

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

На правах рукописи

Михайлов Алексей Валерьевич

**УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИК СИНТЕЗА
ОПТИМАЛЬНЫХ ПРИВОДНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТОВ
НИЗКОВОЛЬТНЫХ КОММУТАЦИОННЫХ АППАРАТОВ**

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 – 2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
РАЗДЕЛ 1 ОБЗОР И АНАЛИЗ КОНСТРУКТИВНЫХ, ТЕХНИЧЕСКИХ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ НИЗКОВОЛЬТНЫХ КОНТАКТОРОВ И РЕЛЕ	15
1.1 Краткий обзор и анализ низковольтных контакторов отечественных и зарубежных компаний.....	15
1.2 Исходные данные для разработки методик проектирования приводных электромагнитов низковольтных контакторов	24
1.3 Перспективные схемы форсированного управления приводными электромагнитами низковольтных контакторов	28
1.4 Основные технические требования к низковольтным контакторам	33
1.5 Выводы к разделу 1	35
РАЗДЕЛ 2 ОПТИМИЗАЦИЯ ПРИВОДОВ КОНТАКТОРОВ НИЗКОГО НАПРЯЖЕНИЯ.....	36
2.1 Разработка методики проектного расчета П-образных двухкатушечных четырехобмоточных форсированных электромагнитов постоянного тока	37
2.2 Разработка методики проектирования оптимального П-образного двухкатушечного четырехобмоточного форсированного электромагнита постоянного тока	48
2.3 Оптимизационные расчеты четырехобмоточных П-образных электромагнитов постоянного тока с последовательно соединенными в режиме пуска низкоомными обмотками.....	49
2.3.1 Расчеты оптимальных форсированных электромагнитов.....	50
2.3.1.1 Полиномиальные зависимости оптимальных созмерностей и параметров форсированного электромагнита, минимизированного по объему активных материалов	52

2.3.1.2	Полиномиальные зависимости оптимальных соразмерностей и параметров форсированного электромагнита, минимизированного по массе активных материалов.....	54
2.3.1.3	Полиномиальные зависимости оптимальных соразмерностей и параметров форсированного электромагнита, минимизированного по стоимости активных материалов, использованных в конструкции электромагнита	54
2.3.1.4	Полиномиальные зависимости оптимальных соразмерностей и параметров форсированного электромагнита, минимизированного по установочной площади	56
2.3.1.5	Полиномиальные зависимости оптимальных соразмерностей и параметров форсированного электромагнита, минимизированного по габаритному объему.....	57
2.3.2	Анализ результатов проектирования оптимальных форсированных электромагнитов	58
2.3.2.1	Сравнительный анализ влияния на оптимальные соразмерности исходных данных проектирования по критериям «объем активных материалов электромагнита» и «габаритный объем электромагнита»	68
2.3.2.2	Сравнительный анализ влияния на оптимальные соразмерности исходных данных проектирования по критериям «установочная площадь электромагнита» и «габаритный объем электромагнита»	75
2.3.2.3	Анализ влияния на оптимальные параметры электромагнита исходных данных проектирования по критериям «объем активных материалов электромагнита» и «габаритный объем электромагнита»	79
2.3.2.4	Анализ влияния на оптимальные параметры электромагнита исходных данных проектирования по критериям	

«установочная площадь электромагнита» и «габаритный объем электромагнита»	94
2.4 Выводы к разделу 2	101
РАЗДЕЛ 3 ПРАКТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	103
3.1 Модернизация электромеханического реле времени с часовым механизмом	103
3.2 Усовершенствование конструкции указательного реле.....	110
3.3 Вакуумный контактор с прямоходовой траверсой, связанной с якорем электромагнита через рычаг	115
3.4 Вакуумный контактор с прямоходовой траверсой непосредственно связанной с якорем электромагнита	120
3.5 Контактор с магнитной памятью и функцией ручного возврата.....	123
3.6 Контактор с электромагнитной защелкой и функцией ручного возврата	128
3.7 Выводы к разделу 3	131
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	133
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	136
ПРИЛОЖЕНИЕ А Условия эксплуатации и технические характеристики реле РВ100, РВ200	148
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Условия эксплуатации и технические характеристики указательных реле РУ21 и РУ21-1	150
ПРИЛОЖЕНИЕ В Результаты оптимизационных расчетов геометрических соразмерностей форсированного электромагнита и его параметров	154
ПРИЛОЖЕНИЕ Г Оценка расхождений относительных размеров между оптимизированными и аппроксимированными (рассчитанными по полиномам) значениями	190

ВВЕДЕНИЕ

Требования для конкретного типа низковольтных аппаратов распределения и управления определяются двумя стандартами:

1) основополагающим стандартом ГОСТ IEC 60947-1-2014 «Аппаратура распределения и управления низковольтная. Часть 1. Общие правила». Стандарт идентичен международному стандарту IEC 60947-1:2011 Low-voltage switchgear and controlgear - Part 1: General rules (Аппаратура коммутационная и механизмы управления низковольтные комплектные. Часть 1. Общие правила) и распространяется на низковольтные аппараты распределения и управления, предназначенные для эксплуатации в электрических цепях номинальным напряжением до 1000 В переменного тока или до 1500 В постоянного тока;

2) стандартом на конкретный вид (тип) низковольтных аппаратов распределения и управления. Низковольтные контакторы, в том числе вакуумные, разрабатываются и изготавливаются в соответствии с ГОСТ Р 50030.4.1-2012 «Аппаратура распределения и управления низковольтная. Часть 4. Контактторы и пускатели. Раздел 1. Электромеханические контакторы и пускатели». Стандарт является частично модифицированным по отношению к международному стандарту МЭК 60947-4-1 "Низковольтная аппаратура распределения и управления. Часть 4-1. Контактторы и пускатели. Электромеханические контакторы и пускатели" (IEC 60947-1 "Low-voltage switchgear and controlgear - Part 4-1: Contactors and motor-starters - Electromechanical contactors and motor-starters) и распространяется на следующие аппараты:

а) контакторы переменного и постоянного тока:

- контакторы переменного и постоянного тока, предназначенные для замыкания и размыкания электрических цепей, а в комбинации с реле перегрузки для пускателей и для защиты этих цепей от возможных рабочих перегрузок;
- органы управления контакторных реле и контакты, управляющие исключительно цепью катушки контактора;

- контакторы или пускатели с электромагнитом электронного управления;

б) пускатели переменного тока:

- реле перегрузки для пускателей, в том числе полупроводниковые с расширенными функциями или без них;
- пускатели, в том числе реверсивные, предназначенные для пуска двигателя, разгона его до номинальной скорости, защиты двигателя и подключенных к нему цепей от рабочих перегрузок и отключения питания двигателя;
- пускатели переменного тока на пониженном напряжении, предназначенные для пуска двигателя, его разгона до номинальной скорости путем подачи сетевого напряжения на выводы двигателя через более чем одну ступень присоединения или постепенного повышения напряжения, подаваемого на выводы, для защиты двигателя и подключенных к нему цепей от рабочих перегрузок и отключения питания двигателя;
- пускатели со схемой звезда-треугольник, предназначенные для пуска трехфазного двигателя в соединении звездой, обеспечении его непрерывной работы в соединении треугольником, защиты двигателя и подключенных к нему цепей от рабочих перегрузок и отключения питания двигателя;
- двухступенчатые автотрансформаторные пускатели, предназначенные для пуска и разгона асинхронного двигателя из положения покоя с пониженным вращающим моментом до нормальной скорости, защиты двигателя и подключенных к нему цепей от рабочих перегрузок и отключения питания двигателя;
- реостатные роторные пускатели, предназначенные для пуска асинхронного двигателя с фазным ротором путем отсечки сопротивлений, предварительно введенных в цепь ротора, для защиты двигателя от рабочих перегрузок и отключения питания двигателя.

Стандарты ГОСТ ИЕС 60947-1-2014 и ГОСТ Р 50030.4.1-2012 устанавливают требования, которым должны удовлетворять контакторы по:

- 1) их срабатыванию и функционированию;
- 2) электроизоляционным свойствам;
- 3) степени защиты, обеспечиваемой оболочкой (если уместно);
- 4) конструкции;
- 5) испытаний, выполняемых для подтверждения соответствия этим требованиям;
- 6) информации, которая должна предоставляться совместно с аппаратами или указываться в публикациях изготовителя.

Не зависимо от того, что контакторы и пускатели изготавливаются отечественными/зарубежными производителями по одному и тому же международному стандарту МЭК 60947-4-1, вакуумные низковольтные контакторы имеют значительные различия по многочисленным параметрам при равных условиях применения. Наиболее критичные и в первую очередь определяющие возможность применения - это стоимостные, массогабаритные показатели и энергоэффективность. Различия вызваны индивидуальными решениями, используемыми производителями, при изготовлении контакторов в части применения вакуумных камер, конструкции, кинематики и способа управления приводными электромагнитами. Обоснованность на уровне научного исследования данных решений позволит рассчитывать оптимальные приводные электромагниты с применением разработанной методики проектного расчета форсированных П-образных электромагнитов. Указанная последовательность решения задач позволит достичь наилучших показателей по стоимости, массе, габаритным размерам и потребляемой мощности вакуумных низковольтных контакторов, а разработанная методика проектного расчета форсированных П-образных электромагнитов может использоваться при разработке приводных электромагнитов любых коммутационных электрических аппаратов с форсированным управлением.

Актуальность темы. Приводные электромагниты являются комплектующими коммутационных электрических аппаратов, средств автоматики и управления. Выпускаются большими объемами, исчисляемыми сотнями тысяч штук в год. Одной из задач современной электротехники, остро стоящей перед практикой, является ресурс- и энергосбережение в приводных электромагнитах контакторов, реле и пускателей. Эффективное снижение энергоемкости и повышение конкурентоспособности электрической аппаратуры может быть обеспечено путем проектирования оптимальных электромагнитных приводов с использованием усовершенствованных методик проектного и оптимизационных расчетов. Повышение качества проектных работ, минимизация затрат на доводку опытных образцов также являются актуальными задачами. Результаты оптимизационных расчетов должны быть обобщены в виде, позволяющем при минимальных затратах средств и времени обеспечить качественное решение проектных работ и не требующих для решения подобного рода задач высококвалифицированных специалистов-разработчиков.

Степень разработанности темы исследования. Значительный вклад в развитие теории и разработку методик синтеза магнитных систем в электромеханических преобразователях внесли работы Афанасьева А.А. [5-7], Буля Б.К., Буля О.Б., Гордона А.В., Дергачева П.А. [25-28], Иванова И.П., Клименко Б.В. [35-41], Ковалева О.Ф. [43], Коца Б.Э., Курбатова П.А. [46], Лобова Б.Н. [48-52], Любчика А.В. [53-56], Нестерина В.А., Неймана В.Ю. [63, 64], Никитенко А.Г. [68-70], Павленко А.В. [71-74], Пеккера И.И., Ротерса Г.К., Свинцова Г.П., Сливинской А.Г., Шоффы В.Н. [90] и др. Однако, многие методики проектного расчета базируются на приближенных моделях электромагнитных и тепловых полей, полученных методами теории цепей и в ряде случаев не соответствуют в полной мере современным требованиям, обеспечивающим необходимое качество проектных работ. Недостаточно внимания уделено методикам синтеза различных магнитных систем, форсировано управляемых приводных электромагнитов.

Современные методики параметрического синтеза оптимальных форсированных электромагнитов должны учитывать особенности схем управления и питания, широкий диапазон температурных и магнитных нагрузок при широких пределах изменения напряжения питания.

Цель работы заключается в усовершенствовании электромагнитных коммутационных аппаратов, прежде всего вакуумных, воздушных контакторов и реле путем минимизации массогабаритных показателей, стоимости активных материалов, потребляемой ими мощности.

Для достижения цели были **поставлены следующие задачи:**

1. Краткий обзор и анализ существующих вакуумных, воздушных контакторов;
2. Определение исходных данных для расчета приводных электромагнитов низковольтных контакторов (ход якоря, усилие трогания и удержания, кинематика, глубина форсировки электромагнита, обоснование перспективных схем форсированного управления);
3. Разработка методики проектного расчета форсированных П-образных электромагнитов с учетом условий питания и работы.
4. Минимизация объема, массы и стоимости активных материалов, габаритного объема, установочной площади электромагнита, при снижении потребляемой ими мощности.
5. Математическое описание результатов оптимизационных расчетов в форме удобной для решения проектных задач.

Объект исследования – приводные электромагниты вакуумных и воздушных низковольтных контакторов и электромагнитных реле.

Предмет исследования – определение исходных данных для расчета приводных электромагнитов вакуумных, воздушных низковольтных контакторов и реле, разработка методик проектного и оптимизационных расчетов форсированных П-образных электромагнитов с использованием обобщенных экспериментальных электромагнитных характеристик и тепловых параметров, полученных раздельным учетом отдачи тепла конвекцией и излучением.

Область исследования – низковольтные контакторы и реле, перспективные схемы форсированного управления приводными электромагнитами.

Научная новизна диссертационной работы

1. Разработанные усовершенствованные методики проектного расчета форсированных симметричных двухкатушечных П-образных электромагнитов с перспективной схемой управления отличаются совместным учетом условий срабатывания, возврата и уравнений нагрева, сводимых к нелинейному уравнению в широком диапазоне варьирования исходных данных проектирования, включая частные критерии оптимальности: массу, объем, стоимость активных материалов, установочную площадь, габаритный объем.

2. Оригинальные результаты оптимизационных расчетов, обобщенные методами теории подобия и планирования эксперимента и представленные в виде полиномиальных зависимостей, облегчают определение и выбор оптимальных соизмерностей и параметров магнитной системы двухкатушечного П-образного форсированного электромагнита.

Установлена мера влияния исходных данных проектирования на оптимальные соизмерности, параметры П-образного электромагнита при различных критериях оптимальности.

Впервые предложены формулы для оценки на стадии проектного расчета перенапряжений, возникающих при включении форсированных П-образных электромагнитов с последовательно соединенными четырьмя обмотками, учитывающие влияние исходных данных проектирования и частных критериев оптимальности.

3. На уровне изобретения решены вопросы конструктивного выполнения электромеханического реле времени с часовым механизмом, указательных реле, вакуумных контакторов с прямоходовой траверсой для работы в продолжительном режиме без потребления электроэнергии.

Эти результаты исследований частично внедрены и планируются использовать на ЗАО «ЧЭАЗ» при разработке новых и импортозамещающих серий реле и контакторов, в том числе вакуумных серии КВЗ.

Результаты исследований используются в учебном процессе подготовки бакалавров, магистров и аспирантов на кафедре электрических и электронных аппаратов ФГБОУ ВО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова».

Теоретическая и практическая ценность результатов работы.

Теоритическая ценность заключается в следующем:

1. Обоснован выбор уравнений проектирования форсированного симметричного П-образного четырехобмоточного электромагнита постоянного тока;

2. Разработан (предложен) алгоритм решения проектной и оптимизационной задач, минимизирующий частные критерии оптимальности (масса, объем и стоимость активных материалов, установочная площадь и габаритный объем электромагнита);

3. Получена математическая зависимость кратности числа витков высокоомных обмоток в долях витков низкоомных обмоток, позволяющая на стадии выполнения проектных и оптимизационных расчетов форсированного электромагнита оценить величину перенапряжения, возникающего при включении электромагнита.

Практическая ценность состоит в том, что:

1. Обобщенные в виде полиномиальных зависимостей результаты оптимизационных расчетов позволяют упростить проведение проектных расчетов, повысить их качество, не требуют высокой квалификации конструкторов-разработчиков электромагнитных приводов коммутационных аппаратов;

2. Созданы электромагнитные аппараты с высокими технико-эксплуатационными параметрами, обеспечивающие им конкурентоспособность на рынке электротехнической продукции;

3. Предложены новые варианты конструктивного исполнения вакуумных низковольтных контакторов и электромеханических реле, оригинальность которых подтверждена патентами на полезные модели и изобретения;

4. Использование результатов работы сокращает финансовые и временные затраты на доводку макетных образцов электромагнитных аппаратов.

Достоверность результатов оптимизационных расчетов проверялась экспериментально физическим моделированием приводных электромагнитов контакторов с номинальным током 160, 250, 400 и 630 А, электромеханического реле времени и указательного реле.

Методология и методы исследования

Методологической основой диссертационной работы является совокупность методов, базирующихся на теории подобия, планирования эксперимента, теории электрических и магнитных цепей, методов решения нелинейных уравнений, оптимального параметрического синтеза. При оптимизационных расчетах использовался метод двухразового сканирования области факторного пространства относительно геометрических соизмерностей в П-образной магнитной системе. Корректность принятых допущений, заложенных в методики проектирования, оценивалась сопоставлением расчетных и экспериментальных данных.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Методики проектного и оптимизационного расчетов форсированных симметричных двухкатушечных П-образных электромагнитов с перспективной схемой управления, позволяющая определить их оптимальные геометрические соизмерности и параметры при разных критериях качества.

2. Полиномиальные зависимости оптимальных соизмерностей и параметров приводных форсированных П-образных электромагнитов, обеспечивающих минимизацию массы, объема и стоимости активных материалов, установочной площади и габаритного объема при снижении потребляемой мощности.

3. Новые конструктивные решения, использованные при модернизации реле времени с часовым механизмом, разработке указательных реле и вакуумных контакторов, позволившие уменьшить их массо-габаритные показатели, а также расширить функциональные и эксплуатационные возможности контакторов, в

частности, путем использования поляризованного электромагнита с блоком ручного возврата или электромагнитной защелки, обеспечивающих сохранение замкнутого положения контактов вакуумного контактора при потере напряжения питания.

Достоверность результатов работы обеспечена:

- обоснованным выбором метода поиска оптимальных соизмерностей П-образного двухобмоточного электромагнита постоянного тока;
- использованием апробированных известных математических моделей нагрузочной характеристики, полученной в результате экспериментальных исследований электромагнитных характеристик П-образной магнитной системы;
- внедрением полученных результатов диссертационных исследований при разработке второй серии вакуумных контакторов КВ2 на номинальные токи 160-630 А, указательного электромагнитного реле и усовершенствовании электромеханического реле времени.

Реализация результатов работы

Основные результаты диссертационной работы были использованы при разработке второй серии вакуумных контакторов КВ2 на номинальные токи 160-630 А. Результаты проектирования с использованием новых алгоритмов синтеза приняты в качестве базовых при разработке третьей серии отечественных вакуумных контакторов КВ3 на ЗАО «ЧЭАЗ». Усовершенствованы электромеханическое реле времени и указательное электромагнитное реле.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на следующих открытых площадках:

- Научно-практическая конференция «Релейная защита и автоматизация электрических сетей» 29.11.2012, г. Москва, доклад «Защита на электромеханических реле: современное состояние, проблемы и перспективы развития»;

- Форум «Чебоксары – Центр наукоёмкого машиностроения России – 2013» 06.02.2013, г. Чебоксары, доклад «Низковольтная аппаратура управления и защиты на ЧЭАЗ»;
- Семинар «Новые решения для систем релейной защиты и автоматики» 21.03.2013, г. Москва, доклад «Разработка и модернизация электромеханических реле для реновации электромеханической релейной защиты»;
- II международная научно-практическая конференция и выставка «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем России-2013» («Релавэкспо-2013») 23.04.2013, г. Чебоксары, доклад «Современное состояние и перспективы электромеханических устройств РЗА»;
- Технический совет МРСК Центра и Приволжья, доклад «Создание необслуживаемых электромеханических реле. Ремонтные комплекты для панелей РЗА» 06.12.2013;
- Человек. Гражданин. Ученый: Регион. Фестиваль студ. и молодежи (Чуваш. гос. ун-т им. И.Н. Ульянова, 25-29 ноября 2014 г.: Чебоксары).

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 17 научных работ, из них 4 – 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 – патентов РФ на полезные модели и на изобретения; 6 – публикаций в других изданиях.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, трех разделов, заключения, списка литературы (109 наименований) и четырех приложений. Работа изложена на 193 страницах машинописного текста, содержит 36 рисунков и 58 таблиц.

РАЗДЕЛ 1 ОБЗОР И АНАЛИЗ КОНСТРУКТИВНЫХ, ТЕХНИЧЕСКИХ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ НИЗКОВОЛЬТНЫХ КОНТАКТОРОВ И РЕЛЕ

Ниже приведен краткий анализ низковольтных контакторов отечественных и зарубежных компаний [57]. Отмечены условия эксплуатации, определяющие выбор компоновочных решений. Отмечена перспективность использования в сетях низкого напряжения вакуумных контакторов, обеспечивающих возможность снижения их массо-габаритных показателей, обеспечение повышенного механического и электрического ресурсов; возможность использования в сетях переменного напряжения до 1140 В. Отсутствие открытой электрической дуги делает их незаменимыми в шкафах с плотной установкой электрической аппаратуры, открывает широкие возможности их применения на объектах со взрывоопасной средой [57]. Они могут быть реализованы на срок службы не менее 25 лет и позволяют при этом существенно снизить затраты на эксплуатацию. В качестве недостатков отмечается относительно высокая стоимость камер, их неремонтопригодность, возможность возникновения перенапряжения при отключении активно-индуктивных цепей [11-13, 57]. Затронуты вопросы выбора исходных данных для разработки и усовершенствования [69, 93, 95-97, 101] методик проектирования [8, 16, 17, 19, 33, 39, 42, 44 и др.] приводных электромагнитных коммутационных аппаратов.

Кратко рассмотрены перспективные схемы форсированного управления приводными электромагнитами. Сформулированы основные технические требования к низковольтным контакторам.

1.1 Краткий обзор и анализ низковольтных контакторов отечественных и зарубежных компаний

Низковольтные контакторы выпускаются на номинальные токи в диапазоне от 4 до 5000 А напряжением до 1000 (1140) В переменного тока или до 1500 В

постоянного тока.

Контакторы на номинальные токи 100-1600 А выполняются с гашением электрической дуги как в воздушной среде, так и в вакуумной среде (камере) [57]. Широкий диапазон номинальных токов контакторов определяет конструктивные особенности выполнения основных функциональных частей [57, 87], рассчитанных на различные номинальные токи контакторов. Условия эксплуатации часто определяют выбор компоновочных решений и среды дугогашения. Для контакторов с тяжелым режимом работы (используемых в металлургической, химической, нефте-газодобывающей, цементной и в других отраслях промышленности), в которых часто возникает необходимость проведения профилактических мероприятий, предпочтение отдается горизонтальной компоновке, позволяющей упростить осмотр и замену выходящих из строя узлов и элементов аппарата [87].

Вакуумные контакторы [57] заслуженно заняли свое место в ряду низковольтных аппаратов управления. При этом экономически оправдана целесообразность производства вакуумных контакторов на токи от 100 до 1600А. Имеются различные примеры применения вакуумных контакторов, однако основной областью применения все же является коммутация приемников электроэнергии в цепях переменного тока, а именно управление асинхронными электродвигателями (категория АС-3 и АС-4 по ГОСТ 50030.4.1). Массовое производство вакуумных контакторов, предназначенных для работы в цепях переменного тока, обуславливается [11, 12] особенностями работы вакуумной камеры. В камере создается среда с глубоким вакуумом (давление до 10^{-7} Па), характеризующаяся отсутствием свободных носителей заряда. Быстрая диффузия частиц, высокая электрическая прочность вакуумного промежутка (до 100 кВ/мм) и высокая скорость ее восстановления (порядка 10 мкс) позволяют при расхождении контактов в вакуумной камере достичь гашения дуги переменного тока уже при первом переходе тока через нуль. Имеется возможность применения вакуумной камеры в цепях постоянного тока. Так, например, для гашения дуги в вакуумной камере на постоянном токе применяются схемы с подключением

параллельно дуге LC-контура. В результате наложения переменного тока, протекающего по LC-контур, на постоянный ток, протекающий через контакт в вакуумной камере, в один из моментов результирующий ток проходит через нуль и дуга гаснет. Однако, в связи со сложностью реализации описанной схемы гашения дуги, вакуумные контакторы постоянного тока не получили широкого распространения. Один из примеров серийно выпускающихся вакуумных контакторов постоянного тока – контактор вакуумный однополюсный КВ-3-0,1/50 производства ООО «ВЭИ-АВИС» г. Москва.

Популярность вакуумных контакторов переменного тока от 160 до 1000 А объясняется их характерными особенностями:

1. Пониженные габариты и масса:

В воздушных контакторах гашение дуги, возникающей при коммутации электрической цепи, достигается с использованием магнитного поля, затягивающего дугу в щель или деионную решетку дугогасительной камеры [11]. При этом зазор между подвижным и неподвижным контактами составляет не менее 10 мм. Для обеспечения гарантированного гашения дуги в вакуумной камере достаточно развести контакты на расстояние 1,0-3,8 мм в зависимости от номинального тока вакуумного контактора. Это свойство вакуумной камеры позволяет существенно снизить габариты и массу привода вакуумного контактора относительно контактора с открытым дугогашением (таблица 1.1).

В таблицах 1.1 и 1.2 приведены [57 и др.] сравнительные характеристики:

а) контакторов с воздушным дугогашением:

- КТ 6020-6040 (ООО «Электроконтактор», г. Владикавказ);
- КТ 6050-6060 (ОАО «ЧЭАЗ», г. Чебоксары);
- КТ6000М («Промфактор», Украина – аналог серии CJ12 «CHINT», Китай);
- CJ40 («CHINT», Китай);
- LC1-F («Schneider Electric», Франция);

б) контакторов вакуумных:

- КВ1 (ОАО «ЧЭАЗ», г. Чебоксары);
- КВ2 (ОАО «ЧЭАЗ», г. Чебоксары);

- КВТ2-1000 (НПП «Контакт», г. Саратов).

2. Повышенный механический ресурс:

Способность вакуумных контакторов коммутировать электрическую цепь с небольшими, относительно воздушных контакторов, растворами контактов, дает возможность снизить величину перемещения подвижных частей контактора и соответственно повысить механическую износостойкость (таблица 1.2).

Таблица 1.1 – Габариты и масса контакторов различных производителей

Наименование контактора	Номинальный ток, А	Количество полюсов	Габариты, мм			Масса, кг	Удельный показатель, плотность контактора / ток, кг/(м ³ *А)
			Ширина	Высота	Глубина		
КТ 6622	160	2	380	214	174	6,2	2,7
КТ 6022М	160	2	346	219	207	6,0	2,4
КВ1-160-2	160	2	170	180	160	3,0	3,8
КВ2-160-2	160	2	182	210	183	5,9	5,3
КТ 6623	160	3	380	214	174	7,4	3,3
КТ 6023М	160	3	406	219	207	7,0	2,4
CJ40-160	160	3	146	186	184	5,5	6,9
LC1-F150	150	3	164	170	171	3,5	4,9
КВ1-160-3	160	3	190	180	160	4,3	4,9
КВ2-160-3	160	3	182	210	183	6,4	5,7
КТ 6632	250	2	380	216	175	7,0	1,9
КТ 6032М	250	2	374	255	230	13,5	2,5
КВ1-250-2	250	2	175	200	180	4,0	2,5
КВ2-250-2	250	2	182	210	183	6,9	3,9
КТ 6633	250	3	380	216	175	8,2	2,3
КТ 6033М	250	3	445	255	230	17,0	2,6
CJ40-250	250	3	146	186	184	5,5	4,4
LC1-F265	265	3	202	203	213	7,5	3,2
КВ1-250-3	250	3	220	200	180	6,0	3,0
КВ2-250-3	250	3	182	210	183	7,4	4,2
КТ 6642	400	2	480	280	220	14,3	1,2
КТ 6042М	400	2	420	296	274	35,5	2,6
КВ1-400-2	400	2	202	240	205	6,0	1,5
КВ2-400-2	400	2	200	225	210	7,6	2,0
КТ 6643	400	3	480	280	220	18,0	1,5
КТ 6043М	400	3	500	296	274	42,5	2,6
CJ40-400	400	3	235	230	160	12,0	3,5

Продолжение таблицы 1.1

Наименование контактора	Номинальный ток, А	Количество полюсов	Габариты, мм			Масса, кг	Удельный показатель, плотность контактора / ток, кг/(м ³ * А)
			Ширина	Высота	Глубина		
LC1-F400	400	3	213	206	219	9,1	2,4
KB1-400-3	400	3	245	240	205	10,0	2,1
KB2-400-3	400	3	200	225	210	8,4	2,2
КТ 6052	630	2	580	335	275	48,0	1,4
КТ 6052М	630	2	469	349	334	50,0	1,5
KB2-630-2	630	2	282	403	161	13,6	1,2
КТ 6053	630	3	680	335	275	57,0	1,4
КТ 6053М	630	3	566	349	334	59,0	1,4
CJ40-630	630	3	245	347	288	22,0	1,4
LC1-F630	630	3	309	304	255	18,6	1,2
KB2-630-3	630	3	282	403	161	17,5	1,5
КТ 6062	1000	2	580	450	330	52,0	0,6
КТ 6063	1000	3	680	450	330	62,0	0,6
КВТ2-1000	1000	3	286	305	272	17,5	0,7

3. Повышенный электрический ресурс:

В вакууме электрическая дуга, при нормальных условиях коммутации, находится в рассеянном («диффузном») виде [11, 12]. «Диффузная» дуга в вакууме существует в виде нескольких параллельных дуг одновременно, через каждую из которых может протекать ток от нескольких десятков до нескольких сотен ампер. Благодаря тому, что эти дуги стремятся охватить всю контактную поверхность, удается достичь более равномерного износа контактов по всему объему. Кроме того, малое время горения дуги в вакууме (не более 10 мс), а также применение дугостойких материалов для контактов (обычно сплав Cu 50% и Cr 50%) позволили значительно повысить коммутационную износостойкость вакуумных контакторов (таблица 1.2).

4. Широкий диапазон номинального напряжения:

Вакуумные контакторы с успехом применяются в цепях переменного тока номинальным напряжением до 1140 В с сохранением габаритных размеров и

основных технических характеристик.

Таблица 1.2 – Технические параметры воздушных и вакуумных контакторов различных производителей

Наименование контактора	Номинальный ток, А	Количество полюсов	Номинальное напряжение, В	Потребляемая мощность, ВА (пуск./раб.)	Коммутационная износостойкость, млн. циклов	Механическая износостойкость, млн. циклов
КТ 6622	160	2	380	*	0,25	1
КТ 6022М	160	2	380	*	0,3	1
КВ1-160-2	160	2	1140	660/60	1,5	3
КВ2-160-2	160	2	1140	660/60	1,5	3
КТ 6623	160	3	380	*	0,25	1
КТ 6023М	160	3	380	*	0,3	1
CJ40-160	160	3	380	880/88	*	1
LC1-F150	150	3	440	550/45	*	10
КВ1-160-3	160	3	1140	660/60	1,5	3
КВ2-160-3	160	3	1140	660/60	1,5	3
КТ 6632	250	2	380	*	0,2	1
КТ 6032М	250	2	380	*	0,3	1
КВ1-250-2	250	2	1140	660/60	1,5	3
КВ2-250-2	250	2	1140	660/60	1,5	3
КТ 6633	250	3	380	*	0,2	1
КТ6033М	250	3	380	*	0,3	1
CJ40-250	250	3	380	880/88	*	1
LC1-F265	265	3	440	650/10	*	10
КВ1-250-3	250	3	1140	660/60	1,5	3
КВ2-250-3	250	3	1140	660/60	1,5	3
КТ 6642	400	2	380	*	0,2	1
КТ 6042М	400	2	380	*	0,3	1
КВ1-400-2	400	2	1140	660/60	1,5	3
КВ2-400-2	400	2	1140	660/60	1,5	3
КТ 6643	400	3	380	*	0,2	1
КТ 6043М	400	3	380	*	0,3	1
CJ40-400	400	3	380	1170/152	*	0,6
LC1-F400	400	3	440	1075/15	*	10
КВ1-400-3	400	3	1140	660/60	1,5	3
КВ2-400-3	400	3	1140	660/60	1,5	3
КТ 6052	630	2	380	140	0,02	0,025
КТ 6052М	630	2	380	*	0,02	0,025
КВ2-630-2	630	2	1140	660/60	1,5	3
КТ 6053	630	3	380	140	0,02	0,025
КТ6053М	630	3	380	*	0,02	0,025
CJ40-630	630	3	380	3578/325	*	0,3

Продолжение таблицы 1.2

Наименование контактора	Номинальный ток, А	Количество полюсов	Номинальное напряжение, В	Потребляемая мощность, ВА (пуск./раб.)	Коммутационная износостойкость, млн. циклов	Механическая износостойкость, млн. циклов
LC1-F630	630	3	440	1650/22	*	5
KB2-630-3	630	3	1140	660/60	1,5	3
КТ 6062	1000	2	380	140	0,025	1
КТ 6063	1000	3	380	140	0,025	1
КВТ2-1000	1000	3	1140	1540/30	0,3	0,3

Примечание: * - сведения отсутствуют

Безусловно, применение воздушных контакторов при повышенном номинальном напряжении с сохранением габаритных размеров так же возможно. Однако при этом снижаются номинальный ток и/или электрический ресурс. Один из примеров реализации подобного подхода – контакторы серии CJ40 компании «CHINT» (таблица 1.3).

Таблица 1.3 – Технические характеристики воздушных контакторов серии CJ40

Наименование контактора	Номинальное напряжение, В	Номинальный рабочий ток, А				Мощность двигателя, кВт (АС-3)
		АС-1	АС-2	АС-3	АС-4	
CJ40-16	220	16	16	16	8	4
	380					7,5
	660					13
CJ40-25	220	25	25	25	9	7,5
	380					11
	660					13
CJ40-32	220	32	32	32	16	7,5
	380					15
	660					25
CJ40-40	220	40	40	40	20	11
	380					18,5
	660					25

Продолжение таблицы 1.3

Наименование контактора	Номинальное напряжение, В	Номинальный рабочий ток, А				Мощность двигателя, кВт (АС-3)
		АС-1	АС-2	АС-3	АС-4	
CJ40-50	220	50	50	50	25	15
	380					25
	660					25
CJ40-63	220	63	63	63	63	18,5
	380					30
	660					55
CJ40-80	220	80	80	80	80	22
	380					37
	660					55
CJ40-100	220	100	100	100	100	30
	380					45
	660					75
CJ40-125	220	125	125	125	125	37
	380					55
	660					75
CJ40-160	220	160	160	160	160	45
	380					75
	660					110
CJ40-200	220	200	200	200	200	55
	380					90
	660					110
CJ40-250	220	250	250	250	250	75
	380					132
	660					110
CJ40-315	220	315	315	315	315	90
	380					160
	660					300
CJ40-400	220	400	400	400	400	110
	380					220
	660					300
CJ40-500	220	500	500	500	500	150
	380					280
	660					300
CJ40-630	220	630	630	630	630	200
	380					335
	660					475
CJ40-800	220	800	800	800	800	250
	380					450
	660					475
CJ40-1000	220	1000	-	1000	-	360
	380					625
	660					475

5. Отсутствие открытой дуги:

Применяя контакторы с воздушным дугогашением, следует учитывать наличие зон выхлопа электрической дуги. Эти зоны порой достигают значительных величин – свыше 300 мм за пределы габаритов контактора. Поэтому коммутация электрической цепи внутри вакуумной камеры является одним из явных достоинств вакуумных контакторов. Вакуумные контакторы практически незаменимы в шкафах с плотной установкой внутренних компонентов. Отсутствие открытой дуги делает привлекательным их применение на объектах с взрывоопасной средой.

Расположение контактов в вакуумной камере предохраняет их от образования окисной пленки. Это позволяет исключить необходимость зачистки контактов и значительно снизить объемы, либо совсем отказаться от регламентных работ по обслуживанию вакуумных контакторов в эксплуатации. Опыт эксплуатации показывает, что вакуумные контакторы могут выпускаться со сроком службы не менее 25 лет.

Необходимо отметить, что имеющиеся недостатки вакуумных контакторов в настоящее время с успехом устраняются:

- **Неремонтопригодность главных контактов (дорогих вакуумных камер).** Конец 20-го века ознаменовался значительным развитием и освоением технологий по изготовлению вакуумной коммутационной аппаратуры. Имеющиеся на сегодняшний день опыт производства и технологии производства позволяют изготавливать надежные контакторы. Вероятность выхода из строя вакуумной камеры ничтожно мала, при условии эксплуатации контактора в соответствии с рекомендациями производителя;

- **Возникновение перенапряжения при отключении.** Значительная величина перенапряжения в цепи нагрузки, возникающая при отключении, опасна ускоренным старением изоляции основного оборудования (обмотки двигателя) и, как следствие, преждевременным выходом из строя. С целью исключения опасных пиков перенапряжения рекомендуется устанавливать ограничители перенапряжения ОПН непосредственно на основное оборудование. На

сегодняшний день предприятия-изготовители предлагают вакуумные контакторы, как со встроенным, так и с комплектно поставленным ОПН.

- **Высокая стоимость.** Плавный переход в течение последних десятилетий от мелкосерийного производства вакуумных контакторов к массовому производству, привел к значительному снижению стоимости вакуумных контакторов. На сегодняшний день разница в цене между контакторами вакуумными и воздушными(аналогами) является существенной на контакторы с номинальным током менее 160 А, на контакторы же с током свыше 160 А разница в цене не существенная.

1.2 Исходные данные для разработки методик проектирования приводных электромагнитов низковольтных контакторов

Известные методики проектных расчетов [3, 8, 10, 19, 39, 44, 52, 53, 60, 65, 69, 70, 99] приводных электромагнитов постоянного тока низковольтных контакторов основаны: 1) на уравнении равенства электромагнитной силы механической ($P_{мх}$), в основном определяемой контактными усилиями пружин, а также возвратной пружины; 2) на уравнении нагрева электромагнита в установившемся режиме.

В качестве расчетного выражения электромагнитной силы ($P_{эм}$) в основном [19, 34, 39, 44, 86] используется упрощенная формула Максвелла:

$$P_{эм} = \frac{B_{\delta}^2 S}{2\mu_0}, \quad (1.1)$$

где B_{δ} – магнитная индукция в рабочем зазоре (δ);

S – площадь поперечного сечения полюса магнитной системы;

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$ – магнитная постоянная вакуума.

Магнитная индукция выбирается [19, 34, 42, 70, 86 и др.] в зависимости от конструктивного фактора:

$$K_{\phi} = \sqrt{P_{\text{мх.кр}}} / \delta_{\text{кр}}, \quad (1.2)$$

где $\delta_{\text{кр}}$, $P_{\text{мх.кр}}$ – координаты "критической точки" [49] на механической характеристике контактора.

Выбор B_{δ} по K_{ϕ} справедлив для определенной конфигурации магнитной системы, условно-полезной работы, превышения температуры нагрева обмотки, что снижает достоверность результатов проектирования.

Расчетное уравнение температуры нагрева электромагнита [85] задается в виде формулы Ньютона:

$$P_{\text{уд}} = (T_{\text{д}} - T_0) S_{\text{охл}} K_{\text{т}}. \quad (1.3)$$

Здесь $P_{\text{уд}}$ – мощность потребляемая электромагнитом в режиме удержания;

$T_{\text{д}}$ – допустимая температура нагрева внешней поверхности обмотки;

T_0 – температура окружающей среды;

$S_{\text{охл}}$ – эквивалентная площадь поверхности охлаждения катушки;

$K_{\text{т}}$ – эквивалентный коэффициент теплоотдачи.

При форсированных приводных электромагнитах с одно, двух, четырехобмоточными катушками используются известные формулы [8, 9, 14, 19, 21, 24, 37-41, 44, 99, 109], которым присущи [91, 100] известные недостатки.

Все это в целом побуждает к усовершенствованию известных математических модулей нагрузочных характеристик, нагрева и алгоритмов проектных расчетов, прежде всего форсированно управляемых электромагнитов.

Для усовершенствования методик синтеза П-образных четырехобмоточных двухкатушечных электромагнитов приняты математически модели экспериментально полученные и обработанные методами теорий подобия [18, 24] и планирования эксперимента [32, 80] нагрузочные характеристики [19, 80]:

Безразмерная функция электромагнитной силы [76-80]:

$$P_* = 10^{-8} [71,41 - 99,48\delta_* + 92,38\delta_*^2 + (-1,574 - 8,83\delta_* + 21,4\delta_*^2 - 19,69\delta_*^3)x_1 + (-2,543 + 25,86\delta_* - 138,09\delta_*^2 +$$

$$\begin{aligned}
& + 314,41\delta_*^3 - 245,31\delta_*^4)x_3 + (0,961 - 6,751\delta_* + 32,38\delta_*^2 - \\
& - 37,30\delta_*^3)x_4 + (0,766 - 25,12\delta_* + 261,4\delta_*^2 - 1069\delta_*^3 + \\
& + 1945,3\delta_*^4 - 1319,3\delta_*^5)x_5 + (-1,213 + 7,593\delta_* - 16,35\delta_*^2 + \\
& + 11,19\delta_*^3)x_1^2 + (-1,434 + 10,44\delta_* - 28,04\delta_*^3 + 24,31\delta_*^3)x_2^2 + \\
& + (-1,423 + 12,65\delta_* - 40,09\delta_*^2 + 40,58\delta_*^3)x_3^2 + (3,358 - \\
& - 47,23\delta_* + 43,68\delta_*^2 + 1347,6\delta_*^3 - 6674,2\delta_*^4 + 12280\delta_*^5 - \\
& - 8088,4\delta_*^6)x_4^2 + (-2,327 + 31,29\delta_* - 171,2\delta_*^2 + 502,3\delta_*^3 - \\
& - 803,9\delta_*^4 + 534,2\delta_*^5)x_5^2 + (0,556 + 5,279\delta_* - 50,06\delta_*^2 + \\
& + 134,6\delta_*^3 - 112,7\delta_*^4)x_1x_3 + (0,072 + 10,66\delta_* - 80,50\delta_*^2 + \\
& + 206,0\delta_*^3 - 176,5\delta_*^4)x_1x_5]^4 \tag{1.4}
\end{aligned}$$

Безразмерная суммарная МДС обмоток электромагнита:

$$\begin{aligned}
F_* = 10^{-4} [& 14,82 + 134,6\delta_* - 351\delta_*^2 + 335,8\delta_*^3 + (0,573 - \\
& - 8,791\delta_* + 6,753\delta_*^2)x_1 + (-0,123 - 2,22\delta_* + 2,756\delta_*^2) \times \\
& \times x_2 - 1,564x_3 + (0,305 + 1,151\delta_* - 0,288\delta_*^2)x_4 + \\
& + 0,909x_5 + 0,028x_2^2 - 0,235x_4^2 + 0,426x_5^2 - 0,228x_1x_2 + \\
& + (0,047 + 1,885\delta_* - 2,374\delta_*^2)x_1x_3 + 0,123x_1x_5]^2. \tag{1.5}
\end{aligned}$$

$$P_{\text{эм. баз}} = \frac{B_0^2 S_c}{\mu_0}, \quad F_{\text{баз}} = \frac{B_0 d_c}{\mu_0}, \quad - \text{ базисные значения электромагнитной и}$$

магнитодвижущей сил соответственно.

Магнитная система с обозначением их основных размеров изображены на рисунке 1.1. Ферромагнитные элементы магнитных систем выполнены из стали марки 10895. В качестве базисного линейного размера магнитной системы принят диаметр (d_c) сердечника. Выбраны широкие пределы варьирования основных относительных геометрических размеров с учетом имеющихся в [24, 55, 80] рекомендаций, а также в связи с необходимостью получения моделей, применимых для синтеза электромагнитов, работающих при форсированном

управлении:

$$1,245 \leq H_* = H_0/d_c \leq 4,755; \quad 0,25 \leq A_* = A_0/d_c \leq 0,75;$$

$$1,24 \leq d_* = d_{\text{п}}/d_c \leq 1,76; \quad 2,5 \leq C_* = C/d_c \leq 4,5;$$

$$0,05 \leq \delta_* = \delta/d_c \leq 0,5; \quad 0,87T \leq B_0 \leq 1,7T,$$

где δ – воздушный рабочий зазор между якорем и полюсным наконечником.

