} \frac{B_{\delta}}{\mu_0} \delta_{\text{кр}} = 1,7 \cdot 1,3 \frac{0,35 \cdot 3,9 \cdot 10^{-3}}{12,56 \cdot 10^{-7}} = 2402\text{А},$$

$$\rho_{\text{г}} = \rho_0 (1 + \alpha(\tau_{\text{доп}} + T_0)) = 1,65 \cdot 10^{-8} (1 + 0,0043(80 + 40)) = 2,5 \cdot 10^{-8}\text{ Ом} \cdot \text{м}.$$

Принимаем толщину «каркаса» $\Delta_{\text{к}} = 2,5 \cdot 10^{-3}\text{ м}$, $m = 0,6$; $\beta = 1,7$; $K_3 = 0,5$;

$$K_{\text{т.н}} = 10 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{град}}.$$

Определяются

$$d_o = d_c + 2\Delta_k = (30 + 2 \cdot 2,5) \cdot 10^{-3} = 35 \cdot 10^{-3} \text{ м},$$

$$\alpha_m = m \left(m + \frac{1 + \beta_r}{2} \right) / (m + 1) = 0,6 \left(0,6 + \frac{1 + 1,7}{2} \right) / (0,6 + 1) = 0,731;$$

$$A_o = m d_o = 0,6 \cdot 35 \cdot 10^{-3} = 21 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$D_o = d_o + 2A_o = (35 + 2 \cdot 21) \cdot 10^{-3} = 77 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$H_o = F \left(\frac{U_{\max}}{U_{\min}} \right) \sqrt{\frac{\rho_r}{2K_{\text{т.н}} K_3 \tau_{\text{доп}} n_p \alpha_m d_o}} = 2402 \cdot \frac{1,05}{0,85} \cdot \sqrt{\frac{2,5 \cdot 10^{-8}}{2 \cdot 10 \cdot 0,5 \cdot 80 \cdot 1 \cdot 0,731 \cdot 35 \cdot 10^{-3}}} =$$

$$= 103,7 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Уточним коэффициент теплопередачи $K_{\text{т.н}}$:

$$S = \pi H_o (D_o + \beta_r d_o) = 3,14 \cdot 103,7 \cdot 10^{-3} (77 + 1,7 \cdot 35) \cdot 10^{-3} = 444 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2,$$

$$K_{\text{т.н}} = \frac{3,6[1 + 0,005\tau_{\text{доп}}]}{S^{1/5}} = \frac{3,6(1 + 0,005 \cdot 80)}{(4,44 \cdot 10^{-2})^{0,2}} = \frac{5,04}{0,536} = 9,4 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{град}}.$$

Уточненное значение отличается на 6 %.

Пример расчета Б.3 расчета по методике Бугаева Г.А. [20]

Исходные данные: $P_{\text{мх.кр}} = 8\text{кГ} = 78,5\text{Н}$; $\delta_{\text{кр}} = 3,9 \cdot 10^{-3}\text{ м} = 3,9\text{см}$; $T_0 = 40^\circ\text{C}$; $\tau_{\text{доп}} = 80^\circ\text{C}$;

$U_{\text{н}} = 220\text{В}$; $U_{\text{мах}} = 1,05U_{\text{н}}$; $U_{\text{мин}} = 0,85U_{\text{н}}$; катушка бандажированная, компаундированная с намоткой на стальную трубу. Режим работы продолжительный. Конструктивный фактор

$$K_{\phi} = \sqrt{P_{\text{мх.кр}}} / \delta_{\text{кр}} = \sqrt{8} / 0,39 = 7,25 \text{ КГ}^{0,5} / \text{см}.$$

По графическим зависимостям (рис. 3.1) определяем:

$$B_{\delta} = 0,35 \text{ Тл}; \sigma_0 = 1,48.$$

Рассчитываем:

$$S_{\text{н}} = \frac{P_{\text{мх.кр}}}{4B_{\delta}^2 10^5} = \frac{78,5}{4 \cdot 0,35^2 \cdot 10^5} = 16 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2;$$

$$d_{\text{н}} = 2\sqrt{S_{\text{н}}/\pi} = 2\sqrt{\frac{16}{3,14}} \cdot 10^{-2} = 45,1 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$S_{\text{с}} = \frac{\sigma_0 B_{\delta} S_{\text{н}}}{B_0} = \frac{1,48 \cdot 0,35 \cdot 16 \cdot 10^{-4}}{1,4} = 5,92 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2;$$

$$d_{\text{с}} = 2\sqrt{S_{\text{с}}/\pi} = 2\sqrt{\frac{5,92}{3,14}} \cdot 10^{-2} = 27,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Принимаем $d_{\text{н}} = 45 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; $d_{\text{с}} = 28 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; $S_{\text{н}} = 15,9 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$; $S_{\text{с}} = 6,15 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$.

Определяем $S_{\text{як}} = B_{\delta} S_{\text{н}} / B_0 = 0,35 \cdot 15,9 \cdot 10^{-4} / 1,2 = 4,64 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$.

Рассчитываем $F = K_{\text{зап}} K_{\text{н}} \frac{B_{\delta} \delta_{\text{кр}}}{\mu_0} = 1,7 \cdot 1,3 \frac{0,35 \cdot 3,9 \cdot 10^{-3}}{12,56 \cdot 10^{-7}} = 2402 \text{ А},$

$$F_{\text{мах}} = 1,05F = 1,05 \cdot 2402 = 2522 \text{ А};$$

$$\rho_{\text{г}} = \rho_0 (1 + \alpha(\tau_{\text{доп}} + T_0)) = 1,65 \cdot 10^{-8} (1 + 0,0043(80 + 40)) = 2,5 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}.$$

Принимаем толщину «каркаса» $\Delta_{\text{к}} = 0,1d_{\text{с}} = 0,1 \cdot 28 \cdot 10^{-3} = 2,8 \cdot 10^{-3} \text{ м},$

$$K_3 = 0,5; K_{\text{т.н}} = 9,7 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{град}}.$$

Внутренний диаметр обмотки $d_0 = d_{\text{с}} + 2\Delta_{\text{к}} = (28 + 2 \cdot 2,8) \cdot 10^{-3} = 33,6 \cdot 10^{-3} \text{ м};$

Принимаем $X = 0,69$; $Y = 1,8$. Подставим данные в (3.14)

$$d_{o1} = 0,65 \cdot \sqrt[3]{\frac{1 + 0,65}{(1 - 0,65)(1 + 1,7 \cdot 0,65)1,8^2} \cdot \frac{2,5 \cdot 10^{-8} \cdot 2144^2}{0,5 \cdot 9,7 \cdot 80}} = 0,383 \text{ м} = 38,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

$$d_{c1} = \frac{d_{o1}}{1 + 2\Delta_k} = \frac{38,3}{1 + 2 \cdot 0,1} = 31,9 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Расхождение составляет $\frac{28 - 31,9}{28} \cdot 100 = 13,9 \%$.

Принимаем $B_{c2} = 1,10 \text{ Тл}$.

Тогда $S_{c2} = 7,53 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$,

$$d_{c2} = 2\sqrt{S_c/\pi} = 2\sqrt{\frac{7,53}{3,14}} \cdot 10^{-2} = 31,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Расхождение составляет $\frac{31 - 31,9}{31} \cdot 100 = 2,9 \%$.

Следовательно, можно принять $d_c = 32 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

Пример расчета Б.4 расчета по методике Шоффы В.Н. [176, 180]

Исходные данные: $P_{\text{мх.кр}} = 8\text{кГ} = 78,5\text{Н}$; $\delta_{\text{кр}} = 3,9 \cdot 10^{-3}\text{ м} = 3,9\text{см}$; $T_0 = 40^\circ\text{C}$; $\tau_{\text{дон}} = 80^\circ\text{C}$;

$U_{\text{н}} = 220\text{В}$; $U_{\text{мх}} = 1,05U_{\text{н}}$; $U_{\text{мин}} = 0,85U_{\text{н}}$; катушка бандажированная, компаундированная с намоткой на стальную трубу. Режим работы продолжительный.

Относительные размеры в КМС:

$$d_* = d_{\text{п}}/d_{\text{с}} = 1,36; c_* = c/d_{\text{с}} = 1,51; A_* = A_{\text{о}}/d_{\text{с}} = 0,635; H_* = H_{\text{о}}/d_{\text{с}} = 2,91;$$

$$a_{\text{п}*} = 0,127; a_{\text{ск}*} = 0,363; d_{\text{б}*} = 1,13; D_* = 2,24; b_{\text{ск}*} = b_{\text{ск}}/d_{\text{с}} = 3,05;$$

$$b_{\text{як}*} = b_{\text{як}}/d_{\text{с}} = 3,05; a_{\text{як}*} = 0,272;$$

Принимаем $B_{\delta} = 0,6\text{ Тл}$ и определяем:

$$S_{\text{п}} = \frac{2\mu_0 P_{\text{эм}}}{B_{\delta}^2} = \frac{2 \cdot 12,56 \cdot 10^{-7} \cdot 78,5}{0,6^2} = 5,48 \cdot 10^{-4}\text{ м}^2;$$

$$d_{\text{п}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{S_{\text{п}}}{\pi}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{5,48}{3,14}} \cdot 10^{-2} = 26,4 \cdot 10^{-3}\text{ м}.$$

При этом $\delta^{**} = \delta/d_{\text{п}} = 3,9 \cdot 10^{-3}/26,4 \cdot 10^{-3} = 0,148$.

Используя рисунок 3.2 по усреднённой тяговой характеристике определим

$$P_{\text{эм}}^{**} = 4,35.$$

По выражению (3.15) определим:

$$F_{\text{мин}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \frac{1}{P_{\text{эм}}^{**}} \sqrt{\frac{P_{\text{эм}}}{\mu_0}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{2}{3,14}} \cdot \frac{1}{4,35} \cdot \sqrt{\frac{78,5}{1,256 \cdot 10^{-6}}} = \frac{1,596}{4,35} \cdot 7906 = 2901\text{ А}.$$

Определим

$$F_{\text{макс(1)}} = F_{\text{мин}}/k_3 = \frac{2901}{0,85U_{\text{н}}/1,05U_{\text{н}}} = 3581\text{ А};$$

$$d_{\text{с}} = d_{\text{п}}/d_* = \frac{26,4 \cdot 10^{-3}}{1,36} = 19,4 \cdot 10^{-3}\text{ м}.$$

Принимаем $K_3 = 0,5$.