Кодированные значения (x_i) факторов рассчитываются формулами линейного преобразования факторного пространства:

$$x_1 = 0,9091H_* - 2,7273; \quad x_2 = 6,386A_* - 3,193;$$

$$x_3 = 6,135d_* - 9,2025; \quad x_4 = 1,5949C_* - 5,5621;$$

$$x_5 = 4,3668B_0 - 5,393.$$

Остальные кратности зафиксированы:

$$a_{\text{як}}/d_c = a_{\text{яр}}/d_c = 0,25; \quad a_{\text{п}}/d_c = 0,2; \quad \Delta_{\text{к}}/d_c = 0,1;$$

$$b_{\text{як}}/d_c = b_{\text{яр}}/d_c = 3,15.$$

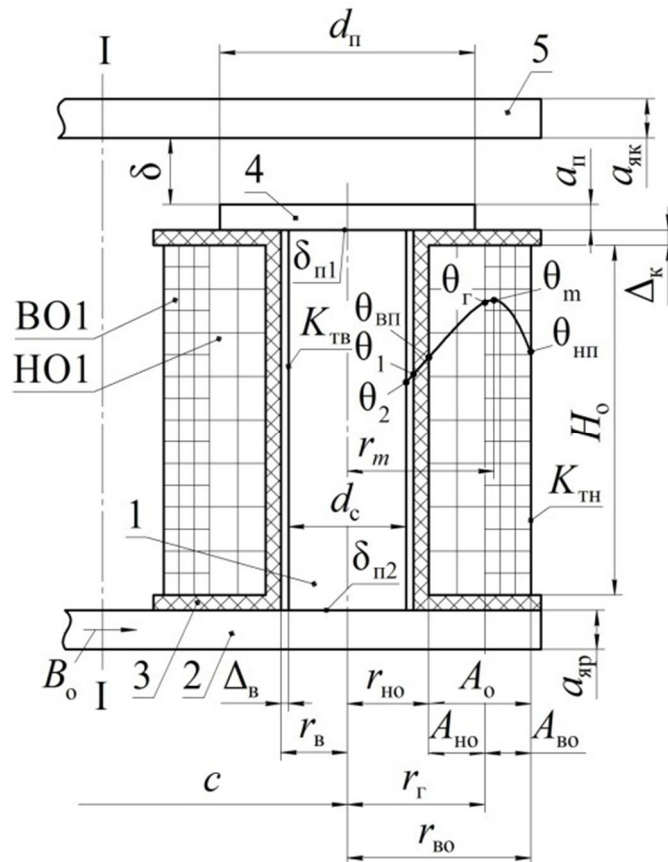


Рисунок 1.1 – Фрагмент эскиза П-образной магнитной системы с обозначением элементов и размеров

Индукция B_0 задавалась в сечении ярма (рисунка 1.1), лежащем в плоскости I-I (плоскость I-I перпендикулярна плоскости рисунка).

Выражение максимальной температуры нагрева коаксиально размещенных на каркасе катушки низко и высокоомных обмоток [2, 75, 109]:

$$\theta_m = T_0 + \frac{q_{\text{во}}}{2\lambda_{\text{во}}} \left(\frac{r_{\text{во}}^2 - r_m^2}{2} - r_m^2 \ln \frac{r_{\text{во}}}{r_m} \right) + \frac{q_{\text{во}} (r_{\text{во}}^2 - r_m^2)}{2r_{\text{во}} K_{\text{тн}}}, \quad (1.6)$$

где θ_m – максимальная температура в толще высокоомной обмотки;

$q_{\text{во}}$ – удельная объемная плотность мощности выделяющейся (рассеивающейся) в объеме высокоомной обмотки;

T_0 – температура окружающей среды;

$\lambda_{\text{во}}$ – эквивалентная теплопроводность замещающего тела высокоомной обмотки;

$K_{\text{тн}}$ – коэффициент теплопроводности наружной поверхности высокоомной обмотки;

$r_{\text{во}}$ – радиус внешней боковой поверхности высокоомной обмотки;

r_m – радиус максимальной температуры в толще высокоомной обмотки.

В соответствии с требованиями [20] в уравнение проектирования вводится условие возврата подвижных элементов приводных электромагнитов в начальное положение.

Важной характеристикой контакторов и реле является механическая. При проектировании по условиям статики она складывается из усилий контактных, возвратных пружин "веса подвижных элементов" коммутационного аппарата.

1.3 Перспективные схемы форсированного управления приводными электромагнитами низковольтных контакторов

К перспективным схемам [9, 22, 23, 37-39, 44, 49, 52, 60-62, 81-84, 88, 89, 109 и др.] форсированного управления (СФУ) приводными электромагнитами контакторов на номинальные токи не менее 160А следует отнести схемы

форсировки с многообмоточными электромагнитами. Они обеспечивают коэффициенты форсировки по мощности от 10 до 35. В случае необходимости получения больших значений коэффициентов форсировки следует уменьшить паразитные зазоры в магнитной системе либо их по возможности исключить (выполнить полюсный наконечник и сердечник из единого прутка, либо два сердечника и ярмо, выполненные из единого прутка). В двухкатушечной П-образной магнитной системе с двумя обмотками, последние могут быть соединены по схеме рисунка 1.2.

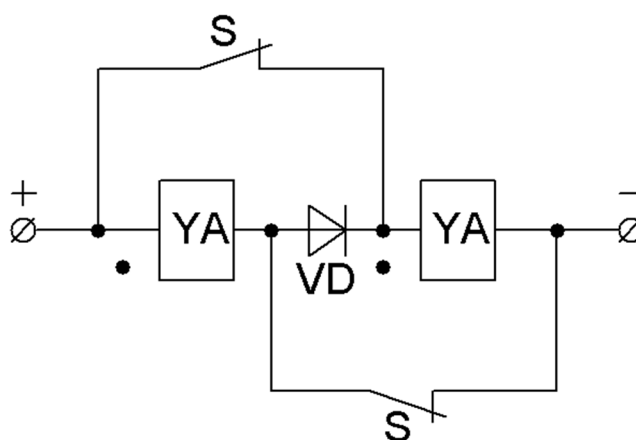


Рисунок 1.2 – Схема форсированного управления с параллельно соединенными в процессе включения обмотками YA

В режиме удержания (после размыкания форсировочных S контактов) обмотки оказываются подсоединенными последовательно и согласно в магнитном отношении.

В режиме пуска МДС электромагнита определяется выражением:

$$F_{\text{п}} = 2 \frac{U}{R} N. \quad (1.7)$$

В режиме удержания (форсировочные контакты разомкнуты) МДС составляет:

$$F_{\text{y}} = \frac{U}{2R} \cdot 2N = \frac{U}{R} \cdot N. \quad (1.8)$$

Коэффициент форсировки по МДС (K_F) будет равен $K_F = 2$.

В двухкатушечной П-образной магнитной системе с четырьмя обмотками две из них выполняются низкоомными (НО1, НО2), две другие – высокоомными (ВО1, ВО2) и соединяются по схеме рисунка 1.3.

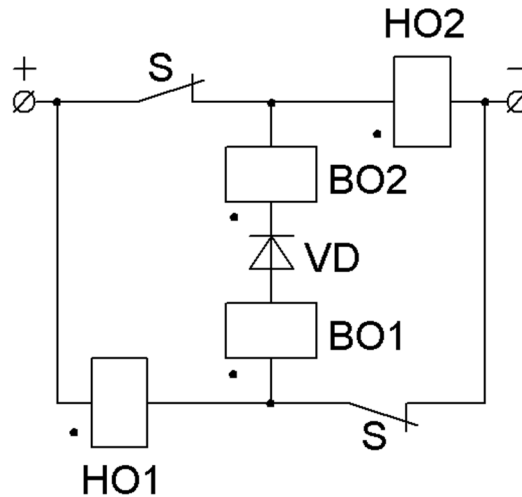


Рисунок 1.3 – Четырехобмоточная схема форсировки с параллельным подсоединением низкоомных обмоток на этапе пуска электромагнита

При подаче на клеммы питания напряжения (рисунок 1.3) через замкнутые форсировочные контакты S (ключи) и последовательно подсоединенными с ними соответственно низкоомными НО1 и НО2 обмотками протекают пусковые токи $I_{п1}$ и $I_{п2}$, создающие пусковую магнитодвижущую силу ($F_{п}$):

$$F_{п} = \frac{U}{R_{но1}} N_{но1} + \frac{U}{R_{но2}} N_{но2}, \quad (1.9)$$

где $R_{но1}$ и $R_{но2}$ – сопротивления низкоомных обмоток;

$N_{но1}$ и $N_{но2}$ – количество витков в низкоомных обмотках.

При $N_{но1} = N_{но2} = N_{но}$, $R_{но1} = R_{но2} = R_{но}$ выражение (1.9) принимает вид:

$$F_{п} = \frac{2UN_{но}}{R_{но}}. \quad (1.10)$$

В режиме удержания все четыре обмотки включаются последовательно и согласно, создавая магнитодвижущую силу удержания:

$$F_{уд} = \frac{U(N_{HO} + N_{BO})^2}{2(R_{HO} + R_{BO})} = U \frac{N_{HO}(1 + N_{BO}/N_{HO})}{R_{HO}(1 + R_{BO}/R_{HO})}. \quad (1.11)$$

Коэффициент форсировки (K_F) по МДС [25, 66, 67, 98] может быть записан на основании (1.10) и (1.11) в виде:

$$K_F = \frac{F_n}{F_{уд}} = 2 \frac{(1 + R_{BO}/R_{HO})}{(1 + N_{BO}/N_{HO})}. \quad (1.12)$$

Выразив R_{BO} и R_{HO} через первичные их параметры можно получить:

$$K_F = 2 \frac{1 + \frac{l_{BO}}{l_{HO}} \cdot \frac{A_{HO}}{A_0 - A_{HO}} \cdot \frac{\rho_{BO}}{\rho_{HO}} \cdot \frac{K_{3.HO}}{K_{3.BO}} \cdot n^2}{1 + n}, \quad (1.13)$$

где $\frac{l_{BO}}{l_{HO}} = 1 + \frac{A_*}{1 + 2\Delta_{B*} + 2\Delta_* + A_*A_{HO*}}$; $A_* = A_0/d_c$; $A_{HO*} = A_{HO}/A_0$;

Примем характерные значения соизмерностей в форсированной магнитной системе:

$$A_* = 0,5; \quad A_{HO*} = 0,4; \quad \Delta_* = 0,1; \quad \Delta_{B*} = 0,02.$$

Оценим величины сомножителей, входящих в выражение (1.13)

$$\frac{l_{BO}}{l_{HO}} = 1 + \frac{0,5}{1 + 2 \cdot 0,02 + 2 \cdot 0,1 + 0,5 \cdot 0,4} = 1,35;$$

$$\rho_{BO} \approx \rho_{HO}; \quad \frac{K_{3.HO}}{K_{3.BO}} = \frac{0,5}{0,35} \approx 1,43.$$

Следовательно, можно записать:

$$K_F = 2 \frac{(1 + 1,93n^2)}{(1 + n)}. \quad (1.14)$$

Кратность чисел витков обычно находится в диапазоне от 1,8-4,5. Следовательно, диапазон изменения K_F составит от 5 до 15.

Четырехобмоточная схема форсированного управления с последовательным соединением низкоомных обмоток приведена на рисунке 1.4.

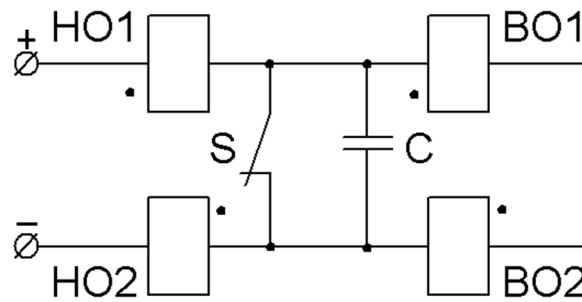


Рисунок 1.4 – Четырехобмоточный форсированный электромагнит с последовательно соединенными низкоомными обмотками

Магнитодвижущая сила в режиме пуска:

$$F_{\Pi} = \frac{U}{2R_{\text{HO}}} 2N_{\text{HO}} = \frac{U}{R_{\text{HO}}} N_{\text{HO}}. \quad (1.15)$$

Магнитодвижущая сила в режиме удержания:

$$F_{\text{уд}} = \frac{U 2(N_{\text{HO}} + N_{\text{BO}})}{2(R_{\text{HO}} + R_{\text{BO}})} = \frac{U}{R_{\text{HO}}} N_{\text{HO}} \frac{(1 + N_{\text{BO}}/N_{\text{HO}})}{(1 + R_{\text{BO}}/R_{\text{HO}})}. \quad (1.16)$$

Коэффициент форсировки по магнитодвижущей силе:

$$K_F = \frac{1 + R_{\text{BO}}/R_{\text{HO}}}{1 + N_{\text{BO}}/N_{\text{HO}}}. \quad (1.17)$$

По аналогии с (1.12) выражение (1.17) преобразуем к виду:

$$K_F = \frac{1 + 1,93n^2}{1 + n}. \quad (1.18)$$

Следовательно, коэффициент форсировки по магнитодвижущей силе устройства с параллельным соединением обмоток вдвое больше, чем в устройстве с последовательным соединением низкоомных обмоток.

Наиболее просто форсированное управление от источника питания переменного тока реализуется подключением устройств, представленных на рисунках 1.2, 1.3, 1.4, через однофазную мостовую схему выпрямления.

Вариант перехода с двухполупериодного питания на однополупериодное представлен на рисунке 1.5.

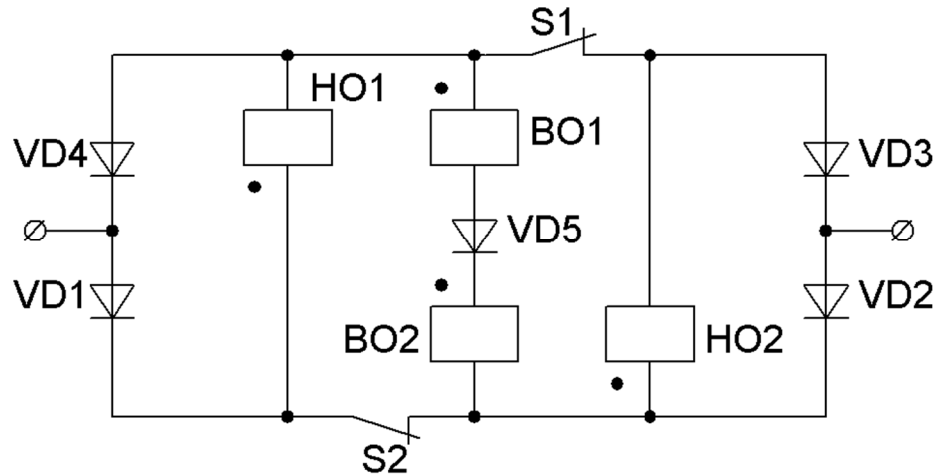


Рисунок 1.5 – Четырехобмоточный форсированный электромагнит переменного тока с переводом питания с двухполупериодного на однополупериодный

Среднее значение (постоянная составляющая) МДС в режиме пуска:

$$F_{\Pi} = 0,9U \frac{2N_{\text{HO}}}{2R_{\text{HO}}} = 0,9U \frac{N_{\text{HO}}}{R_{\text{HO}}}. \quad (1.19)$$

В режиме удержания (при разомкнутых форсированных контактах S1, S2) МДС определяется выражением:

$$F_{\text{уд}} = \frac{0,45U}{2(R_{\text{HO}} + R_{\text{BO}})} 2(N_{\text{HO}} + N_{\text{BO}}) = 0,45 \frac{UN_{\text{HO}}(1 + N_{\text{BO}}/N_{\text{HO}})}{R_{\text{HO}}(1 + R_{\text{BO}}/R_{\text{HO}})}. \quad (1.20)$$

Следовательно:

$$K_F = 4 \frac{(1 + R_{\text{BO}}/R_{\text{HO}})}{(1 + N_{\text{BO}}/N_{\text{HO}})} \approx 4 \frac{(1 + 1,93n^2)}{(1 + n)}. \quad (1.21)$$

1.4 Основные технические требования к низковольтным контакторам

Проектирование оптимальных приводных электромагнитов низковольтных коммутационных аппаратов связано с предъявлением к ним противоречивых исходных данных, которые определяются исходя из функционального назначения, условий эксплуатации, требований по унификации, массо-габаритным показателям и потребляемой мощности аппарата. Применительно к

низковольтным контакторам для выбора исходных данных к приводному электромагниту необходимо предъявить следующие требования к контактору:

- Количество и сочетание (замыкающие/размыкающие) главных и вспомогательных контактов;
- Масса и габаритные размеры;
- Рабочее положение в пространстве с указанием допустимых наклонов относительно вертикальной и горизонтальной оси;
- Номинальный тепловой ток главной цепи и контактов вспомогательной цепи;
- Номинальное напряжение главной цепи и контактов вспомогательной цепи;
- Номинальное напряжение и род тока цепи управления с указанием диапазона допустимого изменения;
- Напряжение и время срабатывания и возврата подвижной системы контактора;
- Режим работы (продолжительный, прерывисто-продолжительный, кратковременный или повторно-кратковременный) с указанием относительной продолжительности включения;
- Максимальная частота включений;
- Номинальный рабочий ток главной цепи и контактов вспомогательной цепи для категории основного применения по ГОСТ 12434;
- Предельное допустимое превышение температуры для катушки управления (управляющей обмотки);
- Номинальная потребляемая мощность при включении/удержании;
- Воздействующий механический фактор с указанием его значения;
- Диапазон изменения рабочей температуры эксплуатации.

Наличие вышеуказанных требований позволяет построить точную механическую характеристику приводного электромагнита, правильно выбрать тип (конструктивное исполнение) и схему управления электромагнита, определить приоритетный показатель качества электромагнита (минимальный

габаритный объем или минимальная установочная площадь или минимальная масса активных материалов или др.)

1.5 Выводы к разделу 1

1. Сравнительная оценка электромагнитных контакторов позволила сделать заключение о перспективности использования в контакторах переменного тока более 100 А вакуумной дугогасительной камеры.

2. Установлено, что методики проектного расчета по условиям "статика" должны быть дополнены условием возврата подвижной системы в исходное состояние.

3. Математическая модель нагрузочной характеристики симметричной двухкатушечной П-образной магнитной системы является предпочтительной формой хранения информации о силовой характеристике форсированного электромагнита.

4. Эффективность схем форсированного управления рекомендуется оценивать по величине коэффициента форсировки по магнитодвижущей силе. Наилучшим показателем обладает четырехобмоточный электромагнит с переключением низкоомных обмоток с параллельного соединения на последовательное и переключения выпрямителя с двухполупериодного на однополупериодный режим питания.

РАЗДЕЛ 2 ОПТИМИЗАЦИЯ ПРИВОДОВ КОНТАКТОРОВ НИЗКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Ежегодный объем выпуска электромагнитных контакторов низкого напряжения составляет сотни тысяч штук. При этом материалоемкость и энергоемкость приводных электромагнитов составляет [44, 62, 75, 99] значительную часть (до 60-70 %) от показателей аппаратов в целом. Наиболее эффективным направлением улучшения эксплуатационных и технико-экономических показателей является форсированное управление электромагнитными приводами контакторов. При этом важно достижение наилучших технико-эксплуатационных показателей.

Задача оптимизации приводов электромагнитных аппаратов обусловлена противоречивостью требований, предъявляемых к электрическим аппаратам. Часто в качестве наилучшего решения используются частные критерии [10, 69, 75] оптимальности (качества). Наряду с общими требованиями по обеспечению заданных условий срабатывания, возврата и нагрева электромагнита к нему предъявляются дополнительное требование в виде обеспечения, например, таких свойств, как минимума массы, объема, стоимости обмоточной меди и ферромагнитной стали (активных материалов), затрачиваемых на изготовление электромагнита. Известно много методов решения [10, 29, 69, 75] подобного рода задач. Часто в качестве ограничений используются неравенства, описывающие диапазоны варьирования относительных геометрических размеров, магнитной индукции, принятые при разработке математических моделей нагрузочных характеристик электромагнитов [79, 80], тепловых параметров.

За последние одно-два десятилетия интенсивно развивается производство и эксплуатация вакуумных контакторов, в которых процессы отключения и включения происходят в вакуумной среде, созданной в специальной дугогасительной камере. При этом они экономичны, требуют минимальных затрат на обслуживание, могут быть использованы в условиях агрессивной среды при эксплуатации на таких производствах как металлургическая, нефтегазовая,

химическая, горно-рудная, цементная и в других отраслях народного хозяйства. Вакуумные контакторы низкого напряжения изготавливаются на номинальные токи от 160 до 1000 и так же, как и воздушные, выполняются с форсированными приводными электромагнитами.

2.1 Разработка методики проектного расчета П-образных двухкатушечных четырехобмоточных форсированных электромагнитов постоянного тока

Задачей проектного расчета [19] электромагнита (рисунок 2.1) состоит в определении его размеров при заданных условиях функционирования. При этом конструктор выбирает основные соизмерности (относительные размеры) электромагнита.

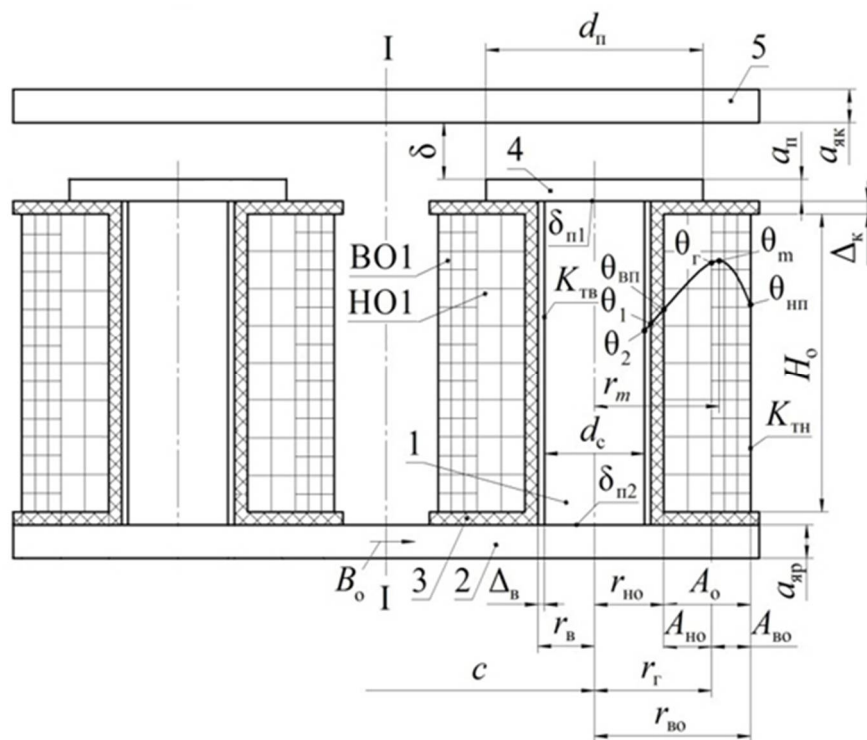


Рисунок 2.1 – Эскиз П-образного двухкатушечного форсированного четырехобмоточного электромагнита постоянного тока с обозначением основных размеров и эпюра распределения температуры в толще высокоомной обмотки

В известных методиках проектного расчета без должного обоснования принимаются ряд коэффициентов [19, 34, 39, 44 и др.] и не учитываются условия

возврата подвижной системы, кратность (отношение) чисел витков высоковольтной и низковольтной обмоток. Последнее не позволяет в рамках проектного расчета оценить величину возможных перенапряжений, возникающих [44] при включении форсированных двух (четырёхобмоточных) электромагнитов.

Ниже излагается методика [31, 92, 94] проектного расчета, в которой устранены отмеченные недостатки. Обратим внимание, что методика базируется на условиях «статике» [39, 92, 98]. Ее основой являются: обобщенная нагрузочная характеристика, полученная экспериментально [79] методами теорий подобия и планирования [32, 80, 92] эксперимента и расчетные выражения максимальной температуры в толще высоковольтной обмотки [2, 75, 109].

Составим систему уравнений проектирования, включающую условие срабатывания (2.1), возврата (отпускания) (2.2) и нагрева (2.3) форсированного электромагнита, управляемого по схеме, представленной на рисунке 2.2:

$$F_{\text{cp}} = \frac{U_{\text{cp}}}{2R_{\text{HO.Г}}} \cdot 2N_{\text{HO}} = \frac{K_{U\text{min}}}{K_{U\text{cp}}} \cdot \frac{U_{\text{H}}}{R_{\text{HO.Г}}} \cdot N_{\text{HO}}; \quad (2.1)$$

$$F_{\text{B}} = \frac{U_{\text{B}} \cdot 2(N_{\text{HO}} + N_{\text{BO}})}{2(R_{\text{HO.X}} + R_{\text{BO.X}})} = \frac{K_{\text{отп}} K_{U\text{отп}} U_{\text{H}} N_{\text{HO}} \left(1 + \frac{N_{\text{BO}}}{N_{\text{HO}}}\right)}{R_{\text{HO.X}} \left(1 + \frac{R_{\text{BO.X}}}{R_{\text{HO.X}}}\right)}; \quad (2.2)$$

$$\theta_m = T_0 + \frac{q_{\text{BO}}}{2\lambda_{\text{BO}}} \left(\frac{r_{\text{BO}}^2 - r_m^2}{2} - r_m^2 \cdot \ln \frac{r_{\text{BO}}}{r_m} \right) + \frac{q_{\text{BO}} (r_{\text{BO}}^2 - r_m^2)}{2K_{\text{ТН}} r_{\text{BO}}}, \quad (2.3)$$

где

$$r_m = \left(\frac{\frac{r_{\text{BO}} - r_{\text{Г}}^2}{2} + r_{\text{Г}}^2 \frac{\lambda_{\text{BO}}}{\lambda_{\text{HO}}} \left[\left(1 - \frac{q_{\text{HO}}}{q_{\text{BO}}}\right) \cdot \ln \frac{r_{\text{Г}}}{r_{\text{HO}}} + \frac{q_{\text{HO}}}{2q_{\text{BO}}} \left(1 - \frac{r_{\text{HO}}^2}{r_{\text{Г}}^2}\right) \right]}{\ln \frac{r_{\text{BO}}}{r_{\text{Г}}} + \frac{\lambda_{\text{BO}}}{\lambda_{\text{HO}}} \cdot \ln \frac{r_{\text{Г}}}{r_{\text{HO}}} + \frac{\lambda_{\text{BO}}}{r_{\text{BO}} K_{\text{ТН}}} + \beta} + \frac{r_{\text{Г}}^2 \left[1 - \frac{q_{\text{HO}}}{q_{\text{BO}}} \left(1 - \frac{r_{\text{HO}}^2}{r_{\text{Г}}^2}\right) \right] \beta + \frac{\lambda_{\text{BO}} r_{\text{BO}}}{K_{\text{ТН}}}}{\ln \frac{r_{\text{BO}}}{r_{\text{Г}}} + \frac{\lambda_{\text{BO}}}{\lambda_{\text{HO}}} \cdot \ln \frac{r_{\text{Г}}}{r_{\text{HO}}} + \frac{\lambda_{\text{BO}}}{r_{\text{BO}} K_{\text{ТН}}} + \beta} \right)^{1/2}; \quad (2.4)$$

$$\beta = \frac{\lambda_{\text{BO}}}{\lambda_{\text{K}}} \cdot \ln\left(1 + \frac{\Delta_{\text{K}}}{\Delta_{\text{B}} + r_{\text{C}}}\right) + \frac{\lambda_{\text{BO}}}{\lambda_{\text{B}}} \cdot \ln\left(1 + \frac{\Delta_{\text{B}}}{r_{\text{C}}}\right) + \frac{\lambda_{\text{BO}}}{r_{\text{C}} K_{\text{TB}}},$$

$$\theta_{\text{НП}} = \theta_m - \frac{q_{\text{BO}}}{2\lambda_{\text{BO}}} \left(\frac{r_{\text{BO}}^2 - r_m^2}{2} - r_m^2 \cdot \ln \frac{r_{\text{BO}}}{r_m} \right),$$

$$\theta_{\Gamma} = \theta_m - \frac{q_{\text{BO}}}{2\lambda_{\text{BO}}} \left(-\frac{r_m^2 - r_{\Gamma}^2}{2} + r_m^2 \cdot \ln \frac{r_m}{r_{\Gamma}} \right) \quad (\text{см. рисунок 2.1}),$$

$$\theta_{\text{ВП}} = \theta_{\Gamma} - \frac{1}{2\lambda_{\text{HO}}} \left\{ \left[q_{\text{HO}} r_{\Gamma}^2 + q_{\text{BO}} (r_m^2 - r_{\Gamma}^2) \right] \cdot \ln \frac{r_{\Gamma}}{r_{\text{HO}}} - \frac{q_{\text{HO}}}{2} (r_{\Gamma}^2 - r_{\text{HO}}^2) \right\},$$

$$\theta_1 = \theta_{\text{ВП}} - \frac{1}{2\lambda_{\text{K}}} \left[q_{\text{HO}} (r_{\Gamma}^2 - r_{\text{HO}}^2) + q_{\text{BO}} (r_m^2 - r_{\Gamma}^2) \right] \cdot \ln\left(1 + \frac{\Delta_{\text{K}}}{r_{\text{B}}}\right),$$

$$\theta_2 = \theta_1 - \frac{1}{2\lambda_{\text{B}}} \left[q_{\text{HO}} (r_{\Gamma}^2 - r_{\text{HO}}^2) + q_{\text{BO}} (r_m^2 - r_{\Gamma}^2) \right] \cdot \ln\left(1 + \frac{\Delta_{\text{B}}}{r_{\text{C}}}\right).$$

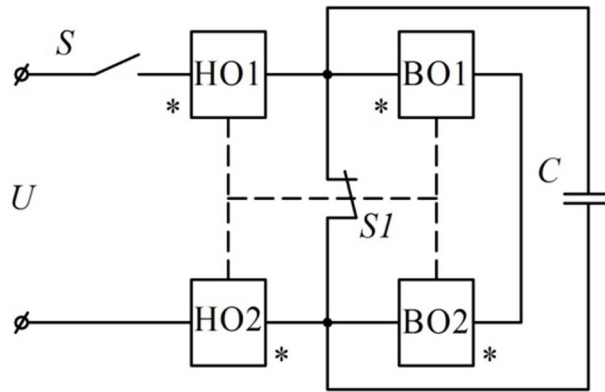


Рисунок 2.2 – Схема форсированного управления электромагнитом коммутационного аппарата: $S1$ – форсировочный контакт, механически связанный с якорем электромагнита; S – внешний контакт управления контактором; C – шунтирующий конденсатор

Здесь обозначено:

$F_{\text{ср}}$, $F_{\text{в}}$ – значения магнитодвижущих сил срабатывания и возврата (рисунок 2.3) электромагнита; $U_{\text{н}}$, $U_{\text{ср}}$, $U_{\text{в}}$ – номинальное напряжение источника питания, напряжения срабатывания и возврата электромагнита соответственно; $K_{U_{\text{min}}}$ – отношение минимального значения напряжения источника питания к номинальному; $K_{U_{\text{ср}}}$, $K_{U_{\text{отп}}}$, – коэффициенты запаса по напряжению

срабатывания и возврата; $K_{\text{отп}}$ – отношение напряжения отпадения (возврата) якоря к номинальному напряжению источника питания; $R_{\text{но.х}}$, $R_{\text{но.г}}$ – сопротивления холодных низкоомных обмоток при температуре T_0 окружающей среды и среднеобъемной их температуре ($\theta_{\text{в.но}}$) в нагретом состоянии; $R_{\text{во.х}}$ – сопротивление холодных высокоомных обмоток при температуре T_0 ; $\theta_{\text{нп}}$, $\theta_{\text{м}}$, $\theta_{\text{г}}$, $\theta_{\text{вп}}$ – температура [2] наружной поверхности высокоомных обмоток, максимальная температура нагрева катушек, находящаяся в толще высокоомных обмоток, $\theta_{\text{г}}$ – температура на границе раздела низкоомных и высокоомных обмоток, $\theta_{\text{вп}}$ – температура на поверхности соприкосновения низкоомной обмотки с каркасом катушки; $q_{\text{но}}$, $q_{\text{во}}$ – мощности тепловых потерь в низкоомных и высокоомных обмотках, отнесенные к их геометрическим объемам; $\lambda_{\text{но}}$, $\lambda_{\text{во}}$, $\lambda_{\text{к}}$, $\lambda_{\text{в}}$ – коэффициенты теплопроводности замещающего тела [2, 85] соответственно низкоомных и высокоомных обмоток, материала каркаса катушек, воздушного промежутка ($\Delta_{\text{в}}$) между ними и сердечниками; $K_{\text{тн}}$, $K_{\text{тв}}$ – коэффициенты теплопередачи с наружных поверхностей высокоомных обмоток и с внутренних поверхностей низкоомных обмоток соответственно; $N_{\text{но}}$, $N_{\text{во}}$ – числа витков в низко- и высокоомных обмотках соответственно.

Определим отношение чисел витков $N_{\text{во}}/N_{\text{но}}=n$. На основании выражения (2.1) можно получить:

$$(U_{\text{н}} / R_{\text{но.г}}) \cdot N_{\text{но}} = F_{\text{ср}} K_{U_{\text{ср}}} / K_{U_{\text{мин}}}.$$

На основании выражения (2.2) можно записать:

$$(U_{\text{н}} / R_{\text{но.г}}) \cdot N_{\text{но}} = \frac{F_{\text{в}}}{1+n} \cdot \frac{R_{\text{но.х}}}{R_{\text{но.г}}} \left(1 + \frac{R_{\text{во.х}}}{R_{\text{но.х}}} \right) \frac{1}{K_{\text{отп}} K_{U_{\text{отп}}}}.$$

Таким образом, условие равенства правых частей двух последних выражений примет вид:

$$F_{\text{ср}} K_{U_{\text{ср}}} / K_{U_{\text{мин}}} = \frac{F_{\text{в}}}{1+n} \cdot \frac{\rho_{\text{х}}}{\rho_{\text{но.г}}} \cdot \frac{(1 + R_{\text{во.х}} / R_{\text{но.х}})}{K_{\text{отп}} K_{U_{\text{отп}}}}.$$

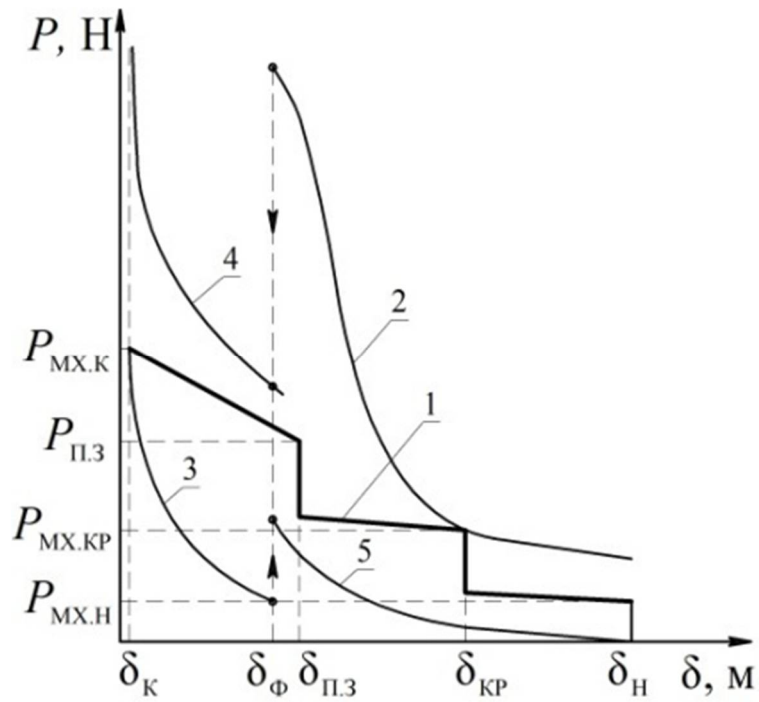


Рисунок 2.3 – Механическая (1) и тяговые характеристики приводного электромагнита: 2 – при напряжении и МДС срабатывания; 3 – при напряжении и МДС возврата; 4 – при напряжении срабатывания; 5 – при напряжении возврата

На основании последнего выражения:

$$(1+n) \frac{F_{\text{ср}}}{F_{\text{в}}} \cdot \frac{K_{U\text{ср}} K_{\text{отп}} K_{U\text{отп}}}{K_{U\text{min}}} \cdot \frac{\rho_{\text{HO.Г}}}{\rho_{\text{X}}} = 1 + \frac{R_{\text{BO.X}}}{R_{\text{HO.X}}} \quad (2.5)$$

Преобразуем правую часть выражения (2.5), выразив сопротивления обмоток через первичные параметры:

$$1 + \frac{R_{\text{BO.X}}}{R_{\text{HO.X}}} = 1 + n^2 \frac{l_{\text{BO}}}{l_{\text{HO}}} \cdot \frac{A_{\text{HO}}}{A_0 - A_{\text{HO}}} \cdot \frac{K_{3,\text{HO}}}{K_{3,\text{BO}}},$$

где $l_{\text{BO}} = \pi(d_{\text{с}} + 2\Delta_{\text{в}} + 2\Delta_{\text{к}} + 2A_{\text{HO}} + A_{\text{BO}})$ – средняя длина витков высокоомной обмотки;

$l_{\text{HO}} = \pi(d_{\text{с}} + 2\Delta_{\text{в}} + 2\Delta_{\text{к}} + A_{\text{HO}})$ – средняя длина витков низкоомной обмотки;

$l_{\text{BO}}/l_{\text{HO}} = 1 + A^*/(1 + 2\Delta_{\text{в}}^* + 2\Delta_{\text{к}}^* + A^* \cdot A_{\text{HO}}^*)$;

$A_{\text{HO}}/(A_0 - A_{\text{HO}}) = A_{\text{HO}}^*/(1 - A_{\text{HO}}^*)$; $\Delta_{\text{в}}^* = \Delta_{\text{в}}/d_{\text{с}}$; $\Delta_{\text{к}}^* = \Delta_{\text{к}}/d_{\text{с}}$; $A_{\text{HO}}^* = A_{\text{HO}}/A_0$.

Обозначим:

$$\frac{l_{\text{BO}}}{l_{\text{HO}}} \cdot \frac{A_{\text{HO}}^*}{1 - A_{\text{HO}}^*} \cdot \frac{K_{3,\text{HO}}}{K_{3,\text{BO}}} = a; \quad \frac{K_{U\text{ср}} K_{U\text{max}}}{K_{U\text{min}}} = K_{\text{max}}; \quad \frac{K_{U\text{отп}} K_{\text{отп}}}{K_{U\text{max}}} = K; \quad \frac{F_{\text{в}}}{F_{\text{ср}}} = K_{\text{в}} -$$

коэффициент возврата.

Подставив полученные выражения в (2.5), запишем:

$$(1+n) \cdot \frac{K_{\max} K}{K_B} \cdot \frac{\rho_{\text{НО.Г}}}{\rho_X} = 1 + an^2.$$

Выполнив в последнем выражении очевидные преобразования, получим квадратное уравнение:

$$an^2 - bn + c = 0, \quad (2.6)$$

где

$$b = \frac{K_{\max} K}{K_B} \cdot \frac{\rho_{\text{НО.Г}}}{\rho_X};$$

$$c = 1 - b.$$

Решение уравнения (2.6) запишем в виде:

$$n_{1,2} = \frac{b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}. \quad (2.7)$$

При решении (2.7) следует иметь в виду:

$$a > 0 \text{ (всегда);}$$

$$b > 0 \text{ (всегда).}$$

$$\text{Если } b > 1, \text{ то } c < 0 \text{ и } n = n_1 = \frac{b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}.$$

$$\text{Если } b = 1, \text{ то } c = 0 \text{ и } n = \frac{1}{a}.$$

$$\text{Если } b < 1 \text{ и } b^2 - 4ac \geq 0, \text{ то } n = \begin{cases} n_1 = \frac{b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}; \\ n_1 = \frac{b - \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}. \end{cases}$$

Если $b^2 - 4ac \leq 0$, то действительных корней не существует (необходимо задать другие кратности (соразмерности) в магнитной системе).

Зависимость температуры в толще обмотки интерполируем квадратичным трехчленом:

$$\theta = Ar^2 + Br^2 + C. \quad (2.8)$$

Расчет среднеобъемной температуры $\theta_{v,HO}$ низкоомной обмотки выполняется по выражению:

$$\theta_{v,HO} = \frac{1}{r_{\Gamma} - r_{HO}} \int_{r_{HO}}^{r_{\Gamma}} (Ar^2 + Br + C) dr = \frac{A}{3}(r_{\Gamma}^2 + r_{\Gamma}r_{HO} + r_{HO}^2) + \frac{B}{2}(r_{\Gamma} + r_{HO}) + C, \quad (2.9)$$

где

$$A = A_{HO} = -\frac{1}{r_m - r_{HO}} \left[\frac{\theta_{\Gamma} - \theta_{B,II}}{r_{\Gamma} - r_{HO}} - \frac{\theta_m - \theta_{\Gamma}}{r_m - r_{\Gamma}} \right];$$

$$B = B_{HO} = \frac{\theta_{\Gamma} - \theta_{B,II}}{r_{\Gamma} - r_{HO}} - A_{HO}(r_{\Gamma} + r_{HO});$$

$$C = C_{HO} = \theta_{B,II} - A_{HO}r_{HO}^2 - B_{HO}r_{HO}.$$

Удельное электрическое сопротивление обмоточной меди нагретой низкоомной обмоткой:

$$\rho_{HO,\Gamma} = 1,62 \cdot 10^{-8} (1 + 0,0043 \cdot \theta_{v,HO}). \quad (2.10)$$

Среднеобъемная температура нагрева $\theta_{v,BO}$ высокоомной обмотки рассчитывается аналогично:

$$\theta_{v,BO} = \frac{A_{BO}}{3}(r_{BO}^2 + r_{BO}r_{\Gamma} + r_{BO}^2) + \frac{B_{BO}}{2}(r_{BO} + r_{\Gamma}) + C_{BO}, \quad (2.11)$$

где

$$A_{BO} = -\frac{1}{r_{BO} - r_m} \left[\frac{\theta_m - \theta_{\Gamma}}{r_m - r_{\Gamma}} - \frac{\theta_{H,II} - \theta_{\Gamma}}{r_{BO} - r_m} \right];$$

$$B_{BO} = \frac{\theta_m - \theta_{\Gamma}}{r_m - r_{\Gamma}} - A_{BO}(r_m + r_{\Gamma});$$

$$C_{BO} = \theta_{H,II} - A_{BO}r_{BO}^2 - B_{BO}r_{BO}.$$

Удельное электрическое сопротивление обмоточной меди высокоомной обмотки рассчитывается по выражению:

$$\rho_{BO,\Gamma} = 1,62 \cdot 10^{-8} (1 + 0,0043 \cdot \theta_{v,BO}). \quad (2.12)$$

Мощность потребляемая электромагнитом в режиме удержания ($P_{уд}$):

$$P_{уд} = \frac{U_{\max}^2}{2(R_{HO,\Gamma} + R_{BO,\Gamma})}, \quad (2.13)$$

где $R_{\text{во.г}}$ – сопротивление высокоомной обмотки в ее нагретом состоянии.

Выражение (2.13) очевидным образом может быть представлено в виде:

$$P_{\text{уд}} = \frac{P_{\text{п}}}{1 + R_{\text{во.г}}/R_{\text{но.г}}}, \quad (2.14)$$

где $P_{\text{п}} = \frac{(K_{U \max} U_{\text{н}})^2}{2R_{\text{но.г}}}$ – мощность потребляемая электромагнитом при замкнутом состоянии форсировочного контакта $S1$ (рисунок 2.2).