Определим по рисунку 3.3 коэффициент $N_{\text{с1}} = 1,2 \cdot 10^6$.

При этом

$$F_{\max(2)} = N_{\text{cl}} \sqrt{d_c^3} = 1,2 \cdot 10^6 \cdot \sqrt{(19,4 \cdot 10^{-3})^3} = 3243 \text{ A.}$$

Таблица Б.1

Номер расчета	$d_{\text{II}} \cdot 10^{-3}, \text{ м}$	$d_c \cdot 10^{-3}, \text{ м}$	$F_{\max(1)}, \text{ А}$	$F_{\max(2)}, \text{ А}$
1	26,4	19,4	3584	3243
2	27	19,9	3315	3365
3	28	20,6	3245	3548

$$\delta^{**} = \delta/d_{\text{II}} = 3,9 \cdot 10^{-3} / 27 \cdot 10^{-3} = 0,144.$$

$$P_{\text{эм}}^{**} = 4,7;$$

Тогда

$$F_{\min} = 2 \cdot \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \frac{1}{P_{\text{эм}}^{**}} \sqrt{\frac{P_{\text{эм}}}{\mu_0}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{2}{3,14}} \cdot \frac{1}{4,7} \cdot \sqrt{\frac{78,5}{1,256 \cdot 10^{-6}}} = \frac{1,596}{4,7} \cdot 7906 = 2685 \text{ A.}$$

$$F_{\max(1)} = F_{\min} / k_3 = \frac{2685}{0,85 U_{\text{H}} / 1,05 U_{\text{H}}} = 3315 \text{ A;}$$

$$d_c = d_{\text{II}} / d_* = \frac{27 \cdot 10^{-3}}{1,36} = 19,9 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

$$F_{\max(2)} = N_{\text{cl}} \sqrt{d_c^3} = 1,2 \cdot 10^6 \sqrt{(19,9 \cdot 10^{-3})^3} = 3365 \text{ A.}$$

$$\delta^{**} = \delta/d_{\text{II}} = 3,9 \cdot 10^{-3} / 28 \cdot 10^{-3} = 0,139.$$

$$P_{\text{эм}}^{**} = 4,8.$$

$$F_{\min} = 2 \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \frac{1}{P_{\text{эм}}^{**}} \sqrt{\frac{P_{\text{эм}}}{\mu_0}} = 2 \sqrt{\frac{2}{3,14}} \cdot \frac{1}{4,8} \cdot \sqrt{\frac{78,5}{1,256 \cdot 10^{-6}}} = \frac{1,596}{4,7} \cdot 7906 = 2629 \text{ A.}$$

$$F_{\max(1)} = F_{\min} / k_3 = \frac{2629}{0,85 U_{\text{H}} / 1,05 U_{\text{H}}} = 3245 \text{ A;}$$

$$d_c = d_{\text{II}} / d_* = \frac{28 \cdot 10^{-3}}{1,36} = 20,6 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

$$F_{\max(2)} = N_{\text{cl}} \sqrt{d_c^3} = 1,2 \cdot 10^6 \sqrt{(20,6 \cdot 10^{-3})^3} = 3548 \text{ A.}$$

Таким образом, (рисунок Б1) $F_{\max} = 3340 \text{ A}$;

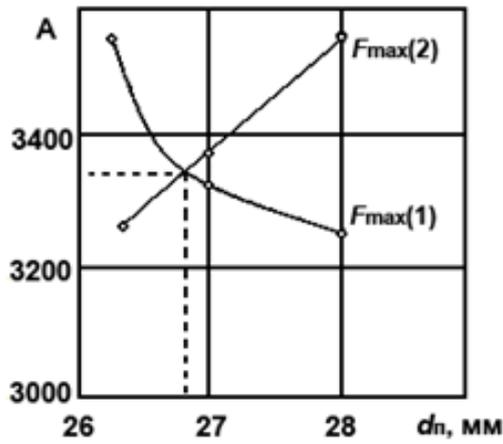


Рисунок Б.1 – К определению диаметра полюсного наконечника

$$d_{II} = 26,8 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$d_c = d_{II} / d_* = 26,8 \cdot 10^{-3} / 1,36 = 19,7 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$d_b = d_c \cdot d_{b*} = 19,7 \cdot 10^{-3} \cdot 1,13 = 22,3 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$D_o = d_c \cdot D_* = 19,7 \cdot 10^{-3} \cdot 2,4 = 47,3 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$c = d_c \cdot c_* = 19,7 \cdot 10^{-3} \cdot 1,51 = 29,7 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$A_o = 0,635 \cdot 19,7 \cdot 10^{-3} = 12,5 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$H_o = d_c \cdot H_* = 19,7 \cdot 10^{-3} \cdot 2,91 = 57,3 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$a_{II} = d_c \cdot a_{II*} = 19,7 \cdot 10^{-3} \cdot 0,127 = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$a_{ск} = d_c \cdot a_{ск*} = 19,7 \cdot 10^{-3} \cdot 0,363 = 7,2 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$a_{як} = d_c \cdot a_{як*} = 19,7 \cdot 10^{-3} \cdot 0,272 = 5,4 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$b_{ск} = b_{як} = d_c \cdot b_{як*} = 19,7 \cdot 10^{-3} \cdot 3,05 = 60,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Рассчитаем обмоточные данные:

$$\rho_r = 1,65 \cdot 10^{-8} (1 + 0,0043(80 + 40)) = 2,50 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м};$$

$$d_m = 2 \cdot \sqrt{\frac{2,5 \cdot 10^{-8} (1,13 + 2,4) 1,2 \cdot 10^6}{1,05 \cdot 220}} \cdot (19,7 \cdot 10^{-3})^{1,25} = 4,28 \cdot 10^{-2} \cdot 7,38 \cdot 10^3 =$$

$$= 0,316 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 0,316 \text{ мм}.$$

Выбираем [96] $d = 0,31 \text{ мм}$.

Уточним $K_3 = 0,5$ (для ПЭВ-2);

$$N = \frac{2 \cdot 0,5 \cdot 2,91 \cdot 0,635}{3,14 \cdot 2,5 \cdot 10^{-8} (1,13 + 2,4) 1,2 \cdot 10^6} \frac{1,05 \cdot 220}{\sqrt{19,7 \cdot 10^{-3}}} = 5,557 \cdot 1646 = 9146 \text{ вит.}$$

Пример расчета Б.5 расчета по методике Любчика М.А. [120]

Исходные данные: $P_{\text{про}} = P_{\text{мх.кр}} = 8\text{кГ} = 78,5\text{Н}$; $\delta_0 = \delta_{\text{кр}} = 3,9 \cdot 10^{-3}\text{м} = 3,9\text{см}$;
 $\vartheta_{\text{о.с}} = T_0 = 40\text{ }^\circ\text{C}$; $\vartheta_{\text{д}} = \Theta_{\text{доп}} = 125\text{ }^\circ\text{C}$; $U_{\text{н}} = 220\text{В}$; катушка
 бандажированная, компаундированная с намоткой на стальную
 трубу. Режим работы продолжительный. Предназначен для работы в
 нормальных условиях, служит приводным ЭМ контактора.
 Производство со стабильным производственным процессом.

1) Согласно рекомендациям [120] определяем коэффициенты запаса для критических условий: $k_0 = 1,35$; $K_{U_{\text{min}}} = 0,85$; $\xi_0 = 0,88$; соответственно по силе, напряжению, нагреву.

2) Выбираем основные коэффициенты кратностей геометрических размеров КМС

Таблица Б.2- Рекомендуемые кратности в КМС

Коэффициенты кратностей	Малогабаритные КМС	Крупногабаритные КМС	Средние значения
$n = A_* = A_0/d_c$	0,50 ÷ 0,80	0,25 ÷ 0,50	0,50
$m = H_* = H_0/d_c$	6,0 ÷ 8,0	4,0 ÷ 6,0	6,0
$q = \Delta_* = \Delta_k/d_c$	0,05 ÷ 0,10	0,10 ÷ 0,15	0,10
$\tau_{\text{п}} = d_* = d_{\text{п}}/d_c$	1,10 ÷ 1,20	1,40 ÷ 1,50	1,30
$i_{\text{п}} = a_{\text{п}*} = a_{\text{п}}/d_c$	0,10 ÷ 0,20	0,20 ÷ 0,30	0,20

Принимаем: $A_* = 0,635$; $H_* = 2,91$; $\Delta_* = 0,065$; $d_* = 1,37$; $a_{\text{п}*} = 0,127$.

Выбираем основные физические параметры и коэффициенты для провода марки ПЭВ: $\Theta = \tau_{\text{доп}} = 85\text{ }^\circ\text{C}$.; $\Theta_0 = \tau_0 = \xi_0 \tau_{\text{доп}} = 0,88 \cdot 85 = 75\text{ }^\circ\text{C}$.

Рассчитаем коэффициенты теплопередачи с наружной и с внутренней поверхности обмотки:

$$h_o = h_n = K_{т.н} = 9,3(1 + 0,006\tau_o) = 9,3(1 + 0,006 \cdot 75) = 13,5 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{град}};$$

$$h_b = K_{т.в} = \gamma \cdot h_n = \beta_{т} K_{т.н} = 1,7 \cdot 13,5 = 23 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{град}};$$

$$\rho = \rho_{г} = \rho_0(1 + \alpha \cdot \Theta_{\text{доп}}) = 1,65 \cdot 10^{-8}(1 + 0,00425 \cdot 125) = 2,53 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}.$$

Таблица Б.3 - Рекомендуемые [96] средние значения f_3 коэффициента заполнения обмоточного окна

Марка обмоточного провода	ПЭЛ, ПЭТ, ПЭВ-1	ПЭВ-2, ПЭЛУ	ПЭЛШО	ПБД
f_3	0,60	0,55	0,50	0,40

Принимаем $f_3 = K_{\text{зап}} = 0,55$.

Расчет комплексов K_O , K_C , K_3 , $K_{ф.п}$, $K_{кр}$.