Преобразуем выражение (2.14):

$$P_{\text{п}} = \left(\frac{U_{\text{н}}}{2R_{\text{но.г}}} 2N_{\text{но}} \right)^2 \frac{2R_{\text{но.г}}}{(2N_{\text{но}})^2} K_{U \max}^2 = (K_{\max} F_{\text{ср}})^2 \frac{\rho_{\text{но.г}} l_{\text{но}}}{2H_{\text{о}} A_{\text{но}} K_{3.\text{но}}}; \quad (2.15)$$

$$1 + \frac{R_{\text{во.г}}}{R_{\text{но.г}}} = 1 + an^2 \rho_{\text{во.г}} / \rho_{\text{но.г}}. \quad (2.16)$$

С учетом (2.15) и (2.16) выражение (2.14) примет вид:

$$P_{\text{уд}} = \frac{\pi}{2} (K_{\max} F_{\text{ср}})^2 \frac{\rho_{\text{но.г}}}{d_{\text{с}}} \frac{(1 + 2\Delta_{\text{в}^*} + 2\Delta_{\text{*}} + A_{\text{*}} A_{\text{но}^*})}{H_{\text{*}} A_{\text{*}} A_{\text{но}^*} K_{3.\text{но}} (1 + an^2 \rho_{\text{во.г}} / \rho_{\text{но.г}})}. \quad (2.17)$$

Мощность потребляемая одной катушкой ($P_{\text{уд.о}}$) электромагнита составит:

$$P_{\text{уд.о}} = 0,5 P_{\text{уд}}. \quad (2.18)$$

С другой стороны

$$P_{\text{уд.о}} = q_{\text{во}} V_{\text{во}} + q_{\text{но}} V_{\text{но}}, \quad (2.19)$$

$$\text{где } q_{\text{во}} V_{\text{во}} = \frac{U_{\max}^2 R_{\text{во.г}}}{(2(R_{\text{но.г}} + R_{\text{во.г}}))^2}; q_{\text{но}} V_{\text{но}} = \frac{U_{\max}^2 R_{\text{но.г}}}{(2(R_{\text{но.г}} + R_{\text{во.г}}))^2}.$$

Следовательно,

$$q_{\text{во}} V_{\text{во}} = \frac{(K_{U \max} U_{\text{н}})^2 R_{\text{во.г}} / R_{\text{но.г}}}{4R_{\text{но.г}} (1 + R_{\text{во.г}} / R_{\text{но.г}})} = 0,5 P_{\text{п}} \frac{an^2 \rho_{\text{во.г}} / \rho_{\text{но.г}}}{(1 + an^2 \rho_{\text{во.г}} / \rho_{\text{но.г}})^2}; \quad (2.20)$$

$$q_{\text{но}} V_{\text{но}} = \frac{(K_{U \max} U_{\text{н}})^2}{4R_{\text{но.г}} (1 + R_{\text{во.г}} / R_{\text{но.г}})} = 0,5 P_{\text{п}} \frac{1}{(1 + an^2 \rho_{\text{во.г}} / \rho_{\text{но.г}})^2}. \quad (2.21)$$

На основании двух последних выражений получим:

$$\frac{q_{\text{но}}}{q_{\text{во}}} = \frac{V_{\text{во}} / V_{\text{но}}}{an^2 \rho_{\text{во.г}} / \rho_{\text{но.г}}}, \quad (2.22)$$

где

$$\frac{V_{\text{BO}}}{V_{\text{HO}}} = \frac{1 - A_{\text{HO}^*}}{A_{\text{HO}^*}} \left(1 + \frac{A_*}{1 + 2\Delta_{\text{B}^*} + 2\Delta_* + A_* A_{\text{HO}^*}} \right);$$

$$V_{\text{BO}} = \pi d_c^3 H_* A_* (1 - A_{\text{HO}^*}) (1 + 2\Delta_{\text{B}^*} + 2\Delta_* + A_* (1 + A_{\text{HO}^*}));$$

$$V_{\text{HO}} = \pi d_c^3 H_* A_* A_{\text{HO}^*} (1 + 2\Delta_{\text{B}^*} + 2\Delta_* + A_* A_{\text{HO}^*}) \quad - \quad \text{геометрические объемы}$$

высокоомных и низкоомных обмоток соответственно.

Расчет МДС срабатывания (F_{cp}) производится на основе экспериментальной нагрузочной характеристики [79], описанной в параметрической форме:

$$P_{\text{эм}} = P_* \cdot P_{\text{баз}}, \quad (2.23)$$

$$F = F_* \cdot F_{\text{баз}}, \quad (2.24)$$

где $P_* = P_*(H_*, A_*, d_*, C_*, A_{\text{HO}^*}, \delta_{\text{кр}^*}, B_0)$; $P_{\text{баз}} = B_0^2 \pi d_c^2 / (4\mu_0)$;

$$F_* = F_*(H_*, A_*, d_*, C_*, A_{\text{HO}^*}, \delta_{\text{кр}^*}, B_0); \quad F_{\text{баз}} = B_0 d_c / \mu_0;$$

$H_*, A_*, d_*, C_*, A_{\text{HO}^*}, \delta_{\text{кр}^*}$ – относительные геометрические размеры магнитной системы (рисунок 2.1);

B_0 – усредненное значение магнитной индукции по поперечному сечению ярма, расположенного в поперечной плоскости I–I симметрии (рисунок 2.1) магнитной системы приводного электромагнита.

Показано [80], что линейность клапанной магнитной системы, ферромагнитные элементы которой изготовлены из стали марки 10895, сохраняется при $B_0 \leq 1,11$ Тл.

Граничное значение электромагнитного усилия ($P_{\text{эм.гр}}$), соответствующее $B_{0,\text{гр}} \approx 1,1$ Тл, определяется по выражению [18]:

$$P_{\text{эм.гр}} = P_*(B_{0,\text{гр}}) \cdot B_{0,\text{гр}}^2 \pi d_c^2 / (4\mu_0).$$

Таким образом, если

$$P_{\text{мх.кр}} < P_{\text{эм.гр}},$$

то магнитная система линейна и [71]:

$$P_{\text{эм}} = P_{\text{мх.кр}} = P_*(B_{0,\text{гр}}) \cdot B_{0,\text{гр}}^2 \pi d_c^2 / (4\mu_0), \quad (2.25)$$

в противном случае

$$P_{эм} = P_{мх.кр} = P_*(B_o) \cdot B_o^2 \pi d_c^2 / (4\mu_0). \quad (2.26)$$

На основании (2.24) и (2.25) получим:

$$B_{o.ср} = \frac{2}{d_c} \sqrt{\frac{\mu_0 P_{мх.кр}}{\pi P_*(B_{o.гр})}},$$

$$F_{ср} = F_*(B_{o.гр}) \cdot B_{o.ср} d_c / \mu_0.$$

На основании (2.26) $B_{o.ср}$ находится одним из методов численного решения нелинейного уравнения. Тогда получим:

$$F_{ср} = F_*(B_{o.ср}) \cdot B_{o.ср} d_c / \mu_0.$$

Расчет МДС возврата (F_B) проводится на основе допущений: при притяннутом положении якоря можно пренебречь потоками рассеяния и выпучивания в магнитной системе. Следовательно,

$$P_{мх.к} = (B_{\delta})_{отп}^2 S_{п} / \mu_0, \quad (2.27)$$

где $(B_{\delta})_{отп}$ – магнитная индукция в рабочих воздушных зазорах при отпадании (возврате) якоря (рисунок 2.3);

$S_{п} = \pi d_{п}^2 / 4$ – площадь поперечного сечения полюсных наконечников.

Магнитный поток в поперечных сечениях (S_c) (рисунок 2.1) якоря, ярма, сердечников, в паразитных зазорах $\delta_{п1}$, $\delta_{п2}$ определяется выражением

$$(B_o)_{отп} S_c = (B_{\delta})_{отп} S_{п}. \quad (2.28)$$

На основании выражений (2.27) и (2.28) получим

$$(B_{\delta})_{отп} = 2 \sqrt{\frac{\mu_0 P_{мх.к}}{\pi}} \cdot \frac{1}{d_* d_c},$$

$$(B_o)_{отп} = (B_{\delta})_{отп} d_*^2.$$

В соответствии с кривой намагничивания стали рассчитываются напряженности [39, 85, 92, 98] магнитного поля и падений магнитных напряжений на ферромагнитных элементах, воздушных зазорах. Сумма последних и определяет F_B .

Преобразуем уравнение (2.3):

$$\theta_m - T_0 = \frac{q_{во}}{2} \left[\frac{1}{\lambda_{во}} \left(\frac{r_{во}^2 - r_m^2}{2} - r_m^2 \cdot \ln \left(\frac{r_{во}}{r_m} \right) \right) + \frac{r_{во}^2 - r_m^2}{r_{во} K_{тн}} \right]. \quad (2.29)$$

Принимая во внимание выражение (2.20), выражение (2.15) примет вид:

$$q_{\text{BO}} V_{\text{BO}} = \frac{1}{2} (K_{\text{max}} F_{\text{cp}})^2 \cdot \frac{\rho_{\text{HO.Г}} l_{\text{HO}} R_{\text{BO.Г}} / R_{\text{HO.Г}}}{2 H_{\text{O}} A_{\text{HO}} K_{3.\text{HO}}} \cdot \frac{an^2 \rho_{\text{BO.Г}} / \rho_{\text{HO.Г}}}{(1 + an^2 \rho_{\text{BO.Г}} / \rho_{\text{HO.Г}})}.$$

На основании последнего выражения получим

$$q_{\text{BO}} = \frac{1}{4} \cdot \frac{1}{V_{\text{BO}}} \cdot \frac{(K_{\text{max}} F_{\text{cp}})^2 \cdot l_{\text{HO}} an^2 \rho_{\text{BO.Г}}}{H_{\text{O}} A_{\text{HO}} K_{3.\text{HO}} (1 + an^2 \rho_{\text{BO.Г}} / \rho_{\text{HO.Г}})^2}. \quad (2.30)$$

Подставив (2.30) в (2.29) и разделив на $(\theta_m - T_0)$ получим

$$1 = \frac{1}{8} \cdot \frac{l_{\text{HO}}}{V_{\text{BO}}} \cdot \frac{(K_{\text{max}} F_{\text{cp}})^2 \cdot an^2 \rho_{\text{BO.Г}}}{H_{\text{O}} A_{\text{HO}} K_{3.\text{HO}} (1 + an^2 \rho_{\text{BO.Г}} / \rho_{\text{HO.Г}})} \cdot \frac{1}{(\theta_m - T_0)} \left[\frac{1}{\lambda_{\text{BO}}} \left(\frac{r_{\text{BO}}^2 - r_m^2}{2} - r_m^2 \cdot \ln \left(\frac{r_{\text{BO}}}{r_m} \right) \right) + \frac{r_{\text{BO}}^2 - r_m^2}{r_{\text{BO}} K_{\text{TH}}} \right];$$

$$\frac{V_{\text{BO}}}{l_{\text{HO}}} = \frac{1}{8} \cdot \frac{(K_{\text{max}} F_{\text{cp}})^2}{H_{\text{O}} A_{\text{HO}} K_{3.\text{HO}}} \cdot \frac{l_{\text{BO}} A_{\text{HO}} K_{3.\text{HO}}}{l_{\text{HO}} A_{\text{BO}} K_{3.\text{BO}}} \cdot \frac{n^2 \rho_{\text{BO.Г}}}{(1 + an^2 \rho_{\text{BO.Г}} / \rho_{\text{HO.Г}})} \cdot \frac{1}{(\theta_m - T_0)} \left[\frac{1}{\lambda_{\text{BO}}} \cdot \left(\frac{r_{\text{BO}}^2 - r_m^2}{2} - r_m^2 \cdot \ln \left(\frac{r_{\text{BO}}}{r_m} \right) \right) + \frac{r_{\text{BO}}^2 - r_m^2}{r_{\text{BO}} K_{\text{TH}}} \right];$$

$$\frac{V_{\text{BO}}}{l_{\text{HO}}} = \frac{1}{8} \cdot \frac{(K_{\text{max}} F_{\text{cp}})^2}{H_{\text{O}} A_{\text{BO}} K_{3.\text{BO}}} \cdot \frac{n^2 \rho_{\text{BO.Г}}}{(1 + an^2 \rho_{\text{BO.Г}} / \rho_{\text{HO.Г}})^2} \cdot \frac{1}{(\theta_m - T_0)} \left[\frac{1}{\lambda_{\text{BO}}} \left(\frac{r_{\text{BO}}^2 - r_m^2}{2} - r_m^2 \cdot \ln \left(\frac{r_{\text{BO}}}{r_m} \right) \right) + \frac{r_{\text{BO}}^2 - r_m^2}{r_{\text{BO}} K_{\text{TH}}} \right].$$

Преобразуем левую часть последнего выражения и сомножитель в знаменателе правой части

$$\frac{V_{\text{BO}}}{l_{\text{HO}}} = d_c^2 H_* A_* (1 - A_{\text{HO}*}); \quad H_{\text{O}} A_{\text{BO}} = d_c^2 H_* A_* (1 - A_{\text{HO}*}).$$

Следовательно,

$$d_c = \left\{ \frac{1}{8} \cdot \frac{K_{\text{max}} F_{\text{cp}}}{K_{3.\text{BO}}} \cdot \frac{1}{H_*^2 A_*^2 (1 - A_{\text{HO}*})^2} \cdot \frac{n^2 \rho_{\text{BO.Г}}}{(1 + an^2 \rho_{\text{BO.Г}} / \rho_{\text{HO.Г}})^2} \cdot \frac{1}{(\theta_m - T_0)} \right\}.$$

$$\left[\frac{1}{\lambda_{\text{BO}}} \cdot \left(\frac{r_{\text{BO}}^2 - r_m^2}{2} - r_m^2 \cdot \ln \left(\frac{r_{\text{BO}}}{r_m} \right) \right) + \frac{r_{\text{BO}}^2 - r_m^2}{r_{\text{BO}} K_{\text{TH}}} \right]^{1/4}. \quad (2.31)$$

Таким образом, система уравнений проектного расчета (2.1), (2.2), (2.3) сведена к нелинейному уравнению (2.31), правая часть которого в неявной форме зависит от диаметра сердечника (d_c). Определение численным методом [29] корня уравнения (2.31) равносильно определению всех размеров и параметров электромагнита.

2.2 Разработка методики проектирования оптимального П-образного двухкатушечного четырехобмоточного форсированного электромагнита постоянного тока

Суть методики расчета оптимального электромагнита состоит не только в определении работоспособных вариантов конструкции, но и выбора из них, обладающего наилучшим показателем качества. Выбор (определение) электромагнита, имеющего минимальные массу или стоимость, или объем активных материалов и других показателей называется его оптимизацией.

Задача нахождения наилучшего варианта решается автоматически перебором области факторного пространства. Ядром алгоритма служит методика проектного расчета электромагнита, рассмотренная в подразделе 2.1. Ядро вложено во внутренний цикл. При каждом сочетании относительных размеров подсчитывается величина критерия качества, которая сравнивается с предыдущим значением. Если текущее значение критерия меньше предыдущего оно запоминается как лучшее (оптимальное); при этом в качестве оптимальных запоминаются и текущие значения кратности размеров и параметров.

Такой алгоритм поиска наилучшего проектного решения апробирован при оптимизации клапанного и втяжного броневого электромагнитов, управляемых нефорсированно. Позже он был использован [59, 77, 78, 80] при оптимизации

нефорсированно управляемого симметричного П-образного двухкатушечного электромагнита постоянного тока.

Для повышения точности определения оптимальных значений использовано двухразовое сканирование факторного пространства. Первичное сканирование факторного пространства позволяет определить оптимальные значения первого приближения (диапазон варьирования каждого фактора делится на 9-11 отрезков). Затем область первичного оптимума расширяется на «шаг влево», на «шаг вправо» по каждой переменной. Полученные уменьшенные отрезки повторно делятся на 9-11 частей и проводится повторная операция сканирования «усеченного» факторного пространства.

В качестве функций ограничений, таким образом, выступают границы варьирования относительных размеров магнитной системы электромагнита, использованных при описании нагрузочных его характеристик и тепловых параметров.

2.3 Оптимизационные расчеты четырехобмоточных П-образных электромагнитов постоянного тока с последовательно соединенными в режиме пуска низкоомными обмотками

Результаты оптимизационных расчетов электромагнитов постоянного тока представляются в виде графических и табличных зависимостей [10, 69, 75], либо в форме полиномов [59, 77].

Последняя форма хранения результатов оптимизационных расчетов наиболее удобна для использования при компьютерном проектировании без вторичного использования оптимизационных методик.

Полиномиальные зависимости оптимальных соизмерностей и параметров получают методами планирования эксперимента [32], результаты которого обобщаются методами теории подобия [18]. Выбор области факторного пространства зависит от предназначения моделей оптимальных электромагнитных приводов коммутационных аппаратов.

Для целей проектирования воздушных электромагнитных контакторов необходимо выбрать повышенное значение [84] рабочих воздушных зазоров (4-10 мм) при относительно малых значениях противодействующих усилий.

В случае проектирования приводов вакуумных контакторов с прямоходовой кинематической схемой принимается относительно малое значение рабочих воздушных зазоров (не превышающих 4 мм) при значительных механических противодействующих усилиях.

В качестве факторов приняты:

$\delta_{кр}$ – величина рабочего воздушного зазора электромагнита в критической точке механической характеристики (мм);

$P_{мх.кр}$ – противодействующее усилие в критической точке механической характеристики (Н);

$P_{мх}^* = P_{мх.к} / P_{мх.кр}$ – отношение противодействующего усилия в конечной точке механической характеристики к значению в критической точке.

Здесь $P_{мх.к}$ – противодействующее усилие в конечном положении якоря;

T_0 – температура окружающей среды (°С);

$\theta_{доп}$ – максимальная температура в толще высокоомных обмоток, принятая в качестве допустимой (°С);

K_{max} – отношение максимального напряжения питания низкоомных обмоток к напряжению срабатывания электромагнита;

$K_{з.но}$ – коэффициент заполнения окон низкоомных обмоток;

$K_{з.во}$ – коэффициент заполнения окон высокоомных обмоток;

$K = K_{отп} K_{Uотп} / K_{Umax}$,

где $K_{отп}$ – кратность напряжения отпускания в долях номинального;

$K_{Uотп}$ – коэффициент запаса по напряжению отпускания;

K_{Umax} – кратность максимального напряжения в долях номинального.

2.3.1 Расчеты оптимальных форсированных электромагнитов

Для проведения вычислительного эксперимента был выбран ортогональный центрально-композиционный план второго порядка [32, 80] для восьми факторов.

Характерные уровни факторов отражены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Факторы вычислительного эксперимента по исследованию оптимальных соразмерностей и параметров форсированного электромагнита

Z_i	z_i Характерные уровни факторов				
	-2,045	-1	0	+1	+2,045
$Z_1 = \delta_{кр}(\text{мм})$	4	5,53	7	8,47	10
$Z_2 = P_{\text{мх.кр}}(\text{Н})$	10	17,67	25	32,33	40
$Z_3 = P_{\text{мх}}^*$	3	6,066	9	11,934	15
$Z_4 = T_0(^{\circ}\text{C})$	25	40,33	55	69,67	85
$Z_5 = \theta_{\text{доп}}(^{\circ}\text{C})$	115	125,22	135	144,78	155
$Z_6 = K_{\text{max}}$	1,60	1,651	1,70	1,749	1,80
$Z_7 = K_{3.\text{но}}$	0,45	0,488	0,525	0,562	0,60
$Z_8 = K_{3.\text{во}}$	0,31	0,3467	0,38	0,4149	0,45

Для проводимого эксперимента коэффициент K принят равным 0,30 ($K=0,30$).

Кодированные значения факторов (z_i) определяются по выражению [19, 71]:

$$z_i = \frac{Z_i - Z_{i.\text{cp}}}{Z_{i.\text{cp}} - Z_{i.\text{min}}}, \quad (2.32)$$

где Z_i – текущее значение фактора;

$Z_{i.\text{cp}}$ – среднее значение фактора;

$Z_{i.\text{min}}$ – минимальное значение фактора в кодированной форме соответствующей уровню $z_{i.\text{min}} = -1$.

Таким образом, на основании (2.32) записаны кодированные выражения факторов:

$$z_1 = 0,682\delta_{кр} - 4,772; \quad z_2 = 0,1364P_{\text{мх.кр}} - 3,411;$$

$$\begin{aligned}
z_3 &= 0,3408P_{\text{мх}}^* - 3,067; & z_4 &= 0,0682T_0 - 3,749; \\
z_5 &= 0,1022\theta_{\text{доп}} - 13,80; & z_6 &= 20,41K_{\text{max}} - 34,69; \\
z_7 &= 27,03K_{3.\text{НО}} - 14,19; & z_8 &= 29,15K_{3.\text{ВО}} - 11,08.
\end{aligned}$$

2.3.1.1 Полиномиальные зависимости оптимальных соизмерностей и параметров форсированного электромагнита, минимизированного по объему активных материалов

Критерий оптимизации записан в виде:

$$V_a = V_c + V_m,$$

где V_c – объем электротехнической стали, используемой в магнитной системе;

V_m – объем обмоточной меди в магнитной системе;

V_a – объем активных материалов, использованных в магнитной системе.

Результаты оптимизационных расчетов геометрических соизмерностей форсированного электромагнита и его параметров представлены в приложении В.

В результате обработки расчетных данных получено:

$$\begin{aligned}
\delta_{V_a}^* = \delta_{\text{кр}}/d_{\text{с.опт.}V_a} &= 10^{-2}(37,6 + 6,26Z_1 - 3,78Z_2 - 1,85Z_3 - 0,57Z_4 + \\
&+ 0,39Z_5 + 0,77Z_2^2 + 0,39Z_1Z_3 - 0,47Z_2Z_3); \quad (2.33)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
H_{V_a}^* = H_{0.\text{опт.}V_a}/d_{\text{с.опт.}V_a} &= 10^{-4}(172 - 5,83Z_1 - 5,26Z_2 + 3,72Z_3 + \\
&+ 8,27Z_4 - 4,85Z_5 - 3,20Z_3^2 + 2,50Z_1Z_2 + 3,42Z_1Z_4 - 2,33Z_1Z_8 - \\
&- 2,43Z_2Z_3 - 1,8Z_1Z_3Z_8)^2; \quad (2.34)
\end{aligned}$$

$$A_{V_a}^* = A_{0.\text{опт.}V_a}/d_{\text{с.опт.}V_a} = 0,45; \quad (2.35)$$

$$A_{\text{НО.}V_a}^* = A_{\text{НО.опт.}V_a}/A_{0.\text{опт.}V_a} = 0,40; \quad (2.36)$$

$$d_{V_a}^* = d_{\text{п.опт.}V_a}/d_{\text{с.опт.}V_a} = 1,26; \quad (2.37)$$

$$C_{V_a}^* = C_{\text{опт.}V_a}/d_{\text{с.опт.}V_a} = (1,633 - 0,049Z_3 - 0,031Z_1Z_2Z_3)^2; \quad (2.38)$$

$$B_{0.\text{ср.}V_a} = 10^{-8}(113 - 1,49Z_3 + 1,13Z_1Z_3)^4; \quad (2.39)$$

$$\begin{aligned}
B_{0.\text{отп.}V_a} &= 10^{-2}(128 - 4,13Z_1 + 5,57Z_2 + 12,42Z_3 - 2,49Z_4 + 1,74Z_5 + \\
&+ 1,52Z_8 - 1,65Z_2^2 - 3,69Z_3^2 + 2,017Z_1Z_3 - 1,54Z_2Z_3); \quad (2.40)
\end{aligned}$$

$$F_{\text{ср.}V_a}^* = F_{\text{ср.}V_a}/F_{\text{кп.ср}} = 10^{-4}(87,2 + 6,8Z_1 - 4,31Z_2 - 2,78Z_3 +$$

$$+1,21Z_1Z_3 - 1,23Z_2Z_3)^2; \quad (2.41)$$

$$F_{\text{отп.}V_a}^* = F_{\text{отп.}V_a} / F_{\text{кп.отп}} = 10^{-4}(21,64 - 0,53Z_1 - 0,82Z_2 - 0,22Z_4)^2; \quad (2.42)$$

$$P_{\text{п.}V_a}^* = P_{\text{п.}V_a} / P_{\text{кп.п}} = 10^{-4}(16,83 + 2,33Z_1 - Z_2 - 0,981Z_3 - 0,479Z_4 + \\ + 0,457Z_5 + 0,237Z_6 - 0,246Z_7)^4; \quad (2.43)$$

$$P_{\text{но.}V_a}^* = P_{\text{но.}V_a} / P_{\text{кп.уд}} = 10^{-12}(84,6 - 8,12Z_1 - 3,05Z_2 + 4,22Z_3 + \\ + 1,02Z_5 - 0,97Z_6 - 1,57Z_8 + 1,31Z_1^2 + 0,9Z_2^2 - 1,1Z_1Z_3 + 1,17Z_2Z_4^2)^4; \quad (2.44)$$

$$P_{\text{во.}V_a}^* = P_{\text{во.}V_a} / P_{\text{кп.уд}} = 10^{-12}(165,6 - 8,52Z_2 - 9,26Z_3 - 2,63Z_4 + \\ + 3,36Z_5 + 1,81Z_3^2)^4; \quad (2.45)$$

$$n_{V_a} = 10^{-4}(187 + 17,44Z_1 - 2,13Z_2 - 18,92Z_3 - 2,47Z_4 + 2,29Z_6 - \\ - 5,81Z_7 + 6,32Z_8 + 1,9Z_3^2 - 2,55Z_2Z_3)^2; \quad (2.46)$$

$$\theta_{\text{но.}V_a}^* = \theta_{\text{но.}V_a} / \theta_{\text{доп}} = 0,962; \quad (2.47)$$

$$\theta_{\text{во.}V_a}^* = \theta_{\text{во.}V_a} / \theta_{\text{доп}} = 0,975. \quad (2.48)$$

Здесь $F_{\text{кп.кр}}$, $F_{\text{кп.отп}}$ – комплексы [20, 71, 93] проектирования для МДС срабатывания и отпускания соответственно:

$$F_{\text{кп.кр}} = \sqrt{P_{\text{мх.кр}} / \mu_0}, \quad F_{\text{кп.отп}} = \sqrt{P_{\text{мх.к}} / \mu_0},$$

$P_{\text{кп.п}}$, $P_{\text{кп.уд}}$ – комплексы [20, 71, 93] проектирования по мощности при срабатывании и удержании соответственно:

$$P_{\text{кп.п}} = \frac{P_{\text{мх.кр}} \cdot \rho_{0.м}}{\mu_0 \delta_{\text{кр}}}, \quad P_{\text{кп.уд}} = \frac{P_{\text{мх.к}} \cdot \rho_{0.м}}{\mu_0 \delta_{\text{к}}},$$

где $\rho_{0.м} = 1,65 \cdot 10^{-8}$ Ом·м – удельное электрическое сопротивление обмоточной меди при нулевой температуре;

$\delta_{\text{кр}}$ – критическая величина рабочего воздушного зазора (м).

В выражениях (2.33)-(2.48) и далее индекс « V_a » указывает на критерий оптимизации по объему активных материалов.

Дана оценка точности аппроксимации по полиномиальным зависимостям и результатам непосредственно вычислительного эксперимента:

$$-5,93\% \leq \delta_{V_a}^* \leq 1,51\%, \quad -15,5\% \leq H_{V_a}^* \leq 1,51\%,$$

$$0\% \leq A_{V_a}^* \leq 8,45\%, \quad -0,09\% \leq A_{\text{но.}V_a}^* \leq 3,3\%,$$

$$\begin{aligned}
0\% \leq d_{Va}^* \leq 7,48\%, & \quad -4,38\% \leq C_{Va}^* \leq 7,6\%, \\
-10,4\% \leq B_{0.ср.Va} \leq 1,74\%, & \quad -12,1\% \leq B_{0.отп.Va} \leq 4,42\%, \\
-8,5\% \leq F_{ср.Va}^* \leq 3,7\%, & \quad -11,1\% \leq F_{отп.Va}^* \leq 4,75\%, \\
-10,8\% \leq P_{п.Va}^* \leq 4,58\%, & \quad -6,47\% \leq P_{НО.Va}^* \leq 3,96\%, \\
-3,18\% \leq P_{ВО.Va}^* \leq 4,28\%, & \quad -6,9\% \leq n_{Va} \leq 3,49\%, \\
-2,33\% \leq \theta_{НО.Va}^* \leq 2,14\%, & \quad -1,78\% \leq \theta_{ВО.Va}^* \leq 0,91\%.
\end{aligned}$$

2.3.1.2 Полиномиальные зависимости оптимальных соизмерностей и параметров форсированного электромагнита, минимизированного по массе активных материалов

Масса активных материалов определяется по выражению:

$$m_a = V_c 7800 + V_m 8900, \quad (2.49)$$

где $V_m = V_{но} K_{з.но} + V_{во} K_{з.во}$ – объем меди обмоток.

Выполненные расчеты позволили констатировать, что оптимальные геометрические соизмерности и параметры описываются численно одинаковыми зависимостями, полученными в предыдущем подразделе. При этом численное значение оптимальной массы может быть определено согласно ниже представленной зависимости:

$$m_a \approx 1,045 V_a. \quad (2.50)$$

2.3.1.3 Полиномиальные зависимости оптимальных соизмерностей и параметров форсированного электромагнита, минимизированного по стоимости активных материалов, использованных в конструкции электромагнита

Стоимость активных материалов (C_a) определяется по выражению:

$$C_a = C_c(7800 V_c + (C_m/C_c)8900 V_m), \quad (2.51)$$

где C_c, C_m – цена стали и меди соответственно (руб./кг).

Вычислительный эксперимент проведен в области факторного пространства, описанного в виде данных, приведенных в таблице 2.1.

Минимизируемая функция цели, описывается выражением (2.51). По результатам расчета при цене меди $\Pi_m = 6\Pi_c$ и их обработки получено:

$$\delta_{ca}^* = \delta_{кр}/d_{c.опт.ca} = 10^{-2}(37,6 + 6,39Z_1 - 3,73Z_2 - 2,49Z_3 - 0,49Z_4 + 0,39Z_5 - 0,4Z_1^2 + 0,65Z_2^2 - 0,59Z_2Z_3); \quad (2.52)$$

$$H_{ca}^* = H_{0.опт.ca}/d_{c.опт.ca} = 10^{-12}(118,6 + 1,56Z_4 - 1,74Z_5 + 1,54Z_1Z_3)^6; \quad (2.53)$$

$$A_{ca}^* = A_{0.опт.ca}/d_{c.опт.ca} = 0,45; \quad (2.54)$$

$$A_{HO.ca}^* = A_{HO.опт.ca}/A_{0.опт.ca} = 0,40; \quad (2.55)$$

$$d_{ca}^* = d_{п.опт.ca}/d_{c.опт.ca} = 1,26; \quad (2.56)$$

$$C_{ca}^* = C_{опт.ca}/d_{c.опт.ca} = 10^{-4}(263,28 - 24,45Z_3 + 4,36Z_4 - 3,08Z_5 + 4,6Z_5^2 + 3,52Z_6^2 + 2,68Z_7^2 + 6,52Z_1Z_2 + 3,63Z_1Z_3 - 3,08Z_1Z_5 - 3,27Z_2Z_3 - 2,83Z_3Z_4 - 11,87Z_1Z_2Z_3 - 3,01Z_1Z_4Z_8); \quad (2.57)$$

$$B_{0.ср.ca} = 10^{-4}(126,6 + 1,90Z_1 - 1,74Z_2 - 4,18Z_3 - 2,08Z_3^2 + 2,63Z_1Z_3 - 2,54Z_2Z_3)^2; \quad (2.58)$$

$$B_{0.отп.ca} = 10^{-4}(112,7 - 2,05Z_1 + 2,43Z_2 + 5,17Z_3 - 2,10Z_3^2)^2; \quad (2.59)$$

$$F_{ср.ca}^* = F_{ср.ca}/F_{кп.ср} = 10^{-4}(86,8 + 6,73Z_1 - 4,38Z_2 - 3,49Z_3 - 0,88Z_1^2 - 1,04Z_3^2 + 1,36Z_1Z_3 - 1,47Z_2Z_3)^2; \quad (2.60)$$

$$F_{отп.ca}^* = F_{отп.ca}/F_{кп.отп} = 10^{-2}(4,6 - 0,21Z_1 - 0,39Z_2 - 0,17Z_3 - 0,06Z_4 + 0,05Z_5 + 0,07Z_2^2 + 0,05Z_1Z_2 + 0,10Z_1Z_3 - 0,05Z_2Z_3); \quad (2.61)$$

$$P_{п.ca}^* = P_{п.ca}/P_{кп.п} = 10^{-8}(168,4 + 23,1Z_1 - 9,95Z_2 - 10,2Z_3 - 4,68Z_4 + 4,37Z_5 + 2,39Z_6 - 2,44Z_7)^2; \quad (2.62)$$

$$P_{HO.ca}^* = P_{HO.ca}/P_{кп.уд} = 10^{-12}(84,4 - 7,62Z_1 - 3,61Z_2 + 3,3Z_3 + 0,90Z_5 - 0,95Z_6 + 0,85Z_7 - 1,78Z_8 + 1,10Z_1^2 + 1,09Z_2^2)^4; \quad (2.63)$$

$$P_{BO.ca}^* = P_{BO.ca}/P_{кп.уд} = 10^{-12}(166 - 8,71Z_2 - 10,4Z_3 - 2,54Z_4 + 3,12Z_5)^4; \quad (2.64)$$

$$n_{ca} = 10^{-4}(188 + 17,3Z_1 - 18,4Z_3 - 2,74Z_4 + 2,52Z_6 - 5,74Z_7 + 6,83Z_8 + 2,30Z_3^2 - 2,15Z_2Z_3)^2; \quad (2.65)$$

$$\theta_{HO.ca}^* = \theta_{HO.ca}/\theta_{доп} = 0,961; \quad (2.66)$$

$$\theta_{BO.ca}^* = \theta_{BO.ca}/\theta_{доп} = 0,975. \quad (2.67)$$

Анализ полученных результатов показывает, что расхождение относительных размеров δ_{ca}^* между оптимизированными и аппроксимированными (рассчитанными по полиномам) значениями не превышает 7% (приложение Г).

2.3.1.4 Полиномиальные зависимости оптимальных соизмерностей и параметров форсированного электромагнита, минимизированного по установочной площади

Функция качества «установочная площадь» (S_y) записана в виде:

$$S_y = b_{як}(c + d_c + 2\Delta_K + 2\Delta_B + 2A_0). \quad (2.68)$$

Преобразовав (2.68) очевидным образом она может быть записана в виде:

$$S_y = \pi d_c^2 (c_* + 2\Delta_{K*} + 2\Delta_{B*} + 2A_*). \quad (2.69)$$

В качестве области варьирования исходных данных использовались данные из таблицы 2.1.

Аппроксимация полиномиальными зависимостями получена в виде:

$$\delta_{sy}^* = \delta_{кр}/d_{c.опт.sy} = 10^{-2}(37,4 + 6,11Z_1 - 3,62Z_2 - 1,64Z_3 - 0,6Z_4 + 0,46Z_5 + 0,64Z_2^2 - 0,38Z_1Z_2); \quad (2.70)$$

$$H_{sy}^* = H_{0.опт.sy}/d_{c.опт.sy} = 10^{-8}(129 - 2,99Z_1 - 1,59Z_2 + 2,74Z_3 + 3,29Z_4 - 1,9Z_5)^4; \quad (2.71)$$

$$A_{sy}^* = A_{0.опт.sy}/d_{c.опт.sy} = 10^{-2}(47,7 - 0,59Z_3^2 + 0,79Z_5^2 - 0,55Z_8^2 - 0,81Z_2Z_5Z_8); \quad (2.72)$$

$$A_{HO.sy}^* = A_{HO.опт.sy}/A_{0.опт.sy} = (0,641 + 0,011Z_4^2)^2; \quad (2.73)$$

$$d_{sy}^* = d_{п.опт.sy}/d_{c.опт.sy} = 1,256; \quad (2.74)$$

$$C_{sy}^* = C_{опт.sy}/d_{c.опт.sy} = 2,522; \quad (2.75)$$

$$B_{0.ср.sy} = 10^{-2}(160 + 2,77Z_1 - 2,99Z_2 - 6,01Z_3 + 1,76Z_4 - 2,82Z_3^2 + 2,58Z_1Z_2 + 3,59Z_1Z_3 - 4,34Z_2Z_3 + 1,9Z_1Z_2Z_3); \quad (2.76)$$

$$B_{0.отп.sy} = 10^{-2}(127 - 5,01Z_1 + 5,63Z_2 + 14,1Z_3 - 2,35Z_4 + 1,61Z_5 - 1,31Z_2^2 - 3,46Z_3^2 + 1,5Z_1Z_2Z_3); \quad (2.77)$$

$$F_{ср.sy}^* = F_{ср.sy}/F_{кп.ср} = 10^{-4}(86,8 + 6,3Z_1 - 4,17Z_2 - 2,22Z_3 - 1,29Z_2Z_3)^2; \quad (2.78)$$

$$F_{отп.sy}^* = F_{отп.sy}/F_{кп.опт} = 10^{-2}(4,57 - 0,29Z_1 - 0,33Z_2 - 0,09Z_4 +$$

$$+0,07Z_5 + 0,09Z_1^2 + 0,08Z_2^2 + 0,06Z_1Z_2Z_3); \quad (2.79)$$

$$P_{п.сy}^* = P_{п.сy}/P_{кп.п} = 10^{-12}(140 + 12,74Z_1 - 5,94Z_2 - 5,47Z_3 - 2,89Z_4 + \\ + 2,56Z_5)^6; \quad (2.80)$$

$$P_{НО.сy}^* = P_{НО.сy}/P_{кп.уд} = 10^{-12}(84,2 - 8,22Z_1 - 2,93Z_2 + 4,63Z_3 + \\ + 1,25Z_5 - 0,93Z_6 - 1,55Z_8 + 1,86Z_1^2 + 0,9Z_2^2 - 1,23Z_1Z_3 + 1,04Z_2Z_3)^4; \quad (2.81)$$

$$P_{ВО.сy}^* = P_{ВО.сy}/P_{кп.уд} = 10^{-12}(165 - 8,18Z_2 - 9,34Z_3 - 2,64Z_4 + \\ + 3,22Z_5 + 1,67Z_2^2 + 1,94Z_3^2)^4; \quad (2.82)$$

$$n_{сy} = 10^{-8}(136 + 6,84Z_1 - 7,08Z_3 - 2,23Z_7 + 2,5Z_8 - 1,62Z_4^2)^4; \quad (2.83)$$

$$\theta_{НО.сy}^* = \theta_{НО.сy}/\theta_{доп} = 0,960; \quad (2.84)$$

$$\theta_{ВО.сy}^* = \theta_{ВО.сy}/\theta_{доп} = 0,974. \quad (2.85)$$

2.3.1.5 Полиномиальные зависимости оптимальных соразмерностей и параметров форсированного электромагнита, минимизированного по габаритному объему

Критерий качества «габаритный объем» (V_{Γ}) составлен в виде математического выражения:

$$V_{\Gamma} = S_y H = \pi d_c^3 (1,25 + c^* + 2A^*) (0,9 + H^*). \quad (2.86)$$

Полиномиальные зависимости оптимальных соразмерностей электромагнита и его параметров записаны ниже:

$$\delta_{V_{\Gamma}}^* = \delta_{кр}/d_{с.опт.V_{\Gamma}} = 10^{-2}(37,6 + 6,26Z_1 - 3,78Z_2 - 1,85Z_3 - 0,5Z_4 + \\ + 0,39Z_5 + 0,7Z_2^2 + 0,39Z_1Z_2 - 0,47Z_2Z_3); \quad (2.87)$$

$$H_{V_{\Gamma}}^* = H_{0.опт.V_{\Gamma}}/d_{с.опт.V_{\Gamma}} = 10^{-4}(158,8 - 5,93Z_1 - 4,79Z_2 + 5,61Z_3 + \\ + 7,91Z_4 - 4,40Z_5 - 3,59Z_3^2 + 1,78Z_1Z_2 + 2,72Z_1Z_3 - 2,72Z_2Z_3 + \\ + 2,57Z_1Z_2Z_3)^2; \quad (2.88)$$

$$A_{V_{\Gamma}}^* = A_{0.опт.V_{\Gamma}}/d_{с.опт.V_{\Gamma}} = 10^{-4}(77,63 + 0,88Z_1Z_2 - 0,83Z_1Z_2Z_3)^2; \quad (2.89)$$

$$A_{НО.V_{\Gamma}}^* = A_{НО.опт.V_{\Gamma}}/A_{0.опт.V_{\Gamma}} = 0,405; \quad (2.90)$$

$$d_{V_{\Gamma}}^* = d_{п.опт.V_{\Gamma}}/d_{с.опт.V_{\Gamma}} = 1,26; \quad (2.91)$$

$$C_{V_{\Gamma}}^* = C_{опт.V_{\Gamma}}/d_{с.опт.V_{\Gamma}} = 2,521 - 0,033Z_3; \quad (2.92)$$

$$B_{0.ср.V\Gamma} = 10^{-4}(126 + 1,67Z_1 - 1,35Z_2 - 3,18Z_3 - 1,47Z_3^2 + 1,60Z_1Z_2 + 2,32Z_1Z_3 - 2,34Z_2Z_3)^2; \quad (2.93)$$

$$B_{0.отп.V\Gamma} = 10^{-4}(113 - 2,29Z_1 + 2,56Z_2 + 6,3Z_3 - 2,0Z_3^2)^2; \quad (2.94)$$

$$F_{ср.V\Gamma}^* = F_{ср.V\Gamma}/F_{кп.ср} = 10^{-2}(73,58 + 11,29Z_1 - 6,79Z_2 - 4,51Z_3 - 1,18Z_3^2 + 1,39Z_1Z_3 - 1,81Z_2Z_3); \quad (2.95)$$

$$F_{отп.V\Gamma}^* = F_{отп.V\Gamma}/F_{кп.отп} = 10^{-2}(4,57 - 0,26Z_1 - 0,36Z_2 - 0,08Z_4 + 0,05Z_5 + 0,09Z_2^2 + 0,09Z_1Z_2 + 0,05Z_1Z_3 + 0,07Z_1Z_2Z_3); \quad (2.96)$$

$$P_{п.V\Gamma}^* = P_{п.V\Gamma}/P_{кп.п} = 10^{-8}(161,12 + 22,97Z_1 - 9,32Z_2 - 10,34Z_3 - 5,02Z_4 + 4,86Z_5 + 2,06Z_6 - 2,35Z_7)^4; \quad (2.97)$$

$$P_{но.V\Gamma}^* = P_{но.V\Gamma}/P_{кп.уд} = 10^{-12}(84,3 - 8,25Z_1 - 3,61Z_2 + 4,84Z_3 - 0,87Z_5 - 0,88Z_6 - 1,78Z_8 + 1,64Z_1^2 + 1,19Z_2^2 - 1,07Z_1Z_3)^4; \quad (2.98)$$

$$P_{во.V\Gamma}^* = P_{во.V\Gamma}/P_{кп.уд} = 10^{-12}(161 - 8,36Z_2 - 9,33Z_3 - 2,82Z_4 + 3,39Z_5)^4; \quad (2.99)$$

$$n_{V\Gamma} = 10^{-8}(134 + 6,96Z_1 - 7,65Z_3 - 2,05Z_7 + 2,76Z_8)^4; \quad (2.100)$$

$$\theta_{но.V\Gamma}^* = \theta_{но.V\Gamma}/\theta_{доп} = 0,953 + 0,010Z_4; \quad (2.101)$$

$$\theta_{во.V\Gamma}^* = \theta_{во.V\Gamma}/\theta_{доп} = 0,969. \quad (2.102)$$

2.3.2 Анализ результатов проектирования оптимальных форсированных электромагнитов

Полиномиальные зависимости, описанные в подразделах 2.3.1.1-2.3.1.5, содержат слагаемое отличное от нуля и члены, содержащие численный коэффициент, умноженный на кодированное значение (Z_i), по крайней мере, одного из факторов. Из таблицы 2.1 видно, что Z_i изменяется от -2,045 до +2,045. Если перед коэффициентом записан знак «плюс», то увеличение $|Z_i|$ приводит к увеличению значения полинома, в противном случае происходит уменьшение его значения. Если факторы равны средним своим значениям, то $Z_i = 0$ и значение полинома равно его значению в центре факторного пространства.

Согласно выражению (2.87) наиболее значительное влияние на функцию относительного рабочего воздушного зазора оказывает значение критического рабочего воздушного зазора (коэффициент перед Z_1 наибольший (6,26)). Наименьшее влияние оказывает допустимая температура нагрева ($\theta_{\text{доп}}$). При известной совокупности исходных данных ($\delta_{\text{кр}}, P_{\text{мх.кр}}, P_{\text{мх.к}}, \theta_0, \theta_{\text{доп}}$) рассчитываются: кодированные значения Z_1, Z_2, Z_3, Z_4, Z_5 факторов; по значению функции $\delta_{V_T}^*$ определяется оптимальный диаметр сердечника $d_{\text{с.опт.}V_T} = \delta_{\text{кр}}/\delta_{V_T}^*$ при оптимизации электромагнита по критерию «габаритный объем электромагнита» (индекс V_T свидетельствует об оптимизации габаритному объему).

Оптимальные значения магнитной индукции в сечении ярма, лежащем в поперечной плоскости симметрии при срабатывании и отпускании якоря электромагнита, рассчитываются по выражениям (2.93) и (2.94) непосредственно в Теслах.

Зависимость n_{V_T} (2.100) позволяет на стадии выполнения проектного расчета оценить величину ожидаемого максимального перенапряжения при последовательном соединении обмоток (рисунок 2.2) к источнику питания напряжением U :

$$U_{\text{макс}} = U \cdot N_{\text{во}} / N_{\text{но}}.$$

Среднеобъемные температуры нагрева низкоомных и высокоомных обмоток заданы в долях максимальной температуры в толще высокоомной обмотки. Поскольку обмотки на каркасе катушек размещены коаксиально (первоначально наматывается низкоомная обмотка), то, несмотря на незначительную мощность, выделяющуюся в толще низкоомной обмотки, ее среднеобъемная температура мало отличается от температуры высокоомной обмотки. Следовательно, можно утверждать, что низкоомные обмотки подогреваются теплом, выделяющимся в высокоомных обмотках.

Обратим внимание на то, что часть функций относительных геометрических размеров при некоторых критериях оптимальности не зависит от исходных данных проектирования. В качестве примера приведем:

$$A_{НО.VГ}^* = 0,405; d_{VГ}^* = 1,26.$$

Здесь записаны «зависимости» относительных значений оптимальной ширины окна низкоомной обмотки в долях A_0 ; диаметра полюсных наконечников $d_{п.опт.VГ}$ в долях $d_{с.опт.VГ}$ при минимизации габаритного объема электромагнита.

Оценка конструкции по полиномиальным зависимостям должна быть дополнена использованием графических и табличных зависимостей, представленных в размерных (именованных) единицах.

Последние позволяют упростить физическое толкование влияния исходных данных проектирования на размеры и параметры электромагнита.

При решении проектных задач с использованием графических и табличных данных целесообразно использование методов интерполяции [29] и экстраполяции. Это позволяет с большей точностью определять искомые размеры и параметры проектируемого электромагнита.

Ниже анализ влияния исходных данных проектирования и критериев оптимальности на размеры и параметры магнитной системы выполнен на основе графических зависимостей и табличных данных.

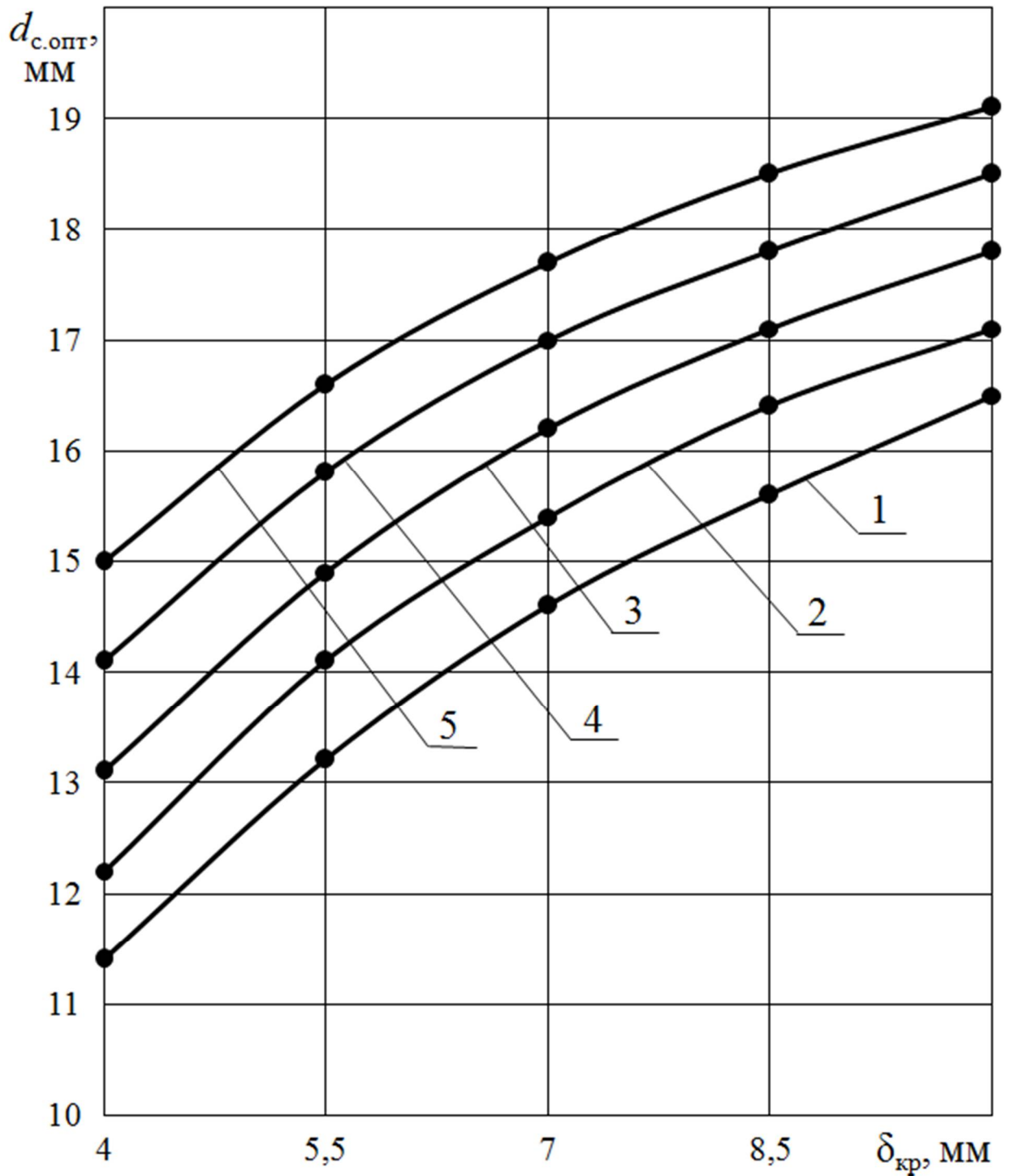
Из семейства графических зависимостей, представленных на рисунке 2.4, наглядно видно, что при больших значениях критического рабочего воздушного зазора и механического усилия необходимо выбирать большие диаметры сердечников. Причем рост критического значения механического усилия приводит к необходимости практически пропорционального увеличения диаметра сердечников независимо от величины критического значения рабочего воздушного зазора.

Семейство графических зависимостей, изображенных на рисунке 2.5, позволяет оценить и обоснованно выбрать необходимую высоту обмотки в зависимости от координат критической точки механической характеристики и температуры окружающей среды. Зависимости имеют явно выраженный экстремум. При этом оптимальная высота обмоток электромагнита должна быть увеличена пропорционально критическому значению механического усилия.

Зависимость суммарной ширины низкоомной и высокоомной обмоток, коаксиально размещенных на каркасе катушки, от величины критического значения рабочего воздушного зазора (рисунок 2.6) при фиксированных: температуре окружающей среды (T_0); $P_{\text{мх.кр}}$ имеют практически монотонно нарастающий характер. Наибольшее приращение наблюдается в диапазоне изменения $\delta_{\text{кр}}$ от 4 до 7 мм.

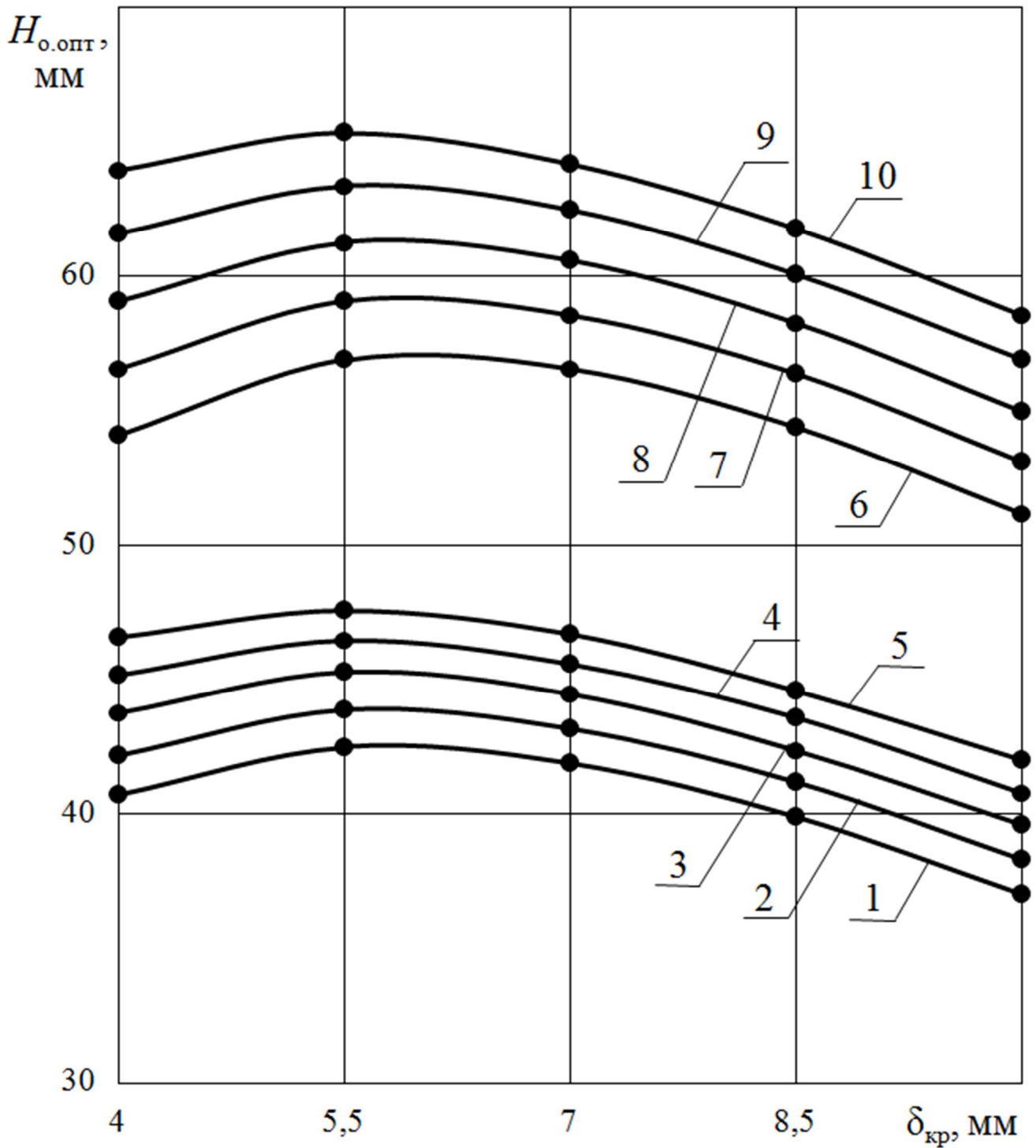
Зависимости $A_{VГ}^*$, $A_{\text{НО.VГ}}^*$, $d_{VГ}^*$ имеют в размерной форме нелинейный характер (рисунок 2.6, рисунок 2.7, рисунок 2.8). Связано это с тем, что оптимальный диаметр сердечников $d_{\text{с.опт.VГ}}$ нелинейно зависит от $\delta_{\text{кр}}$.

Аналогичный, монотонный характер нарастаний наблюдается и для функций $d_{\text{п.опт}}$ (рисунок 2.8) и межосевого расстояния сердечников $C_{\text{опт}}$ (рисунок 2.9). При увеличении температуры окружающей среды с 40°C до 85°C возрастает оптимальный диаметр полюсного наконечника. Необходимый диаметр полюсного наконечника возрастает при увеличении критических значений рабочего воздушного зазора и механической противодействующей силы. С ростом критического механического усилия практически пропорционально должно быть увеличено расстояние между осями сердечников магнитопровода.



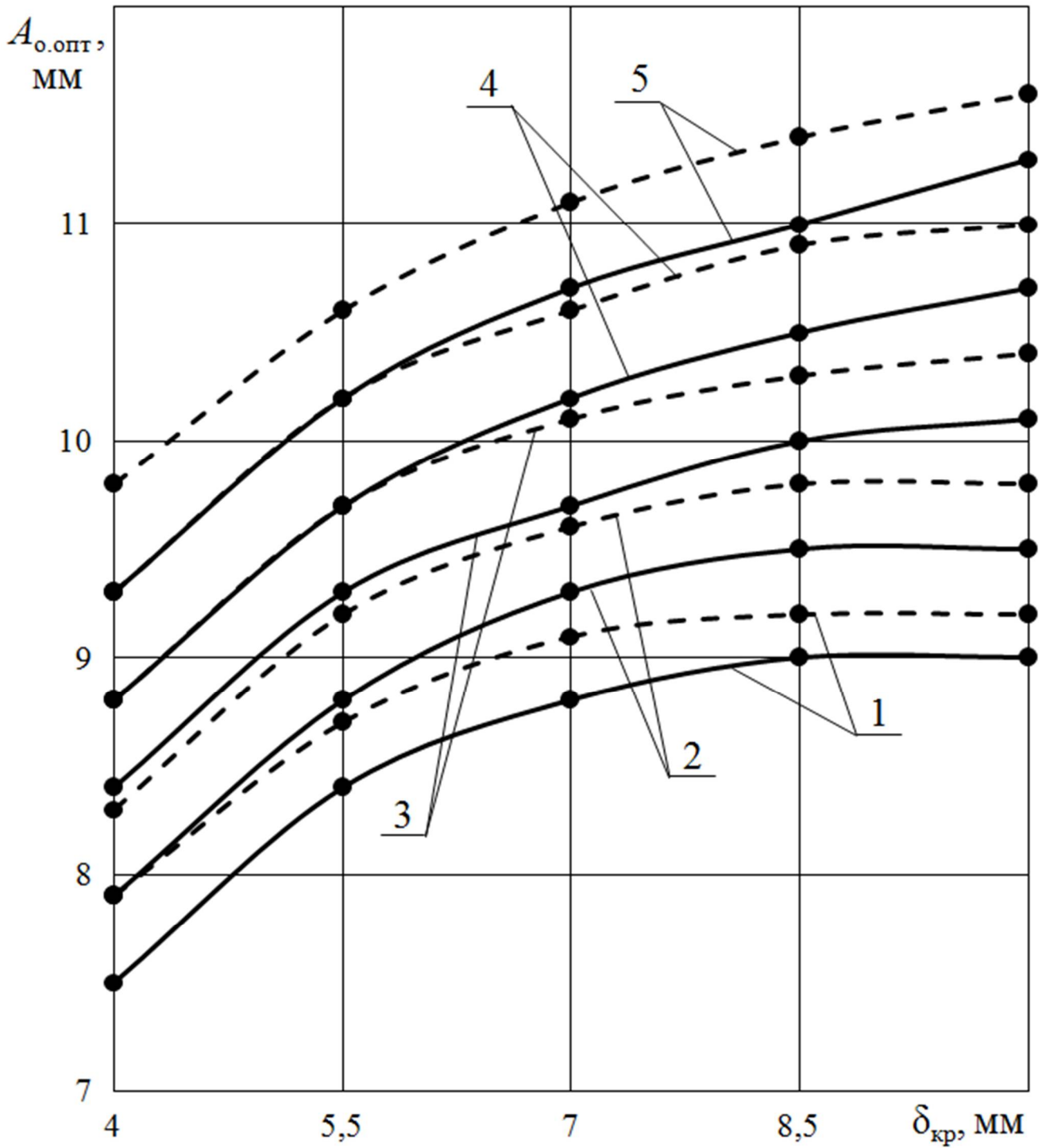
1 – $P_{мх.кр}=10$ Н; 2 – $P_{мх.кр}=17,5$ Н; 3 – $P_{мх.кр}=25$ Н;
 4 – $P_{мх.кр}=32,5$ Н; 5 – $P_{мх.кр}=40$ Н

Рисунок 2.4 – Зависимости оптимальных диаметров сердечников электромагнита, минимизированного по критерию «габаритный объем» при $\theta_{доп}=115$ °С; $T_0=40$ °С; $P_{мх}^*=9$; $K_{max}=1,80$; $K=0,30$; $K_{з.НО}=0,525$; $K_{з.ВО}=0,38$



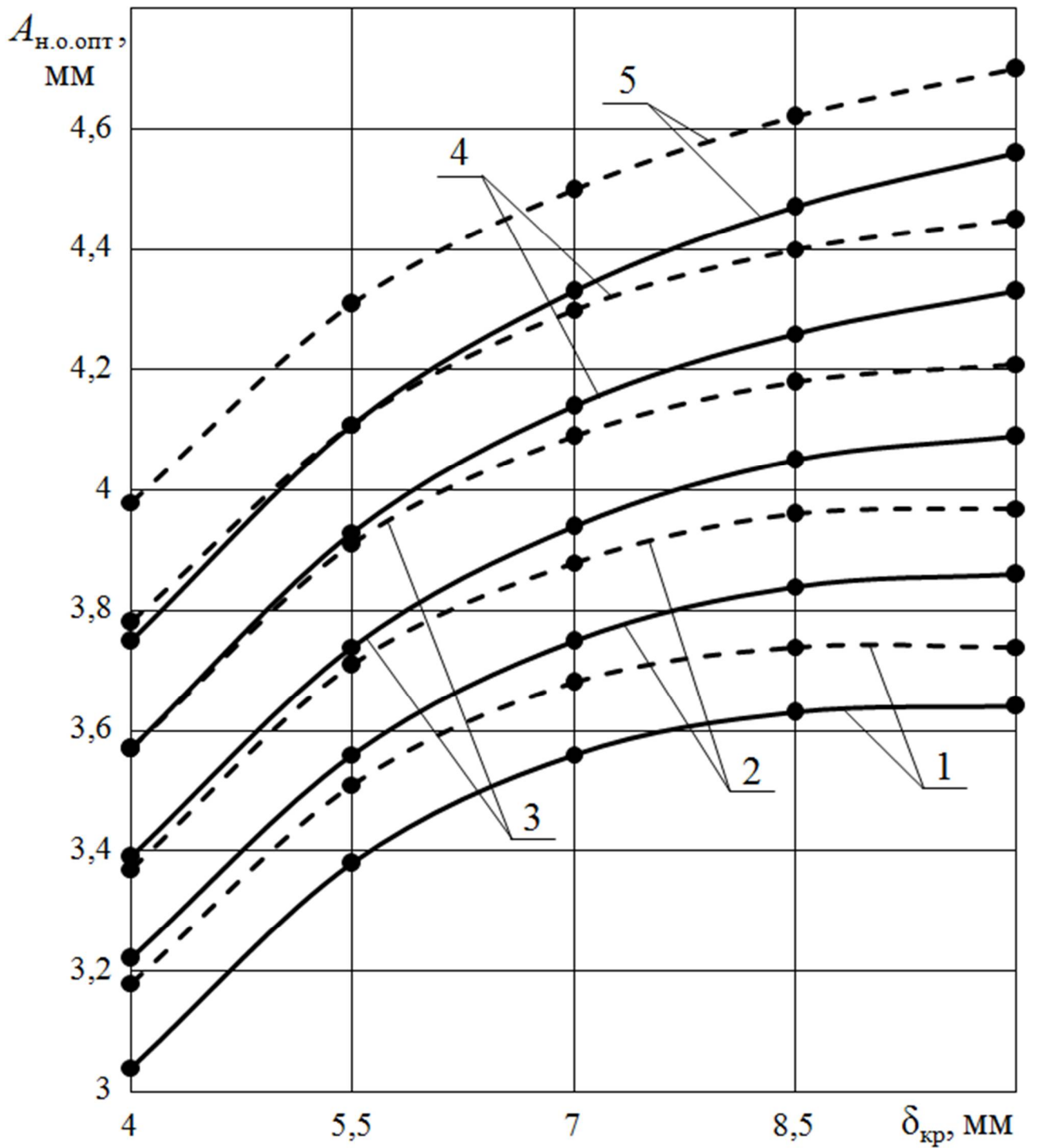
1, 6 – $P_{мх.кр} = 10$ Н; 2, 7 – $P_{мх.кр} = 17,5$ Н; 3, 8 – $P_{мх.кр} = 25$ Н;
 4, 9 – $P_{мх.кр} = 32,5$ Н; 5, 10 – $P_{мх.кр} = 40$ Н;
 1-5 – $T_0 = 40^\circ\text{C}$; 6-10 – $T_0 = 85^\circ\text{C}$

Рисунок 2.5 – Зависимости оптимальной высоты обмоток электромагнита минимизированного по критерию «габаритный объем» при $\theta_{доп} = 115^\circ\text{C}$; $P_{мх}^* = 9$; $K_{max} = 1,80$; $K = 0,30$; $K_{з.НО} = 0,525$; $K_{з.ВО} = 0,38$



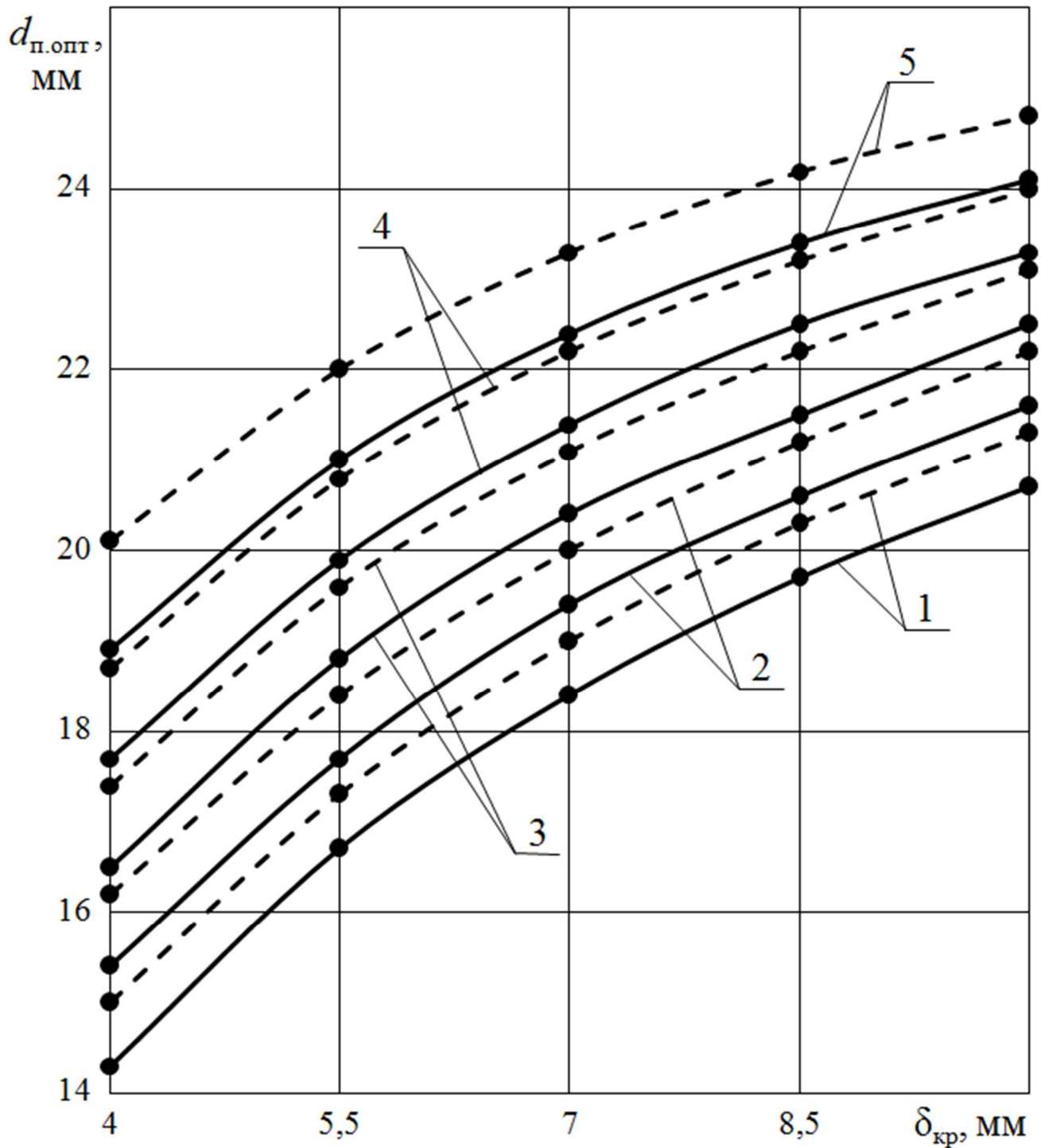
— (при $T_0=40\text{ }^\circ\text{C}$);
 - - - (при $T_0=85\text{ }^\circ\text{C}$);
 1 – $P_{\text{мх.кр}}=10\text{ Н}$; 2 – $P_{\text{мх.кр}}=17,5\text{ Н}$; 3 – $P_{\text{мх.кр}}=25\text{ Н}$;
 4 – $P_{\text{мх.кр}}=32,5\text{ Н}$; 5 – $P_{\text{мх.кр}}=40\text{ Н}$

Рисунок 2.6 – Зависимости оптимальной суммарной ширины окна обмоток электромагнита, минимизированного по критерию «габаритный объем» при $\theta_{\text{доп}}=115\text{ }^\circ\text{C}$; $P_{\text{мх}}^*=9$; $K_{\text{max}}=1,80$; $K=0,30$; $K_{\text{з.НО}}=0,525$; $K_{\text{з.ВО}}=0,38$



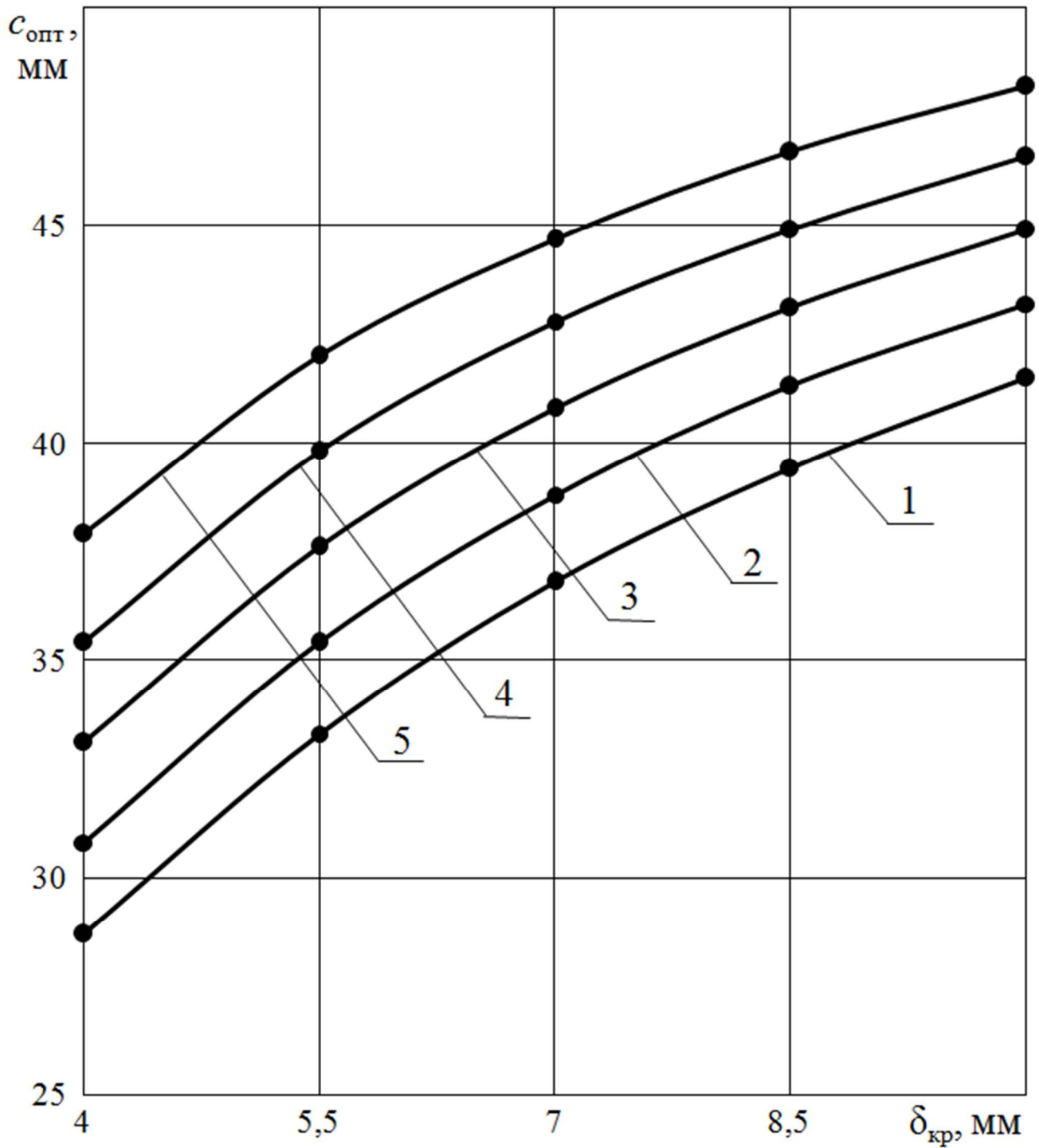
— (при $T_0=40^\circ\text{C}$);
 - - - (при $T_0=85^\circ\text{C}$);
 1 – $P_{\text{мх.кр}}=10\text{ Н}$; 2 – $P_{\text{мх.кр}}=17,5\text{ Н}$; 3 – $P_{\text{мх.кр}}=25\text{ Н}$;
 4 – $P_{\text{мх.кр}}=32,5\text{ Н}$; 5 – $P_{\text{мх.кр}}=40\text{ Н}$

Рисунок 2.7 – Зависимости оптимальной ширины окна низкоомных обмоток электромагнита, минимизированного по критерию «габаритный объем» при $\theta_{\text{доп}}=115^\circ\text{C}$; $P_{\text{мх}}^*=9$; $K_{\text{max}}=1,80$; $K=0,30$; $K_{3,\text{HO}}=0,525$; $K_{3,\text{BO}}=0,38$



— (при $T_0=40$ °C);
 --- (при $T_0=85$ °C);
 1 – $P_{мх.кр}=10$ Н; 2 – $P_{мх.кр}=17,5$ Н; 3 – $P_{мх.кр}=25$ Н;
 4 – $P_{мх.кр}=32,5$ Н; 5 – $P_{мх.кр}=40$ Н

Рисунок 2.8 – Зависимости оптимального диаметра полюсных наконечников электромагнита, минимизированного по критерию «габаритный объем» при $\theta_{доп}=115$ °C; $P_{мх}^*=9$; $K_{max}=1,80$; $K=0,30$; $K_{з.НО}=0,525$; $K_{з.ВО}=0,38$



1 – $P_{мх.кр}=10$ Н; 2 – $P_{мх.кр}=17,5$ Н; 3 – $P_{мх.кр}=25$ Н;
 4 – $P_{мх.кр}=32,5$ Н; 5 – $P_{мх.кр}=40$ Н

Рисунок 2.9 – Зависимости оптимального межосевого расстояния сердечников электромагнита, минимизированного по критерию «габаритный объем» при $\theta_{доп}=115$ °С; $T_0=40$ °С; $P_{мх}^*=9$; $K_{max}=1,80$; $K=0,30$; $K_{з.НО}=0,525$; $K_{з.ВО}=0,38$

2.3.2.1 Сравнительный анализ влияния на оптимальные соизмерности исходных данных проектирования по критериям «объем активных материалов электромагнита» и «габаритный объем электромагнита»

Данные таблицы 2.2 и таблицы 2.8 свидетельствуют, что при проектировании форсированного П-образного электромагнита по критериям объем активных материалов (V_a) и габаритный объем (V_r) электромагнита постоянного тока имеет место следующее соотношение:

$$d_{с.опт.Va} = d_{с.опт.Vr} . \quad (2.103)$$

Согласно данным таблицы 2.3 и таблицы 2.9

$$H_{0.опт.Va} > H_{0.опт.Vr} . \quad (2.104)$$

При этом отношение сходственных элементов этих таблиц (элементы, находящиеся на пересечении сходственных столбцов и строк) подчиняются соотношению:

$$\frac{H_{0.опт.Va}}{H_{0.опт.Vr}} \approx 1,15 \div 1,20. \quad (2.105)$$

Согласно данным таблицы 2.4 и таблицы 2.10

$$A_{0.опт.Vr} > A_{0.опт.Va} . \quad (2.106)$$

При этом $\frac{A_{0.опт.Vr}}{A_{0.опт.Va}} \approx 1,20 \div 1,50. \quad (2.107)$

Согласно данным таблицы 2.5 и таблицы 2.11

$$A_{НО.опт.Vr} > A_{НО.опт.Va} . \quad (2.108)$$

При этом $\frac{A_{НО.опт.Vr}}{A_{НО.опт.Va}} \approx 1,20 \div 1,50. \quad (2.109)$

Согласно данным таблицы 2.6 и таблицы 2.12

$$\frac{d_{п.опт.Va}}{d_{п.опт.Vr}} \approx 1,0. \quad (2.110)$$

Согласно данным таблицы 2.7 и таблицы 2.13

$$C_{опт.Va} > C_{опт.Vr} . \quad (2.111)$$

При этом $\frac{C_{опт.Va}}{C_{опт.Vr}} \approx 1,06. \quad (2.112)$

Таблица 2.2 – Результаты минимизации критерия «объем активных материалов электромагнита» при $P_{\text{мх}}^*=9$, $K_{\text{max}}=1,80$, $K_{\text{з.но}}=0,525$, $K_{\text{в.но}}=0,38$, $K=0,3$

Исходные данные проектирования			Оптимальный диаметр сердечников				
$T_{\text{доп}}, ^\circ\text{C}$	$T_0, ^\circ\text{C}$	$\delta_{\text{кр}} \cdot 10^{-3}, \text{ м}$	$d_{\text{с.опт}}, \text{ мм}$				
		$P_{\text{мх.кр}}, \text{ Н}$	4	5,5	7	8,5	10
115	40	10	11,4	13,2	14,6	15,6	16,5
		17,5	12,2	14,1	15,4	16,4	17,1
		25	13,1	14,9	16,2	17,1	17,8
		32,5	14,1	15,8	17,0	17,8	18,5
		40	15,0	16,6	17,7	18,5	19,1
	85	10	11,9	13,7	15,1	16,1	16,9
		17,5	12,8	14,6	15,9	16,9	17,6
		25	13,8	15,6	16,8	17,6	18,3
		32,5	14,9	16,5	17,6	18,4	19,0
		40	15,9	17,5	18,5	19,2	19,7
155	40	10	10,9	12,7	14,1	15,2	16,0
		17,5	11,7	13,5	14,9	15,9	16,7
		25	12,5	14,3	15,6	16,6	17,3
		32,5	13,3	15,1	16,3	17,3	18,0
		40	14,2	15,9	17,1	17,9	18,6
	85	10	11,4	13,2	14,6	15,6	16,4
		17,5	12,2	14,0	15,4	16,3	17,1
		25	13,1	14,9	16,1	17,1	17,8
		32,5	14,0	15,7	16,9	17,8	18,5
		40	15,0	16,6	17,7	18,5	19,1

Таблица 2.3 – Результаты минимизации критерия «объем активных материалов электромагнита» при $P_{\text{мх}}^*=9$, $K_{\text{max}}=1,80$, $K_{\text{з.но}}=0,525$, $K_{\text{в.но}}=0,38$, $K=0,3$

Исходные данные проектирования			Оптимальная высота обмотки				
$T_{\text{доп}}, ^\circ\text{C}$	$T_0, ^\circ\text{C}$	$\delta_{\text{кр}} \cdot 10^{-3}, \text{ м}$	$H_{\text{о.опт}}, \text{ мм}$				
		$P_{\text{мх.кр}}, \text{ Н}$	4	5,5	7	8,5	10
115	40	10	48,3	50,3	49,2	46,5	42,8
		17,5	49,9	51,8	50,8	48,1	44,6
		25	51,5	53,2	52,2	49,7	46,3
		32,5	53,0	54,5	53,5	51,2	48,0
		40	54,3	55,7	54,9	52,6	49,7
	85	10	63,7	66,7	65,9	63,0	58,8
		17,5	66,4	69,1	68,2	65,4	61,3
		25	69,0	71,4	70,5	67,7	63,8
		32,5	71,6	73,7	72,6	69,9	66,2
		40	74,1	75,8	74,6	72,0	68,6
155	40	10	37,7	39,1	37,9	35,4	32,1
		17,5	38,7	40,0	38,9	36,5	33,4
		25	39,6	40,9	39,8	37,6	34,7
		32,5	40,5	41,6	40,7	38,6	35,9
		40	41,1	42,2	41,4	39,5	37,1
	85	10	50,9	53,1	52,2	49,5	45,8
		17,5	52,6	54,7	53,8	51,2	47,7
		25	54,3	56,3	55,4	52,9	49,5
		32,5	55,9	57,7	56,9	54,5	51,4
		40	57,4	59,0	58,2	56,0	53,1

Таблица 2.4 – Результаты минимизации критерия «объем активных материалов электромагнита» при $P_{\text{мх}}^*=9$, $K_{\text{max}}=1,80$, $K_{\text{з.но}}=0,525$, $K_{\text{в.но}}=0,38$, $K=0,3$

Исходные данные проектирования			Оптимальная ширина окна обмоток					
$T_{\text{доп}}, ^\circ\text{C}$	$T_0, ^\circ\text{C}$	$\delta_{\text{кр}} \cdot 10^{-3}, \text{ м}$	$A_{0,\text{опт}}, \text{ мм}$					
		$P_{\text{мх.кр}}, \text{ Н}$	4	5,5	7	8,5	10	
115	40	10	5,1	5,9	6,6	7,0	7,4	
		17,5	5,5	6,3	6,9	7,4	7,7	
		25	5,9	6,7	7,3	7,7	8,0	
		32,5	6,3	7,1	7,6	8,0	8,3	
		40	6,8	7,5	8,0	8,3	8,6	
	85	10	5,3	6,2	6,8	7,2	7,6	
		17,5	5,8	6,6	7,2	7,6	7,9	
		25	6,2	7,0	7,5	7,9	8,2	
		32,5	6,7	7,4	7,9	8,3	8,6	
		40	7,2	7,8	8,3	8,6	8,9	
	155	40	10	4,9	5,7	6,3	6,8	7,2
			17,5	5,2	6,1	6,7	7,1	7,5
25			5,6	6,4	7,0	7,4	7,8	
32,5			6,0	6,8	7,3	7,8	8,1	
40			6,4	7,1	7,7	8,1	8,3	
85		10	5,1	5,9	6,5	7,0	7,4	
		17,5	5,5	6,3	6,9	7,3	7,7	
		25	5,9	6,7	7,3	7,7	8,0	
		32,5	6,3	7,1	7,6	8,0	8,3	
		40	6,7	7,5	8,0	8,3	8,6	

Таблица 2.5 – Результаты минимизации критерия «объем активных материалов электромагнита» при $P_{\text{мх}}^*=9$, $K_{\text{max}}=1,80$, $K_{\text{з.но}}=0,525$, $K_{\text{в.но}}=0,38$, $K=0,3$

Исходные данные проектирования			Оптимальная ширина окна низкоомных обмоток $A_{\text{но,опт}}, \text{ мм}$					
$T_{\text{доп}}, ^\circ\text{C}$	$T_0, ^\circ\text{C}$	$\delta_{\text{кр}} \cdot 10^{-3}, \text{ м}$	$A_{\text{но,опт}}, \text{ мм}$					
		$P_{\text{мх.кр}}, \text{ Н}$	4	5,5	7	8,5	10	
115	40	10	2,05	2,38	2,63	2,81	2,98	
		17,5	2,20	2,53	2,77	2,95	3,08	
		25	2,36	2,68	2,91	3,08	3,21	
		32,5	2,54	2,84	3,05	3,21	3,33	
		40	2,7	3,0	3,19	3,34	3,44	
	85	10	2,14	2,47	2,71	2,89	3,04	
		17,5	2,31	2,63	2,86	3,03	3,17	
		25	2,49	2,80	3,02	3,18	3,30	
		32,5	2,67	2,97	3,17	3,32	3,43	
		40	2,87	3,14	3,32	3,45	3,55	
	155	40	10	1,96	2,29	2,54	2,73	2,89
			17,5	2,10	2,43	2,67	2,86	3,00
25			2,24	2,57	2,81	2,98	3,12	
32,5			2,4	2,72	2,94	3,11	3,23	
40			2,55	2,86	3,07	3,22	3,34	
85		10	2,04	2,38	2,62	2,81	2,96	
		17,5	2,20	2,53	2,76	2,94	3,08	
		25	2,36	2,68	2,91	3,07	3,20	
		32,5	2,52	2,83	3,05	3,20	3,32	
		40	2,70	2,99	3,19	3,33	3,44	

Таблица 2.6 – Результаты минимизации критерия «объем активных материалов электромагнита» при $R_{мх}^*=9$, $K_{мах}=1,80$, $K_{з.но}=0,525$, $K_{в.но}=0,38$, $K=0,3$

Исходные данные проектирования			Оптимальный диаметр полюсных наконечников $d_{п.опт}$, мм				
$T_{доп}$, °C	T_0 , °C	$\delta_{кр} \cdot 10^{-3}$, м	4	5,5	7	8,5	10
		$P_{мх.кр}$, Н					
115	40	10	14,3	16,6	18,4	19,7	20,7
		17,5	15,4	17,7	19,3	20,6	21,6
		25	16,5	17,8	20,3	21,5	22,4
		32,5	17,7	19,8	21,3	22,4	23,3
		40	18,9	20,9	22,3	23,3	24,1
	85	10	15,0	17,3	19,0	20,2	21,2
		17,5	16,1	18,4	20,0	21,2	22,1
		25	17,4	19,6	21,1	22,2	23,1
		32,5	18,7	20,8	22,2	23,2	23,9
		40	20,1	22,0	23,2	24,1	24,8
155	40	10	13,7	16,0	17,8	19,1	20,2
		17,5	14,7	17,0	18,7	20,0	21,0
		25	15,7	18,0	19,6	20,8	21,8
		32,5	16,7	19,0	20,5	21,7	22,6
		40	17,8	20,0	21,5	22,5	23,4
	85	10	14,3	16,6	18,3	19,6	20,7
		17,5	15,3	17,7	19,3	20,6	21,5
		25	16,5	18,7	20,3	21,5	22,4
		32,5	17,6	19,8	21,3	22,4	23,2
		40	18,9	20,9	22,3	23,3	24,1

Таблица 2.7 – Результаты минимизации критерия «объем активных материалов электромагнита» при $R_{мх}^*=9$, $K_{мах}=1,80$, $K_{з.но}=0,525$, $K_{в.но}=0,38$, $K=0,3$

Исходные данные проектирования			Оптимальное расстояние между осями сердечников $c_{опт}$, мм				
$T_{доп}$, °C	T_0 , °C	$\delta_{кр} \cdot 10^{-3}$, м	4	5,5	7	8,5	10
		$P_{мх.кр}$, Н					
115	40	10	30,3	35,3	38,9	41,7	43,9
		17,5	32,6	37,5	41,0	43,6	45,7
		25	35,0	39,7	43,1	45,6	47,5
		32,5	37,5	42,1	45,2	47,5	49,3
		40	40,0	44,4	47,3	49,4	51,0
	85	10	31,7	36,6	40,2	42,9	45,0
		17,5	34,2	3,90	42,2	45,0	46,9
		25	36,8	41,5	44,7	47,1	48,9
		32,5	39,6	44,0	47,0	49,1	50,8
		40	42,5	46,6	49,2	51,2	52,6
155	40	10	29,0	34,0	37,7	40,5	42,7
		17,5	31,1	36,0	39,6	42,3	44,5
		25	33,2	38,1	41,6	44,2	46,2
		32,5	35,5	40,2	43,5	46,0	47,9
		40	37,8	42,3	45,5	47,8	49,5
	85	10	30,3	35,2	38,9	41,6	43,8
		17,5	32,5	37,4	40,9	43,6	45,7
		25	34,9	39,7	43,0	45,5	47,5
		32,5	37,4	42,0	45,2	47,5	49,3
		40	40,0	44,3	47,3	49,4	51,0

Таблица 2.8 – Результаты минимизации критерия «габаритный объем электромагнита» при $R_{мх}^*=9$, $K_{тах}=1,80$, $K_{з.но}=0,525$, $K_{в.но}=0,38$, $K=0,3$

Исходные данные проектирования			Оптимальный диаметр сердечников				
$T_{доп}, ^\circ\text{C}$	$T_0, ^\circ\text{C}$	$\delta_{кр} \cdot 10^{-3}, \text{ м}$	$d_{с.опт}, \text{ мм}$				
		$P_{мх.кр}, \text{ Н}$	4	5,5	7	8,5	10
115	40	10	11,4	13,2	14,6	15,6	16,5
		17,5	12,2	14,1	15,4	16,4	17,1
		25	13,1	14,9	16,2	17,1	17,8
		32,5	14,1	15,8	17,0	17,8	18,5
		40	15,0	16,6	17,7	18,5	19,1
	85	10	11,9	13,7	15,1	16,1	16,9
		17,5	12,8	14,6	15,9	16,9	17,6
		25	13,8	15,6	16,8	17,6	18,3
		32,5	14,9	16,5	17,6	18,4	19,0
		40	15,9	17,5	18,5	19,2	19,7
155	40	10	10,9	12,7	14,1	15,2	16,0
		17,5	11,7	13,5	14,9	15,9	16,7
		25	12,5	14,3	15,6	16,6	17,3
		32,5	13,3	15,1	16,3	17,3	18,0
		40	14,2	15,9	17,1	17,9	18,6
	85	10	11,4	13,2	14,6	15,6	16,4
		17,5	12,2	14,0	15,4	16,3	17,1
		25	13,1	14,9	16,1	17,1	17,8
		32,5	14,0	15,7	16,9	17,8	18,5
		40	15,0	16,6	17,7	18,5	19,1