Для КМС принимается, что электромагнитный момент создается за счет сил основного зазора, т.е. $K_C = 0$.

Для однокатушечной МС $K_O = 2/f_3 = 2/K_{\text{зап}} = 2/0,55 = 3,64$.

Комплекс коэффициентов запаса:

$$K_3 = \frac{k_o}{X_o \xi_o} = \frac{k_o}{K_{U \min}^2 \xi_o} = \frac{1,35}{0,85^2 \cdot 0,88} = 2,12.$$

Комплекс физических параметров:

$$K_{ф.п} = \frac{\rho}{\mu_0 h_o \Theta_{\text{доп}}} = \frac{\rho_{г}}{\mu_0 K_{т.н} \tau_{\text{доп}}} = \frac{2,53 \cdot 10^{-8}}{12,56 \cdot 10^{-7} \cdot 13,5 \cdot 85} = 1,76 \cdot 10^{-5} \frac{\text{М}^3}{\text{Н}}.$$

Комплекс коэффициентов кратностей $K_{кр}$ определяется по выражению [120].

Для удобства размещения катушки при ее установке предусматривается конструктивный запас $A_3 = u \cdot d_c$; практически принимают $0,1 \leq u \leq 0,2$. Выбираем $u = 0,2$.

$$\tau_{ср} = l_{ср*} = \pi(1 + 2q + n) = \pi(1 + 2\Delta_* + A_*) = 3,14(1 + 2 \cdot 0,065 + 0,635) = 5,54;$$

$$\lambda_{ок} = \frac{A_o H_o}{d_c^2} = 0,635 \cdot 2,91 = 0,185;$$

$$\lambda_{\pi} = \frac{S_{\pi}}{d_c^2} = \frac{\pi}{4} d_*^2 = \frac{3,14}{4} \cdot 1,37^2 = 1,47;$$

$$\begin{aligned} \lambda_{\text{охл}} &= \pi \cdot H_* [1 + 2\Delta_* + 2A_* + \beta_T (1 + 2\Delta_*)] = \\ &= 3,14 \cdot 2,91 [1 + 2 \cdot 0,065 + 2 \cdot 0,635 + 1,7(1 + 2 \cdot 0,065)] = 39,5. \end{aligned}$$

$$K_{\text{кр}} = \frac{l_{\text{ср}^*}}{\lambda_{\pi} \lambda_{\text{ок}} \lambda_{\text{охл}}} = \frac{5,54}{1,47 \cdot 1,85 \cdot 39,5} = 5,16 \cdot 10^{-2}.$$

Определим остальные кратности в МС:

$$c_* = 0,5 + \Delta_* + A_* + u = 0,5 + 0,065 + 0,635 + 0,2 = 1,4.$$

Принимаем $c_* = 1,87$.

$$b_{\text{ск}^*} = 1 + 2\Delta_* + 2A_* = 1 + 2 \cdot 0,065 + 2 \cdot 0,635 = 2,4.$$

Принимаем $b_{\text{ск}^*} = 3,05$.

$$b_{\text{як}^*} = b_{\text{ск}^*} = 3,05; a_{\text{ск}^*} = 0,36; a_{\text{як}^*} = a_{\text{ск}^*} = 0,36; R_{\text{o}^*} = 2,23.$$

Комплекс коэффициентов, уточняющих проектный расчет определяется выражением [120]. При стандартных условиях [120] нагрева обмотки $\psi_o = 1$ и для продолжительного режима работы $n_p = 1$.

$$\begin{aligned} \varepsilon_d^2 &= 1 + \frac{5,8i_{\pi}}{\tau_{\pi} (1 + 0,91i_{\pi} x)^2} = 1 + \frac{5,8a_{\pi^*}}{d_* (1 + 0,91a_{\pi^*} x)^2} = 1 + \frac{5,8 \cdot 0,127}{1,37(1 + 0,91 \cdot 0,127x)^2} = \\ &= 1 + \frac{0,538}{(1 + 0,116x)^2}. \end{aligned}$$

$$\varepsilon_o^2 = 1 + \frac{1,48}{\tau_{\pi} x} + \frac{5,8a_{\pi^*}}{\tau_{\pi} (1 + 0,91i_{\pi} x)} = 1 + \frac{1,08}{x} + \frac{0,538}{1 + 0,116x}.$$

$$\sigma_{\text{об}} = 1 + \frac{2}{\pi} g' \frac{H_*}{x} \left[\frac{1 + C_a}{d_*^2 \varepsilon_o^2} + \eta'_B \right] = 1 + \frac{5,84}{x} \left(\frac{0,525}{\varepsilon_o^2} + 0,256 \cdot 10^{-2} \right).$$

$$g' = \lambda = \frac{2\pi}{\ln(2c_* + \sqrt{4c_*^2 - 1})} = \frac{2 \cdot 3,14}{\ln(2 \cdot 1,87 + \sqrt{4 \cdot 1,87^2 - 1})} = 3,15.$$

$$\eta'_B = \frac{\delta'_{\text{эКВ}}}{\delta_{\text{кр}}} = \frac{0,1 \cdot 10^{-3}}{3,9 \cdot 10^{-3}} = 2,56 \cdot 10^{-2};$$

$$\eta''_B = \frac{\delta''_{\text{эКВ}}}{\delta_{\text{кр}}} = \frac{0,1 \cdot 10^{-3}}{3,9 \cdot 10^{-3}} = 2,56 \cdot 10^{-2}.$$

$$C_a = 0.$$

$$\varphi_{об} = \frac{1}{1 + C_a + \tau_{п}^2 \varepsilon_0^2 \eta'_B (1 + \sigma_{об})} = \frac{1}{1 + 0,048 \varepsilon_0^2 (1 + \sigma_{об})}.$$

$$\varphi_0 = 0,9 \varphi_{об}.$$

$$D_0 = K_0 K_3 K_{ф.п} K_{кр} = 3,64 \cdot 2,12 \cdot 1,76 \cdot 10^{-5} \cdot 5,16 \cdot 10^{-2} = 69,9 \cdot 10^{-7}.$$

$$D_c = D_0 \frac{P_{про}}{\delta_0^3} = D_0 \frac{P_{мх.кр}}{\delta_{кр}^3} = 69,9 \cdot 10^{-7} \frac{78,5}{3,9^3 \cdot 10^{-9}} = 9250.$$

$$D_x = K_y(x).$$

$D(x) = x^5 D_x$. Расчет функции $D(x)$ отражён в таблице Б.4, нахождение x_0 на рисунке Б.2.

Таблица Б.4- К графическому нахождению диаметра сердечника

x	ε_0^2	ε_d^2	$\sigma_{об}$	$\varphi_{об}$	φ_0^2	K_y	x^5	$D(x)$
4	1,637	1,251	1,468	0,838	0,569	0,712	1024	7,29
5	1,557	1,216	1,394	0,848	0,582	0,708	3125	2213
6	1,497	1,187	1,341	0,856	0,594	0,705	7776	5482
7	1,451	1,177	1,302	0,862	0,602	0,709	16807	11909

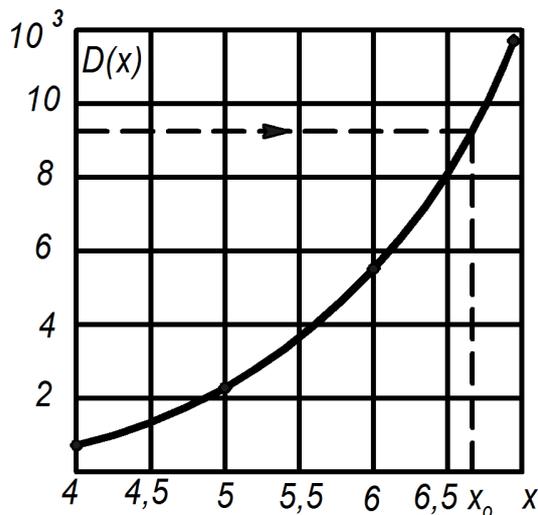


Рисунок Б2 - К нахождению относительного диаметра сердечника КМС

Относительный диаметр сердечника

x_0 составил (рис. Б.2) 6,65.

Следовательно,

$$d_c = \delta_{кр} \cdot x_0 = 3,9 \cdot 10^{-3} \cdot 6,65 = 25,7 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Принимаем $d_c = 26 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$

Определим абсолютные размеры

МС:

$$A_0 = A_* \cdot d_c = 0,635 \cdot 26 = 16,5 \text{ мм;}$$

$$H_0 = H_* \cdot d_c = 2,91 \cdot 26 = 75,7 \text{ мм;}$$

$$d_{п} = d_* \cdot d_c = 1,37 \cdot 26 = 35,6 \text{ мм; } a_{п} = a_{п*} \cdot d_c = 0,127 \cdot 26 = 3,3 \text{ мм;}$$

$$\Delta_k = \Delta_* \cdot d_c = 0,065 \cdot 26 = 1,7 \text{ мм;}$$

$$a_{\text{ск}} = a_{\text{ск}^*} \cdot d_c = 0,36 \cdot 26 = 9,4 \text{ мм};$$

$$a_{\text{як}} = a_{\text{ск}} = 9,4 \text{ мм};$$

$$b_{\text{ск}} = b_{\text{як}} = 3,05 \cdot 26 = 79,3 \text{ мм};$$

$$R_o = R_{o^*} \cdot d_c = 1,87 \cdot 26 = 48,6 \text{ мм};$$

Определим номинальную МДС

$$F_{\text{н}} = n_p \sqrt{\psi_o \frac{h_o \Theta_o f_3}{\rho} \cdot \frac{\lambda_{\text{охл}} \cdot \lambda_{o^*} d_c^3}{l_{o^*}}} = 1 \sqrt{1 \frac{13,5 \cdot 75 \cdot 0,55}{2,53 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{39,5 \cdot 1,85 \cdot 26^3 \cdot 10^{-9}}{5,54}} = 2259 \text{ А}$$