Таблица 2.9 – Результаты минимизации критерия «габаритный объем электромагнита» при $R_{мх}^*=9$, $K_{тах}=1,80$, $K_{з.но}=0,525$, $K_{в.но}=0,38$, $K=0,3$

Исходные данные проектирования			Оптимальная высота обмотки				
$T_{доп}, ^\circ\text{C}$	$T_0, ^\circ\text{C}$	$\delta_{кр} \cdot 10^{-3}, \text{ м}$	$H_{о.опт}, \text{ мм}$				
		$P_{мх.кр}, \text{ Н}$	4	5,5	7	8,5	10
115	40	10	40,7	42,5	41,9	39,9	37,0
		17,5	42,2	43,9	43,2	41,2	38,3
		25	43,8	45,3	44,5	42,4	39,6
		32,5	45,2	46,5	45,6	43,6	40,8
		40	46,6	47,6	46,7	44,6	42,0
	85	10	54,1	56,9	56,6	54,4	51,2
		17,5	56,6	59,1	58,6	56,4	53,1
		25	59,1	61,3	60,6	58,3	55,0
		32,5	61,6	63,4	62,5	60,1	56,9
		40	64,0	65,3	64,2	61,8	58,6
155	40	10	31,8	33,2	32,4	30,5	27,9
		17,5	32,8	34,0	33,3	31,4	28,8
		25	33,8	34,9	34,1	32,2	29,8
		32,5	34,7	35,6	34,8	33,0	30,6
		40	35,5	36,3	35,5	33,7	31,5
	85	10	43,3	45,5	45,0	43,0	40,1
		17,5	45,0	47,0	46,5	44,4	41,5
		25	46,7	48,5	47,8	45,8	43,0
		32,5	48,4	49,9	49,1	47,1	44,3
		40	49,9	51,2	50,3	48,3	45,6

Таблица 2.10 – Результаты минимизации критерия «габаритный объем электромагнита» при $R_{мх}^*=9$, $K_{мах}=1,80$, $K_{з.но}=0,525$, $K_{в.но}=0,38$, $K=0,3$

Исходные данные проектирования			Оптимальная ширина окна обмоток				
$T_{доп}, ^\circ C$	$T_o, ^\circ C$	$\delta_{кр} \cdot 10^{-3}, м$	$A_{о.опт}, мм$				
		$P_{мх.кр}, Н$	4	5,5	7	8,5	10
115	40	10	7,5	8,4	8,8	9,0	9,0
		17,5	7,9	8,8	9,3	9,5	9,5
		25	8,4	9,3	9,7	10,0	10,1
		32,5	8,8	9,7	10,2	10,5	10,7
		40	9,3	10,2	10,7	11,0	11,3
	85	10	7,9	8,7	9,1	9,2	9,2
		17,5	8,3	9,2	9,6	9,8	9,8
		25	8,8	9,7	10,1	10,3	10,4
		32,5	9,3	10,2	10,6	10,9	11,0
		40	9,8	10,6	11,1	11,4	11,6
155	40	10	7,2	8,0	8,5	8,7	8,8
		17,5	7,6	8,5	8,9	9,2	9,3
		25	8,0	8,9	9,4	9,7	9,8
		32,5	8,4	9,3	9,8	10,2	10,4
		40	8,7	9,7	10,3	10,7	10,9
	85	10	7,5	8,3	8,8	9,0	9,0
		17,5	7,9	8,8	9,3	9,5	9,5
		25	8,4	9,2	9,7	10,0	10,1
		32,5	8,8	9,7	10,2	10,5	10,7
		40	9,2	10,1	10,7	11,0	11,2

Таблица 2.11 – Результаты минимизации критерия «габаритный объем электромагнита» при $R_{мх}^*=9$, $K_{мах}=1,80$, $K_{з.но}=0,525$, $K_{в.но}=0,38$, $K=0,3$

Исходные данные проектирования			Оптимальная ширина окна низкоомных обмоток $A_{но.опт}, мм$				
$T_{доп}, ^\circ C$	$T_o, ^\circ C$	$\delta_{кр} \cdot 10^{-3}, м$	$A_{но.опт}, мм$				
		$P_{мх.кр}, Н$	4	5,5	7	8,5	10
115	40	10	3,04	3,38	3,56	3,63	3,64
		17,5	3,22	3,56	3,75	3,84	3,86
		25	3,39	3,74	3,94	4,05	4,09
		32,5	3,57	3,93	4,14	4,26	4,33
		40	3,75	4,11	4,33	4,47	4,56
	85	10	3,18	3,51	3,68	3,74	3,74
		17,5	3,37	3,71	3,88	3,96	3,97
		25	3,57	3,91	4,09	4,18	4,21
		32,5	3,78	4,11	4,30	4,40	4,45
		40	3,98	4,31	4,50	4,62	4,70
155	40	10	2,91	3,26	3,44	3,53	3,55
		17,5	3,07	3,42	3,62	3,73	3,76
		25	3,22	3,59	3,80	3,92	3,98
		32,5	3,38	3,76	3,98	4,12	4,20
		40	3,54	3,92	4,16	4,32	4,42
	85	10	3,04	3,38	3,55	3,63	3,64
		17,5	3,21	3,56	3,74	3,83	3,86
		25	3,39	3,74	3,94	4,04	4,09
		32,5	3,56	3,92	4,13	4,25	4,32
		40	3,74	4,10	4,32	4,46	4,55

Таблица 2.12 – Результаты минимизации критерия «габаритный объем электромагнита» при $R_{мх}^*=9$, $K_{тах}=1,80$, $K_{з.но}=0,525$, $K_{в.но}=0,38$, $K=0,3$

Исходные данные проектирования			Оптимальный диаметр полюсных наконечников $d_{п.опт}$, мм				
$T_{доп}$, °C	T_0 , °C	$\delta_{кр} \cdot 10^{-3}$, м	4	5,5	7	8,5	10
		$P_{мх.кр}$, Н					
115	40	10	14,3	16,6	18,4	19,7	20,7
		17,5	15,4	17,7	19,3	20,6	21,6
		25	16,5	17,8	20,3	21,5	22,4
		32,5	17,7	19,8	21,3	22,4	23,3
		40	18,9	20,9	22,3	23,3	24,1
	85	10	15,0	17,3	19,0	20,2	21,2
		17,5	16,1	18,4	20,0	21,2	22,1
		25	17,4	19,6	21,1	22,2	23,1
		32,5	18,7	20,8	22,2	23,2	23,9
		40	20,1	22,0	23,2	24,1	24,8
155	40	10	13,7	16,0	17,8	19,1	20,2
		17,5	14,7	17,0	18,7	20,0	21,0
		25	15,7	18,0	19,6	20,8	21,8
		32,5	16,7	19,0	20,5	21,7	22,6
		40	17,8	20,0	21,5	22,5	23,4
	85	10	14,3	16,6	18,3	19,6	20,7
		17,5	15,3	17,7	19,3	20,6	21,5
		25	16,5	18,7	20,3	21,5	22,4
		32,5	17,6	19,8	21,3	22,4	23,2
		40	18,9	20,9	22,3	23,3	24,1

Таблица 2.13 – Результаты минимизации критерия «габаритный объем электромагнита» при $R_{мх}^*=9$, $K_{тах}=1,80$, $K_{з.но}=0,525$, $K_{в.но}=0,38$, $K=0,3$

Исходные данные проектирования			Оптимальное расстояние между осями сердечников $s_{опт}$, мм				
$T_{доп}$, °C	T_0 , °C	$\delta_{кр} \cdot 10^{-3}$, м	4	5,5	7	8,5	10
		$P_{мх.кр}$, Н					
115	40	10	28,7	33,3	36,8	39,4	41,5
		17,5	30,8	35,4	38,8	41,3	43,2
		25	33,1	37,6	40,8	43,1	44,9
		32,5	35,4	39,8	42,8	44,9	46,6
		40	37,9	42,0	44,7	46,7	48,2
	85	10	30,0	34,6	38,0	40,5	42,5
		17,5	32,3	36,9	40,1	42,5	44,4
		25	34,8	39,2	42,3	44,5	46,2
		32,5	37,4	41,6	44,4	46,6	48,0
		40	40,2	44,0	46,6	48,4	49,7
155	40	10	27,4	32,1	35,6	38,3	40,4
		17,5	29,4	34,0	37,4	40,0	42,1
		25	31,4	36,0	39,3	41,8	43,7
		32,5	33,6	38,0	41,2	43,5	45,3
		40	35,7	40,0	43,0	45,2	46,8
	85	10	28,6	33,3	36,7	39,4	41,4
		17,5	30,8	35,4	38,7	41,2	43,2
		25	33,0	37,5	40,7	43,1	44,9
		32,5	35,4	39,7	42,7	44,9	46,6
		40	37,8	41,9	44,7	46,7	48,2

2.3.2.2 Сравнительный анализ влияния на оптимальные соизмерности исходных данных проектирования по критериям «установочная площадь электромагнита» и «габаритный объем электромагнита»

Оптимальный диаметр сердечников при минимизации электромагнита по критерию «установочная площадь электромагнита» (таблица 2.14) практически совпадают с диаметром сердечника, определенным при минимизации критерия «габаритный объем электромагнита» (таблица 2.8), оставаясь несколько меньшим при увеличении критического рабочего воздушного зазора $\delta_{кр} > 8,5$ мм.

Соотношение величин оптимальной высоты обмоток при минимизации критериев «габаритный объем электромагнита» и «установочная площадь электромагнита» следующее (таблицы 2.9, 2.15):

$$H_{\text{опт. } S_y} \approx 1,1 H_{\text{опт. } V_{\text{габ.}}}$$

Оптимальная суммарная ширина окна низкоомных и высокоомных обмоток при минимизации критерия «габаритный объем электромагнита» больше приблизительно на 15%, чем при минимизации критерия «установочная площадь электромагнита» (таблицы 2.10, 2.16).

Оптимальная ширина окна низкоомных обмоток (таблица 2.11, 2.17) наиболее существенно изменяется в области факторного пространства (критического рабочего воздушного зазора) от 4 до 7 мм. С увеличением температуры окружающей среды до 85 °С ощутимая разница имеет место быть при критическом механическом усилии от 10 до 32,5 Н при допустимой температуре 115 °С. При температуре окружающей среды 85 °С и допустимой температуре 155 °С минимальная разность между величинами ширины окна низкоомных обмоток в рассматриваемом случае наблюдается при критическом рабочем воздушном зазоре 7 мм.

Оптимальный диаметр полюсных наконечников при минимизации установочной площади оказывается большим в диапазоне изменения критического рабочего воздушного зазора от 4 до 7 мм (таблицы 2.12, 2.18). При

прочих равных условиях диаметры полюсных наконечников в пределах сравниваемых критериев оптимизации сохраняются постоянными.

Оптимальное расстояние между осями сердечников должно быть выбрано большим при минимизации критерия «установочная площадь электромагнита» в диапазоне от 4 до 8,5 мм (таблицы 2.13, 2.19) независимо от допустимой температуры нагрева обмоток.

Оптимальные величины геометрических соизмерностей при минимизации по критериям «установочная площадь электромагнита» и «габаритный объем электромагнита» можно считать отличающимися в определяющей степени и могут рассматриваться как возможные разбросы, допустимые с точки зрения обеспечения технологичности сборки.

Таблица 2.14 – Результаты минимизации критерия «установочная площадь электромагнита» при $P_{\text{мх}}^* = 9$, $K_{\text{мах}} = 1,80$, $K_{3.\text{но}} = 0,525$, $K_{3.\text{во}} = 0,38$, $K = 0,3$

Исходные данные проектирования			Оптимальный диаметр сердечников				
$T_{\text{доп}}, ^\circ\text{C}$	$T_0, ^\circ\text{C}$	$\delta_{\text{кр}} \cdot 10^{-3}, \text{ м}$ $P_{\text{мх.кр}}, \text{ Н}$	$d_{\text{с.опт}}, \text{ мм}$				
			4	5,5	7	8,5	10
115	40	10	12,1	13,7	14,9	15,7	16,3
		17,5	12,9	14,5	15,6	16,4	17,1
		25	13,7	15,3	16,4	17,2	17,8
		32,5	14,5	16,1	17,2	17,9	18,5
		40	15,3	16,9	17,9	18,7	19,2
	85	10	12,8	14,4	15,5	16,2	16,8
		17,5	13,7	15,2	16,3	17,0	17,6
		25	14,6	16,1	17,1	17,9	18,4
		32,5	15,5	17,0	18,0	18,7	19,2
		40	16,5	17,9	18,8	19,5	20,0
155	40	10	11,5	13,1	14,3	15,2	15,9
		17,5	12,2	13,8	15,0	15,9	16,5
		25	12,9	14,5	15,7	16,6	17,2
		32,5	13,6	15,2	16,4	17,3	17,9
		40	14,3	15,9	17,1	17,9	18,6
	85	10	12,1	13,7	14,8	15,7	16,3
		17,5	12,9	14,5	15,6	16,4	17,1
		25	13,7	15,3	16,4	17,2	17,8
		32,5	14,5	16,1	17,1	17,9	18,5
		40	15,3	16,8	17,9	18,7	19,2

Таблица 2.15 – Результаты минимизации критерия «установочная площадь электромагнита» при $R_{мх}^*=9$, $K_{мах}=1,80$, $K_{з.но}=0,525$, $K_{з.во}=0,38$, $K=0,3$

Исходные данные проектирования			Оптимальная высота обмотки				
$T_{доп}, ^\circ C$	$T_o, ^\circ C$	$\delta_{кр} \cdot 10^{-3}, м$	$H_{o,опт}, мм$				
		$P_{мх.кр}, Н$	4	5,5	7	8,5	10
115	40	10	44,9	46,6	46,0	44,3	41,9
		17,5	47,0	48,4	47,5	45,5	42,9
		25	49,1	50,1	48,9	46,7	43,9
		32,5	51,0	51,7	50,3	47,8	44,8
		40	52,9	53,3	51,6	48,9	45,7
	85	10	63,0	65,1	64,2	61,9	58,7
		17,5	66,3	67,8	66,5	63,8	60,3
		25	69,5	70,5	68,8	65,7	61,9
		32,5	72,7	73,1	70,9	67,5	63,4
		40	75,7	75,6	73,0	69,1	64,8
155	40	10	33,8	35,2	34,8	33,4	31,6
		17,5	35,2	36,4	35,8	34,3	32,2
		25	36,5	37,5	36,7	35,1	32,9
		32,5	37,8	38,6	37,6	35,8	33,5
		40	39,0	39,6	38,5	36,5	34,0
	85	10	48,0	49,8	49,3	47,5	45,1
		17,5	50,2	51,7	50,9	48,9	46,2
		25	52,4	53,6	52,5	50,2	47,2
		32,5	54,5	55,4	53,9	51,4	48,2
		40	56,5	57,0	55,3	52,5	49,2

Таблица 2.16 – Результаты минимизации критерия «установочная площадь электромагнита» при $R_{мх}^*=9$, $K_{мах}=1,80$, $K_{з.но}=0,525$, $K_{з.во}=0,38$, $K=0,3$

Исходные данные проектирования			Оптимальная ширина окна обмоток				
$T_{доп}, ^\circ C$	$T_o, ^\circ C$	$\delta_{кр} \cdot 10^{-3}, м$	$A_{o,опт}, мм$				
		$P_{мх.кр}, Н$	4	5,5	7	8,5	10
115	40	10	6,2	7,0	7,6	8,0	8,3
		17,5	6,6	7,4	8,0	8,4	8,7
		25	7,0	7,8	8,4	8,8	9,1
		32,5	7,4	8,2	8,8	9,2	9,5
		40	7,8	8,6	9,2	9,5	9,8
	85	10	6,6	7,3	7,9	8,3	8,6
		17,5	7,0	7,8	8,3	8,7	9,0
		25	7,5	8,2	8,7	9,1	9,4
		32,5	7,9	8,7	9,2	9,5	9,8
		40	8,4	9,1	9,6	9,9	10,2
155	40	10	5,8	6,7	7,3	7,7	8,1
		17,5	6,2	7,1	7,6	8,1	8,4
		25	6,6	7,4	8,0	8,4	8,8
		32,5	6,9	7,8	8,4	8,8	9,1
		40	7,3	8,1	8,7	9,2	9,5
	85	10	6,2	7,0	7,6	8,0	8,3
		17,5	6,6	7,4	8,0	8,4	8,7
		25	7,0	7,8	8,4	8,8	9,1
		32,5	7,4	8,2	8,7	9,1	9,4
		40	7,8	8,6	9,1	9,5	9,8

Таблица 2.17 – Результаты минимизации критерия «установочная площадь электромагнита» при $R_{мх}^*=9$, $K_{мах}=1,80$, $K_{з.но}=0,525$, $K_{з.во}=0,38$, $K=0,3$

Исходные данные проектирования			Оптимальная ширина окна низкоомных обмоток $A_{но,опт}$, мм				
$T_{доп}$, °C	T_o , °C	$\delta_{кр} \cdot 10^{-3}$, м	4	5,5	7	8,5	10
		$P_{мх.кр}$, Н					
115	40	10	2,63	2,98	3,23	3,41	3,55
		17,5	2,8	3,15	3,4	3,57	3,71
		25	2,98	3,33	3,56	3,74	3,87
		32,5	3,15	3,50	3,73	3,90	4,03
		40	3,32	3,67	3,90	4,06	4,18
	85	10	3,09	3,47	3,73	3,92	4,06
		17,5	3,31	3,68	3,93	4,11	4,25
		25	3,52	3,89	4,13	4,30	4,44
		32,5	3,75	4,10	4,33	4,50	4,62
		40	3,97	4,31	4,54	4,69	4,81
155	40	10	2,49	2,85	3,10	3,30	3,44
		17,5	2,64	3,00	3,26	3,45	3,59
		25	2,80	3,16	3,41	3,60	3,74
		32,5	2,95	3,31	3,56	3,75	3,89
		40	3,10	3,47	3,72	3,90	4,04
	85	10	2,92	3,30	3,58	3,78	3,93
		17,5	3,10	3,49	3,76	3,96	4,11
		25	3,30	3,68	3,95	4,14	4,28
		32,5	3,49	3,87	4,13	4,32	4,46
		40	3,68	4,06	4,32	4,50	4,64

Таблица 2.18 – Результаты минимизации критерия «установочная площадь электромагнита» при $R_{мх}^*=9$, $K_{мах}=1,80$, $K_{з.но}=0,525$, $K_{з.во}=0,38$, $K=0,3$

Исходные данные проектирования			Оптимальный диаметр полюсных наконечников $d_{п,опт}$, мм				
$T_{доп}$, °C	T_o , °C	$\delta_{кр} \cdot 10^{-3}$, м	4	5,5	7	8,5	10
		$P_{мх.кр}$, Н					
115	40	10	15,2	17,2	18,7	19,7	20,5
		17,5	16,2	18,2	19,6	20,7	21,4
		25	17,2	19,2	20,6	21,6	22,4
		32,5	18,2	20,2	21,6	22,5	23,3
		40	19,2	21,2	22,5	23,5	24,2
	85	10	16,1	18,1	19,4	20,4	21,2
		17,5	17,2	19,2	20,5	21,4	22,1
		25	18,4	20,3	21,5	22,4	23,1
		32,5	19,5	21,4	22,6	23,4	24,1
		40	20,7	22,5	23,6	24,5	25,1
155	40	10	14,4	16,5	18,0	19,1	19,9
		17,5	15,3	17,4	18,8	19,9	20,8
		25	16,2	18,3	19,7	20,8	21,6
		32,5	17,1	19,2	20,6	21,7	22,5
		40	17,9	20,0	21,5	22,5	23,3
	85	10	15,2	17,2	18,7	19,7	20,5
		17,5	16,2	18,2	19,6	20,6	21,4
		25	17,2	19,2	20,6	21,6	22,3
		32,5	18,2	20,2	21,5	22,5	23,3
		40	19,2	21,2	22,5	23,4	24,2

Таблица 2.19 – Результаты минимизации критерия «установочная площадь электромагнита» при $R_{мх}^*=9$, $K_{max}=1,80$, $K_{з.но}=0,525$, $K_{з.во}=0,38$, $K=0,3$

Исходные данные проектирования			Оптимальное расстояние между осями сердечников $c_{опт}$, мм				
$T_{доп}$, °С	T_0 , °С	$\delta_{кр} \cdot 10^{-3}$, м	4	5,5	7	8,5	10
		$P_{мх.кр}$, Н					
115	40	10	30,5	34,6	37,5	39,6	41,2
		17,5	32,5	36,6	39,4	41,4	43,0
		25	34,5	38,6	41,3	43,3	44,9
		32,5	36,6	40,6	43,3	45,2	46,7
		40	38,6	42,5	45,2	47,1	48,5
	85	10	32,3	36,3	39,0	41,0	42,5
		17,5	34,6	38,4	41,1	43,0	44,4
		25	36,9	40,6	43,2	45,0	46,4
		32,5	39,2	42,9	45,3	47,1	48,4
		40	41,5	45,1	47,4	49,1	50,3
155	40	10	28,9	33,1	36,0	38,2	40,0
		17,5	30,7	34,8	37,8	40,0	41,7
		25	32,4	36,7	39,6	41,8	43,4
		32,5	34,2	38,5	41,4	43,5	45,1
		40	36,0	40,2	43,1	45,2	46,8
	85	10	30,5	34,6	37,4	39,5	41,2
		17,5	32,5	36,5	39,4	41,4	43,0
		25	34,5	38,5	41,3	43,3	44,8
		32,5	36,5	40,5	43,2	45,2	46,7
		40	38,5	42,5	45,2	47,1	48,5

2.3.2.3 Анализ влияния на оптимальные параметры электромагнита исходных данных проектирования по критериям «объем активных материалов электромагнита» и «габаритный объем электромагнита»

Здесь под параметрами электромагнита понимаются: магнитные индукции в сечении ярма, лежащем в поперечной плоскости симметрии электромагнита при его срабатывании и возврате, магнитодвижущие силы при срабатывании и возврате, мощности потребляемые электромагнитом в режиме пуска, в режиме удержания низкоомными и высокоомными обмотками, кратность числа витков высокоомных обмоток в долях низкоомных обмоток, среднеобъемные температуры нагрева в толще низкоомной и высокоомной обмоток, объем активных материалов и габаритный объем.

Оптимальная величина магнитной индукции в поперечной плоскости симметрии ярма электромагнита при срабатывании для выбранной области факторного пространства при оптимизации:

- по критерию «объем активных материалов электромагнита» не зависит от величин критического рабочего зазора и механического усилия, температур окружающей среды и допустимой и равна 1,62 Тл (таблица 2.20);

- по критерию «габаритный объем электромагнита» изменяется в соответствии с таблицей 2.21.

Оптимальная величина магнитной индукции в поперечной плоскости симметрии ярма электромагнита при возврате для выбранной области факторного пространства при оптимизации:

- по критерию «объем активных материалов электромагнита» ($B_{о.опт.Ва}$) повышается с увеличением величины критической механической силы и не зависит от допустимой температуры нагрева; при увеличении же величины критического рабочего зазора и температуры окружающей среды, напротив, уменьшается (таблица 2.22).

- по критерию «габаритный объем электромагнита» ($B_{о.опт.Вгаб}$) увеличивается с увеличением критических значений силы и уменьшается при увеличении критического значения рабочего зазора, оставаясь независимой от температуры окружающей среды T_0 и допустимой температуры $\theta_{доп}$; при этом магнитная система остается нелинейной при критических значениях рабочего воздушного зазора, не превышающих 8,5 мм (таблица 2.23).

Кроме того, значение магнитной индукции $B_{о.опт.Вгаб}$ превалирует над значением магнитной индукции $B_{о.опт.Ва}$.

Оптимальные значения МДС срабатывания $F_{ср.опт}$ при оптимизации по критериям «объем активных материалов электромагнита» и «габаритный объем электромагнита» увеличиваются с ростом критической величины воздушного зазора и силы (таблицы 2.24 и 2.25 соответственно), оставаясь независимыми от температуры окружающей среды и допустимой температуры нагрева. При этом

$$F_{ср.опт.Ва} > F_{ср.опт.Вгаб}.$$

Оптимальные значения МДС отпускания $F_{\text{отп.опт}}$ увеличиваются со снижением величины критического рабочего зазора и с ростом величины критического механического усилия (таблицы 2.26 и 2.27). При этом величина МДС отпадания в большей степени изменяется при нарастании величины критического механического усилия. Оптимальные величины МДС отпускания не зависят от допустимой температуры нагрева при минимизации как габаритного объема так и объема активных материалов. Они также не зависят от температуры окружающей среды при минимизации габаритного объема. Однако, при прочих равных условиях $F_{\text{отп.опт.}V_a} \approx F_{\text{отп.опт.}V_{\text{габ}}}$.

Мощность, потребляемая в режиме пуска существенно больше при оптимизации по критерию «объем активных материалов электромагнита» (таблицы 2.28 и 2.29). При этом с нарастанием величины критического рабочего воздушного зазора и механического усилия наблюдается рост значения допустимой пусковой мощности. С ростом допустимой температуры нагрева имеет место увеличение потребляемой мощности при включении электромагнита. Увеличение температуры окружающей среды от 40 до 85°C приводит к неизбежному снижению допустимой потребляемой мощности при пуске.

Оптимальные величины мощности потребляемой низкоомными обмотками в режиме удержания $P_{\text{но}}$ увеличиваются со снижением критического значения рабочего зазора и с ростом критического значения механического усилия (таблицы 2.30 и 2.31). Рост температуры окружающей среды не сказывается на величине мощности потребляемой низкоомными обмотками. При этом рост допустимой температуры нагрева приводит к росту допустимой мощности выделяемой в низкоомных обмотках. Отметим, что мощность $P_{\text{но}}$ остается большей при минимизации габаритного объема:

$$P_{\text{но.}V_a} < P_{\text{но.}V_{\text{габ}}}$$

Мощность, потребляемая высокоомными обмотками, как следует из таблиц 2.32 и 2.33 не зависят от величины критического рабочего зазора. Эта мощность существенно нарастает с ростом величины критического усилия. С ростом температуры окружающей среды допустимая потребляемая мощность

уменьшается. С ростом же допустимой температуры нагрева допустимая потребляемая мощность возрастает. При этом мощность, потребляемая высокоомными обмотками при минимизации объема активных материалов больше, чем при минимизации габаритного объема:

$$P_{\text{во.}Ia} > P_{\text{во.}I\text{габ.}}$$

Отношение числа витков высокоомных обмоток к низкоомным возрастает с повышением величины критического рабочего воздушного зазора и не зависит от температуры окружающей среды, а также допустимой температуры нагрева обмоток при минимизации критерия «габаритный объем электромагнита» (таблица 2.34). Такое отношение при минимизации критерия «объем активных материалов электромагнита» (таблица 2.35) приводит к увеличению кратности этих чисел витков при нарастании величины критического рабочего воздушного зазора и уменьшении величины критического механического усилия. Рост температуры окружающей среды при прочих равных условиях приводит к незначительному уменьшению кратности n . При этом кратность n оказывается большей при минимизации электромагнита по критерию «объем активных материалов».

Среднеобъемная температура низкоомных обмоток зависит только от допустимой температуры нагрева при минимизации критерия «объем активных материалов электромагнита» (таблица 2.36). При минимизации критерия «габаритный объем электромагнита» среднеобъемная температура низкоомных обмоток зависит от температуры окружающей среды и допустимой температуры нагрева обмоток (таблица 2.37).

Среднеобъемная температура высокоомных обмоток зависит лишь от допустимой температуры нагрева обмоток при минимизации критериев «объем активных материалов электромагнита» (таблица 2.38) и «габаритный объем электромагнита» (таблица 2.39):

$$\theta_{\text{во.}Ia} \approx \theta_{\text{во.}I\text{габ.}}$$

Величина критерия оптимальности «габаритный объем электромагнита» увеличивается с ростом величины критического рабочего воздушного зазора и с

ростом величины критического механического усилия (таблица (2.40)). С ростом температуры окружающей среды и уменьшением допустимой температуры нагрева обмоток габаритный объем увеличивается.

Величина критерия оптимальности «объем активных материалов электромагнита» нарастает с увеличением величин критических усилий величинах критического рабочего воздушного зазора $\delta_{кр}$ до 8,5 мм и уменьшается при величинах критического рабочего воздушного зазора $\delta_{кр}$, больших 8,5 мм (таблица 2.41). С ростом величины критического рабочего воздушного зазора $\delta_{кр}$ объем активных материалов электромагнита монотонно возрастает. При этом с ростом температуры окружающей среды и уменьшением допустимой температуры нагрева обмоток объем активных материалов увеличивается.

Таблица 2.20 – Результаты минимизации критерия «объем активных материалов электромагнита» при $P_{мх}^* = 9$, $K_{max} = 1,80$, $K_{з.но} = 0,525$, $K_{в.но} = 0,38$, $K = 0,3$

Исходные данные проектирования			Оптимальная индукция в основании сердечников при срабатывании $B_{ср.опт}$, Тл				
$T_{доп}$, °C	T_0 , °C	$\delta_{кр} \cdot 10^{-3}$, м	4	5,5	7	8,5	10
		$P_{мх.кр}$, Н					
115	40	10	1,62	1,62	1,62	1,62	1,62
		17,5	1,62	1,62	1,62	1,62	1,62
		25	1,62	1,62	1,62	1,62	1,62
		32,5	1,62	1,62	1,62	1,62	1,62
		40	1,62	1,62	1,62	1,62	1,62
	85	10	1,62	1,62	1,62	1,62	1,62
		17,5	1,62	1,62	1,62	1,62	1,62
		25	1,62	1,62	1,62	1,62	1,62
		32,5	1,62	1,62	1,62	1,62	1,62
		40	1,62	1,62	1,62	1,62	1,62
155	40	10	1,62	1,62	1,62	1,62	1,62
		17,5	1,62	1,62	1,62	1,62	1,62
		25	1,62	1,62	1,62	1,62	1,62
		32,5	1,62	1,62	1,62	1,62	1,62
		40	1,62	1,62	1,62	1,62	1,62
	85	10	1,62	1,62	1,62	1,62	1,62
		17,5	1,62	1,62	1,62	1,62	1,62
		25	1,62	1,62	1,62	1,62	1,62
		32,5	1,62	1,62	1,62	1,62	1,62
		40	1,62	1,62	1,62	1,62	1,62

Таблица 2.21 – Результаты минимизации критерия «габаритный объем электромагнита» при $R_{мх}^*=9$, $K_{max}=1,80$, $K_{з.но}=0,525$, $K_{в.но}=0,38$, $K=0,3$

Исходные данные проектирования			Оптимальная индукция в основании сердечников при срабатывании $B_{ср.опт}$, Тл				
$T_{доп}$, °С	T_0 , °С	$\delta_{кр} \cdot 10^{-3}$, м	4	5,5	7	8,5	10
		$P_{мх.кр}$, Н					
115	40	10	1,74	1,70	1,65	1,61	1,57
		17,5	1,69	1,67	1,64	1,61	1,59
		25	1,65	1,64	1,63	1,62	1,61
		32,5	1,60	1,61	1,61	1,62	1,63
		40	1,56	1,58	1,60	1,62	1,64
	85	10	1,74	1,70	1,65	1,61	1,57
		17,5	1,69	1,67	1,64	1,61	1,59
		25	1,65	1,64	1,63	1,62	1,61
		32,5	1,60	1,61	1,61	1,62	1,63
		40	1,56	1,58	1,60	1,62	1,64
155	40	10	1,74	1,70	1,65	1,61	1,57
		17,5	1,69	1,67	1,64	1,61	1,59
		25	1,65	1,64	1,63	1,62	1,61
		32,5	1,60	1,61	1,61	1,62	1,63
		40	1,56	1,58	1,60	1,62	1,64
	85	10	1,74	1,70	1,65	1,61	1,57
		17,5	1,69	1,67	1,64	1,61	1,59
		25	1,65	1,64	1,63	1,62	1,61
		32,5	1,60	1,61	1,61	1,62	1,63
		40	1,56	1,58	1,60	1,62	1,64

Таблица 2.22 – Результаты минимизации критерия «объем активных материалов электромагнита» при $R_{мх}^*=9$, $K_{max}=1,80$, $K_{з.но}=0,525$, $K_{в.но}=0,38$, $K=0,3$

Исходные данные проектирования			Оптимальная индукция в основании сердечников при отпуске $B_{отп.опт}$, Тл				
$T_{доп}$, °С	T_0 , °С	$\delta_{кр} \cdot 10^{-3}$, м	4	5,5	7	8,5	10
		$P_{мх.кр}$, Н					
115	40	10	1,17	1,13	1,09	1,04	1,00
		17,5	1,22	1,17	1,13	1,09	1,05
		25	1,26	1,21	1,17	1,13	1,09
		32,5	1,29	1,25	1,21	1,16	1,12
		40	1,32	1,28	1,24	1,19	1,15
	85	10	1,09	1,05	1,01	0,97	0,93
		17,5	1,14	1,10	1,06	1,01	0,97
		25	1,18	1,14	1,10	1,05	1,01
		32,5	1,21	1,17	1,13	1,09	1,05
		40	1,24	1,20	1,16	1,12	1,08
155	40	10	1,24	1,20	1,16	1,12	1,07
		17,5	1,29	1,24	1,20	1,16	1,12
		25	1,33	1,28	1,24	1,20	1,16
		32,5	1,36	1,32	1,28	1,24	1,19
		40	1,39	1,35	1,31	1,27	1,22
	85	10	1,17	1,12	1,08	1,04	1,00
		17,5	1,21	1,17	1,13	1,07	1,04
		25	1,25	1,21	1,17	1,12	1,08
		32,5	1,29	1,24	1,20	1,16	1,12
		40	1,32	1,27	1,23	1,19	1,15

Таблица 2.23 – Результаты минимизации критерия «габаритный объем электромагнита» при $R_{мх}^*=9$, $K_{max}=1,80$, $K_{з.но}=0,525$, $K_{в.но}=0,38$, $K=0,3$

Исходные данные проектирования			Оптимальная индукция в основании сердечников при отпуске $B_{отп.опт}$, Тл				
$T_{доп}$, °C	T_0 , °C	$\delta_{кр} \cdot 10^{-3}$, м	4	5,5	7	8,5	10
		$P_{мх.кр}$, Н					
115	40	10	1,26	1,21	1,16	1,11	1,06
		17,5	1,27	1,23	1,18	1,13	1,08
		25	1,31	1,26	1,20	1,15	1,10
		32,5	1,33	1,28	1,23	1,17	1,12
		40	1,35	1,30	1,25	1,20	1,14
	85	10	1,26	1,21	1,16	1,11	1,06
		17,5	1,27	1,23	1,18	1,13	1,08
		25	1,31	1,26	1,20	1,15	1,10
		32,5	1,33	1,28	1,23	1,17	1,12
		40	1,35	1,30	1,25	1,20	1,14
155	40	10	1,26	1,21	1,16	1,11	1,06
		17,5	1,27	1,23	1,18	1,13	1,08
		25	1,31	1,26	1,20	1,15	1,10
		32,5	1,33	1,28	1,23	1,17	1,12
		40	1,35	1,30	1,25	1,20	1,14
	85	10	1,26	1,21	1,16	1,11	1,06
		17,5	1,27	1,23	1,18	1,13	1,08
		25	1,31	1,26	1,20	1,15	1,10
		32,5	1,33	1,28	1,23	1,17	1,12
		40	1,35	1,30	1,25	1,20	1,14

Таблица 2.24 – Результаты минимизации критерия «объем активных материалов электромагнита» при $R_{мх}^*=9$, $K_{max}=1,80$, $K_{з.но}=0,525$, $K_{в.но}=0,38$, $K=0,3$

Исходные данные проектирования			Оптимальная МДС срабатывания электромагнита $F_{ср.опт}$, А				
$T_{доп}$, °C	T_0 , °C	$\delta_{кр} \cdot 10^{-3}$, м	4	5,5	7	8,5	10
		$P_{мх.кр}$, Н					
115	40	10	1903	2242	2625	3055	3536
		17,5	2419	2855	3347	3901	4520
		25	2777	3283	3855	4498	5220
		32,5	3040	3599	4233	4947	5748
		40	3236	3839	4522	5292	6157
	85	10	1903	2242	2625	3055	3536
		17,5	2419	2855	3347	3901	4520
		25	2777	3283	3855	4498	5220
		32,5	3040	3599	4233	4947	5748
		40	3236	3839	4522	5292	6157
155	40	10	1903	2242	2625	3055	3536
		17,5	2419	2855	3347	3901	4520
		25	2777	3283	3855	4498	5220
		32,5	3040	3599	4233	4947	5748
		40	3236	3839	4522	5292	6157
	85	10	1903	2242	2625	3055	3536
		17,5	2419	2855	3347	3901	4520
		25	2777	3283	3855	4498	5220
		32,5	3040	3599	4233	4947	5748
		40	3236	3839	4522	5292	6157

Таблица 2.25 – Результаты минимизации критерия «габаритный объем электромагнита» при $R_{мх}^*=9$, $K_{max}=1,80$, $K_{з.но}=0,525$, $K_{в.но}=0,38$, $K=0,3$

Исходные данные проектирования			Оптимальная МДС срабатывания электромагнита $F_{ср.опт}$, А				
$T_{доп}$, °С	T_o , °С	$\delta_{кр} \cdot 10^{-3}$, м	4	5,5	7	8,5	10
		$P_{мх.кр}$, Н					
115	40	10	1817	2143	2469	2795	3122
		17,5	2306	2738	3169	3601	4032
		25	2640	3156	3672	4188	4703
		32,5	2878	3466	4054	4642	5230
		40	3046	3699	4351	5003	5656
	85	10	1817	2143	2469	2795	3122
		17,5	2306	2738	3169	3601	4032
		25	2640	3156	3672	4188	4703
		32,5	2878	3466	4054	4642	5230
		40	3046	3699	4351	5003	5656
155	40	10	1817	2143	2469	2795	3122
		17,5	2306	2738	3169	3601	4032
		25	2640	3156	3672	4188	4703
		32,5	2878	3466	4054	4642	5230
		40	3046	3699	4351	5003	5656
	85	10	1817	2143	2469	2795	3122
		17,5	2306	2738	3169	3601	4032
		25	2640	3156	3672	4188	4703
		32,5	2878	3466	4054	4642	5230
		40	3046	3699	4351	5003	5656

Таблица 2.26 – Результаты минимизации критерия «объем активных материалов электромагнита» при $R_{мх}^*=9$, $K_{max}=1,80$, $K_{з.но}=0,525$, $K_{в.но}=0,38$, $K=0,3$

Исходные данные проектирования			Оптимальная МДС отпускания электромагнита $F_{отп.опт}$, А				
$T_{доп}$, °С	T_o , °С	$\delta_{кр} \cdot 10^{-3}$, м	4	5,5	7	8,5	10
		$P_{мх.кр}$, Н					
115	40	10	513	491	469	448	427
		17,5	662	633	604	576	549
		25	771	736	703	670	638
		32,5	856	817	779	742	706
		40	924	882	841	800	761
	85	10	486	464	443	422	402
		17,5	626	597	569	542	516
		25	728	694	662	630	599
		32,5	808	770	733	698	663
		40	872	831	790	751	713
155	40	10	513	491	469	448	427
		17,5	662	633	604	576	549
		25	771	736	703	670	638
		32,5	856	817	779	742	706
		40	924	882	841	800	761
	85	10	486	464	443	422	402
		17,5	626	597	569	542	516
		25	728	694	662	630	599
		32,5	808	770	733	698	663
		40	872	831	790	751	713

Таблица 2.27 – Результаты минимизации критерия «габаритный объем электромагнита» при $R_{мх}^*=9$, $K_{max}=1,80$, $K_{з.но}=0,525$, $K_{в.но}=0,38$, $K=0,3$

Исходные данные проектирования			Оптимальная МДС отпускания электромагнита				
$T_{доп}, ^\circ C$	$T_o, ^\circ C$	$\delta_{кр} \cdot 10^{-3}, м$	$F_{отп.опт}, А$				
		$P_{мх.кр}, Н$	4	5,5	7	8,5	10
115	40	10	501	476	452	429	406
		17,5	645	613	582	551	522
		25	751	713	676	640	605
		32,5	833	790	749	709	669
		40	898	852	807	763	720
	85	10	501	476	452	429	406
		17,5	645	613	582	551	522
		25	751	713	676	640	605
		32,5	833	790	749	709	669
		40	898	852	807	763	720
155	40	10	501	476	452	429	406
		17,5	645	613	582	551	522
		25	751	713	676	640	605
		32,5	833	790	749	709	669
		40	898	852	807	763	720
	85	10	501	476	452	429	406
		17,5	645	613	582	551	522
		25	751	713	676	640	605
		32,5	833	790	749	709	669
		40	898	852	807	763	720

Таблица 2.28 – Результаты минимизации критерия «объем активных материалов электромагнита в» при $R_{мх}^*=9$, $K_{max}=1,80$, $K_{з.но}=0,525$, $K_{в.но}=0,38$, $K=0,3$

Исходные данные проектирования			Оптимальная мощность потребляемая электромагнитом при пуске $P_{п.опт}, Вт$				
$T_{доп}, ^\circ C$	$T_o, ^\circ C$	$\delta_{кр} \cdot 10^{-3}, м$	$P_{п.опт}, Вт$				
		$P_{мх.кр}, Н$	4	5,5	7	8,5	10
115	40	10	132	179	241	319	414
		17,5	207	285	388	519	679
		25	264	370	510	688	929
		32,5	305	435	608	829	1102
		40	333	484	688	945	1266
	85	10	85	123	174	239	320
		17,5	132	195	279	387	523
		25	166	250	364	511	696
		32,5	189	291	431	612	841
		40	203	321	482	693	962
155	40	10	217	274	351	446	561
		17,5	344	441	570	730	924
		25	445	578	754	974	1241
		32,5	522	688	908	1182	1515
		40	579	774	1032	1355	1750
	85	10	147	197	262	343	443
		17,5	232	314	423	559	726
		25	297	408	556	743	972
		32,5	344	482	665	896	1182
		40	377	538	751	1023	1359

Таблица 2.29 – Результаты минимизации критерия «габаритный объем электромагнита» при $R_{мх}^*=9$, $K_{max}=1,80$, $K_{з.но}=0,525$, $K_{в.но}=0,38$, $K=0,3$

Исходные данные проектирования			Оптимальная мощность потребляемая электромагнитом при пуске $P_{п.опт}$, Вт				
$T_{доп}$, °C	T_o , °C	$\delta_{кр} \cdot 10^{-3}$, м	4	5,5	7	8,5	10
		$P_{мх.кр}$, Н					
115	40	10	92	127	179	250	346
		17,5	145	203	288	405	564
		25	186	263	377	535	750
		32,5	217	311	449	643	906
		40	240	347	506	730	1035
	85	10	58	84	123	178	253
		17,5	90	133	197	287	410
		25	115	172	256	377	543
		32,5	133	201	304	450	654
		40	146	223	340	509	744
155	40	10	158	208	280	378	506
		17,5	252	334	453	615	829
		25	327	437	597	816	1106
		32,5	385	520	716	985	1343
		40	429	585	812	1124	1542
	85	10	104	142	198	275	377
		17,5	164	227	319	445	615
		25	212	296	418	589	818
		32,5	248	349	499	708	990
		40	274	391	563	804	1132

Таблица 2.30 – Результаты минимизации критерия «объем активных материалов электромагнита» при $R_{мх}^*=9$, $K_{max}=1,80$, $K_{з.но}=0,525$, $K_{в.но}=0,38$, $K=0,3$

Исходные данные проектирования			Мощность потребляемая низкоомной обмоткой $P_{но.опт}$, Вт				
$T_{доп}$, °C	T_o , °C	$\delta_{кр} \cdot 10^{-3}$, м	4	5,5	7	8,5	10
		$P_{мх.кр}$, Н					
115	40	10	1,90	1,19	0,79	0,58	0,47
		17,5	3,04	1,88	1,24	0,89	0,72
		25	4,01	2,46	1,60	1,15	0,92
		32,5	4,85	2,95	1,91	1,35	1,08
		40	5,61	3,38	2,17	1,52	1,21
	85	10	1,90	1,19	0,79	0,58	0,47
		17,5	3,04	1,88	1,24	0,89	0,72
		25	4,01	2,46	1,60	1,15	0,92
		32,5	4,85	2,95	1,91	1,35	1,08
		40	5,61	3,38	2,17	1,52	1,21
155	40	10	2,19	1,40	0,95	0,70	0,58
		17,5	3,53	2,23	1,49	1,09	0,89
		25	4,67	2,92	1,94	1,41	1,14
		32,5	5,66	3,51	2,31	1,67	1,35
		40	6,56	4,03	2,64	1,89	1,52
	85	10	2,19	1,40	0,95	0,70	0,58
		17,5	3,53	2,23	1,49	1,09	0,89
		25	4,67	2,92	1,94	1,41	1,14
		32,5	5,66	3,51	2,31	1,67	1,35
		40	6,56	4,03	2,64	1,89	1,52

Таблица 2.31 – Результаты минимизации критерия «габаритный объем электромагнита» при $R_{мх}^*=9$, $K_{max}=1,80$, $K_{з.но}=0,525$, $K_{в.но}=0,38$, $K=0,3$

Исходные данные проектирования			Мощность потребляемая низкоомной обмоткой				
$T_{доп}, ^\circ C$	$T_o, ^\circ C$	$\delta_{кр} \cdot 10^{-3}, м$	$P_{но.опт}, Вт$				
		$P_{мх.кр}, Н$	4	5,5	7	8,5	10
115	40	10	2,20	1,34	0,89	0,66	0,56
		17,5	3,46	2,08	1,36	1,00	0,85
		25	4,49	2,66	1,71	1,24	1,05
		32,5	5,35	3,14	2,00	1,44	1,21
		40	6,11	3,54	2,23	1,59	1,33
	85	10	2,20	1,34	0,89	0,66	0,56
		17,5	3,46	2,08	1,36	1,00	0,85
		25	4,49	2,66	1,71	1,24	1,05
		32,5	5,35	3,14	2,00	1,44	1,21
		40	6,11	3,54	2,23	1,59	1,33
155	40	10	2,48	1,54	1,03	0,77	0,67
		17,5	3,91	2,39	1,58	1,18	1,01
		25	5,09	3,07	2,01	1,48	1,26
		32,5	6,09	3,63	2,35	1,71	1,46
		40	6,96	4,11	2,64	1,91	1,61
	85	10	2,48	1,54	1,03	0,77	0,67
		17,5	3,91	2,39	1,58	1,18	1,01
		25	5,09	3,07	2,01	1,48	1,26
		32,5	6,09	3,63	2,35	1,71	1,46
		40	6,96	4,11	2,64	1,91	1,61

Таблица 2.32 – Результаты минимизации критерия «объем активных материалов электромагнита» при $R_{мх}^*=9$, $K_{max}=1,80$, $K_{з.но}=0,525$, $K_{в.но}=0,38$, $K=0,3$

Исходные данные проектирования			Мощность потребляемая высокоомной обмоткой $P_{во.опт}, Вт$				
$T_{доп}, ^\circ C$	$T_o, ^\circ C$	$\delta_{кр} \cdot 10^{-3}, м$	$P_{во.опт}, Вт$				
		$P_{мх.кр}, Н$	4	5,5	7	8,5	10
115	40	10	12,09	12,09	12,09	12,09	12,09
		17,5	19,66	19,66	19,66	19,66	19,66
		25	26,05	26,05	26,05	26,05	26,05
		32,5	31,37	31,37	31,37	31,37	31,37
		40	35,71	35,71	35,71	35,71	35,71
	85	10	10,05	10,05	10,05	10,05	10,05
		17,5	16,28	16,28	16,28	16,28	16,28
		25	21,50	21,50	21,50	21,50	21,50
		32,5	25,79	25,79	25,79	25,79	25,79
		40	29,25	29,25	29,25	29,25	29,25
155	40	10	16,26	16,26	16,26	16,26	16,26
		17,5	26,57	26,57	26,57	26,57	26,57
		25	35,4	35,4	35,4	35,4	35,4
		32,5	42,88	42,88	42,88	42,88	42,88
		40	49,1	49,1	49,1	49,1	49,1
	85	10	13,7	13,7	13,7	13,7	13,7
		17,5	22,32	22,32	22,32	22,32	22,32
		25	29,65	29,65	29,65	29,65	29,65
		32,5	35,79	35,79	35,79	35,79	35,79
		40	40,85	40,85	40,85	40,85	40,85

Таблица 2.33 – Результаты минимизации критерия «габаритный объем электромагнита» при $R_{мх}^*=9$, $K_{маx}=1,80$, $K_{з.но}=0,525$, $K_{в.но}=0,38$, $K=0,3$

Исходные данные проектирования			Мощность потребляемая высокоомной обмоткой $P_{во.опт}$, Вт				
$T_{доп}$, °C	T_0 , °C	$\delta_{кр} \cdot 10^{-3}$, м	4	5,5	7	8,5	10
		$P_{мх.кр}$, Н					
115	40	10	10,97	10,97	10,97	10,97	10,97
		17,5	17,83	17,83	17,83	17,83	17,83
		25	23,62	23,62	23,62	23,62	23,62
		32,5	28,43	28,43	28,43	28,43	28,43
		40	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35
	85	10	8,95	8,95	8,95	8,95	8,95
		17,5	14,49	14,49	14,49	14,49	14,49
		25	19,12	19,12	19,12	19,12	19,12
		32,5	22,91	22,91	22,91	22,91	22,91
		40	25,96	25,96	25,96	25,96	25,96
155	40	10	14,89	14,89	14,89	14,89	14,89
		17,5	24,34	24,34	24,34	24,34	24,34
		25	32,42	32,42	32,42	32,42	32,42
		32,5	39,26	39,26	39,26	39,26	39,26
		40	44,94	44,94	44,94	44,94	44,94
	85	10	12,34	12,34	12,34	12,34	12,34
		17,5	20,10	20,10	20,10	20,10	20,10
		25	26,68	26,68	26,68	26,68	26,68
		32,5	32,19	32,19	32,19	32,19	32,19
		40	36,72	36,72	36,72	36,72	36,72

Таблица 2.34 – Результаты минимизации критерия «габаритный объем электромагнита» при $R_{мх}^*=9$, $K_{маx}=1,80$, $K_{з.но}=0,525$, $K_{в.но}=0,38$, $K=0,3$

Исходные данные проектирования			Кратность числа витков n				
$T_{доп}$, °C	T_0 , °C	$\delta_{кр} \cdot 10^{-3}$, м	4	5,5	7	8,5	10
		$P_{мх.кр}$, Н					
115	40	10	2,04	2,58	3,21	3,94	4,8
		17,5	2,04	2,58	3,21	3,94	4,8
		25	2,04	2,58	3,21	3,94	4,8
		32,5	2,04	2,58	3,21	3,94	4,8
		40	2,04	2,58	3,21	3,94	4,8
	85	10	2,04	2,58	3,21	3,94	4,8
		17,5	2,04	2,58	3,21	3,94	4,8
		25	2,04	2,58	3,21	3,94	4,8
		32,5	2,04	2,58	3,21	3,94	4,8
		40	2,04	2,58	3,21	3,94	4,8
155	40	10	2,04	2,58	3,21	3,94	4,8
		17,5	2,04	2,58	3,21	3,94	4,8
		25	2,04	2,58	3,21	3,94	4,8
		32,5	2,04	2,58	3,21	3,94	4,8
		40	2,04	2,58	3,21	3,94	4,8
	85	10	2,04	2,58	3,21	3,94	4,8
		17,5	2,04	2,58	3,21	3,94	4,8
		25	2,04	2,58	3,21	3,94	4,8
		32,5	2,04	2,58	3,21	3,94	4,8
		40	2,04	2,58	3,21	3,94	4,8

Таблица 2.35 – Результаты минимизации критерия «объем активных материалов электромагнита» при $R_{мх}^*=9$, $K_{max}=1,80$, $K_{з.но}=0,525$, $K_{в.но}=0,38$, $K=0,3$

Исходные данные проектирования			Кратность числа витков n				
$T_{доп}, ^\circ C$	$T_o, ^\circ C$	$\delta_{кр} \cdot 10^{-3}, м$	4	5,5	7	8,5	10
		$P_{мх.кр}, Н$					
115	40	10	2,66	3,27	3,95	4,69	5,50
		17,5	2,63	3,25	3,92	4,66	5,46
		25	2,61	3,22	3,89	4,62	5,42
		32,5	2,58	3,19	3,86	4,59	5,38
		40	2,56	3,16	3,82	4,55	5,35
	85	10	2,42	3,00	3,65	4,37	5,14
		17,5	2,39	2,97	3,62	4,33	5,11
		25	2,37	2,95	3,59	4,30	5,07
		32,5	2,34	2,92	3,56	4,27	5,03
		40	2,32	2,89	3,53	4,23	5,00
155	40	10	2,66	3,27	3,95	4,69	5,50
		17,5	2,63	3,25	3,92	4,66	5,46
		25	2,61	3,22	3,89	4,62	5,42
		32,5	2,58	3,19	3,86	4,59	5,38
		40	2,56	3,16	3,82	4,55	5,35
	85	10	2,42	3,00	3,65	4,37	5,14
		17,5	2,39	2,97	3,62	4,33	5,11
		25	2,37	2,95	3,59	4,30	5,07
		32,5	2,34	2,92	3,56	4,27	5,03
		40	2,32	2,89	3,53	4,23	5,00

Таблица 2.36 – Результаты минимизации критерия «объем активных материалов электромагнита» при $R_{мх}^*=9$, $K_{max}=1,80$, $K_{з.но}=0,525$, $K_{в.но}=0,38$, $K=0,3$

Исходные данные проектирования			Среднеобъемная температура в толще низкоомной обмотки $T_{но}, ^\circ C$				
$T_{доп}, ^\circ C$	$T_o, ^\circ C$	$\delta_{кр} \cdot 10^{-3}, м$	4	5,5	7	8,5	10
		$P_{мх.кр}, Н$					
115	40	10	111	111	111	111	111
		17,5	111	111	111	111	111
		25	111	111	111	111	111
		32,5	111	111	111	111	111
		40	111	111	111	111	111
	85	10	111	111	111	111	111
		17,5	111	111	111	111	111
		25	111	111	111	111	111
		32,5	111	111	111	111	111
		40	111	111	111	111	111
155	40	10	149	149	149	149	149
		17,5	149	149	149	149	149
		25	149	149	149	149	149
		32,5	149	149	149	149	149
		40	149	149	149	149	149
	85	10	149	149	149	149	149
		17,5	149	149	149	149	149
		25	149	149	149	149	149
		32,5	149	149	149	149	149
		40	149	149	149	149	149

Таблица 2.37 – Результаты минимизации критерия «габаритный объем электромагнита» при $R_{мх}^*=9$, $K_{max}=1,80$, $K_{з.но}=0,525$, $K_{в.но}=0,38$, $K=0,3$

Исходные данные проектирования			Среднеобъемная температура в толще низкоомной обмотки $T_{но}, ^\circ\text{C}$				
$T_{доп}, ^\circ\text{C}$	$T_o, ^\circ\text{C}$	$\delta_{кр} \cdot 10^{-3}, \text{ м}$	4	5,5	7	8,5	10
		$P_{мх.кр}, \text{ Н}$					
115	40	10	108	108	108	108	108
		17,5	108	108	108	108	108
		25	108	108	108	108	108
		32,5	108	108	108	108	108
		40	108	108	108	108	108
	85	10	112	112	112	112	112
		17,5	112	112	112	112	112
		25	112	112	112	112	112
		32,5	112	112	112	112	112
		40	112	112	112	112	112
155	40	10	146	146	146	146	146
		17,5	146	146	146	146	146
		25	146	146	146	146	146
		32,5	146	146	146	146	146
		40	146	146	146	146	146
	85	10	151	151	151	151	151
		17,5	151	151	151	151	151
		25	151	151	151	151	151
		32,5	151	151	151	151	151
		40	151	151	151	151	151

Таблица 2.38 – Результаты минимизации критерия «объем активных материалов электромагнита» при $R_{мх}^*=9$, $K_{max}=1,80$, $K_{з.но}=0,525$, $K_{в.но}=0,38$, $K=0,3$

Исходные данные проектирования			Среднеобъемная температура в толще высокоомной обмотки $T_{во}, ^\circ\text{C}$				
$T_{доп}, ^\circ\text{C}$	$T_o, ^\circ\text{C}$	$\delta_{кр} \cdot 10^{-3}, \text{ м}$	4	5,5	7	8,5	10
		$P_{мх.кр}, \text{ Н}$					
115	40	10	112	112	112	112	112
		17,5	112	112	112	112	112
		25	112	112	112	112	112
		32,5	112	112	112	112	112
		40	112	112	112	112	112
	85	10	112	112	112	112	112
		17,5	112	112	112	112	112
		25	112	112	112	112	112
		32,5	112	112	112	112	112
		40	112	112	112	112	112
155	40	10	151	151	151	151	151
		17,5	151	151	151	151	151
		25	151	151	151	151	151
		32,5	151	151	151	151	151
		40	151	151	151	151	151
	85	10	151	151	151	151	151
		17,5	151	151	151	151	151
		25	151	151	151	151	151
		32,5	151	151	151	151	151
		40	151	151	151	151	151

Таблица 2.39 – Результаты минимизации критерия «габаритный объем электромагнита» при $R_{мх}^*=9$, $K_{max}=1,80$, $K_{з.но}=0,525$, $K_{в.но}=0,38$, $K=0,3$

Исходные данные проектирования			Среднеобъемная температура в толще высокоомной обмотки $T_{во}, ^\circ\text{C}$				
$T_{доп}, ^\circ\text{C}$	$T_o, ^\circ\text{C}$	$\delta_{кр} \cdot 10^{-3}, \text{ м}$	4	5,5	7	8,5	10
		$P_{мх.кр}, \text{ Н}$					
115	40	10	111	111	111	111	111
		17,5	111	111	111	111	111
		25	111	111	111	111	111
		32,5	111	111	111	111	111
		40	111	111	111	111	111
	85	10	111	111	111	111	111
		17,5	111	111	111	111	111
		25	111	111	111	111	111
		32,5	111	111	111	111	111
		40	111	111	111	111	111
155	40	10	150	150	150	150	150
		17,5	150	150	150	150	150
		25	150	150	150	150	150
		32,5	150	150	150	150	150
		40	150	150	150	150	150
	85	10	150	150	150	150	150
		17,5	150	150	150	150	150
		25	150	150	150	150	150
		32,5	150	150	150	150	150
		40	150	150	150	150	150

Таблица 2.40 – Результаты минимизации критерия «объем активных материалов электромагнита» при $R_{мх}^*=9$, $K_{max}=1,80$, $K_{з.но}=0,525$, $K_{в.но}=0,38$, $K=0,3$

Исходные данные проектирования			Минимальный объем активных материалов электромагнита $V_a, \text{ см}^3$				
$T_{доп}, ^\circ\text{C}$	$T_o, ^\circ\text{C}$	$\delta_{кр} \cdot 10^{-3}, \text{ м}$	4	5,5	7	8,5	10
		$P_{мх.кр}, \text{ Н}$					
115	40	10	38,96	51,16	67,07	101,4	183,5
		17,5	47,04	62,71	78,04	107,8	182,2
		25	56,33	73,5	87,9	114,5	180,9
		32,5	66,9	85,6	98,6	121,5	179,7
		40	78,96	99,2	110,2	128,8	178,5
	85	10	52,82	75,84	102,7	153,7	275,3
		17,5	62,93	88,2	114,7	162,4	273,6
		25	74,4	102,1	127,8	171,5	271,9
		32,5	87,4	117,6	141,9	180,9	270,2
		40	102,1	134,7	157,2	190,8	268,5
155	40	10	29,2	37,72	46,9	67,43	123,4
		17,5	35,7	45,2	53,6	72,2	122,5
		25	43,3	53,6	61,1	77,1	121,5
		32,5	52,0	63,2	69,3	82,3	120,6
		40	62,0	74,1	78,3	87,8	119,7
	85	10	40,4	55,5	72,5	106,6	192,7
		17,5	48,7	65,3	81,8	113,3	191,4
		25	58,2	76,44	91,9	120,2	190,1
		32,5	69,1	88,9	103,0	127,5	189,0
		40	81,4	102,9	115,0	135,0	187,5

Таблица 2.41 – Результаты минимизации критерия «габаритный объем электромагнита» при $R_{мх}^*=9$, $K_{max}=1,80$, $K_{з.но}=0,525$, $K_{в.но}=0,38$, $K=0,3$

Исходные данные проектирования			Габаритный объем электромагнита				
$T_{доп}, ^\circ C$	$T_o, ^\circ C$	$\delta_{кр} \cdot 10^{-3}, м$	$V_{габ}, см^3$				
		$P_{мх.кр}, Н$	4	5,5	7	8,5	10
115	40	10	191,2	214,4	207,3	208,9	255,8
		17,5	205,7	234,6	231,1	236,7	292,6
		25	221,0	256,2	257,0	267,3	333,1
		32,5	237,2	279,2	284,8	300,6	377,8
		40	254,2	303,8	314,8	337,1	426,7
	85	10	255,2	305,3	316,6	339,3	429,7
		17,5	273,2	331,5	349,2	379,1	483,6
		25	292,1	359,5	384,2	422,4	542,4
		32,5	312,0	389,1	421,7	469,2	606,4
		40	332,9	420,6	461,9	519,8	675,8
155	40	10	149,2	157,5	142,5	135,0	159,8
		17,5	161,3	173,6	160,5	155,2	185,8
		25	174,1	190,9	180,2	177,5	214,8
		32,5	187,6	209,5	201,6	202,2	247,1
		40	201,9	229,3	224,9	229,4	282,9
	85	10	202,8	230,5	226,3	231,1	285,1
		17,5	217,9	251,8	251,7	261,0	324,9
		25	233,9	274,6	279,1	293,9	368,7
		32,5	250,8	298,9	308,8	329,7	416,8
		40	268,5	324,7	340,7	368,7	469,5

2.3.2.4 Анализ влияния на оптимальные параметры электромагнита исходных данных проектирования по критериям «установочная площадь электромагнита» и «габаритный объем электромагнита»

Оптимальная величина магнитной индукции в поперечной плоскости симметрии ярма при срабатывании электромагнита фактически одинакова при минимизации критериев «габаритный объем электромагнита» (таблица 2.21), «установочная площадь электромагнита» (таблица 2.42) и находится в диапазоне 1,74-1,57 Тл и практически не зависит от температуры окружающей среды и допустимой температуры нагрева обмоток.

Оптимальная величина магнитной индукции в сечении ярма, расположенном в поперечной плоскости симметрии при возврате изменяется в пределах 0,98-1,35 Тл (таблицы 2.23, 2.43). Указанные диапазоны изменения магнитных индукций свидетельствуют, что магнитные системы являются нелинейными за исключением области изменения критического механического

усилия 10-32 Н и критических зазоров от 7 до 10 мм при допустимых температурах нагрева 115, 155 °С.

Магнитодвижущая сила срабатывания при критерии оптимизации «установочная площадь электромагнита» больше на 100 А в диапазоне изменения критического рабочего зазора от 4 до 7 мм и на 200 А – от 7 до 10 мм по сравнению с критерием «габаритный объем электромагнита». Эти соотношения не зависят от температуры окружающей среды и допустимой температурой нагрева (таблицы 2.25, 2.44). Магнитодвижущая сила при возврате больше на 50 А при минимизации установочной площади по сравнению с минимизацией габаритного объема (таблицы 2.27, 2.45) во всем диапазоне изменения критических величин механического усилия и рабочего зазора.

Мощность в режиме пуска при минимизации установочной площади больше на 30-50 Вт по сравнению с минимизацией габаритного объема при допустимой температуре нагрева 115 °С (таблицы 2.29, 2.46). При допустимой температуре 155 °С разность пусковой мощности составляет 60-80 Вт.

Величины мощности, потребляемой низкоомными обмотками в режиме удержания при данных критериях оптимальности, отличаются не более чем на 10-15% (таблица 2.31, 2.47).

С увеличением критического механического усилия разность величин мощности, потребляемой высокоомными обмотками в режиме удержания при данных критериях оптимальности, изменяется от 20 до 7 % (таблицы 2.33, 2.48).

Кратность числа витков при изменении критического рабочего зазора от 4 до 10 мм для двух сравниваемых критериев оптимальности изменяется от 2 до 4,8 (таблица 2.34, 2.49). При этом для критерия «установочная площадь электромагнита» кратность зависит от температуры окружающей среды, тогда как для критерия «габаритный объем электромагнита» кратность не является зависимой от температуры окружающей среды и допустимой температуры нагрева.

Среднеобъемная температура низкоомных и высокоомных обмоток для сравниваемых критериев оптимизации практически одинакова (таблицы 2.37, 2.39

и таблицы 2.50, 2.51 соответственно).

Таблица 2.42 – Результаты минимизации критерия «установочная площадь электромагнита» при $P_{\text{мх}}^*=9$, $K_{\text{мах}}=1,80$, $K_{\text{з.но}}=0,525$, $K_{\text{з.во}}=0,38$, $K=0,3$

Исходные данные проектирования			Оптимальная индукция в основании сердечников при срабатывании $B_{\text{о.ср.опт}}$, Тл				
$T_{\text{доп}}$, °С	$T_{\text{о}}$, °С	$\delta_{\text{кр}} \cdot 10^{-3}$, М $P_{\text{мх.кр}}$, Н	4	5,5	7	8,5	10
115	40	10	1,70	1,67	1,65	1,62	1,59
		17,5	1,67	1,65	1,63	1,62	1,60
		25	1,63	1,63	1,62	1,62	1,61
		32,5	1,60	1,61	1,61	1,62	1,62
		40	1,57	1,59	1,60	1,62	1,63
	85	10	1,75	1,73	1,70	1,67	1,65
		17,5	1,72	1,70	1,69	1,67	1,66
		25	1,69	1,68	1,68	1,67	1,67
		32,5	1,66	1,66	1,67	1,67	1,68
		40	1,62	1,64	1,65	1,67	1,68
155	40	10	1,70	1,67	1,65	1,62	1,59
		17,5	1,67	1,65	1,63	1,62	1,60
		25	1,63	1,63	1,62	1,62	1,61
		32,5	1,60	1,61	1,61	1,62	1,62
		40	1,57	1,59	1,60	1,62	1,63
	85	10	1,75	1,73	1,70	1,67	1,65
		17,5	1,72	1,70	1,69	1,67	1,66
		25	1,69	1,68	1,68	1,67	1,67
		32,5	1,66	1,66	1,67	1,67	1,68
		40	1,62	1,64	1,65	1,67	1,68

Таблица 2.43 – Результаты минимизации критерия «установочная площадь электромагнита» при $P_{\text{мх}}^*=9$, $K_{\text{мах}}=1,80$, $K_{\text{з.но}}=0,525$, $K_{\text{з.во}}=0,38$, $K=0,3$

Исходные данные проектирования			Оптимальная индукция в основании сердечников при отпуске $B_{\text{о.отп.опт}}$, Тл				
$T_{\text{доп}}$, °С	$T_{\text{о}}$, °С	$\delta_{\text{кр}} \cdot 10^{-3}$, М $P_{\text{мх.кр}}$, Н	4	5,5	7	8,5	10
115	40	10	1,19	1,14	1,09	1,03	0,98
		17,5	1,23	1,18	1,13	1,07	1,02
		25	1,27	1,21	1,16	1,11	1,06
		32,5	1,30	1,25	1,20	1,14	1,09
		40	1,33	1,27	1,22	1,17	1,12
	85	10	1,12	1,07	1,01	0,96	0,91
		17,5	1,16	1,11	1,05	1,00	0,95
		25	1,19	1,14	1,09	1,04	0,99
		32,5	1,23	1,17	1,12	1,07	1,02
		40	1,25	1,20	1,15	1,10	1,05
155	40	10	1,25	1,20	1,15	1,10	1,05
		17,5	1,29	1,24	1,19	1,14	1,09
		25	1,33	1,28	1,23	1,18	1,13
		32,5	1,36	1,31	1,26	1,21	1,16
		40	1,39	1,34	1,29	1,24	1,19
	85	10	1,18	1,13	1,08	1,03	0,98
		17,5	1,22	1,17	1,12	1,07	1,02
		25	1,26	1,21	1,16	1,11	1,05
		32,5	1,29	1,24	1,19	1,14	1,09
		40	1,32	1,27	1,22	1,17	1,11

Таблица 2.44 – Результаты минимизации критерия «установочная площадь электромагнита» при $R_{мх}^*=9$, $K_{max}=1,80$, $K_{з.но}=0,525$, $K_{з.во}=0,38$, $K=0,3$

Исходные данные проектирования			Оптимальная МДС отпускания электромагнита				
$T_{доп}, ^\circ C$	$T_o, ^\circ C$	$\delta_{кр} \cdot 10^{-3}, м$	$F_{ср.опт}, А$				
		$P_{мх.кр}, Н$	4	5,5	7	8,5	10
115	40	10	1919	2230	2565	2924	3306
		17,5	2441	2845	3281	3747	4245
		25	2803	3277	3789	4337	4923
		32,5	3068	3599	4171	4786	5443
		40	3265	3842	4466	5136	5854
	85	10	1919	2230	2565	2924	3306
		17,5	2441	2845	3281	3747	4245
		25	2803	3277	3789	4337	4923
		32,5	3068	3599	4171	4786	5443
		40	3265	3842	4466	5136	5854
155	40	10	1919	2230	2565	2924	3306
		17,5	2441	2845	3281	3747	4245
		25	2803	3277	3789	4337	4923
		32,5	3068	3599	4171	4786	5443
		40	3265	3842	4466	5136	5854
	85	10	1919	2230	2565	2924	3306
		17,5	2441	2845	3281	3747	4245
		25	2803	3277	3789	4337	4923
		32,5	3068	3599	4171	4786	5443
		40	3265	3842	4466	5136	5854

Таблица 2.45 – Результаты минимизации критерия «установочная площадь электромагнита» при $R_{мх}^*=9$, $K_{max}=1,80$, $K_{з.но}=0,525$, $K_{з.во}=0,38$, $K=0,3$

Исходные данные проектирования			Оптимальная МДС отпускания электромагнита				
$T_{доп}, ^\circ C$	$T_o, ^\circ C$	$\delta_{кр} \cdot 10^{-3}, м$	$F_{отп.опт}, А$				
		$P_{мх.кр}, Н$	4	5,5	7	8,5	10
115	40	10	550	501	468	451	450
		17,5	701	636	592	569	568
		25	808	731	679	652	650
		32,5	892	804	744	713	711
		40	961	863	797	763	761
	85	10	527	478	445	427	428
		17,5	670	605	561	539	537
		25	771	694	642	615	613
		32,5	850	762	702	671	669
		40	914	816	750	716	714
155	40	10	574	525	492	475	474
		17,5	733	668	624	601	600
		25	847	769	717	690	688
		32,5	936	848	788	757	755
		40	1010	912	846	811	809
	85	10	551	502	469	452	450
		17,5	702	637	593	571	569
		25	810	732	680	653	651
		32,5	894	805	746	715	713
		40	963	865	799	765	762

Таблица 2.46 – Результаты минимизации критерия «установочная площадь электромагнита» при $R_{мх}^*=9$, $K_{max}=1,80$, $K_{з.но}=0,525$, $K_{з.во}=0,38$, $K=0,3$

Исходные данные проектирования			Оптимальная мощность потребляемая электромагнитом при пуске $P_{п.опт}$, Вт				
$T_{доп}$, °C	T_o , °C	$\delta_{кр} \cdot 10^{-3}$, м	4	5,5	7	8,5	10
		$P_{мх.кр}$, Н					
115	40	10	120	159	215	292	394
		17,5	188	252	344	470	637
		25	240	325	448	616	841
		32,5	278	380	529	735	1010
		40	304	421	592	828	1146
	85	10	77	106	149	209	289
		17,5	119	167	237	334	466
		25	151	214	307	436	612
		32,5	173	249	361	518	731
		40	188	274	401	580	826
155	40	10	195	247	323	424	557
		17,5	308	394	518	686	905
		25	397	512	679	904	1200
		32,5	464	604	808	1084	1447
		40	513	675	909	1228	1649
	85	10	130	170	229	310	416
		17,5	203	270	367	499	673
		25	260	349	478	655	889
		32,5	301	409	566	781	1068
		40	330	454	633	881	1213

Таблица 2.47 – Результаты минимизации критерия «установочная площадь электромагнита» при $R_{мх}^*=9$, $K_{max}=1,80$, $K_{з.но}=0,525$, $K_{з.во}=0,38$, $K=0,3$

Исходные данные проектирования			Мощность потребляемая низкоомной обмоткой $P_{но.опт}$, Вт				
$T_{доп}$, °C	T_o , °C	$\delta_{кр} \cdot 10^{-3}$, м	4	5,5	7	8,5	10
		$P_{мх.кр}$, Н					
115	40	10	2,00	1,17	0,76	0,56	0,5
		17,5	3,22	1,86	1,19	0,87	0,77
		25	4,25	2,44	1,54	1,12	0,98
		32,5	5,16	2,93	1,83	1,32	1,16
		40	5,98	3,36	2,08	1,50	1,30
	85	10	2,00	1,17	0,76	0,56	0,5
		17,5	3,22	1,86	1,19	0,87	0,77
		25	4,25	2,44	1,54	1,12	0,98
		32,5	5,16	2,93	1,83	1,32	1,16
		40	5,98	3,36	2,08	1,50	1,30
155	40	10	2,39	1,43	0,95	0,71	0,63
		17,5	3,85	2,29	1,49	1,12	0,99
		25	5,11	3,00	1,94	1,44	1,27
		32,5	6,21	3,62	2,32	1,71	1,51
		40	7,22	4,17	2,66	1,95	1,71
	85	10	2,39	1,43	0,95	0,71	0,63
		17,5	3,85	2,29	1,49	1,12	0,99
		25	5,11	3,00	1,94	1,44	1,27
		32,5	6,21	3,62	2,32	1,71	1,51
		40	7,22	4,17	2,66	1,95	1,71

Таблица 2.48 – Результаты минимизации критерия «установочная площадь электромагнита» при $R_{мх}^*=9$, $K_{мак}=1,80$, $K_{з.но}=0,525$, $K_{з.во}=0,38$, $K=0,3$

Исходные данные проектирования			Мощность потребляемая высокоомной обмоткой $P_{во.опт}$, Вт				
$T_{доп}$, °C	T_0 , °C	$\delta_{кр} \cdot 10^{-3}$, м	4	5,5	7	8,5	10
		$P_{мх.кр}$, Н					
115	40	10	13,67	13,67	13,67	13,67	13,67
		17,5	21,20	21,20	21,20	21,20	21,20
		25	27,03	27,03	27,03	27,03	27,03
		32,5	31,62	31,62	31,62	31,62	31,62
		40	35,33	35,33	35,33	35,33	35,33
	85	10	11,43	11,43	11,43	11,43	11,43
		17,5	17,61	17,61	17,61	17,61	17,61
		25	22,33	22,33	22,33	22,33	22,33
		32,5	25,99	25,99	25,99	25,99	25,99
		40	28,90	28,90	28,90	28,90	28,90
155	40	10	18,02	18,02	18,02	18,02	18,02
		17,5	28,16	28,16	28,16	28,16	28,16
		25	36,19	36,19	36,19	36,19	36,19
		32,5	42,65	42,65	42,65	42,65	42,65
		40	48,00	48,00	48,00	48,00	48,00
	85	10	15,24	15,24	15,24	15,24	15,24
		17,5	23,70	23,70	23,70	23,70	23,70
		25	30,31	30,31	30,31	30,31	30,31
		32,5	35,57	35,57	35,57	35,57	35,57
		40	39,86	39,86	39,86	39,86	39,86

Таблица 2.49 – Результаты минимизации критерия «установочная площадь электромагнита» при $R_{мх}^*=9$, $K_{мак}=1,80$, $K_{з.но}=0,525$, $K_{з.во}=0,38$, $K=0,3$

Исходные данные проектирования			Кратность числа витков n				
$T_{доп}$, °C	T_0 , °C	$\delta_{кр} \cdot 10^{-3}$, м	4	5,5	7	8,5	10
		$P_{мх.кр}$, Н					
115	40	10	2,07	2,59	3,22	3,94	4,79
		17,5	2,07	2,59	3,22	3,94	4,79
		25	2,07	2,59	3,22	3,94	4,79
		32,5	2,07	2,59	3,22	3,94	4,79
		40	2,07	2,59	3,22	3,94	4,79
	85	10	1,74	2,20	2,75	3,40	4,16
		17,5	1,74	2,20	2,75	3,40	4,16
		25	1,74	2,20	2,75	3,40	4,16
		32,5	1,74	2,20	2,75	3,40	4,16
		40	1,74	2,20	2,75	3,40	4,16
155	40	10	2,07	2,59	3,22	3,94	4,79
		17,5	2,07	2,59	3,22	3,94	4,79
		25	2,07	2,59	3,22	3,94	4,79
		32,5	2,07	2,59	3,22	3,94	4,79
		40	2,07	2,59	3,22	3,94	4,79
	85	10	1,74	2,20	2,75	3,40	4,16
		17,5	1,74	2,20	2,75	3,40	4,16
		25	1,74	2,20	2,75	3,40	4,16
		32,5	1,74	2,20	2,75	3,40	4,16
		40	1,74	2,20	2,75	3,40	4,16

Таблица 2.50 – Результаты минимизации критерия «установочная площадь электромагнита» при $R_{мх}^*=9$, $K_{маx}=1,80$, $K_{з.но}=0,525$, $K_{з.во}=0,38$, $K=0,3$

Исходные данные проектирования			Среднеобъемная температура в толще низкоомной обмотки $T_{но}, ^\circ\text{C}$				
$T_{доп}, ^\circ\text{C}$	$T_0, ^\circ\text{C}$	$\delta_{кр} \cdot 10^{-3}, \text{ м}$	4	5,5	7	8,5	10
		$P_{мх.кр}, \text{ Н}$					
115	40	10	110	110	110	110	110
		17,5	110	110	110	110	110
		25	110	110	110	110	110
		32,5	110	110	110	110	110
		40	110	110	110	110	110
	85	10	110	110	110	110	110
		17,5	110	110	110	110	110
		25	110	110	110	110	110
		32,5	110	110	110	110	110
		40	110	110	110	110	110
155	40	10	149	149	149	149	149
		17,5	149	149	149	149	149
		25	149	149	149	149	149
		32,5	149	149	149	149	149
		40	149	149	149	149	149
	85	10	149	149	149	149	149
		17,5	149	149	149	149	149
		25	149	149	149	149	149
		32,5	149	149	149	149	149
		40	149	149	149	149	149

Таблица 2.51 – Результаты минимизации критерия «установочная площадь электромагнита» при $R_{мх}^*=9$, $K_{маx}=1,80$, $K_{з.но}=0,525$, $K_{з.во}=0,38$, $K=0,3$

Исходные данные проектирования			Среднеобъемная температура в толще высокоомной обмотки $T_{во}, ^\circ\text{C}$				
$T_{доп}, ^\circ\text{C}$	$T_0, ^\circ\text{C}$	$\delta_{кр} \cdot 10^{-3}, \text{ м}$	4	5,5	7	8,5	10
		$P_{мх.кр}, \text{ Н}$					
115	40	10	112	112	112	112	112
		17,5	112	112	112	112	112
		25	112	112	112	112	112
		32,5	112	112	112	112	112
		40	112	112	112	112	112
	85	10	112	112	112	112	112
		17,5	112	112	112	112	112
		25	112	112	112	112	112
		32,5	112	112	112	112	112
		40	112	112	112	112	112
155	40	10	151	151	151	151	151
		17,5	151	151	151	151	151
		25	151	151	151	151	151
		32,5	151	151	151	151	151
		40	151	151	151	151	151
	85	10	151	151	151	151	151
		17,5	151	151	151	151	151
		25	151	151	151	151	151
		32,5	151	151	151	151	151
		40	151	151	151	151	151

2.4 Выводы к разделу 2

1. Разработаны усовершенствованные методики проектного и оптимизационного расчетов, обеспечивающие расхождение между оптимизированными и аппроксимированными (рассчитанными по полиномам) значениями относительных размеров и параметров форсированных симметричных П-образных двухкатушечных четырехобмоточных электромагнитов постоянного тока не превышающее 7 %.

2. Отработана методика двухразового сканирования области факторного пространства при минимизации массы, объема, стоимости активных материалов, габаритного объема, установочной площади. Двухразовое сканирование области факторного пространства позволяет повысить точность определения оптимальных соразмерностей электромагнита и его параметров на 4 % относительно одноразового сканирования.

3. Полученные полиномиальные модели геометрических соразмерностей и параметров электромагнита позволяют обеспечить улучшение качества проектных работ, не требуют дополнительного обращения к оптимизационным процедурам и повышенной квалификации инженера-проектировщика.

4. Установлено, что функции оптимальных соразмерностей: 1) критического рабочего воздушного зазора, и высоты обмоток в долях диаметра сердечника независимо при минимизации по разным частным критериям оптимальности зависят от критического значения рабочего воздушного зазора, критического значения механической силы, кратности механического усилия в конечном положении якоря в долях ее критического значения, температуры окружающей среды, максимальной температуры в толще высокоомной обмотки (исключение составляет функция относительной высоты обмотки при минимизации по критерию «стоимость активных материалов», которая не зависит от критического значения механической силы); 2) относительной суммарной ширины низкоомной и высокоомной обмоток, относительной ширины низкоомной обмотки, относительного диаметра полюсного наконечника при минимизации объема и

стоимости активных материалов соответственно равные 0,45, 0,40 и 1,26; относительного диаметра полюсного наконечника при минимизации установочной площади равно 1,26; относительной ширины низкоомной обмотки, относительного диаметра полюсного наконечника при минимизации габаритного объема, равные 0,405 и 1,26 являются постоянными в выбранной области факторного пространства.

5. Проведенный сравнительный анализ влияния на оптимальные соразмерности исходных данных проектирования на примере сопоставления критериев «объем активных материалов электромагнита» (первый критерий) и «габаритный объем электромагнита» (второй критерий) позволил установить следующие соотношения:

- отношение значения высоты обмотки, полученной при оптимизации по первому критерию к значению высоты обмотки, полученной при оптимизации по второму критерию лежит в диапазоне 1,15-1,20;
- отношение значения суммарной ширины окна обмотки, полученной при оптимизации по второму критерию к значению суммарной ширины окна обмотки, полученной при оптимизации по первому критерию находится в диапазоне 1,20-1,50;
- отношение значения ширины намотки низкоомной обмотки, полученной при оптимизации по второму критерию к значению ширины намотки низкоомной обмотки, полученной при оптимизации по первому критерию изменяется в диапазоне 1,20-1,50;
- отношение значения расстояния между осями сердечников, полученного при оптимизации по первому критерию к значению расстояния между осями сердечников, полученного по второму критерию составляет приблизительно 1,06;
- отношение диаметров сердечников и диаметров полюсных наконечников при оптимизации соответственно по первому и второму критериям приблизительно равны единице.

РАЗДЕЛ 3 ПРАКТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Полиномиальные зависимости оптимальных соизмерностей и параметров форсированного П-образного двухкатушечного четырех-обмоточного электромагнита, полученные в разделе 2, использованы при выборе геометрии и оценке параметров приводных электромагнитов.

При разработке ударо- и вибростойкого указательного реле РУ31 и РУ32 принято целесообразным применение симметричного П-образного двухкатушечного электромагнита с поворотным уравновешенным якорем.

Модернизация электромеханического реле времени с часовым механизмом преследовала цель – достижение увеличения срока службы, повышения надежности функционирования, снижения потребляемой реле мощности.

3.1 Модернизация электромеханического реле времени с часовым механизмом

Реле времени предназначены для использования в схемах релейной защиты в качестве вспомогательного элемента для получения регулируемой выдержки времени.

Реле времени с часовым механизмом на постоянном (серии РВ100) и переменном оперативном (серии РВ200) токе серийно выпускаются ЗАО «Чебоксарский электроаппаратный завод» (ЗАО «ЧЭАЗ», г. Чебоксары) по техническим условиям ТУ 16-523.158-79. Условия эксплуатации и технические характеристики реле РВ 100, РВ 200 приведены в приложении А.

Основными потребителями реле РВ100 и РВ200 являются межрегиональные распределительные сетевые компании (МРСК), объединенные в ОАО «Холдинг МРСК». В связи с необходимостью реконструкции [1] релейной защиты автоматизированных подстанций 6-220 кВ ОАО «Холдинг МРСК» для обеспечения их надежной и бесперебойной работы в 2011 году была инициирована модернизация электромеханических реле времени с часовым

механизмом серий РВ100, РВ200. Модернизация реле направлялась на решение проблем, рассмотренных в таблице 3.1, а также на повышение их энергоэффективности.

Таблица 3.1 – Недостатки реле РВ100, РВ200 и варианты их решения

Проблема	Вариант решения	Параметр, единица измерения	Значение параметра	
			Старое реле	Новое реле
Быстрый износ часового механизма реле	Модернизация зубчатой передачи, изменение материала	Срок службы, лет	-	25
Быстрый износ контактной механики	Изменения материала контактной пары, изменение формы контактов и уменьшение контактного давления	Количество срабатываний: - без нагрузки - с нагрузкой	5000 2000	10000 4000
Выход из строя (перегорание) катушек реле	Повышение надежности катушек: изменение технологии намотки, применение обмоточного провода с более высоким температурным индексом, введение пропитки лаком МЛ92, разработка ограничителя перенапряжения (ОПН) для установки на вывода катушки, применение плавкого предохранителя в цепи катушки с целью защиты от длительного воздействия повышенного напряжения			

С целью снижения затрат на освоение производства модернизируемого реле, было проведено исследование возможности оптимизации втяжного электромагнита (рисунок 3.1) по потребляемой мощности с сохранением основных размеров деталей серийно изготавливаемого реле РВ100 [3, 15].

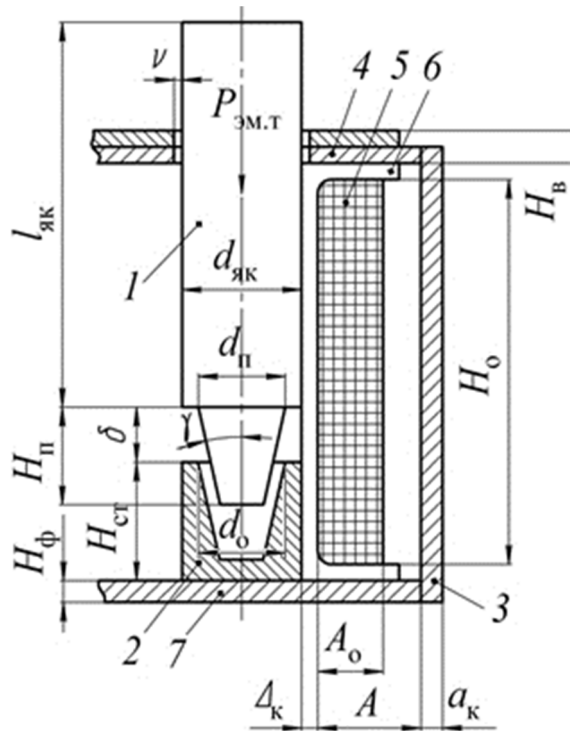


Рисунок 3.1 – эскиз втяжного электромагнита реле PB100:
 1 – якорь; 2 – стоп; 3 – корпус; 4 – воротничок; 5 – обмотка;
 6 – каркас; 7 – опорный фланец

Было сделано предположение о наличии оптимального угла γ конусности рабочего полюса втяжного якоря (рисунок 3.1), обеспечивающего наибольшее электромагнитное тяговое усилие при наименьшей магнитодвижущей силе срабатывания МДС (F). Исследование проводилось расчетным путем в программной среде [17] FEMM. Были приняты размеры серийно выпускаемого реле:

$$d_{\text{як}} = 14,5 \text{ мм}; d_{\text{п}} = 10 \text{ мм}; H_{\text{п}} = 12,5 \text{ мм}; 2\gamma = 30^\circ; H_{\text{ст}} = 14,5 \text{ мм};$$

$$a_{\text{ск}} = 3 \text{ мм}; (b_{\text{ск}} = 44 \text{ мм} - \text{ширина скобы}); H_0 = 48 \text{ мм}; A_0 = 9,5 \text{ мм};$$

$$A = 11,5 \text{ мм}; H_{\text{в}} = 3 \text{ мм}; \nu = 0,6 \text{ мм}; \Delta_{\text{к}} = 1,5 \text{ мм}; a_{\text{к}} = 3,5 \text{ мм};$$

$$l_{\text{як}} = 43,5 \text{ мм}; d_0 = 11 \text{ мм}.$$

Расчет выполнялся при следующих условиях: марка материала якоря и стопа – сталь 20; марка материала: корпуса, фланца, воротничка – сталь 08; размер $d_{\text{п}}$ оставался неизменным; угол γ конусности изменялся от 0° до 17° .