Рассчитаем число витков обмотки и диаметр обмоточного провода:

$$N = \frac{U_{\text{н}}}{n_p \cdot \sqrt{\psi_o \frac{h_o \Theta_o \rho}{f_3} \cdot \frac{\lambda_{\text{охл}} \cdot l_{o^*} \cdot d_c}{\lambda_{o^*}}}} = \frac{220}{1 \cdot \sqrt{1 \frac{13,5 \cdot 75 \cdot 2,53 \cdot 10^{-8}}{0,55} \cdot \frac{39,5 \cdot 5,54 \cdot 26 \cdot 10^{-3}}{1,85}}}}$$

$$= 18432 \text{ вит.}$$

$$d_{\text{м}} = 2d_c \sqrt{\frac{f_3 \lambda_{\text{ок}}}{\pi \cdot N}} = 2 \cdot 26 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{\frac{0,55 \cdot 1,85}{3,14 \cdot 1,8432 \cdot 10^4}} = 0,218 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Пример расчета Б.6 расчета по методике Свинцова Г.П. [151]

Исходные данные для расчета: $P_{\text{мх.кр}} = 8\text{кГ} = 78,5\text{Н}$; $\delta_{\text{кр}} = 3,9 \cdot 10^{-3}\text{м} = 3,9\text{см}$; $T_0 = 40^\circ\text{C}$;

$$R_0 = 50 \cdot 10^{-3}\text{М}; \tau = 80^\circ\text{C}; \beta_T = 1; K_3 = 0,4; d_* = 1,37; a_{\text{п*}} = 0,127;$$

$$a_{\text{ск*}} = 0,36; H_* = 2,91; A_* = 0,635; \Delta_* = 0,065 \text{ (кратности размеров в МС}$$

соответствуют приводному ЭМ контактора КПВ-503) Катушка

бандажированная, компаундированная с намоткой на стальную

трубу, обмоточный провод – медный.

Решение:

В соответствии с рис. 1.11 $R_0 = C + a_{\text{ск}}$

$$\text{tg}\varphi = \delta/R_0 = 3,9 \cdot 10^{-3}/50 \cdot 10^{-3} = 0,078; \varphi = 0,078 \text{ рад} (4,47^\circ\text{C}).$$

$$R_* = c_* + a_{\text{ск*}}; R_* = 1,51 + 0,36 = 1,87; \delta_* = R_* \text{tg}\varphi = 1,87 \cdot 0,078 = 0,1459.$$

$$\chi = 2 \left(1,87 - \sqrt{1,87^2 - (0,5 \cdot 1,37)^2} \right) / 0,078 + 0,5568 \cdot 1,37 + 0,4 \cdot 0,1459 + \\ + \frac{2 \cdot 1,37}{\pi} \ln \left(1 + \frac{0,127}{0,1459} \right) + \frac{8 \cdot 0,127}{3,14^2} = 4,804.$$

Рассчитаем составляющие комплекса Y_2 :

$$S = H_* [(1 + 2\Delta_*)(1 + \beta_T) + 2A_*].$$

$$S = 2,91 [(1 + 2 \cdot 0,065)(1 + 1) + 2 \cdot 0,635] = 12,57.$$

$$\frac{A_* H_* S^{0,8}}{(R_* \text{tg}\varphi)^2 (1 + 2\Delta_* + A_*)} = \frac{0,635 \cdot 2,91 \cdot 12,57^{0,8}}{0,1459^2 (1 + 2 \cdot 0,065 + 0,635)} = 372,6.$$

$$\frac{3,6 K_3 \mu_0^2}{\pi^{0,2} \cdot 1,62 \cdot 10^{-8}} = \frac{3,6 \cdot 0,4 \cdot 12,56^2 (10^{-7})^2}{3,14^{0,2} \cdot 1,62 \cdot 10^{-8}} = 111,54 \cdot 10^{-6}.$$

$$\frac{\tau(1 + 0,005\tau)}{1 + 0,0043(\tau + T_0)} = \frac{80(1 + 0,005 \cdot 80)}{1 + 0,0043(80 + 40)} = 73,88.$$

Принимаем $K_{\text{п}} = 1,40$; $K_{\text{зап}} = \sqrt{1,5}$ (для контакторов).

Следовательно, $K = 1,4 \cdot 1,225 = 1,715$; $K^2 = 2,941$; $\frac{1}{K^2} = 0,340$.

а) Для продолжительного режима работы ($n_p = 1$)

Исходя из $B_{\delta}^2 = Y_2 d_c^{0,6}$

$$Y_2 = 111,54 \cdot 10^{-6} \cdot 73,88 \cdot 0,340 \cdot 372,6 = 1,044 ; Y_2^{10/3} = 1,154 .$$

Подсчитаем комплексы:

$$\frac{2\mu_0 P_{\text{ЭМ}}}{\pi \chi \delta_*} = \frac{2 \cdot 12,56 \cdot 10^{-7} \cdot 78,6}{3,14 \cdot 4,804 \cdot 0,1459} = 0,897 \cdot 10^{-4} ;$$

$$\sqrt{\frac{2\mu_0 P_{\text{ЭМ}}}{\pi \chi \delta_*}} = \sqrt{0,897 \cdot 10^{-4}} = 9,474 \cdot 10^{-3} .$$

В соответствии с выражением

$$B_{\delta} = \left(\frac{2\mu_0 P_{\text{ЭМ}} Y_2^{10/3}}{\pi \chi \delta_*} \right)^{3/26}$$

получим:

$$B_{\delta} = (0,897 \cdot 10^{-4} \cdot 1,154)^{0,1154} = 0,347 \text{ Т} .$$

Тогда согласно выражению $d_c = \frac{1}{B_{\delta}} \sqrt{\frac{2\mu_0 P_{\text{ЭМ}}}{\pi \chi \delta_*}}$

$$d_c = \frac{9,471 \cdot 10^{-3}}{0,349} = 27,3 \cdot 10^{-3} \text{ м (тестовый образец имеет } d_c = 27,5 \cdot 10^{-3} \text{ м; см.}$$

таблицу Б.5).

Таблица Б.5-Соразмерности в клапанных МС приводных ЭМ реальных аппаратов, (заимствованы из [176])

Тип аппарата	d_c , мм	A_*	H_*	d_*	c_*	Δ_*	$a_{п*}$	$a_{ск*}$
КН-100	16	1,0	3,37	1,25	1,56	0,0	0,22	0,25
КПМ-113	26	0,52	2,94	1,46	1,40	0,115	0,14	0,346
КПЗ1/40	22	0,775	2,91	1,60	1,50	0,025	0,21	0,27
КПВ-503	27,5	0,635	2,91	1,37	1,51	0,065	0,127	0,36
КПВ-604	33,5	0,70	3,34	1,34	1,55	0,085	0,10	0,30
КПВ-605	44	0,74	3,29	1,41	1,41	0,07	0,136	0,25
Реле 8В	11	0,865	4,0	1,46	1,57	0,0	0,45	0,245
Реле 8М	9	0,87	4,21	1,34	1,56	0,0	0,47	0,28

В соответствии с $S_{\text{охл}} = \pi d_c^2 S$:

$$S_{\text{охл}} = 3,14 (27,3 \cdot 10^{-3})^2 12,57 = 294,2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 > S_{\text{охл.гр}},$$

что свидетельствует об адекватном выборе расчетной формулы (Б1) для определения B_δ .

Результаты расчета основных параметров МС сведены в таблицу Б.6.

Таблица Б.6 - Результаты проектного расчета КМС по предлагаемой методике

Режим работы		d_c , мм	A_o , мм	H_o , мм	d_n , мм	c , мм	Δ_k , мм	a_n , мм	$a_{ск}$, мм
$n_p = 1$		27,3	17,3	79,4	37,1	41,2	1,77	3,47	9,83
$n_p = 4$		15,5	9,84	45,1	21,2	23,4	1,0	1,97	5,58
Кратко- временн ый	$t_{вкл} = 1с$	6,4	4,06	18,6	8,77	9,66	0,42	0,81	2,30
	$t_{вкл} = 10с$	11,4	7,24	33,2	15,6	17,2	0,74	1,45	4,10

б) повторно-кратковременный режим работы (принимая ПВ % = 25 – относительная продолжительность включения). Согласно [159] $n_p = 100/\text{ПВ} \%$, следовательно, $n_p = \frac{100}{25} = 4$.

В данном случае сохраним основные соразмерности в МС (принимая их соответствующими продолжительному режиму).

Согласно этой методики

$$Y_2 = 1,044 \cdot 4 = 4,176, \text{ а } Y_2^{10/3} = 117,3.$$

$$B_\delta = (0,897 \cdot 10^{-4} \cdot 117,3)^{0,1154} = 0,591 \text{ Т.}$$

$$\text{Тогда на основании } d_c = \frac{1}{B_\delta} \sqrt{\frac{2\mu_0 P_{эм}}{\pi \chi \delta_*}} :$$

$$d_c = \frac{9,471 \cdot 10^{-3}}{0,591} = 16,0 \cdot 10^{-3} \text{ м, а } d_c^2 = 256 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

В соответствии с $S_{охл} = \pi d_c^2 S$:

$$S_{охл} = 3,14 \cdot 256 \cdot 10^{-6} \cdot 12,57 = 101,0 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 < S_{охл,гр} \text{ (необходимо использовать в}$$

расчетах в данном случае выражение $B_\delta = \left(\frac{2\mu_0 P_{эм} Y_1^6}{\pi \chi \delta_*} \right)^{1/14}$).

В соответствии с $B_\delta^2 = Y_1 d_c^{1/3}$ подсчитаем составляющие и Y_1 :

$$\frac{2,1K_3 \mu_0^2}{\sqrt[3]{\pi} \cdot 1,62 \cdot 10^{-8}} = \frac{2,1 \cdot 0,4 \cdot 12,56^2 \cdot 10^{-14}}{\sqrt[3]{3,14} \cdot 1,62 \cdot 10^{-8}} = 55,86 \cdot 10^{-6};$$

$$\sqrt[3]{S^2} = \sqrt[3]{12,57^2} = 5,406 ;$$

$$\frac{A_* H_* \sqrt[3]{S^2}}{(R_* t g \varphi)^2 (1 + 2\Delta_* + A_*)} = \frac{0,635 \cdot 2,91 \cdot 5,406}{0,1459^2 (1 + 2 \cdot 0,065 + 0,635)} = 265,9 ;$$

$$Y_1 = 55,86 \cdot 10^{-6} \cdot 73,88 \cdot 0,340 \cdot 4 \cdot 265,9 = 1,492 , \text{ а } Y_1^6 = (1,492)^6 = 11,05 .$$

$$B_\delta = (0,897 \cdot 10^{-4} \cdot 11,05)^{0,07143} = 0,610 \text{ Тл} .$$

$$d_c = \frac{9,471 \cdot 10^{-3}}{0,61} = 15,5 \cdot 10^{-3} \text{ м} , \text{ а } d_c^2 = 240 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 .$$

$S_{\text{охл}} = 3,14 \cdot 240 \cdot 10^{-6} \cdot 12,57 = 94,7 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 < S_{\text{охл.гр}}$ (это свидетельствует об адекватном выборе расчетной формулы для B_δ).

в) кратковременный режим нагрева

$$1) t_{\text{вкл}} = 1 \text{ с} .$$

$$\text{В соответствии с } B_\delta = 0,1282 \sqrt[4]{\frac{P_{\text{эм}} \tau}{(1 + 0,0043(\tau + T_0)) t_{\text{вкл}}} \chi(R_* t g \varphi)^3} \cdot \sqrt{\frac{A_* H_* K_3}{K}} ;$$

$$\frac{P_{\text{эм}} \tau}{(1 + 0,0043(\tau + T_0)) t_{\text{вкл}}} = \frac{78,6 \cdot 80}{1 + 0,0043(80 + 40)} = 4148 ;$$

$$\frac{1}{X(R_* t g \varphi)^3} = \frac{1}{4,804(0,1459)^3} = 67,0 ;$$

$$\sqrt{A_* H_* K_3 / K} = \sqrt{0,635 \cdot 2,91 \cdot 0,4 / 2,941} = 0,501 ;$$

$$B_\delta = 0,1282 \sqrt[4]{414,8 \cdot 67} \cdot 0,501 = 1,47 \text{ Т} .$$

На основании $d_c^2 = \frac{B_\delta^{12}}{Y_1^6}$ имеем:

$$d_c = \frac{9,471 \cdot 10^{-3}}{1,47} = 6,4 \cdot 10^{-3} \text{ м} .$$

$$2) t_{\text{вкл}} = 10 \text{ с} .$$

$$B_\delta = 0,1282 \sqrt[4]{414,8 \cdot 67} \cdot 0,501 = 0,829 \text{ Т} ;$$

$$d_c = \frac{9,471 \cdot 10^{-3}}{0,829} = 11,4 \cdot 10^{-3} \text{ м} .$$

Результаты проектного расчета МС приведены в таблицу Б.7.

Таблица Б.7. Результаты проектного расчета КМС по предлагаемой методике

Режим работы	d_c , мм	A_o , мм	H_o , мм	d_{II} , мм	c , мм	Δ_k , мм	a_{II} , мм	$a_{ск}$, мм	
$n_p = 1$	27,3	17,3	79,4	37,1	41,2	1,77	3,47	9,83	
$n_p = 4$	15,5	9,84	45,1	21,2	23,4	1,0	1,97	5,58	
Кратко- временный	$t_{вкл} = 1с$	6,4	4,06	18,6	8,77	9,66	0,42	0,81	2,30
	$t_{вкл} = 10с$	11,4	7,24	33,2	15,6	17,2	0,74	1,45	4,10

При выполнении промышленных проектов часть полученных размеров КМС округляется до значений по сортаменту.

Пример расчета Бб по оптимизационной методике Любчика М.А. [116]

Исходные данные: Критическое значение усилия $P_{\text{про}} = P_{\text{мх.кр}} = 15 \text{ Н}$; критический рабочий воздушный зазор $\delta_o = \delta_{\text{кр}} = 6 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. Температура окружающей среды $\Theta_{o.c} = T_o = 40 \text{ }^\circ\text{C}$. Провод обмоточный марки ПЭВ. Допустимая температура нагрева обмотки $\Theta_d = \Theta_{\text{доп}} = 125 \text{ }^\circ\text{C}$. Обмотка компаундированная намотанная на металлическую трубу ($\beta_r = 1,7$). Режим работы продолжительный. Предназначен для работы в нормальных условиях. Служит МС приводного ЭМ контактора. Производство со стабильным технологическим процессом. Магнитная система должна быть минимизирована по массе активных материалов.

Решение:

1. Согласно рекомендациям [120] назначаем коэффициенты запаса для критических условий: $k_o = 1,35$; $K_{U_{\text{min}}} = \chi_o = 0,85$; $\xi_o = 0,88$ соответственно по силе, напряжению, нагреву.

2. Выбираем и определяем кратности МС:

$$e = d_* = 1,6; \Delta_* = q = 0,1; i_{\text{п}} = a_{\text{п}*} = 0,2.$$

В соответствии [116] определим

$$n = A_* = 0,732 - 0,0056 \cdot 15 = 0,648;$$

$$\beta = \left(5,339 + 0,437 / P_{\text{мх.кр}} \right) / d_*^{1,084} = \left(5,339 + \frac{0,437}{15} \right) / 1,6^{1,084} = 3,21.$$

$$m = H_* = n\beta = 0,648 \cdot 3,21 = 2,08.$$

Для провода

$$\Theta_d = \tau_{\text{доп}} = 85 \text{ }^\circ\text{C}; \Theta_o = \tau_o = \xi_o \tau_{\text{доп}} = 0,88 \cdot 85 = 75 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Рассчитаем коэффициенты теплопередачи с наружной и с внутренней боковой поверхностями обмотки:

$$h_o = h_n = K_{т.н} = 9,3(1 + 0,006\tau_o) = 9,3(1 + 0,006 \cdot 75) = 13,5 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{град}};$$

$$h_b = K_{т.в} = \gamma h_n = \beta K_{т.н} = 1,7 \cdot 13,5 = 23 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{град}}.$$

Удельное электрическое сопротивление обмоточной меди

$$\rho = \rho_r = \rho_o(1 + \alpha\Theta_{\text{доп}}) = 1,65 \cdot 10^{-8}(1 + 0,0043 \cdot 125) = 2,53 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}.$$

По данным [116, 120] принимаем $f_3 = K_3 = 0,55$.

Расчет комплексов $K_c, K_o, K_3, K_{\phi.п}, K_{\text{кр}}$.

Для КМС принимается, что электромагнитный момент создается за счет сил основного зазора, т.е. $K_c = 0$.

Для однокатушечной МС $K_o = 2/f_3 = 2/K_3 = 2/0,55 = 3,64$.

Комплекс коэффициентов запаса:

$$K_{\text{зап}} = \frac{k_o}{\chi_o^2 \xi_o} = \frac{k_p}{K_{U_{\text{min}}}^2 \xi_o} = \frac{1,35}{0,85^2 \cdot 0,88} = 2,12.$$

Комплекс физических параметров:

$$K_{\phi.п} = \frac{\rho}{\mu_o h_o \Theta_d} = \frac{\rho}{\mu_o K_{т.н} \tau_{\text{доп}}} = \frac{2,53 \cdot 10^{-8}}{12,56 \cdot 10^{-7} \cdot 13,5 \cdot 85} = 1,76 \cdot 10^{-5} \frac{\text{М}^3}{\text{Н}}.$$

Комплекс коэффициентов кратностей определяется по выражению

$$K_{\text{кр}} = \frac{l_{\text{ср}^*}}{\lambda_{\text{охл}} \lambda_{\text{ок}} \lambda_{\text{п}}}.$$

Для удобства размещения катушки при ее установке предусматривается конструктивный запас $A_3 = u d_c$; практически принимают $0,1 \leq u \leq 0,2$. Выбираем $u = 0,2$.

$$\tau_{\text{ср}} = l_{\text{ср}^*} = \pi(1 + 2q + n) = \pi(1 + 2\Delta_* + A_*) = 3,14(1 + 2 \cdot 0,1 + 0,648) = 5,80;$$

$$\lambda_{\text{ок}} = \frac{A_o H_o}{d_c^2} = A_* H_* = 0,648 \cdot 2,08 = 1,348;$$

$$\lambda_{\text{п}} = \frac{S_{\text{п}}}{d_c^2} = \frac{\pi}{4} d_*^2 = \frac{3,14}{4} \cdot 1,6^2 = 2,01;$$

$$\lambda_{\text{охл}} = \pi H_* [1 + 2\Delta_* + 2A_* + \beta_T (1 + 2\Delta_*)] = 3,14 \cdot 2,08 \cdot [1 + 2 \cdot 0,1 + 2 \cdot 0,648 + 1,7(1 + 2 \cdot 0,1)] = 29,63;$$

$$K_{\text{кр}} = \frac{l_{\text{ср}*}}{\lambda_{\text{п}} \lambda_{\text{ок}} \lambda_{\text{охл}}} = \frac{5,80}{2,01 \cdot 1,348 \cdot 29,63} = 7,225 \cdot 10^{-2}.$$

Определим остальные кратности в МС:

$$c_* = 0,5 + \Delta_* + A_* + u = 0,5 + 0,1 + 0,648 + 0,2 = 1,448;$$

$$b_{\text{ск}*} = 1 + 2\Delta_* + 2A_* = 1 + 2 \cdot 0,1 + 2 \cdot 0,648 = 2,5;$$

$$a_{\text{ск}*} = \frac{\pi}{4b_{\text{ск}*}} = \frac{3,14}{4 \cdot 2,5} = 0,314;$$

$$R_{\text{о}*} = c_* + a_{\text{ск}*} = 1,448 + 0,314 = 1,762.$$

Комплекс коэффициентов, уточняющих проектный расчет, определяется выражением $K_y = \varphi_0^2 \varepsilon_d^2 \psi_0 n_p^2$, при стандартных условиях нагрева обмотки [120] $\psi_0 = 1$. для продолжительного режима работы $n_p = 1$. Следовательно, $K_y = \varphi_0^2 \varepsilon_d^2$.