Результаты расчета тяговых характеристик при $F = 1000 \text{ А}$ [4] приведены на рисунке 3.2.

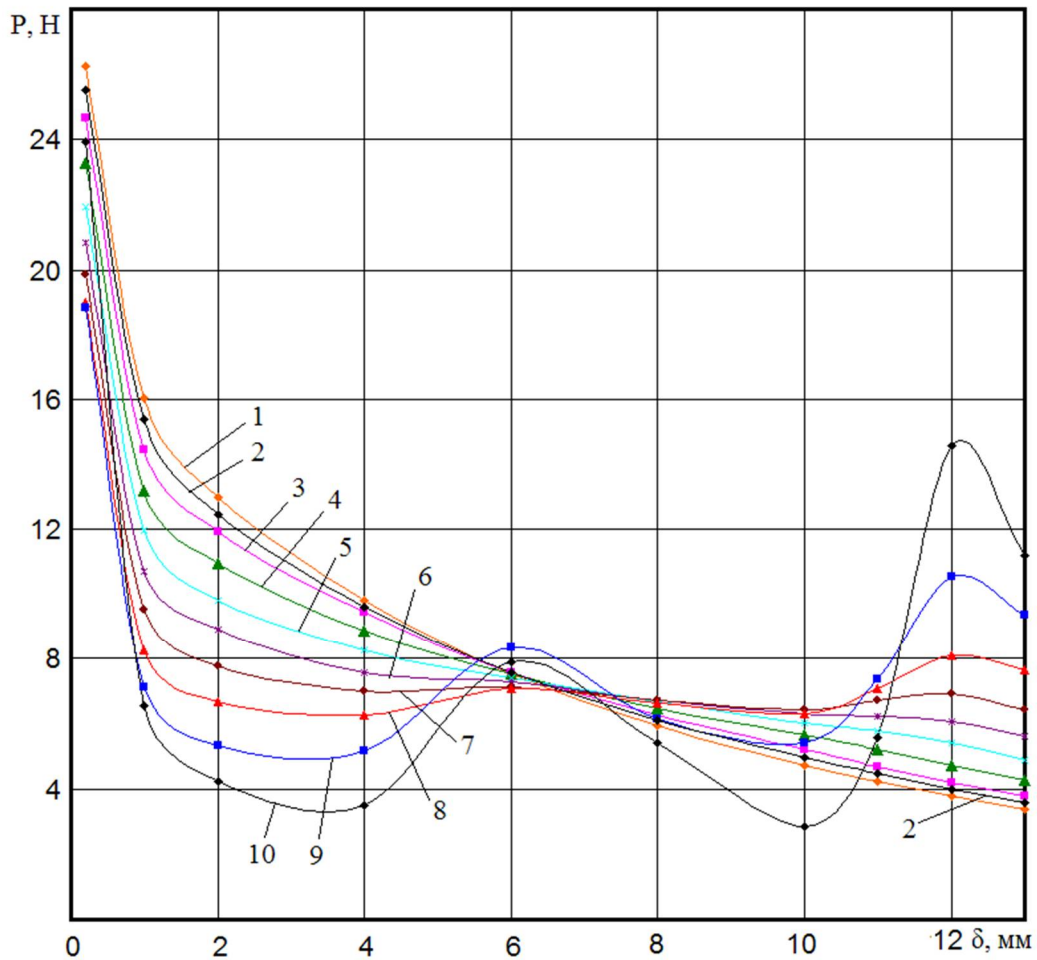


Рисунок 3.2 – Статические тяговые характеристики при $F = 1000 \text{ А}$ и γ :
 1 – 16° ; 2 – 15° ; 3 – 14° ; 4 – 12° ; 5 – 10° ; 6 – 8° ; 7 – 6° ; 8 – 4° ; 9 – 2° ; 10 – 0°

В серийно выпускаемом реле РВ100 угол γ конусности рабочего полюса втяжного якоря равен 15° , а магнитодвижущая сила срабатывания, определенная экспериментально, составляет 1030 А.

Проведенные исследования выявили, что оптимальным углом конусности рабочего полюса втяжного якоря является угол $\gamma = 8^\circ$ (рисунок 3.3), что подтверждено экспериментальными исследованиями [56]. Это позволило обеспечить срабатывание электромагнита при меньшей МДС (800 А) и снизить потребляемую мощность модернизированного электромеханического реле времени с часовым механизмом в 1,6 раза.

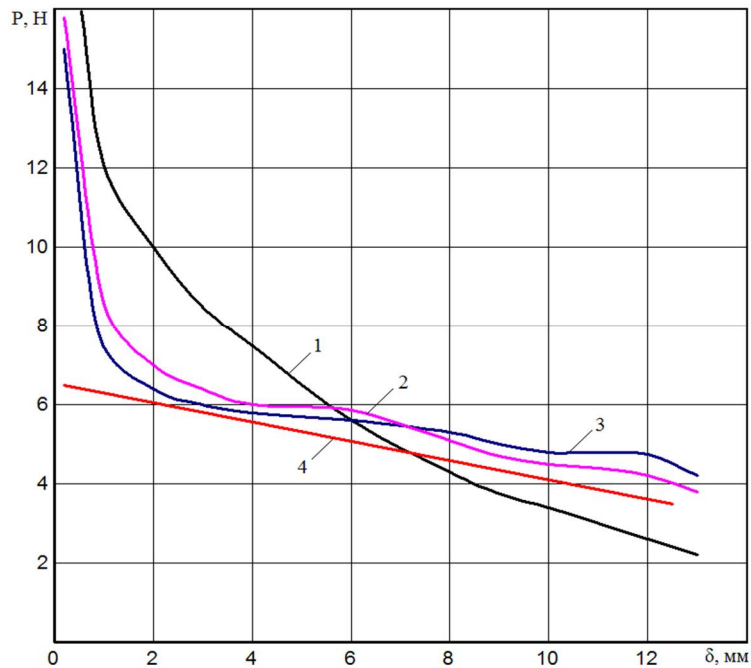


Рисунок 3.3 – Статические тяговые характеристики:

- 1 – при $\gamma=15^\circ$, $F=1000\text{A}$; 2 – при $\gamma=8^\circ$, $F=800\text{A}$; 3 – при $\gamma=7^\circ$, $F=800\text{A}$;
 4 – механическая характеристика электромагнита реле времени РВ-100

В результате модернизации были достигнуты параметры реле, указанные в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Технические характеристики модернизированного реле времени

Наименование параметра	Значения для реле	
	постоянного тока	переменного тока
Рабочее номинальное напряжение катушки, U_n , В	220	220
Коммутируемая мощность переключающих контактов - для постоянного тока (при токе не более 1А, постоянной времени 0,02 сек), Вт - для переменного тока (при токе не более 5А и коэффициенте мощности не менее 0,4), ВА	100	400
Коммутируемая мощность переключающих и замыкающих контактов: - для постоянного тока (при токе не более 1А, постоянной времени 0,02 сек), Вт	100	

Продолжение таблицы 3.2

Наименование параметра	Значения для реле	
	постоянного тока	переменного тока
Коммутируемая мощность переключающих и замыкающих контактов: - для переменного тока (при токе не более 5А и коэффициенте мощности не менее 0,4), ВА		400
Коммутируемая мощность скользящих контактов: - для постоянного тока (при токе не более 1А, постоянной времени 0,02 сек), Вт - для переменного тока (при токе не более 5А и коэффициенте мощности не менее 0,4), ВА	50	100
Длительный ток контактов - с выдержкой времени, А - переключающий контакт, А	5 3	5 3
Наименьший коммутируемый ток контактов, А При напряжении не менее (до и после испытаний на механическую износостойкость), В	0,01 24	0,01 24
Потребляемая мощность установившегося режима, не более (при втянутом якоре): - для реле постоянного тока, Вт - для реле переменного тока, ВА	15,0	12,5
Напряжение срабатывания (в диапазоне рабочих температур), % от U_n , не более	70	80
Пульсации питающего напряжения, %, не более	10	
Термическая устойчивость, % от U_n	110	110
Время срабатывания контакта без выдержки времени, сек, не более	0,08	0,08
Время возврата подвижных частей в исходное положение, сек	0,15	0,15
Количество срабатываний при ресурсных испытаниях (средняя наработка на отказ) - без нагрузки (механический ресурс), циклов, не менее - с нагрузкой (коммутационный ресурс), циклов, не менее	10000 4000	10000 4000

Продолжение таблицы 3.2

Наименование параметра	Значения для реле	
	постоянного тока	переменного тока
Количество контактных пар:		
- скользящих	1	1
- замыкающих	1	1
- мгновенных переключающих	1	1
Интервал регулировки выдержки времени, сек	0,5...9	0,5...9
Основная погрешность времени срабатывания реле относительно уставки, не более (для диапазона 3 – 9 сек), %	4	4
Разброс времени срабатывания относительно уставки (для диапазона 3- 9 сек), %, не более	2,5	2,5
Дополнительная погрешность времени срабатывания реле в диапазоне температур – 40°С до +40°С, %, не более	2,5	2,5
Дополнительная погрешность после ресурсных испытаний на коммутационную износостойкость, %	5	5
Время замкнутого состояния проскальзывающего контакта, сек, не менее	0,25	0,25
Габаритные размеры реле, мм, не более	98×147×137	98×147×137
Масса, кг, не более	1,5	1,5

При разработке электромеханического реле времени с часовым механизмом (рисунок 3.4) были применены оригинальные технические решения, направленные на улучшение технических характеристик и повышение надежности [45, 47, 58]:

- Конструктивной особенностью реле является его снабжение пневматическим амортизатором одностороннего действия, обеспечивающим безударное воздействие якоря на рычаг при взводе часового механизма и свободный ход якоря в обратную сторону. Патент РФ на изобретение №2566533 «Электромеханическое реле времени» [102];

- Другой особенностью реле являются оригинальная контактная система и толкатель, закрепленный на выходном валу часового механизма. Патент на изобретение №2574956 «Электромеханическое реле времени» [103];
- Другой особенностью является использование втяжного электромагнита, который содержит якорь, катушку, магнитопровод с проходным фланцем и внутренним воротничком оригинальной формы, защищенный патентом на изобретение №2581040 «Втяжной электромагнит» [104].



Рисунок 3.4 – Внешний и общий виды разработанного электромеханического реле времени с часовым механизмом

3.2 Усовершенствование конструкции указательного реле

Указательные реле используются в качестве указателя действия схем защиты и автоматики.

ЗАО «ЧЭАЗ» (г. Чебоксары) серийно выпускаются указательные реле РУ21 и РУ21-1 по техническим условиям ТУ16-523.465-79 (рисунок 3.5). Указательные реле РУ21, применяются в цепях постоянного и переменного тока частотой 50 Гц,

а реле РУ21-1 в цепях постоянного тока. Условия эксплуатации и технические характеристики реле РУ21 и РУ21-1 приведены в приложении Б.



Рисунок 3.5 – Внешний вид реле указательного РУ21 и РУ21-1

Основными потребителями указательных реле РУ21 и РУ21-1 являются межрегиональные распределительные сетевые компании. В рамках инициированной в 2011 году ОАО «Холдинг МРСК» исследований, направленных на обеспечение надежной и бесперебойной работы электромеханических реле, планировалось решение проблем по реле РУ21 и РУ21-1, приведенных в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Недостатки реле РУ21 и РУ21-1 и варианты их решения

Проблема	Вариант решения	Параметр, единица измерения	Значение параметра	
			Старое реле	Новое реле
Частые самопроизвольные срабатывания реле	Повышение устойчивости реле к ударам и вибрациям в диапазоне частот 10-100 Гц	Ускорение, g, м/сек ²	0,5	2
Износ механической части реле	Модернизация конструкции, замена материала	Механическая износостойкость, циклов	5000	10000

В ходе выполнения исследований были разработаны реле РУ31 и РУ32 [58]. Данные реле лишены недостатков реле РУ21 и РУ21-1 и имеют повышенную визуализацию состояния реле «взведено»/«сработало» и обеспечивают возможность быстрой замены ранее снятых с производства реле РУ-1 и РЭУ11 за счет сохранения установочных и присоединительных размеров. Реле РУ31 имеет установочные и присоединительные размеры соответствующие реле РЭУ11, а реле РУ32 – соответствующие РУ-1 (рисунок 3.6).

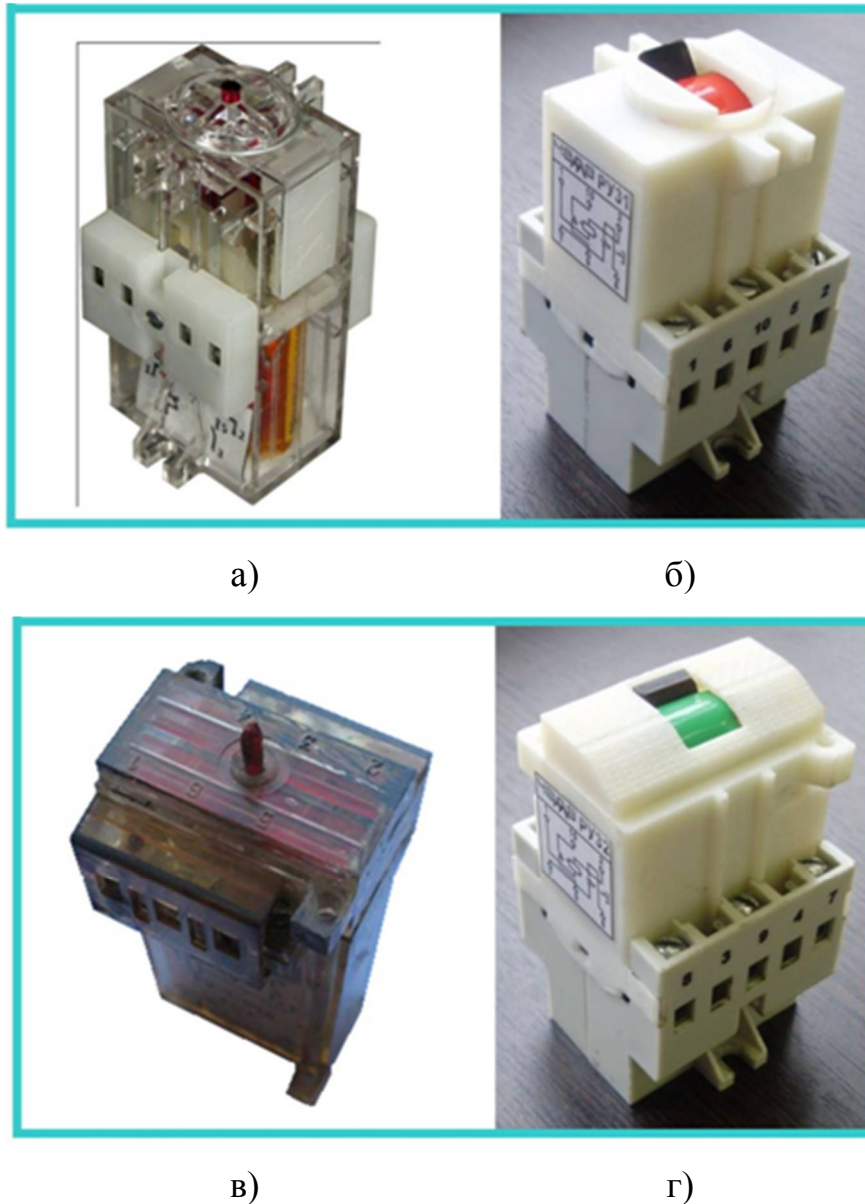


Рисунок 3.6 – внешний вид указательного реле:

а) РУ-1, б) РУ31, в) РЭУ11, г) РУ32

Реле РУ31 и РУ32 включают следующие основные узлы (рисунки 3.7 и 3.8): сборный корпус реле; электромагнитная система; узел сигнализации состояния реле («взведено»/«сработало»); группа контактная.

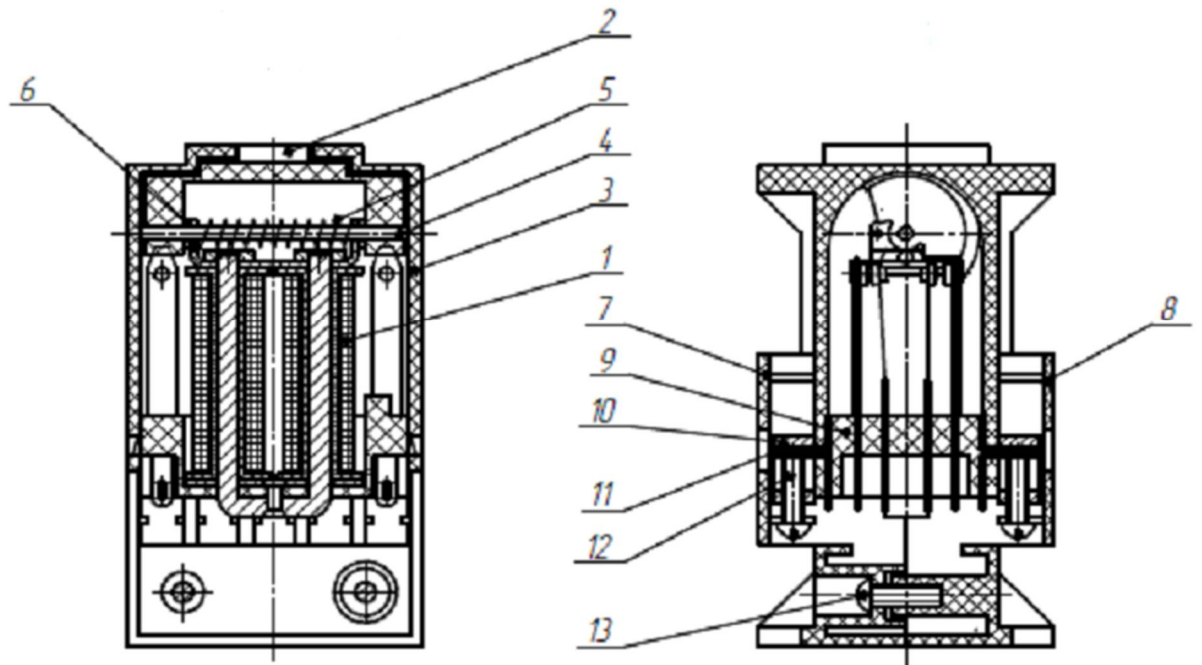


Рисунок 3.7 – указательное реле РУ31

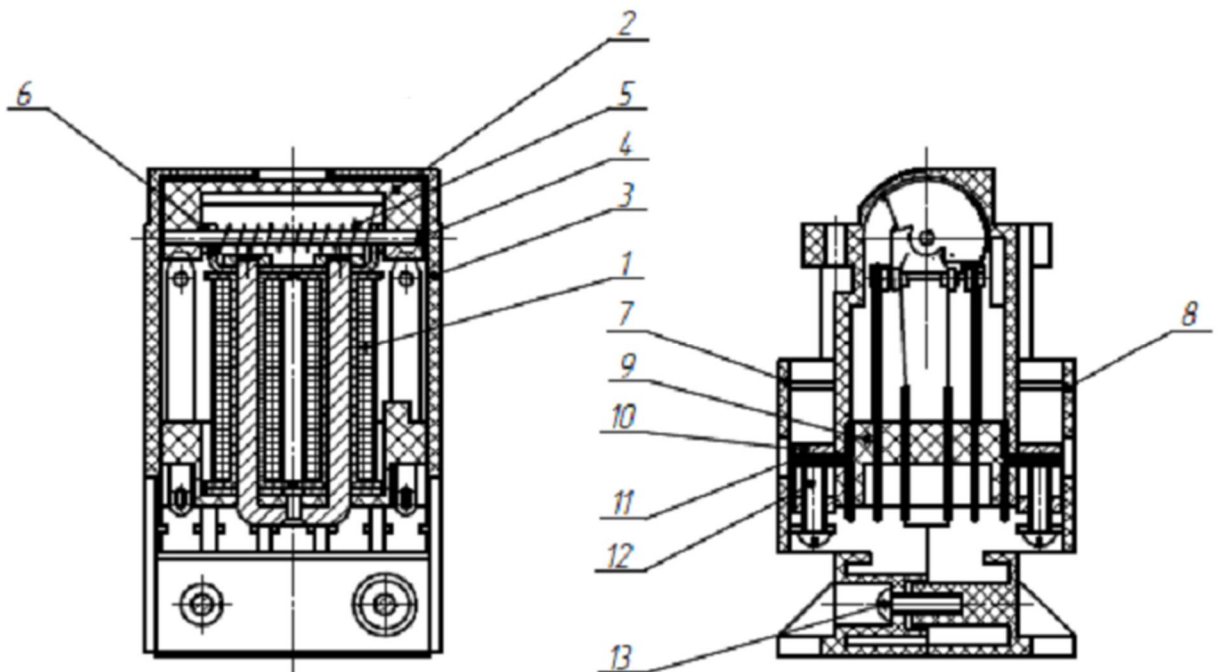


Рисунок 3.8 – указательное реле РУ32

Сборный корпус реле выполняет защитно-декоративную и несущую функции. Корпус состоит из колодки 9, двух оснований 7 и 8, скрепленных

винтами 13, и кожуха 3. Основные узлы реле монтируются на колодке 9. Верхняя часть кожуха 3 имеет прямоугольное окно, в котором находится флажок 2 механизма сигнализации состояния реле. Электромагнитная система состоит электромагнита 1, якоря и возвратной пружины. Электромагнит 1 содержит П-образный магнитопровод, на котором размещены две катушки с обмотками. Магнитопровод крепится к колодке 9 с помощью заклепки. Якорь электромагнитной системы выполнен в виде пластины, которая содержит изогнутый язычок. Изогнутый язычок играет роль защелки, которая входит в паз, расположенный на внутренней поверхности флажка 2. Узел сигнализации состояния реле содержит флажок 2, установленный с возможностью поворота на оси 4. Последняя размещена в отверстиях скобы 6, которая закреплена на концах магнитопровода электромагнита 1. На оси 4 расположена пружина кручения 5, один конец которой упирается в ступень флажка 2, а другой размещен в отверстии скобы 6. Флажок 2 имеет клавишу, с помощью которой производится ручное переключение флажка из положения «сработало» в положение «взведено». На торцевых частях флажка 2 имеются выступы, с помощью которых переключаются электрические контакты группы контактной. Группа контактная содержит две пары пластин, которые закреплены в колодке 9. Верхние концы контактных пластин расположены в зоне поворота переключающих выступов флажка 2. Концы контактных пластин, к которым присоединятся внешние провода, расположены в нижней полости колодки 9. Присоединение внешних проводов к контактным пластинам и обмоткам катушек осуществляется с помощью винта 12 и скоб 10, 11. При подаче напряжения якорь электромагнита 1 притягивается к полюсным наконечникам. В это время защелка якоря выходит из паза флажка 2, флажок начинает поворачиваться под действием пружины 5 и приходит в положение «сработало». При этом в окне кожуха 3 появляется красная сигнальная поверхность флажка 2. Возврат флажка в исходное положение производится вручную путем поворота флажка с помощью клавиши.

Разработанные конструкции указательных реле РУ31 и РУ32 имеют уравновешенный якорь, обеспечивающий повышение устойчивости реле к ударам

и вибрациям, что позволило решить проблему самопроизвольного срабатывания.

Особенности усовершенствованных указательных реле РУ31, РУ32 [45, 47]:

- 1) улучшение визуального восприятия сигнала реле;
- 2) повышение надежности реле путем обеспечения стабильной работы в условиях ударных и вибрационных нагрузок;
- 3) повышение удобства ручного переключения реле.

Конструктивные особенности реле РУ31 и РУ32 (рисунок 3.9) защищены патентом РФ на изобретение №2581046 «Указательное электромагнитное реле» [105].



Рисунок 3.9 – устройство узла сигнализации
указательного электромагнитного реле

3.3 Вакуумный контактор с прямоходовой траверсой, связанной с якорем электромагнита через рычаг

Вакуумные контакторы предназначены для использования в пускателях, станциях управления, для коммутации токов включения и отключения асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором и других приемников электроэнергии в системах дистанционного управления электроприводами.

Отечественными производителями вакуумных низковольтных контакторов являются ЗАО «ЧЭАЗ» (г. Чебоксары), АО «НПП «Контакт» (г. Саратов), ПО «Север» (г. Новосибирск). Вакуумные низковольтные контакторы отечественных производителей имеют сравнимые технические характеристики и в основном одинаковую кинематику, а именно, рычажный способ передачи перемещения от электромагнитной системы к подвижному выводу вакуумной камеры (рисунок 3.10).

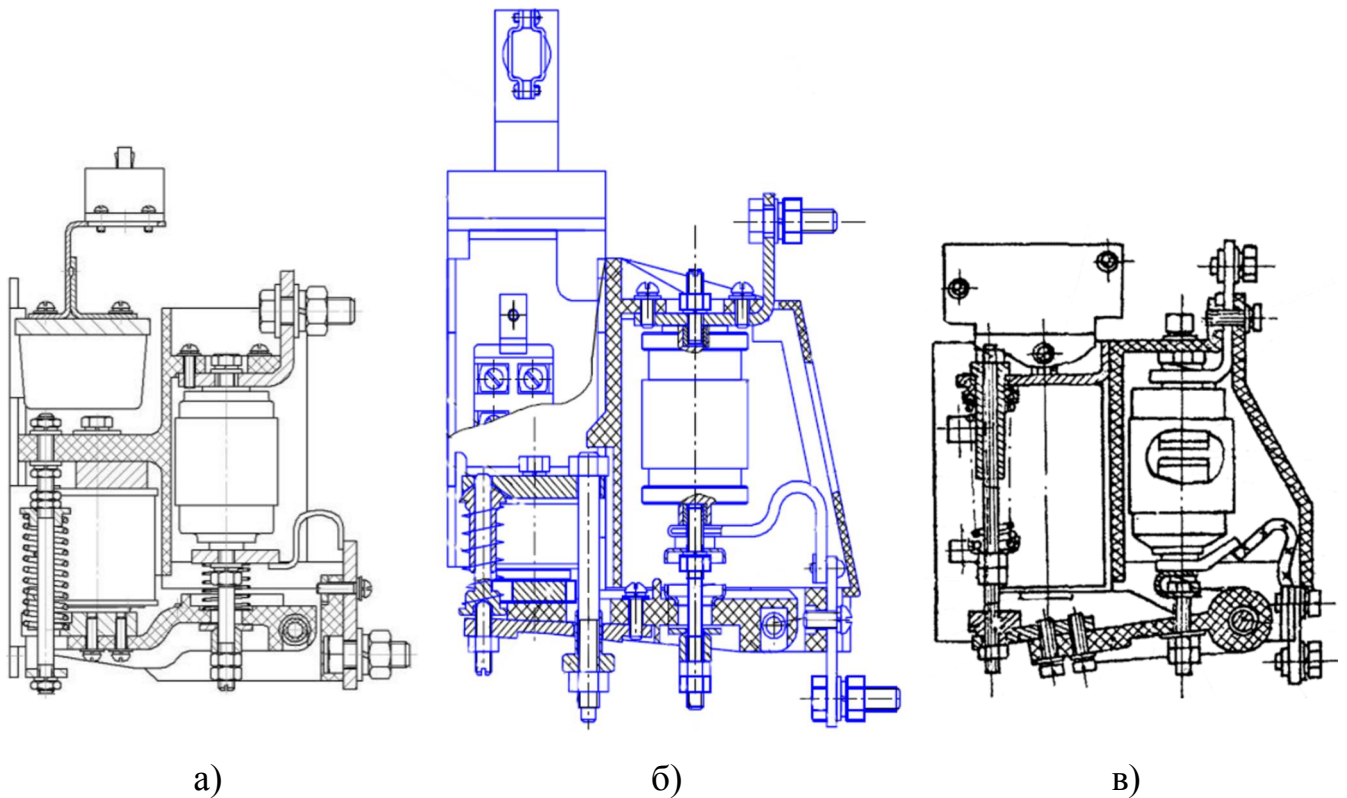


Рисунок 3.10 – Вакуумный низковольтный контактор:

а) серии КВ1,14 (ПО «Север, г. Новосибирск); б) серии КВТ-1,14 (АО «НПП «Контакт», г. Саратов); в) серии КВ1 (ЗАО «ЧЭАЗ», г. Чебоксары)

Технические характеристики низковольтных вакуумных контакторов:

- 1) Номинальный ток, А: от 160 до 1000 А;
- 2) Номинальное напряжение переменного тока 50 Гц, В: до 1140 В;
- 3) Потребляемая мощность, Вт / ВА:
 - при включении не более 660 / 660;
 - при удержании не более 25 / 60;

- 4) Количество полюсов по главной цепи: 2, 3;
- 5) Номинальное напряжение вспомогательных контактов: до 660 В;
- 6) Номинальный тепловой ток вспомогательных контактов: 10 А;
- 7) Степень защиты: IP00 по ГОСТ 14255-69;
- 8) Режим работы: продолжительный, прерывисто-продолжительный, повторно-кратковременный, кратковременный;
- 9) Климатическое исполнение У категория размещения «2» или В категории размещения «3» по ГОСТ 15150-69;
- 10) Рабочая температура окружающего воздуха: от -60 °С до +60 °С.

Недостатком вакуумных контакторов серии КВ1,14 (ПО «Север, г. Новосибирск), серии КВТ-1,14 (АО «НПП «Контакт», г. Саратов), серии КВ1 (ЗАО «ЧЭАЗ», г. Чебоксары) является их низкая надежность, обусловленная несоосным перемещением подвижного токоввода вакуумной камеры относительно неподвижного, из-за наличия изгибающего момента на подвижном токовводе вакуумной камеры при включении и отключении вакуумного контактора, в результате воздействия на подвижный токоввод рычага, совершающего поворотное движение. Несоблюдение соосного перемещения подвижного токоввода вакуумной камеры относительно неподвижного при работе вакуумного контактора приводит к затиранию, возможному заклиниванию подвижного токоввода внутри камеры и в дальнейшем к выходу ее из строя, что снижает срок службы аппарата в целом. Устранить указанный недостаток возможно исключением непосредственного воздействия рычага на подвижный токоввод вакуумной камеры. Один из вариантов подобного решения - это введение прямоходовой траверсы, обеспечивающей соосное перемещение подвижного токоввода вакуумной камеры.

Вакуумные контакторы с прямоходовой траверсой, связанной с якорем электромагнита через рычаг, серийно изготавливаются ЗАО «ЧЭАЗ» (г. Чебоксары) по техническим условиям БКЖИ.644535.004ТУ «Вакуумные низковольтные контакторы серии КВ2» (рисунок 3.11). Конструкция вакуумных контакторов серии КВ2 на 160 и 250 А защищена патентом №49356 [107].

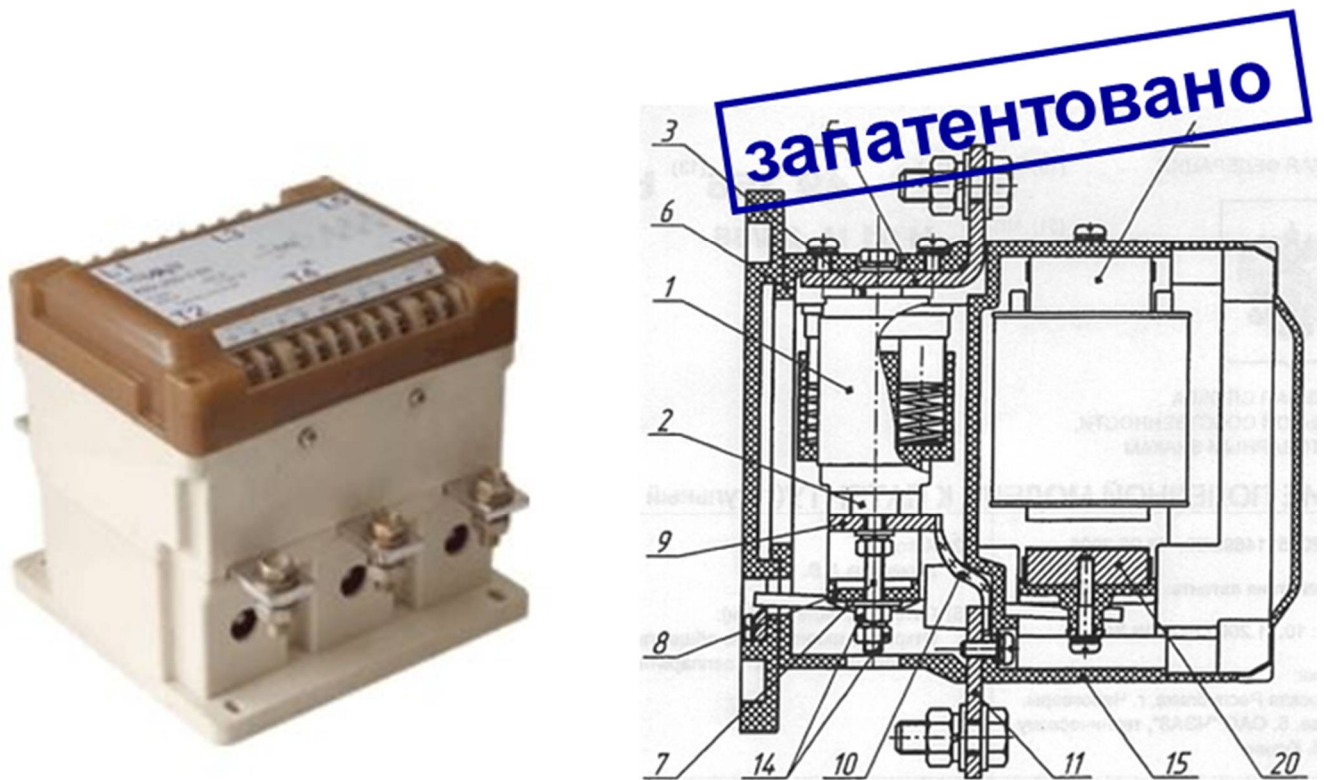


Рисунок 3.11 – Внешний и общий виды контактора серии KV2 на 160 и 250 А

Вакуумные контакторы KV2-160, KV2-250 имеют четырехобмоточную схему форсированного управления с последовательным соединением низкоомных обмоток, приведенную на рисунке 3.12. Сборная конструкция вакуумных контакторов KV2 на 160 и 250 А состоит из блока управления и блока главных контактов (рисунке 3.13). Блок управления содержит П-образный двухкатушечный четырехобмоточный электромагнит 1 постоянного тока и панель управления 2, закрепленные в корпусе 3. На панели управления размещены переключающий контакт 4 (S), конденсатор 5 (C), варисторы (RU1, RU2) и выпрямительный мост 6 (VD1). Блок главных контактов содержит вакуумные дугогасительные камеры 7, закрепленные со стороны неподвижных контактов через шины 8 к основанию 9, и прямоходовую траверсу 10, скользящую по направляющим 11 и воздействующую на подвижные контакты 14 вакуумных камер. Блоки управления и главных контактов механически связаны между собой. Перемещение от якоря 12 электромагнита передается траверсе с помощью рычагов 13.

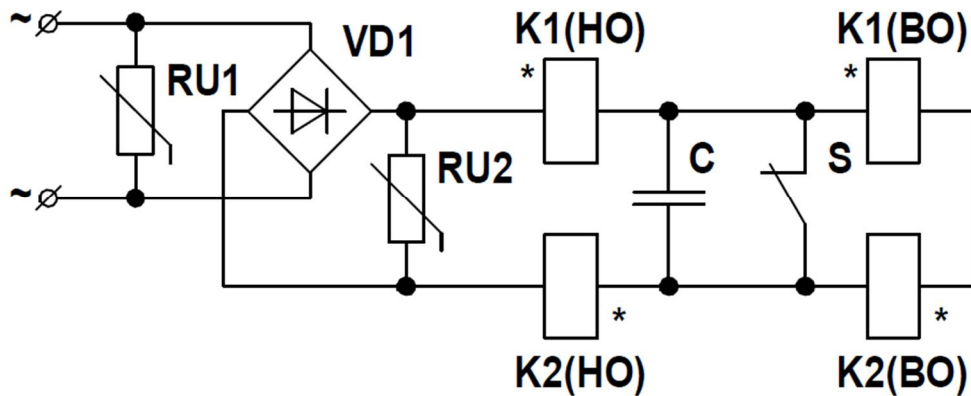


Рисунок 3.12 – Схема электрическая управления контактором KB2 на 160 и 250 А

На рисунке 3.12 приняты следующие обозначения элементов схемы:

K1(HO), K1(BO) – низкоомная и высокоомная обмотки первой катушки электромагнита контактора;

K2(HO), K2(BO) – низкоомная и высокоомная обмотки второй катушки электромагнита контактора;

S – контакт, механически связанный с якорем электромагнита контактора;

C – искрогасящий конденсатор;

VD1 – выпрямительный мост для преобразования переменного напряжения цепи питания в постоянное напряжение управления;

RU1, RU2 – варисторы, защищающие от перенапряжений выпрямительный мост VD1, как со стороны питания, так и со стороны обмоток управления.

В исходном положении контакт S замкнут (рисунок 3.12). При подаче напряжения управления ток протекает через пусковые низкоомные обмотки K1(HO) и K2(HO), якорь 12 (рисунок 3.13) начинает прямолинейное движение и через рычаги 13 воздействует на подвижные контакты камер, замыкая электрическую цепь. Контакт S размыкается, в цепь подключается добавочное сопротивление высокоомных обмоток K1(BO) и K2(BO), потребляемый ток снижается, вакуумный контактор переходит в режим удержания. Особенности четырехобмоточной схемы форсированного управления с последовательным соединением низкоомных обмоток подробно рассмотрены в разделе 1.3 настоящей диссертации (рисунок 1.4).

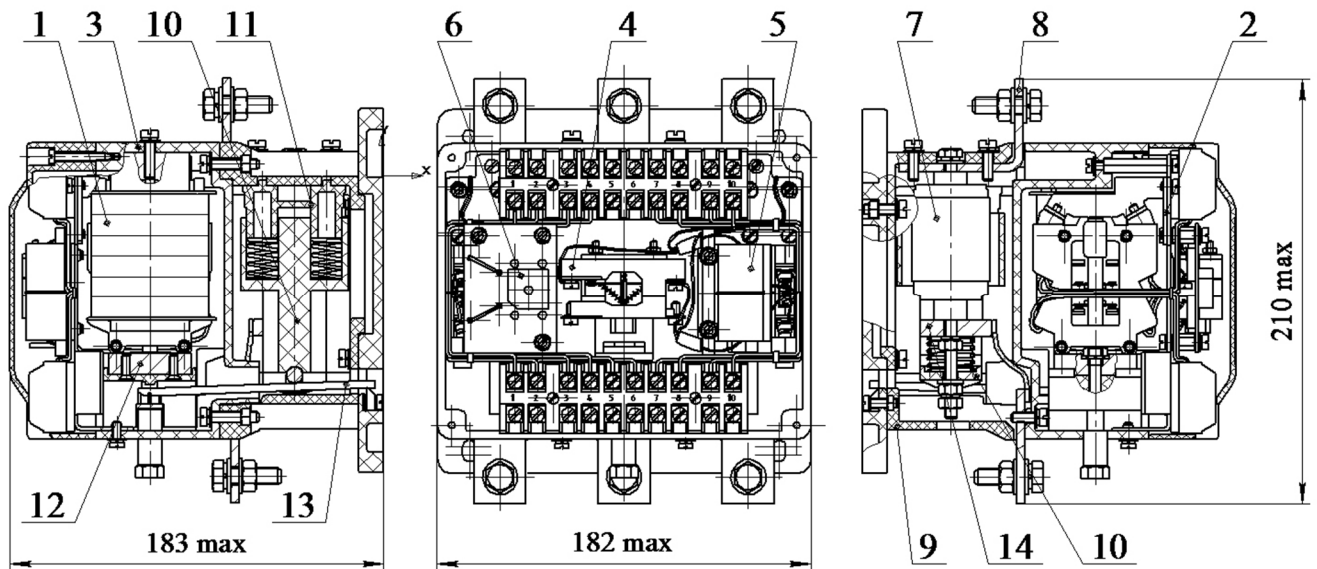


Рисунок 3.13 - Вакуумный контактор KB2 на 160 и 250 А

3.4 Вакуумный контактор с прямоходовой траверсой непосредственно связанной с якорем электромагнита

Прямоходовая траверса, обеспечивающая соосное перемещение подвижного токоввода вакуумной камеры относительно неподвижного, может быть непосредственно связана с якорем электромагнита. В этом случае, электромагнит размещается по направлению перемещения подвижного токоввода вакуумной камеры, а ход якоря электромагнита равен суммарной величине раствора и провала вакуумной камеры.

Вакуумные контакторы с прямоходовой траверсой непосредственно связанной с якорем электромагнита серийно изготавливаются ЗАО «ЧЭАЗ» (г. Чебоксары) по техническим условиям БКЖИ.644535.004ТУ «Вакуумные низковольтные контакторы серии KB2» (рисунок 3.14). Конструкция вакуумных контакторов серии KB2 на 630 А защищена патентом №82065 [108].

Вакуумный низковольтный контактор KB2 на 630 А имеет моноблочную конструкцию, все элементы которой собираются на корпусе 1 (рисунок 3.15). В верхней части корпуса 1 установлены вакуумные дугогасительные камеры 2, подвижные контакты которых связаны с якорем 3 П-образного двухкатушечного

электромагнита 4 постоянного тока через изоляционную траверсу 5. Сбоку корпуса 1 крепится электронный блок включения 7, формирующий ток катушки. В исходном состоянии контакты вакуумных дугогасительных камер 2 удерживаются в разомкнутом положении с помощью возвратных пружин 6.

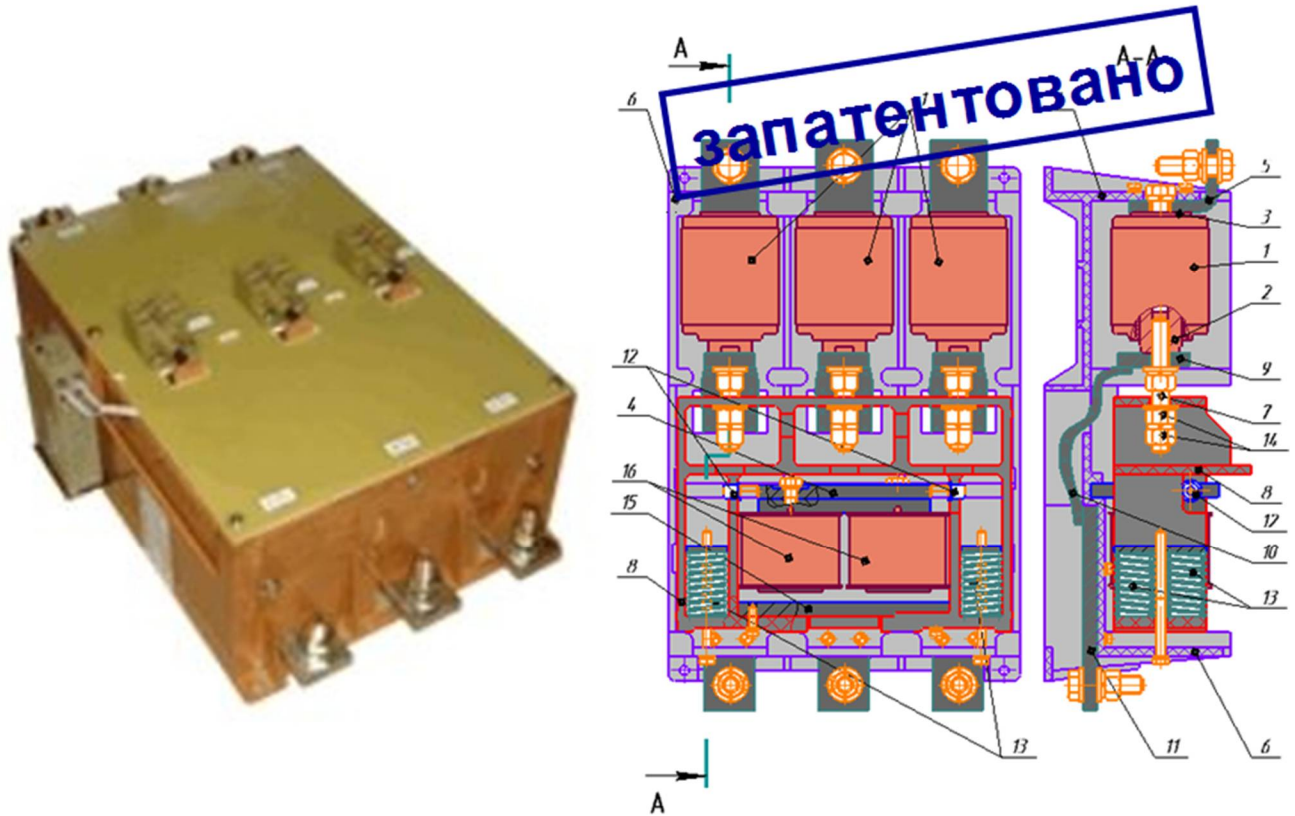


Рисунок 3.14 – Внешний и общий виды контактора серии KV2 на 630 А

Схема электрическая управления контактором KV2 на 630 А приведена на рисунке 3.16, на которой приняты следующие обозначения элементов:

K1, K2 – обмотки катушек П-образного электромагнита постоянного тока;

БВ – электронный блок включения контактора.