$$\varepsilon_d^2 = 1 + \frac{5,8a_{\text{п}*}}{d_* (1 + 0,91a_{\text{п}*}x)^2} = 1 + \frac{5,8 \cdot 0,2}{1,6(1 + 0,91 \cdot 0,2x)^2} = 1 + \frac{0,725}{(1 + 0,182x)^2};$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_0^2 &= 1 + \frac{1,48}{d_* x} + \frac{5,8a_{\text{п}*}}{d_* (1 + 0,91a_{\text{п}*}x)} = 1 + \frac{1,48}{1,6x} + \frac{5,8 \cdot 0,2}{1,6(1 + 0,182x)} = \\ &= 1 + \frac{0,925}{x} + \frac{0,725}{1 + 0,182x}; \end{aligned}$$

$$g' = \lambda = \frac{2\pi}{\ln(2c_* + \sqrt{4c_*^2 - 1})} = \frac{2\pi}{\ln(2 \cdot 1,448 + \sqrt{4 \cdot 1,448^2 - 1})} = \frac{6,28}{1,725} = 3,64;$$

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{ос}} &= 1 + \frac{2}{\pi} \frac{g'H_*}{x} \left[\frac{1}{d_*^2 \varepsilon_0^2} + \eta'_e \right] = 1 + \frac{2 \cdot 3,64 \cdot 2,08}{3,14x} \left[\frac{1}{1,6^2 \varepsilon_0^2} + 0,033 \right] = \\ &= 1 + \frac{4,82}{x} \left[\frac{0,391}{\varepsilon_0^2} + 0,033 \right]; \end{aligned}$$

$$\eta'_B = \frac{\delta'_{\text{эКВ}}}{\delta_0} = \frac{0,2 \cdot 10^{-3}}{6 \cdot 10^{-3}} = 0,033;$$

$$\eta'' = \eta'_B = 0,033;$$

$$\varphi_{об} = \frac{1}{1 + d_*^2 \varepsilon_o^2 \eta'_B (1 + \sigma_{об})} = \frac{1}{1 + 2,56 \cdot 0,033 \varepsilon_o^2 (1 + \sigma_{об})} =$$

$$= \frac{1}{1 + 0,0845 \varepsilon_o^2 (1 + \sigma_{об})};$$

$$\varphi_o = (0,8 \div 0,9) \varphi_{об}; \text{ (при } 1 < x < 5 \text{)}$$

$$\varphi_o = 0,9 \varphi_{об};$$

$$K_y = \varphi_o^2 \varepsilon_d^2 = D_x;$$

$D(x) = x^5 D_x$ (результаты расчета сведены в таблицу Б.9).

$$D_o = K_o K_3 K_{ф.п} K_{кр} = 3,64 \cdot 2,12 \cdot 1,76 \cdot 10^{-5} \cdot 7,225 \cdot 10^{-2} = 98,13 \cdot 10^{-7};$$

$$D_c = D_o \frac{P_{мх.кр}}{\delta_{кр}^3} = \frac{98,13 \cdot 15 \cdot 10^{-7}}{6^3 \cdot 10^{-9}} = 681.$$

Таблица Б.8 - Результаты расчета по оптимизационной методике Любчика М.А.

x	x^5	ε_o^2	ε_d^2	$\sigma_{об}$	$\varphi_{об}$	φ_o	φ_o^2	K_y	D_x	$D(x)$
2	32	1,994	1,390	1,552	0,699	0,629	0,396	0,550	0,550	17,6
3	243	1,777	1,303	1,406	0,735	0,662	0,438	0,571	0,571	138,8
4	1024	1,651	1,243	1,325	0,755	0,680	0,462	0,574	0,574	588
5	3125	1,565	1,199	1,273	0,769	0,692	0,479	0,574	0,547	1794

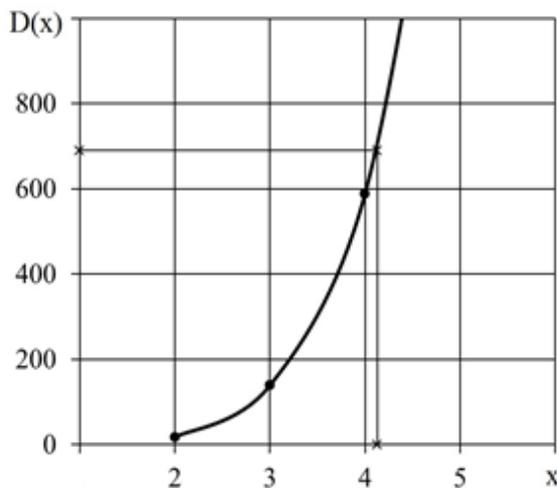


Рисунок Б.3- К графическому определению диаметра сердечника

По рисунку Б.3, построенному по данным таблицы Б.8, определяем величину относительного рабочего зазора, соответствующего $D_c = 681$.

$$x = d_c / \delta_{кр} \rightarrow d_c = 4,18 \cdot 6 = 25,1 \text{ мм}$$

Пример расчета Б.8 по разработанной оптимизационной методике [71]

Исходные данные: Критическое значение усилия $P_{\text{мх.кр}} = 15 \text{ Н}$; критический рабочий воздушный зазор $\delta_{\text{кр}} = 6 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; температура окружающей среды $T_0 = 40 \text{ }^\circ\text{C}$; допустимая температура нагрева обмотки $\theta_{\text{доп}} = 125 \text{ }^\circ\text{C}$; режим работы продолжительный; производство со стабильным технологическим процессом; магнитная система должна быть минимизирована по потребляемой мощности; номинальное напряжение $U_{\text{н}} = 220 \text{ В}$, $K_{U_{\text{max}}} = 1,05$, $K_{U_{\text{min}}} = 0,85$.

Решение: Принимаем $K_3 = 0,5$

$$1) \quad z_1 = 0,319\delta_{\text{кр}} - 2,236 = 0,319 \cdot 6 - 2,236 = -0,322 ;$$

$$z_2 = 0,159P_{\text{мх.кр}} - 2,392 = 0,159 \cdot 15 - 2,392 = -0,007 ;$$

$$z_3 = 0 ; z_4 = 0 ; z_5 = 8K_3 - 4 = 8 \cdot 0,5 - 4 = 0 .$$

$$2) \quad \delta_{*p} = 10^{-8} \left(72 + 5,5(-0,322) - 1,7(-0,322)^2 \right)^4 = 0,241 ;$$

$$H_{*p} = 10^{-4} \left(156,1 - 4,5(-0,322)^2 \right)^2 = 2,422 ; c_{*p} = 1,836 ; A_{*p} = 0,655 ;$$

$$d_{*p} = 1,848 + 0,027(-0,322) = 1,839 ;$$

$$B_{*p} = 10^{-12} \left(109,5 + 8,3(-0,322) - 2,2(-0,322)^2 \right)^6 = 1,467 .$$

$$3) \quad d_c = \frac{\delta_{\text{кр}}}{0,241} = \frac{6}{0,241} = 24,9 \text{ мм} ; H_0 = H_{*p}d_c = 60,3 \text{ мм} ;$$

$$d_{\text{II}} = d_{*p}d_c = 1,839 \cdot 24,9 = 45,8 \text{ мм} ; c_p = c_{*p}d_c = 1,836 \cdot 24,9 = 45,7 \text{ мм} ;$$

$$A_0 = 0,655 \cdot 24,9 = 16,3 \text{ мм} ;$$

$$B_{\text{кп}} = \sqrt{\mu_0 P_{\text{мх.кр}}} / \delta_{\text{кр}} = \sqrt{12,56 \cdot 10^{-7} \cdot 15} / (6 \cdot 10^{-3}) = 0,723 ;$$

$$B_0 = B_{*p}B_{\text{кп}} = 1,467 \cdot 0,723 = 1,06 \text{ Т} .$$

$$4) \quad x_1 = 1,007H_{*p} - 2,769 = 1,007 \cdot 2,422 - 2,769 = -0,33 ;$$

$$x_2 = 3,195d_{*p} - 5,591 = 3,195 \cdot 1,839 - 5,591 = 0,285 ;$$

$$x_3 = 4,405c_{*p} - 7,753 = 4,405 \cdot 1,836 - 7,753 = 0,335 ;$$

$$x_4 = 6,667A_{*p} - 4 = 6,667 \cdot 0,655 - 4 = 0,367 ;$$

$$B_0 \leq 1,11 \text{ Т} , \text{ поэтому } x_5 = -0,674 .$$

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{\delta_{*p}}{0,25 + c_{*p}} = \operatorname{arctg} \frac{0,241}{0,25 + 1,836} = \operatorname{arctg} 0,1155, \quad \varphi = 0,1160.$$

$$5) \quad b_0 = 4,15 + 7,04\varphi - 13,9\varphi^2 = 4,15 + 7,04 \cdot 0,116 - 13,9 \cdot 0,116^2 = 4,78;$$

$$b_1 = 0,15 - 1,55\varphi + 4,39\varphi^2 = 0,15 - 1,55 \cdot 0,116 + 4,39 \cdot 0,116^2 = 0,029;$$

$$b_2 = 0,096 + 0,783\varphi - 2,25\varphi^2 = 0,096 + 0,783 \cdot 0,116 - 2,25 \cdot 0,116^2 = 0,157;$$

$$b_5 = 0,204 - 0,953\varphi + 2,34\varphi^2 = 0,204 - 0,953 \cdot 0,116 + 2,34 \cdot 0,116^2 = 0,125;$$

$$b_{55} = 0,149 - 0,691\varphi + 1,59\varphi^2 = 0,149 - 0,691 \cdot 0,116 + 1,59 \cdot 0,116^2 = 0,090;$$

$$B = b_0 + b_1x_1 - b_2x_2 + b_5x_5 + b_{55}x_5^2 = 4,78 + 0,029 \cdot (-0,33) - 0,157 \cdot 0,285 + \\ + 0,125 \cdot (-0,674) + 0,09 \cdot (-0,674)^2 = 4,682;$$

$$F_* = 10^{-4} B^4 = 10^{-4} \cdot 4,682^4 = 480,5 \cdot 10^{-4};$$

$$F_{\text{баз}} = \frac{B_0 d_c}{\mu_0} = \frac{1,06 \cdot 24,9 \cdot 10^{-3}}{12,56 \cdot 10^{-7}} = 2,10 \cdot 10^4;$$

$$F_{\text{сп}} = F_* F_{\text{баз}} = 480,5 \cdot 10^{-4} \cdot 2,1 \cdot 10^4 = 1009 \text{ А.}$$

$$6) \quad a_{55} = 3,202(0,01 \cdot 125) - 4,163 = -0,161;$$

$$a_{66} = 6,667(0,01 \cdot 40) - 3,667 = -1;$$

$$\Theta_{v,*} = \left[1,44 + 0,154(-0,161) - 0,184(-1) + 0,043(-1)^2 - 0,024(-0,161)(-1) \right]^2 = \\ = 1,638^2 = 2,684;$$

$$\Theta_v = \Theta_{v,*} T_0 = 2,684 \cdot 40 = 107,4 \text{ }^\circ\text{C.}$$

$$7) \quad \rho_{\text{гор}} = 1,62 \cdot 10^{-8} (1 + 0,0043 \Theta_v) = 1,62 \cdot 10^{-8} (1 + 0,0043 \cdot 107,4) = \\ = 2,368 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м};$$

$$8) \quad U_{\text{сп}} = K_{U \text{ мин}} U_{\text{н}} / K_{U \text{ сп}} = 0,85 \cdot 220 / 1,1 = 170 \text{ В.}$$

$$9) \quad d'_M = 2 \sqrt{\frac{\rho_{\text{гор}} (d_c + 2\Delta_k + A_0) F_{\text{сп}}}{U_{\text{сп}}}} = \\ = 2 \sqrt{\frac{2,368 \cdot 10^{-8} (24,9 + 2 \cdot 2,49 + 16,3) 10^{-3} \cdot 1009}{170}} = 0,161 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Выбираем $d_M = 0,16 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, $K_3 = 0,55$,

$$q_M = \frac{\pi d_M^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 0,16^2 \cdot 10^{-6}}{4} = 0,02 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

$$N = A_0 H_0 K_3 / q_M = \frac{16,3 \cdot 60,3 \cdot 0,55 \cdot 10^{-6}}{0,02 \cdot 10^{-6}} = 27029 \text{ вит.}$$

Результаты расчета по различным методикам

Таблица Б.9 Результаты расчета, полученные по различным оптимизационными методиками

Авторы методики	d_p , мм	d_c , мм	A_p , мм	A_0 , мм	H_0 , мм	$b_{ск}$, мм	$a_{ск}$, мм	F, А
Ротерс Г.- Гордон А.В.	41,3	24,3	4,0	18,2	9,72	73	6,0	2402
Софронов Ю.В.	45,1	29,7	-	21,0	103,7	-	-	2402
Бугаев Г.А.	45,1	27,5	-	-	-	-	-	2402
Шоффа В.Н.	26,8	19,7	2,5	12,5	57,3	60,1	7,2	3340
Любчик М.А.	35,6	25,7	3,3	16,6	75,7	79,3	9,4	2259
Свинцов Г.П.	37,1	27,3	3,5	17,3	79,4	62,3	9,83	-
Любчик М.А. (оптимизационная методика)	40,16	25,1	5,02	16,26	52,20	62,75	7,88	-
Разработанная оптимизационная методика	45,8	24,9	5,60	16,3	60,3	78,18	6,23	1246

Данные таблицы свидетельствуют о существенных разбросах геометрических размеров при расчете по разным методикам. Значительное отличие величины МДС вызвано недостаточно обоснованным выбором коэффициентов запаса, потерями МДС на ферромагнитные сопротивления МС.

Приложение В

Критерий оптимальности: габаритный объем

Таблица В.1 – Влияние критической величины рабочего зазора при изменении $\delta_{кр} = 2 \div 12$ мм и постоянных $P_{мх.кр} = 10$ Н; $\Theta_{max} = 105^\circ C$; $T_0 = 40^\circ C$; $K_{max} = 1,35$; $P_{атм} = 760$ мм.рт.ст.; $k_3 = 0,5$

$\delta_{кр}$, мм	$\delta_{опт}^*$	$H_{опт}^*$	$d_{опт}^*$	$C_{опт}^*$	$A_{опт}^*$	$B_{опт}^*$
2	0,109	1,309	1,772	1,654	0,707	0,520
4	0,191	1,684	1,832	1,703	0,710	1,075
6	0,231	1,354	1,802	1,748	0,735	1,439
8	0,278	1,369	1,802	1,756	0,768	1,918
10	0,320	1,369	1,832	1,771	0,766	2,398
12	0,357	1,369	1,832	1,771	0,771	2,877

Таблица В.2 – Влияние величины критической противодействующей силы при изменении $P_{мх.кр} = 5 - 25$ Н и постоянных $\delta_p = 5$ мм; $\Theta_{max} = 105^\circ C$; $T_0 = 40^\circ C$; $K_{max} = 1,35$; $P_{атм} = 760$ мм.рт.ст.; $k_3 = 0,5$

$P_{мх.кр}$, Н	$\delta_{опт}^*$	$H_{опт}^*$	$d_{опт}^*$	$C_{опт}^*$	$A_{опт}^*$	$B_{опт}^*$
5	0,301	2,997	1,832	1,778	0,615	2,070
10	0,263	3,079	1,847	1,786	0,608	1,675
15	0,239	2,944	1,817	1,771	0,623	1,414
20	0,217	2,614	1,802	1,763	0,617	1,204
25	0,209	2,787	1,757	1,771	0,616	1,131

Таблица В.3 – Влияние максимальной допустимой температуры нагрева обмотки при изменении $\Theta_{max} = 90, 105, 120, 135,^\circ C$ и постоянных $\delta_{кр} = 5$ мм; $P_{мх.кр} = 10$ Н; $T_0 = 40^\circ C$; $K_{max} = 1,35$; $P_{атм} = 760$ мм.рт.ст.; $k_3 = 0,5$

Θ_{max} , $^\circ C$	$\delta_{опт}^*$	$H_{опт}^*$	$d_{опт}^*$	$C_{опт}^*$	$A_{опт}^*$	$B_{опт}^*$
90	0,251	3,102	1,772	1,778	0,627	1,548
105	0,263	3,079	1,847	1,786	0,608	1,675
120	0,269	2,787	1,832	1,771	0,633	1,682
135	0,281	2,982	1,765	1,778	0,624	1,774

Таблица В.4 – Влияние температуры окружающей среды при изменении T_0 и постоянных $\delta_{кр} = 5$ мм; $P_{мх.кр} = 10$ Н; $\Theta_{max} = 105^\circ C$; $K_{max} = 1,35$; $P_{атм} = 760$ мм.рт.ст.; $k_3 = 0,5$

T_0, C	$\delta_{опт}^*$	$H_{опт}^*$	$d_{опт}^*$	$C_{опт}^*$	$A_{опт}^*$	$B_{опт}^*$
40	0,199	1,210	1,847	1771	0,725	1,199
55	0,201	1,527	1,877	1,756	0,729	1,199
70	0,212	2,314	1,817	1,748	0,687	1,199

Таблица В.5 – Влияние кратности изменения напряжения на обмотке в диапазоне K_{max} от 1,05 до 1,70 и постоянных $\delta_{кр} = 5$ мм; $P_{мх.кр} = 10$ Н; $\Theta_{max} = 105^\circ C$; $T_0 = 40^\circ C$; $P_{атм} = 760$ мм.рт.ст.; $k_3 = 0,5$

K_{max}	$\delta_{опт}^*$	$H_{опт}^*$	$d_{опт}^*$	$C_{опт}^*$	$A_{опт}^*$	$B_{опт}^*$
1,05	0,231	1,392	1,802	1,748	0,737	1,435
1,35	0,199	1,210	1,847	1,771	0,725	1,199
1,70	0,209	1,909	1,817	1,733	0,714	1,199

Таблица В.6 – Влияние коэффициента заполнения при изменении $k_3 = 0,3; 0,5; 0,7$ и постоянных $\delta_{кр} = 5$ мм; $P_{мх.кр} = 10$ Н; $T_0 = 40^\circ C$; $\Theta_{max} = 105^\circ C$; $K_{max} = 1,05$; $P_{атм} = 760$ мм.рт.ст.

k_3	$\delta_{опт}^*$	$H_{опт}^*$	$d_{опт}^*$	$C_{опт}^*$	$A_{опт}^*$	$B_{опт}^*$
0,3	0,209	1,969	1,817	1,733	0,719	1,199
0,5	0,199	1,210	1,817	1,771	0,725	1,199
0,7	0,218	1,294	1,817	1,733	0,727	1,329

Таблица В.7 – Влияние атмосферного давления при изменении $P_{атм} = 600, 760, 900$ мм.рт.ст. и постоянных $\delta_{кр} = 5$ мм; $P_{мх.кр} = 10$ Н; $T_0 = 40^\circ C$; $\Theta_{max} = 105^\circ C$; $K_{max} = 1,05$; $k_3 = 0,5$

$P_{атм}$	$\delta_{опт}^*$	$H_{опт}^*$	$d_{опт}^*$	$C_{опт}^*$	$A_{опт}^*$	$B_{опт}^*$
600	0,235	2,104	1,787	1,733	0,729	1,407
760	0,199	1,210	1,847	1,771	0,725	1,199
900	0,218	1,564	1,817	1,833	0,726	1,301

Критерий оптимальности: высота электромагнита

Таблица В.8 – Влияние критической величины рабочего зазора при изменении $\delta_{кр} = 2 \div 12$ мм и постоянных $P_{мх.кр} = 10$ Н; $\Theta_{max} = 105^\circ C$; $T_0 = 40^\circ C$; $K_{max} = 1,35$; $P_{атм} = 760$ мм.рт.ст.; $k_3 = 0,5$

$\delta_{кр}$, мм	$\delta_{опт}^*$	$H_{опт}^*$	$d_{опт}^*$	$C_{опт}^*$	$A_{опт}^*$	$B_{опт}^*$
2	0,106	1,165	1,765	1,801	0,771	0,532
4	0,170	1,165	1,780	1,831	0,761	1,982
6	0,221	1,165	1,780	1,861	0,792	1,439
8	0,265	1,165	1,877	1,861	0,777	1,918
10	0,303	1,165	1,9*07	1,861	0,783	2,398
12	0,339	1,165	1,922	1,861	0,786	2,877

Таблица В.9 – Влияние величины критической противодействующей силы при изменении $P_{мх.кр} = 5 - 25$ Н и постоянных $\delta_p = 5$ мм; $\Theta_{max} = 105^\circ C$; $T_0 = 40^\circ C$; $K_{max} = 1,35$; $P_{атм} = 760$ мм.рт.ст.; $k_3 = 0,5$

$P_{мх.кр}$, Н	$\delta_{опт}^*$	$H_{опт}^*$	$d_{опт}^*$	$C_{опт}^*$	$A_{опт}^*$	$B_{опт}^*$
5	0,224	1,165	1,960	1,906	0,826	1,696
10	0,197	1,165	1,817	1,846	0,756	1,213
15	0,180	1,165	1,780	1,831	0,765	1,062
20	0,169	1,165	1,817	1,831	0,769	0,995
25	0,161	1,165	1,780	1,831	0,766	0,917

Таблица В.10 – Влияние максимальной допустимой температуры нагрева обмотки при изменении $\Theta_{max} = 90, 105, 120, 135, ^\circ C$ и постоянных $\delta_p = 5$ мм; $P_{мх.кр} = 10$ Н; $T_0 = 40^\circ C$; $K_{max} = 1,35$; $P_{атм} = 760$ мм.рт.ст.; $k_3 = 0,5$

Θ_{max} , $^\circ C$	$\delta_{опт}^*$	$H_{опт}^*$	$d_{опт}^*$	$C_{опт}^*$	$A_{опт}^*$	$B_{опт}^*$
90	0,186	1,165	1,892	1,861	0,791	1,199
105	0,197	1,165	1,817	1,846	0,759	1,213
120	0,206	1,165	1,817	1,846	0,757	1,287
135	0,214	1,165	1,780	1,846	0,764	1,343

Таблица В.11 – Влияние температуры окружающей среды при изменении T_0 и постоянных $\delta_{кр} = 5$ мм; $P_{мх.кр} = 10$ Н; $\Theta_{max} = 105^\circ C$; $K_{max} = 1,35$; $P_{атм} = 760$ мм.рт.ст.; $k_3 = 0,5$

T_0, C	$\delta_{опт}^*$	$H_{опт}^*$	$d_{опт}^*$	$C_{опт}^*$	$A_{опт}^*$	$B_{опт}^*$
40	0,197	1,165	1,817	1,846	0,759	1,213
55	0,182	1,165	1,937	1,898	0,774	1,199
70	0,160	1,165	2,102	1,973	0,761	1,199

Таблица В.12 – Влияние кратности изменения напряжения на обмотке $K_{max} = 1,05$ и постоянных $\delta_{кр} = 5$ мм; $P_{мх.кр} = 10$ Н; $\Theta_{max} = 105^\circ C$; $T_0 = 40^\circ C$; $P_{атм} = 760$ мм.рт.ст.; $k_3 = 0,5$

K_{max}	$\delta_{опт}^*$	$H_{опт}^*$	$d_{опт}^*$	$C_{опт}^*$	$A_{опт}^*$	$B_{опт}^*$
1,05	0,219	1,165	1,832	1,831	0,756	1,407
1,35	0,197	1,165	1,817	1,846	0,759	1,213
1,70	0,175	1,165	1,945	1,891	0,831	1,199

Таблица В.13 – Влияние коэффициента заполнения при изменении $k_3 = 0,3; 0,5; 0,7$ и постоянных $\delta_{кр} = 5$ мм; $P_{мх.кр} = 10$ Н; $T_0 = 40^\circ C$; $\Theta_{max} = 105^\circ C$; $K_{max} = 1,05$; $P_{атм} = 760$ мм.рт.ст.

k_3	$\delta_{опт}^*$	$H_{опт}^*$	$d_{опт}^*$	$C_{опт}^*$	$A_{опт}^*$	$B_{опт}^*$
0,3	0,173	1,165	1,960	1,906	0,834	1,199
0,5	0,197	1,165	1,817	1,846	0,759	1,213
0,7	0,211	1,165	1,780	1,846	0,755	1,315

Таблица В.14 – Влияние атмосферного давления при изменении $P_{атм} = 600, 760, 900$ мм.рт.ст. и постоянных $\delta_{кр} = 5$ мм; $P_{мх.кр} = 10$ Н; $T_0 = 40^\circ C$; $\Theta_{max} = 105^\circ C$; $K_{max} = 1,05$; $k_3 = 0,5$

$P_{атм}$	$\delta_{опт}^*$	$H_{опт}^*$	$d_{опт}^*$	$C_{опт}^*$	$A_{опт}^*$	$B_{опт}^*$
600	0,194	1,165	1,832	1,831	0,761	1,199
760	0,197	1,165	1,817	1,846	0,759	1,213
900	0,199	1,165	1,832	1,831	0,753	1,227

Критерий оптимальности: установочная площадь

Таблица В.15 – Влияние критической величины рабочего зазора при изменении $\delta_{кр} = 2 \div 12$ мм и постоянных $P_{мх.кр} = 10$ Н; $\Theta_{max} = 105^\circ C$; $T_0 = 40^\circ C$; $K_{max} = 1,35$; $P_{атм} = 760$ мм.рт.ст.; $k_3 = 0,5$

$\delta_{кр}$, мм	$\delta_{опт}^*$	$H_{опт}^*$	$d_{опт}^*$	$C_{опт}^*$	$A_{опт}^*$	$B_{опт}^*$
2	0,139	2,944	1,772	1,658	0,636	0,676
4	0,230	4,002	1,817	1,658	0,645	1,554
6	0,301	3,672	1,780	1,703	0,652	2,196
8	0,358	3,619	1,787	1,771	0,646	2,917
10	0,401	3,672	1,765	1,703	0,631	3,674
12	0,449	3,499	1,780	1,771	0,635	4,358

Таблица В.16 – Влияние величины критической противодействующей силы при изменении $P_{мх.кр} = 5 - 25$ Н и постоянных $\delta_p = 5$ мм; $\Theta_{max} = 105^\circ C$; $T_0 = 40^\circ C$; $K_{max} = 1,35$; $P_{атм} = 760$ мм.рт.ст.; $k_3 = 0,5$

$P_{мх.кр}$, Н	$\delta_{опт}^*$	$H_{опт}^*$	$d_{опт}^*$	$C_{опт}^*$	$A_{опт}^*$	$B_{опт}^*$
5	0,314	3,874	1,817	1,756	0,641	2,468
10	0,267	3,724	1,772	1,688	0,626	1,823
15	0,240	3,957	1,750	1,658	0,621	1,609
20	0,225	3,417	1,750	1,643	0,651	1,349
25	0,210	3,192	1,757	1,621	0,613	1,189

Таблица В17. – Влияние максимальной допустимой температуры нагрева обмотки при изменении $\Theta_{max} = 90, 105, 120, 135,^\circ C$ и постоянных $\delta_p = 5$ мм; $P_{мх.кр} = 10$ Н; $T_0 = 40^\circ C$; $K_{max} = 1,35$; $P_{атм} = 760$ мм.рт.ст.; $k_3 = 0,5$

Θ_{max} , $^\circ C$	$\delta_{опт}^*$	$H_{опт}^*$	$d_{опт}^*$	$C_{опт}^*$	$A_{опт}^*$	$B_{опт}^*$
90	0,257	3,897	1,780	1,688	0,622	1,774
105	0,267	3,724	1,772	1,688	0,626	1,823
120	0,276	3,544	1,772	1,688	0,656	1,879
135	0,283	3,619	1,757	1,748	0,609	1,943

Таблица В.18 – Влияние температуры окружающей среды при изменении T_0 и постоянных $\delta_{кр} = 5$ мм; $P_{мх.кр} = 10$ Н; $\Theta_{max} = 105^\circ C$; $K_{max} = 1,35$; $P_{атм} = 760$ мм.рт.ст.; $k_3 = 0,5$

T_0, C	$\delta_{опт}^*$	$H_{опт}^*$	$d_{опт}^*$	$C_{опт}^*$	$A_{опт}^*$	$B_{опт}^*$
40	0,267	3,724	1,772	1,688	0,626	1,823
55	0,253	4,144	1,802	1,748	0,612	1,809
70	0,231	3,732	1,832	1,703	0,566	1,520

Таблица В.19 – Влияние кратности изменения напряжения на обмотке K_{max} и постоянных $\delta_{кр} = 5$ мм; $P_{мх.кр} = 10$ Н; $\Theta_{max} = 105^\circ C$; $T_0 = 40^\circ C$; $P_{атм} = 760$ мм.рт.ст.; $k_3 = 0,5$

K_{max}	$\delta_{опт}^*$	$H_{опт}^*$	$d_{опт}^*$	$C_{опт}^*$	$A_{опт}^*$	$B_{опт}^*$
1,05	0,287	3,387	1,765	1,688	0,620	1,950
1,35	0,267	3,724	1,772	1,688	0,626	1,823
1,70	0,247	3,952	1,817	1,688	0,649	1,717

Таблица В.20 – Влияние коэффициента заполнения при изменении $k_3 = 0,3; 0,5; 0,7$ и постоянных $\delta_{кр} = 5$ мм; $P_{мх.кр} = 10$ Н; $T_0 = 40^\circ C$; $\Theta_{max} = 105^\circ C$; $K_{max} = 1,05$; $P_{атм} = 760$ мм.рт.ст.

k_3	$\delta_{опт}^*$	$H_{опт}^*$	$d_{опт}^*$	$C_{опт}^*$	$A_{опт}^*$	$B_{опт}^*$
0,3	0,243	4,092	1,780	1,673	0,635	1,703
0,5	0,267	3,724	1,772	1,688	0,626	1,823
0,7	0,281	3,649	1,772	1,703	0,623	1,957

Таблица В.21 – Влияние атмосферного давления при изменении $P_{атм} = 600, 760, 900$ мм.рт.ст. и постоянных $\delta_{кр} = 5$ мм; $P_{мх.кр} = 10$ Н; $T_0 = 40^\circ C$; $\Theta_{max} = 105^\circ C$; $K_{max} = 1,05$; $k_3 = 0,5$

$P_{атм}$	$\delta_{опт}^*$	$H_{опт}^*$	$d_{опт}^*$	$C_{опт}^*$	$A_{опт}^*$	$B_{опт}^*$
600	0,265	3,769	1,787	1,718	0,609	1,809
760	0,267	3,724	1,772	1,688	0,626	1,823
900	0,271	3,649	1,772	1,703	0,649	1,837