Электронный блок включения БВ обеспечивает работу контактора от цепи управления как переменного, так и постоянного тока и предназначен для формирования тока включения и удержания катушек электромагнита. При подаче напряжения на вход электронного блока включения БВ (рисунке 3.16) на выходе формируется ток включения $I_{\text{вкл}}$ длительностью 300 мс, протекающий по обмоткам катушек П-образного электромагнита контактора, якорь 3

электромагнита (рисунке 3.15) с траверсой 5 начинают прямолинейное движение, сжимая возвратные пружины 6. Подвижные контакты вакуумных дугогасительных камер 2 замыкаются за счет внешнего атмосферного давления. Через 300 мс после подачи напряжения на вход электронного блока включения БВ на выходе блока формируется ток удержания $I_{уд}$. Вакуумный контактор переходит в режим удержания, при этом $I_{вкл}/I_{уд} = 4$.

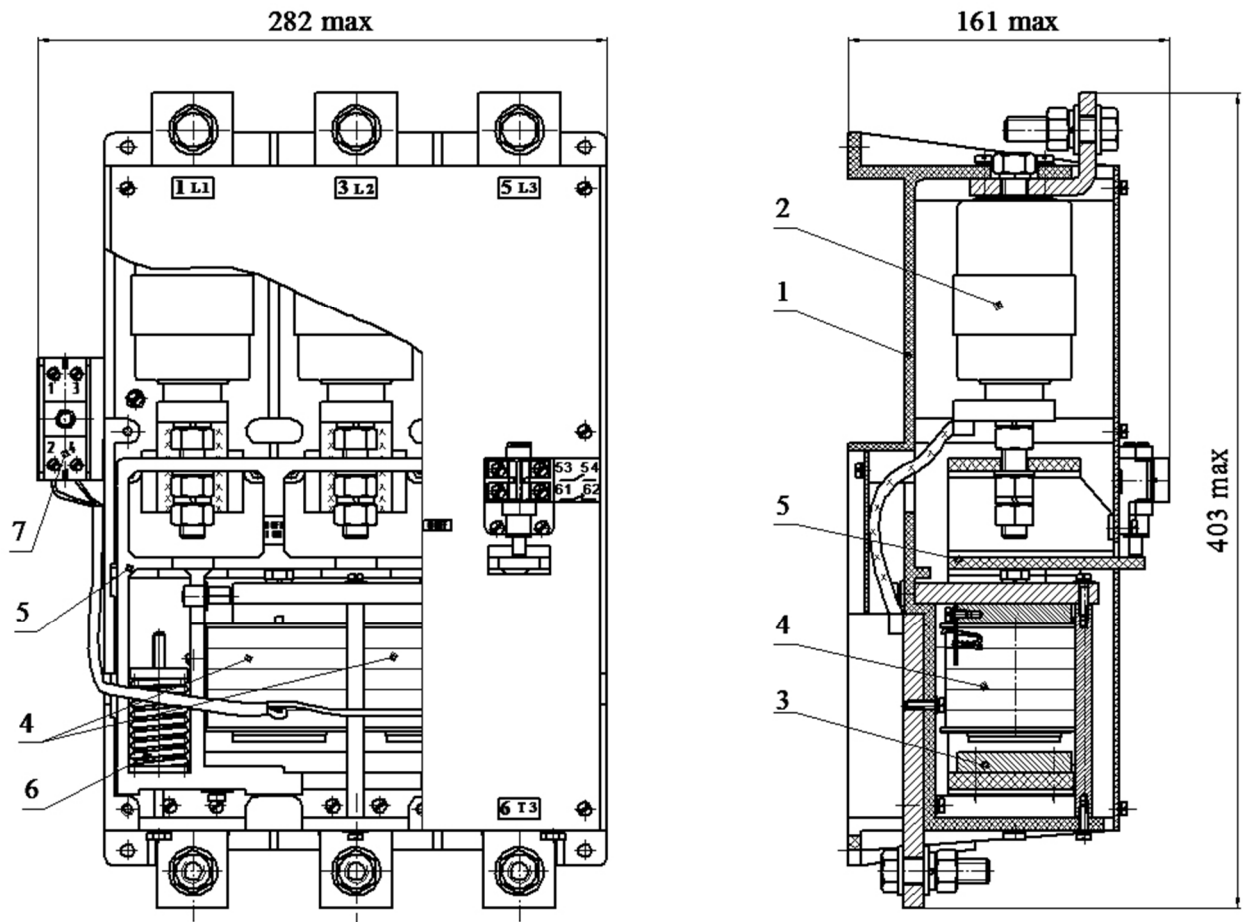


Рисунок 3.15 - Вакуумный контактор KV2 на 630 А

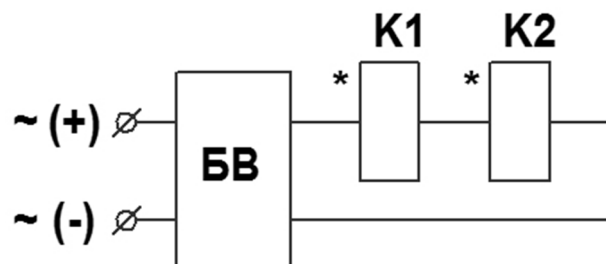


Рисунок 3.16 – Схема электрическая управления контактором KV2 на 630 А

3.5 Контактор с магнитной памятью и функцией ручного возврата

Вакуумные низковольтные контакторы серии КВ1,14 (ПО «Север», г. Новосибирск), серии КВТ-1,14 (АО «НПП «Контакт», г. Саратов), серии КВ1 и КВ2 (ЗАО «ЧЭАЗ», г. Чебоксары) предназначены для кратковременного, повторно-кратковременного и продолжительного режимов работы. У перечисленных производителей контакторы имеют схему форсированного управления обмотками электромагнита, однако, потребляемая мощность при удержании составляет не менее 10 Вт / 15 ВА. Указанное обстоятельство подталкивает к использованию конструктивных решений, позволяющих обеспечить работу контактора в продолжительном режиме при полном снятии питания по цепи управления.

Один из возможных вариантов решения – применение «магнитной защелки» (магнитной памяти с функцией ручного возврата). В случае использования контактора с магнитной памятью, для дистанционного управления этим контактором необходимо иметь минимум две обмотки или две катушки управления (включающую и отключающую). Наиболее целесообразно использовать схему, приведенную на рисунке 3.17 [41].

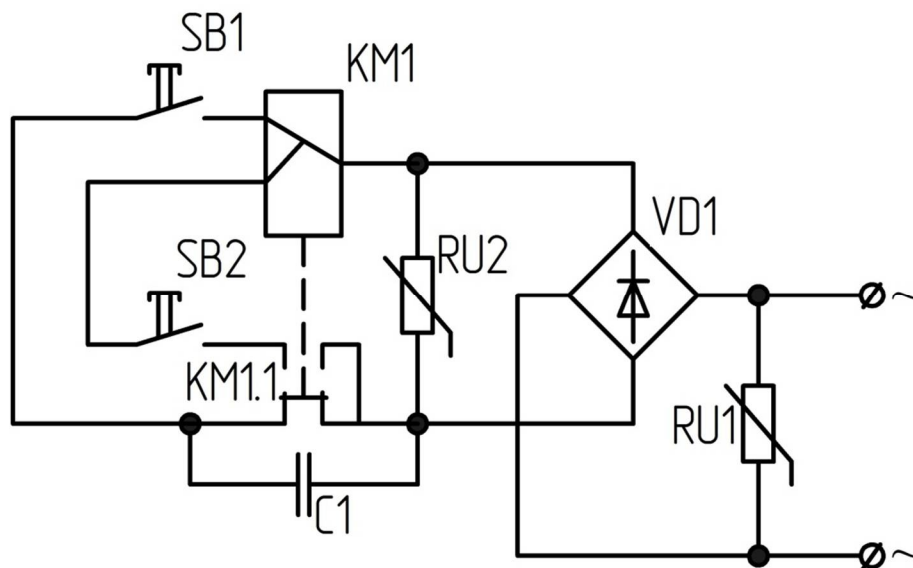


Рисунок 3.17 – Схема электрическая принципиальная подключения обмоток управления контактора с магнитной памятью

На рисунке 3.17 приняты следующие обозначения элементов схемы:

KM1 – обмотки управления контактора со средней точкой;

KM1.1 – переключающий блок-контакт, механически связанный с якорем электромагнита контактора;

SB1, SB2 – внешние кнопки управления без фиксации соответственно включением и отключением контактора;

C1 – искрогасящий конденсатор;

RU1, RU2 – варисторы;

VD1 – выпрямительный мост для преобразования переменного напряжения цепи питания в постоянное напряжение управления.

Рассматриваемое схемное решение имеет следующие отличительные особенности:

- применение схемы позволяет использовать контактор в цепях постоянного и переменного тока по цепи управления (оперативного питания);
- выпрямительный мост защищен от перенапряжений варисторами RU1 и RU2, как со стороны питания, так и со стороны обмоток управления;
- применение искрогасящего конденсатора C1 существенно увеличивает электрический ресурс контактов переключающего блок-контакта KM1.1;
- переключающий блок-контакт KM1.1 обеспечивает кратковременный режим работы обмоток управления, независимо от длительности подачи сигнала на включение или отключение внешними кнопками SB1, SB2.

В исходном состоянии внешние кнопки SB1 и SB2 разомкнуты, обмотки управления обесточены, переключающий контакт блок-контакта KM1.1 находится в нижнем положении в соответствии с рисунком 3.17, обеспечивая готовность контактора к включению. При нажатии оператором на внешнюю кнопку SB1 от источника переменного напряжения через выпрямительный мост VD1 и переключающий блок-контакт подается управляющее напряжение на включающую обмотку. Контактор срабатывает, изменяется положение контакта переключающего блок-контакта KM1.1, который разрывает цепь включающей

обмотки и подготавливает к включению цепь отключающей обмотки. Возврат контактора в исходное состояние обеспечивается нажатием на кнопку SB2.

Устройство поляризованного электромагнита с магнитной памятью и функцией ручного возврата описано и опубликовано в доступных источниках [30]. Пример практического применения запатентованного решения приведен на рисунке 3.18, где поз. 1 – это устройство ручного возврата, поз. 2 – шунт, поз. 3 – постоянный магнит.

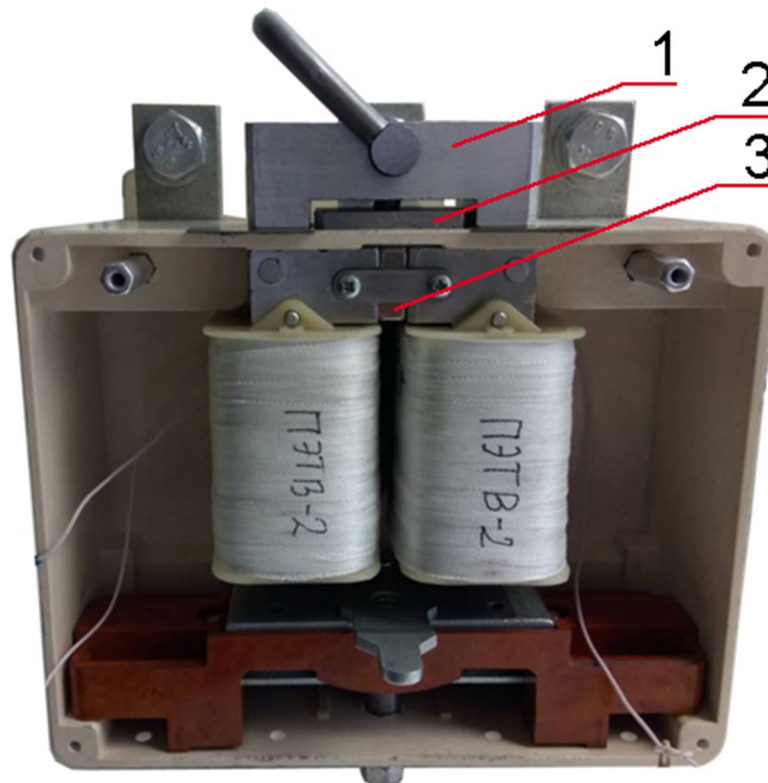


Рисунок 3.18 – Внешний вид макетного образца вакуумного контактора в габаритах КВ2 на 160, 250 А с магнитной памятью и функцией ручного возврата, изготовленного на ЗАО «ЧЭАЗ» (г. Чебоксары)

Вакуумный контактор КВ2 на 160, 250 А с магнитной памятью и функцией ручного возврата предназначен для работы в продолжительном режиме при наличии и отсутствии оперативного питания. Описание работы контактора поясняется взаимным расположением подвижных (якорь 1, шунт 4) и неподвижных (ядро 2, постоянный магнит 3) частей магнитной системы при наличии и отсутствии оперативного питания изображенных на рисунке 3.19.

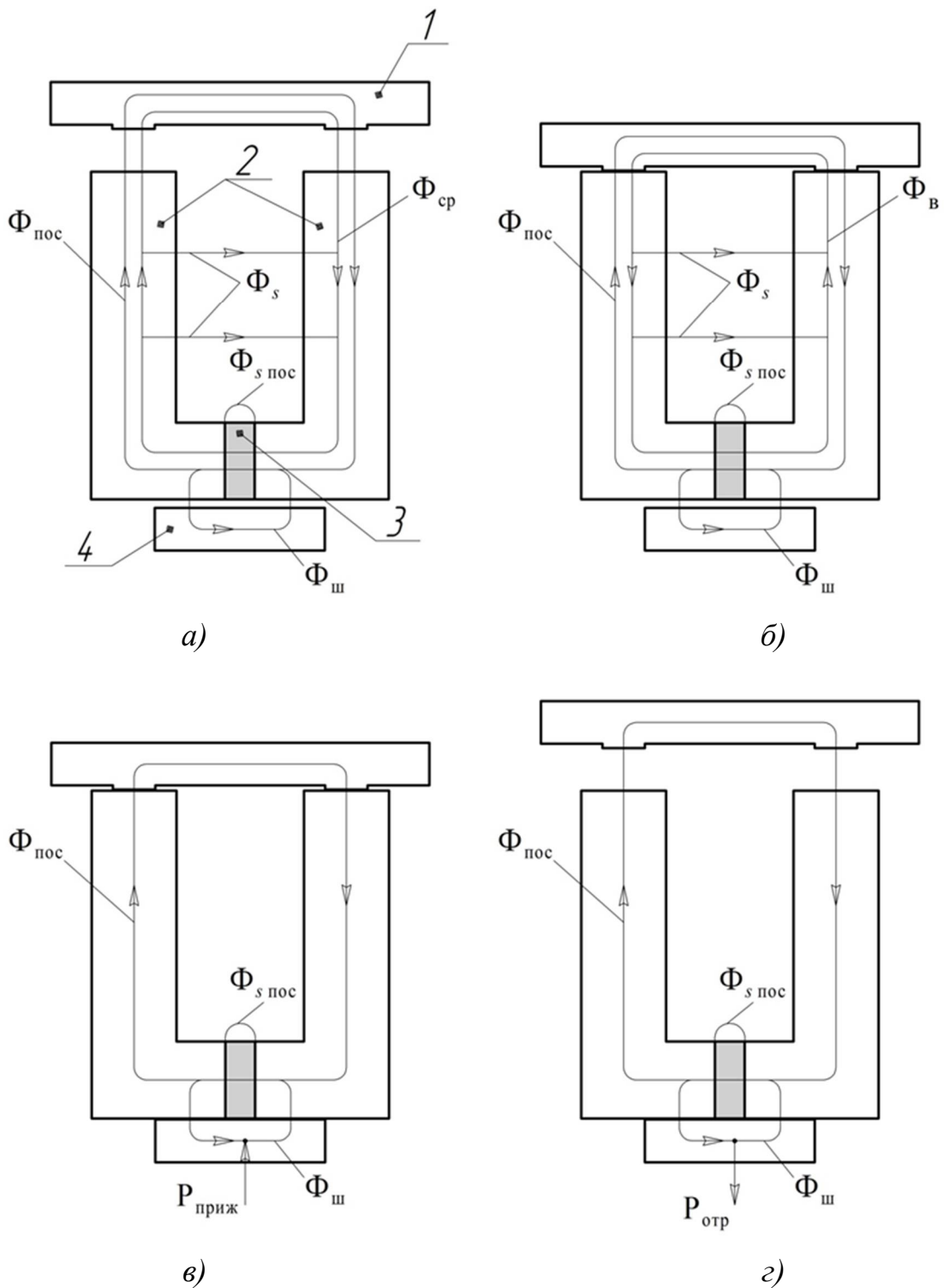


Рисунок 3.19 – Взаимное расположение подвижных и неподвижных частей магнитной системы при наличии (а, б) и отсутствии (в, г) оперативного питания

В исходном состоянии имеет место начальный рабочий зазор $\delta_{\text{н}}$ между якорем и ярмом электромагнита и максимальный зазор $\delta_{\text{ш.макс}}=2$ мм между шунтом и ярмом. При этом в магнитной системе под воздействием постоянного магнита

возбуждаются магнитные потоки $\Phi_{\text{пос}}$, $\Phi_{s \text{ пос}}$ и $\Phi_{\text{ш}}$. Направление потоков показано на рисунке 3.19,а. Электромагнитное усилие, создаваемое потоком $\Phi_{\text{пос}}$ между якорем и ярмом недостаточно для срабатывания электромагнита. Электромагнитное усилие между шунтом и ярмом равно 3 кгс, при этом шунт удерживается в исходном положении с помощью устройства ручного возврата.

Для включения контактора подается напряжение на включающую обмотку (на рисунке 3.17 управляющие обмотки условно не показаны) кнопкой SB1. В системе возбуждается магнитный поток, направленный согласно с магнитным потоком $\Phi_{\text{пос}}$. При достижении значения этого потока, равного потоку срабатывания $\Phi_{\text{ср}}$ электромагнит срабатывает, якорь переходит в конечное положение (рисунок 3.19,б). Переключающий вспомогательный контакт контактора КМ отключает включающую обмотку и подготавливает к включению отключающую обмотку. Якорь удерживается в конечном положении посредством магнитного потока $\Phi_{\text{пос}}$.

Для отключения контактора (при наличии оперативного питания) кнопкой SB2 подается напряжение на отключающую обмотку, возбуждается магнитный поток $\Phi_{\text{в}}$, направленный встречно магнитному потоку постоянного магнита $\Phi_{\text{пос}}$. При достижении в рабочем зазоре алгебраической суммы потоков $\Phi_{\text{пос}}$ и $\Phi_{\text{в}}$ значения магнитного потока возврата якорь возвращается в исходное положение под воздействием возвратной пружины контактора.

Для отключения контактора (при отсутствии оперативного питания) шунт, находящийся в исходном положении, высвобождается с помощью устройства ручного возврата и за счет имеющего магнитного потока $\Phi_{\text{ш}}$ притягивается к ярму с усилием $P_{\text{приж}}$ (рисунок 3.19,в). При этом магнитная цепь, состоящая из постоянного магнита, основания ярма и шунта обеспечивает существенное снижение магнитного потока $\Phi_{\text{пос}}$, соответственно, снижение электромагнитного усилия в зазоре, что приводит к отключению контактора (рисунок 3.19,г). Отключение контактора связано с увеличением рабочего зазора и перераспределением магнитных потоков $\Phi_{\text{пос}}$ и $\Phi_{\text{ш}}$ в сторону увеличения магнитного потока $\Phi_{\text{ш}}$, и, как следствие, увеличению электромагнитного усилия

между шунтом и ярмом примерно в 4 раза. Возврат магнитной системы в исходное положение производится устройством ручного возврата, которое обеспечивает необходимое усилие отрыва $P_{отр}$ шунта от ярма.

3.6 Контактр с электромагнитной защелкой и функцией ручного возврата

Альтернативным вариантом решения обеспечения работы контактора в продолжительном режиме при полном снятии питания по цепи управления является применение «электромагнитной защелки» (механического узла, удерживающего приводной электромагнит контактора в замкнутом состоянии и имеющего возможность дистанционного управления посредством собственного электромагнита).

Оптимальная схема управления контактором с электромагнитной защелкой приведена на рисунке 3.20.

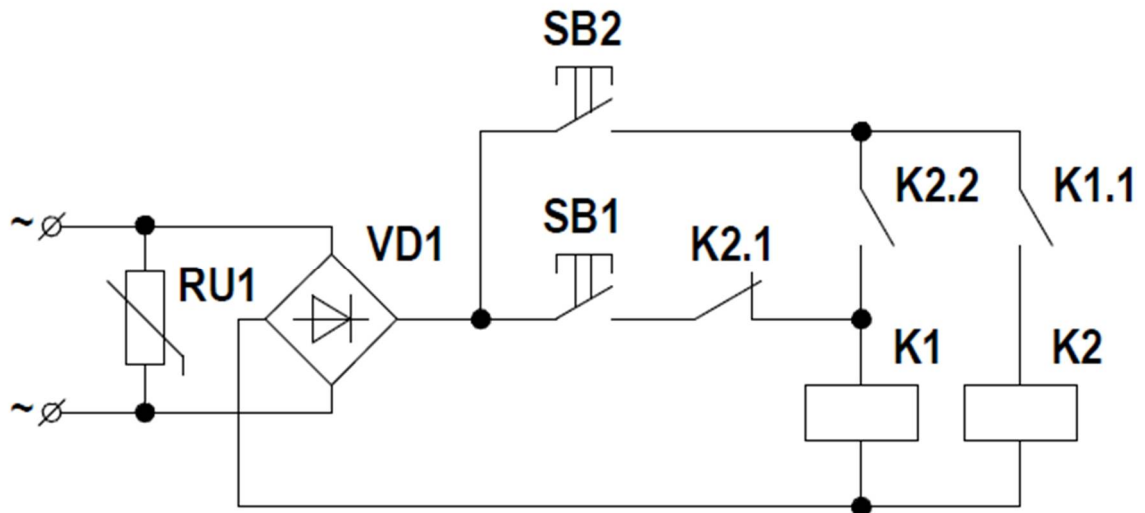


Рисунок 3.20 – Схема электрическая управления контактором с электромагнитной защелкой

На рисунке 3.20 приняты следующие обозначения элементов схемы:

K1 – обмотка катушки электромагнита контактора;

K2 – обмотка катушки электромагнитной защелки;

K1.1 – контакт, механически связанный с якорем электромагнита контактора;

K2.1, K2.2 – контакты переключающего блок-контакта, механически связанного с якорем электромагнита защелки;

SB1, SB2 – внешние кнопки управления без фиксации соответственно включением и отключением контактора;

RU1 – варистор;

VD1 – выпрямительный мост для преобразования переменного напряжения цепи питания в постоянное напряжение управления.

Рассматриваемое схемное решение имеет следующие отличительные особенности:

- применение схемы позволяет использовать контактор в цепях постоянного и переменного тока по цепи управления (оперативного питания);
- выпрямительный мост защищен от перенапряжений со стороны питания варистором RU1;
- контакты K1.1, K2.1, K2.2 обеспечивают кратковременный режим работы обмоток катушек контактора и электромагнитной защелки, независимо от длительности подачи сигнала на включение или отключение внешними кнопками SB1, SB2.

Устройство вакуумного контактора с электромагнитной защелкой, приведенное на рисунке 3.21, защищено патентом №2588606 [106].

Работа контактора осуществляется следующим образом.

В исходном состоянии кнопки SB1 и SB2 разомкнуты (рисунок 3.20). Контакт K2.1 переключающего блок-контакта электромагнитной защелки находится в замкнутом положении, обеспечивая готовность контактора к включению. При нажатии оператором на внешнюю кнопку SB1 от источника переменного напряжения через выпрямительный мост VD1 и контакт K2.1 подается управляющее напряжение на катушку приводного электромагнита контактора. Контактор срабатывает, электромагнитная защелка механически блокирует якорь электромагнита контактора в замкнутом состоянии, контакт K2.1 переключающего блок-контакта электромагнитной защелки размыкается и

разрывает цепь катушки электромагнита контактора, а контакты K2.2, K1.1 замыкаются и подготавливают контактор к отключению.

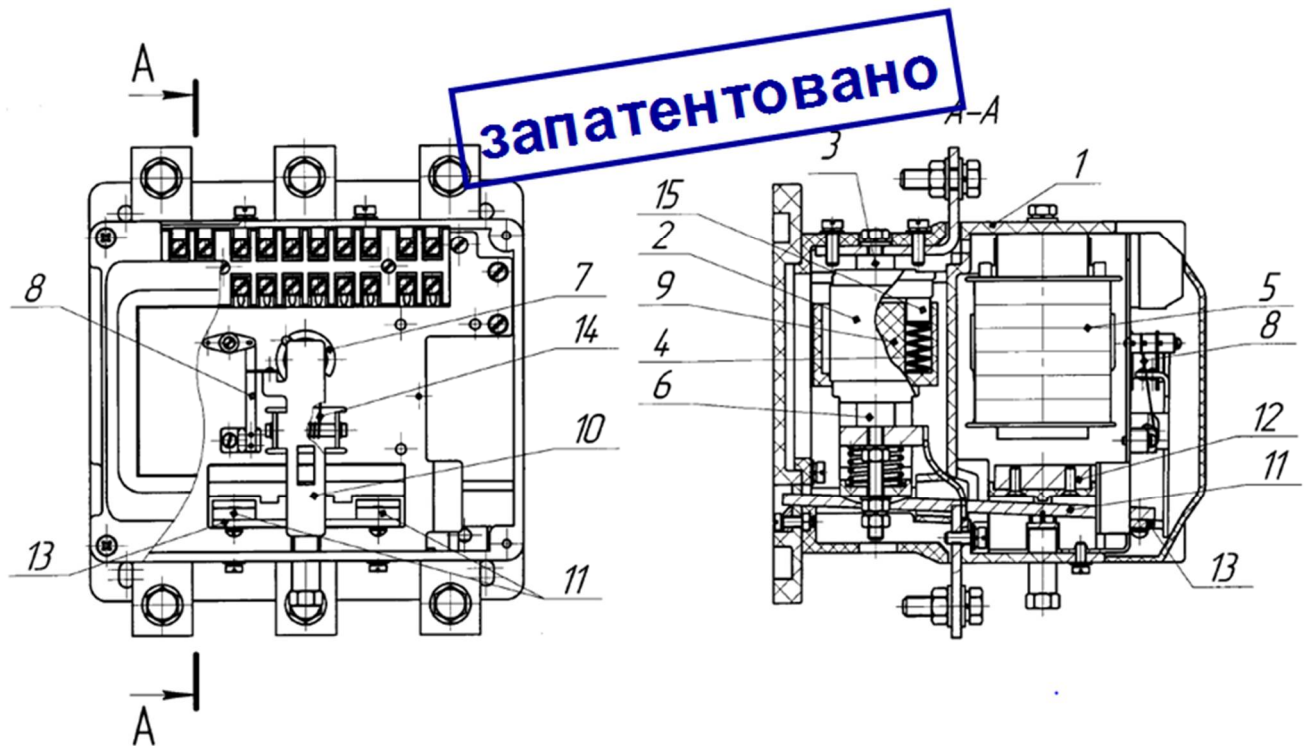


Рисунок 3.21 – Общий вид вакуумного контактора в габаритах KB2 на 160, 250 А с электромагнитной защелкой

Возврат контактора в исходное состояние обеспечивается нажатием на внешнюю кнопку SB2. При нажатии оператором на кнопку SB2 от источника переменного напряжения через выпрямительный мост VD1, контакты K2.2 и K1.1 одновременно подается управляющее напряжение на катушку электромагнита контактора K1 и катушку электромагнитной защелки K2 соответственно. Якорь электромагнита контактора подтягивается и тем самым существенно снижает противодействующую силу на срабатывание электромагнита электромагнитной защелки. Электромагнитная защелка срабатывает и высвобождает якорь электромагнита контактора. Контакт K2.1 переключающего блок-контакта электромагнитной защелки замыкается, обеспечивая готовность контактора к повторному включению, а контакт K2.2 размыкается и разрывает цепь катушки электромагнита контактора. Якорь электромагнита контактора возвращается в

исходное состояние, контакт К1.1 размыкается и разрывает цепь катушки электромагнитной защелки, контактор отключился.

При отсутствии оперативного питания, возврат контактора в исходное состояние обеспечивается механическим воздействием непосредственно на электромагнитную защелку.

Пример практического применения контактора с электромагнитной защелкой приведен на рисунке 3.22.

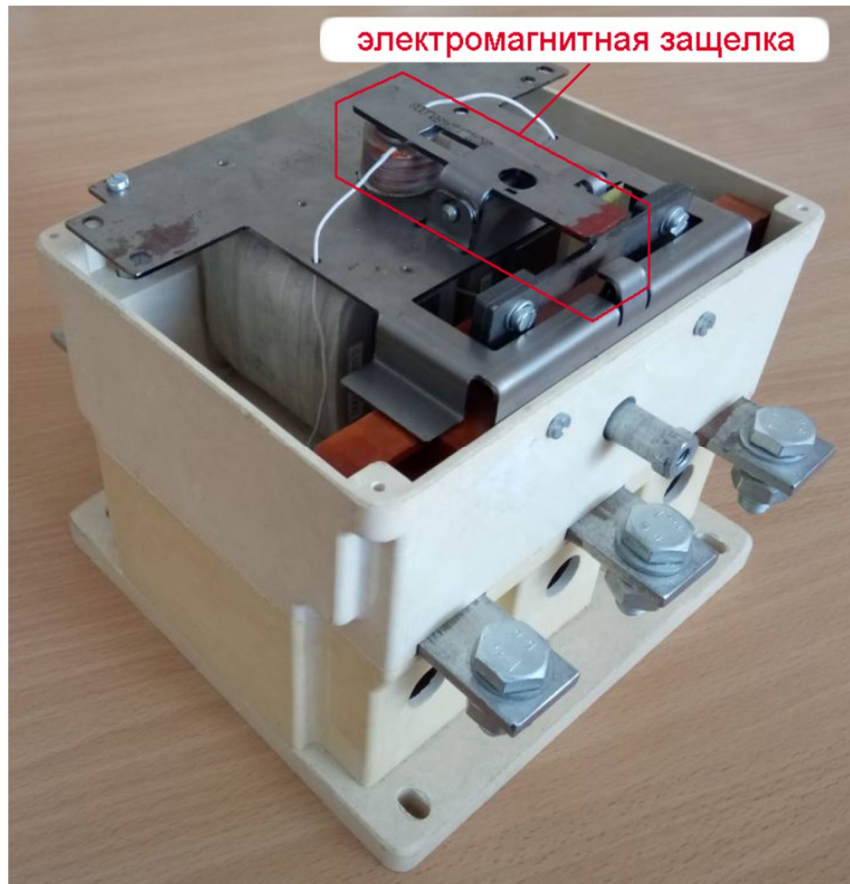


Рисунок 3.22 – Внешний вид макетного образца вакуумного контактора в габаритах КВ2 на 160, 250 А с электромагнитной защелкой, изготовленного на ЗАО «ЧЭАЗ» (г. Чебоксары)

3.7 Выводы к разделу 3

Результаты проведенных исследований были использованы при разработке ряда коммутационных электромагнитных аппаратов.

1. Результаты оптимизационных расчетов форсированного П-образного четырехобмоточного электромагнита использованы при разработке вакуумных контакторов серии КВ2 на номинальные токи 160, 250, 400 и 630 А, позволившие уменьшить массо-габаритные их показатели, а также потребляемую ими мощность до уровня образцов зарубежных компаний.

Модификации контактора с магнитной памятью с функцией ручного возврата и с электромагнитной защелкой с функцией ручного возврата позволили исключить потребление электроэнергии в продолжительном режиме работы контактора.

2. Усовершенствованный вариант электромеханического реле времени РВ100, РВ200 с часовым механизмом имеет меньшее потребление, большую износостойкость и больший срок службы.

3. Усовершенствованный вариант указательного реле РУ-31 и РУ-32, реализованные на основе П-образного электромагнита, обладает повышенной ударостойкостью, надежностью функционирования и удобной визуализацией сработавшего состояния реле.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Электромагнитные контакторы, реле используются во многих отраслях экономики страны, производятся в объемах, исчисляемых десятками, сотнями тысяч штук в год. Улучшение технико-эксплуатационных параметров этой группы аппаратов обеспечит им конкурентоспособность на внешнем рынке электротехнической продукции.

В результате выполненных исследований:

1. На основе обзора и анализа характеристик электромагнитных контакторов и реле определены данные для выполнения проектных и оптимизационных расчетов форсированных приводных электромагнитов с учетом условий срабатывания, нагрева и дополнительно возврата.

2. Разработаны усовершенствованные методики проектного и оптимизационного расчетов, обеспечивающие расхождение между оптимизированными и аппроксимированными (рассчитанными по полиномам) значениями относительных размеров и параметров форсированных симметричных П-образных двухкатушечных четырехобмоточных электромагнитов постоянного тока не превышающее 7 %.

3. Двухразовое сканирование области факторного пространства при минимизации массы, объема, стоимости активных материалов, габаритного объема, установочной площади позволяет повысить точность определения оптимальных соразмерностей электромагнита и его параметров на 4 % относительно одноразового сканирования.

4. С целью количественного описания результатов оптимизационных расчетов проведен вычислительный эксперимент методами теорий подобия и планирования эксперимента. Установлено, что функции оптимальных соразмерностей: 1) критического рабочего воздушного зазора, и высоты обмоток в долях диаметра сердечника независимо при минимизации по разным частным критериям оптимальности зависят от критического значения рабочего воздушного зазора, критического значения механической силы, кратности механического

усилия в конечном положении якоря в долях ее критического значения, температуры окружающей среды, максимальной температуры в толще высокоомной обмотки (исключение составляет функция относительной высоты обмотки при минимизации по критерию «стоимость активных материалов», которая не зависит от критического значения механической силы); 2) относительной суммарной ширины низкоомной и высокоомной обмоток, относительной ширины низкоомной обмотки, относительного диаметра полюсного наконечника при минимизации объема и стоимости активных материалов соответственно равными 0,45, 0,40 и 1,26; относительного диаметра полюсного наконечника при минимизации установочной площади равного 1,26; относительной ширины низкоомной обмотки, относительного диаметра полюсного наконечника при минимизации габаритного объема, равные 0,405 и 1,26 являются постоянными в выбранной области факторного пространства.

5. Предложено для согласования тяговой и механической характеристик электромеханического реле времени серий РВ100 и РВ200 выполнить конусообразный полюс приводного электромагнита с углом конусности $\gamma = 8^\circ$. Конструкция дополнительно снабжена пневматическим демпфером с целью обеспечения безударного взвода часового механизма и показано, что можно отказаться от форсированного управления электромагнитным приводом. Это позволило исключить перегорание обмоток электромагнита.

Усовершенствованные конструкции указательных реле РУ31 и РУ32 аналогов реле РУ21, РЭУ-11, РУ-1 выполнены на базе П-образной магнитной системы с минимизированной установочной площадью и с уравновешенным якорем, что позволило «уплотнить» установку реле в современных устройствах релейной защиты и обеспечить повышение удароустойчивости реле и улучшение визуального восприятия сигнала срабатывания реле.

Спроектированные вакуумные контакторы КВ2-160, КВ2-250 и КВ2-630 на номинальные токи 160, 250 и 630 А соответственно выполненные на основе П-образной форсированной четырехобмоточной магнитной системы последовательным соединением обмоток является конкурентоспособным на

рынке низковольтной электротехнической аппаратуры. А исполнения вакуумных контакторов с магнитной памятью с функцией ручного возврата и с электромагнитной защелкой с функцией ручного возврата позволяют исключить потребление электроэнергии во включенном состоянии контакторов.

Рекомендуется:

– разработчикам при проектировании аппаратов с форсированными электромагнитными приводами использовать полученные полиномиальные зависимости оптимальных соизмерностей и параметров магнитной системы П-образного форсированного электромагнита;

– к внедрению в серийное производство разработанные модернизированное электромеханическое реле времени с часовым механизмом; указательные реле РУ31 и РУ32; контактор с магнитной памятью и функцией ручного возврата; контактор с электромагнитной защелкой и функцией ручного возврата.

Перспективой дальнейшей разработки темы является усовершенствование методик проектного и оптимизационных расчетов по различным критериям качества для форсированных симметричных Ш-образных однокатушечных двухобмоточных электромагнитов постоянного тока.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреев, Д. Обновление электромеханических устройств РЗА / Д. Андреев, Е. Киркова, П. Кузьмин, М. Г. Линт, В. А. Матисон, А. В. Михайлов // Электроэнергия. – 2013. – № 6 (21). – С. 114–117.
2. Архипова, Е. В. К тепловому расчету двухобмоточных форсированных электромагнитов / Е. В. Архипова, А. В. Приказчиков, Н. В. Руссова, Г. П. Свинцов // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике: материалы VII Всероссийской научно-технической конференции. – Чебоксары, 2010. – С. 268–270.
3. Архипова, Е. В. Анализ статических тяговых характеристик броневой магнитной системы с втяжным конусообразным якорем / Е. В. Архипова, Ю. М. Зайцев, А. В. Михайлов, Н. В. Руссова, Г. П. Свинцов // Электротехника. – 2013. – № 12. – С. 11–14.
4. Архипова, Е. В. Сравнительная оценка расчета силовых характеристик магнитной системы с втяжным якорем с коническим полюсом / А. В. Михайлов, В. Н. Петров // Региональная энергетика и электротехника: проблемы и решения: сб. науч. тр. Вып. IX. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2013. – С. 157–161.
5. Афанасьев, А. А. Метод сопряжения конформных отображений в задачах электромеханики / А. А. Афанасьев. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2011. – 390 с.
6. Афанасьев, А. А. Физико-математические основы электродинамических систем: учебное пособие: В 2 кн. Кн. 1. Основы теории электромагнитного поля и аналитические методы решения полевых задач / А. А. Афанасьев. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2014. – 380 с.
7. Афанасьев, А. А. Физико-математические основы электродинамических систем: учебное пособие: В 2 кн. Кн. 2. Распространение электромагнитных волн в средах. Численные методы для полевых задач. Сверхпроводимость в

- электроэнергетике / А.А. Афанасьев. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2014. – 484 с.
8. Байбузов, А. В. Принципы проектирования электромагнитных клапанов с форсированным электромагнитом / А. В. Байбузов, Ф. И. Букашев // Вестник Новгородского государственного ун-та. – 2009. – № 50. – С. 51–52.
 9. Баранов, П. Р. Выбор схемы включения двухобмоточного электромагнита / П. Р. Баранов, В. С. Гринберг // Электричество. – 1986. – № 4. – С. 47–49.
 10. Бахвалов, Ю. А. Электромагнитные механизмы. Анализ и синтез / Ю. А. Бахвалов, Н. И. Горбатенко, А. Г. Никитенко. – М. : Высш. шк., 1998. – 330 с.
 11. Белкин, Г. С. Коммутационные процессы в электрических аппаратах / Г. С. Белкин. – М. : Знак, 2003. – 244 с.
 12. Белкин, Г. С. Проектирование вакуумных дугогасительных камер с применением ЭВМ / Г. С. Белкин. – М. : Изд-во МЭИ, 2000. – 56 с.
 13. Белкин, Г. С. Электрическая дуга в вакуумных выключателях / Г. С. Белкин. – М. : Изд-во МЭИ, 2006. – 28 с.
 14. Белокопытов, С. Л. Решение многокритериальной задачи рационального выбора схем форсировки срабатывания электромагнитов / С. Л. Белокопытов [и др.] // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2006. – № 3. – С. 49–51.
 15. Бугаев, Г. А. Экспериментальное сопоставление клапанных электромагнитов постоянного тока / Г. А. Бугаев, Л. А. Пушкарев // Низковольтная аппаратура (разработка и исследование). – М. : Информэлектро. – 1968. – Вып. 1. – С. 56–68.
 16. Буль, Б. К. Электромеханические аппараты автоматики: учеб. для вузов по спец. "Электрические аппараты" / Б. К. Буль, О. Б. Буль, В. А. Азанов, В. Н. Шоффа. – М. : Высш. шк., 1988. – 303 с.
 17. Буль, О. Б. Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов: Магнитные цепи, поля и программа FEMM / О. Б. Буль. – М. : Издательский центр "Академия", 2005. – 336 с.

18. Веников, В. А. Теория подобия и моделирование / В. А. Веников. – М. : Высш. шк., 1976. – 479 с.
19. Гордон, А. В. Электромагниты постоянного тока / А. В. Гордон, А. Г. Сливинская. – М.-Л. : Госэнергоиздат, 1960. – 447 с.
20. ГОСТ 2491-82. Пускатели электромагнитные низковольтные. Общие технические условия. М.6 ИПК Стандартиформ, 1984.
21. Гревцов, В. Н. К оценке форсированного включения электромагнитных аппаратов постоянного тока / В. Н. Гревцов, А. Г. Никитенко, В. П. Гринченков, Е. А. Дроздова // Изв. вузов. Электромеханика. – 1992. – № 4. – С. 65–68.
22. Гринберг, В. С. Выбор схемы включения двухобмоточного электромагнита / В. С. Гринберг // Электричество. – 1982. – № 10. – С. 45–49.
23. Гринченков, В. П. Исследование динамических процессов в электромагнитах подвеса / В. П. Гринченков, А. Г. Никитенко, А. В. Павленко // Изв. вузов. Электромеханика. – 1982. – № 12. – С. 1432–1437.
24. Гурницкий, В. Н. К теории приближенного подобия электромагнитов постоянного тока / В. Н. Гурницкий // Электричество. – 1968. – № 12. – С. 34–38.
25. Дергачев, П. А. Синтез оптимальных структур источников магнитного поля электротехнических структур: автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. техн. наук: 05.09.01 / П. А. Дергачев. – М., 2010. – 20 с.
26. Дергачев, П. А. Электромеханическое преобразование энергии в системе с объемным высокотемпературным сверхпроводником. Ч.1. Математическое моделирование / П. А. Дергачев, Ю. В. Кулаев, П. А. Курбатов, Е. П. Курбатова // Электротехника. – 2016. – № 6. – С. 62.
27. Дергачев, П. А. Электромеханическое преобразование энергии в системе с объемным высокотемпературным сверхпроводником. Ч.1. Математическое моделирование / П. А. Дергачев, Ю. В. Кулаев, П. А. Курбатов, Е. П. Курбатова // Электротехника. – 2016. – № 7. – С. 43.
28. Дергачев, П. А. Полностью интегрированный кинематический накопитель энергии с магнитным ВТСП подвесом маховика / П. А. Дергачев,

- А. А. Костерин, П. А. Курбатов, Е. П. Курбатова // Альтернативная энергетика и экология (ISJAEE). – 2015. – № 22. – С. 95.
29. Дьяконов, В. П. Справочник по алгоритмам и программам на языке бейсик для персональных ЭВМ. – М. : Наука, 1987. – 240 с.
30. Зайцев, Ю. М. Вакуумный контактор KB2-250-3 с поляризованным приводом / Ю. М. Зайцев, А. В. Михайлов, В. Н. Петров, Г. П. Свинцов, А. С. Семенова // Человек. Гражданин. Ученый: сб. тр. Регион. Фестиваля студ. и молодежи (Чуваш. гос. ун-т им. И.Н. Ульянова, 25-29 ноября 2014 г.). – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2015. – С. 27.
31. Зайцев, Ю. М. Методика параметрического синтеза форсированных четырехобмоточных П-образных электромагнитов постоянного напряжения в схеме последовательного соединения обмоток / Зайцев Ю. М. [и др.] // Вестник Чувашского университета. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та. – 2017. – № 3.– С. 38–46.
32. Ивоботенко, Б. А. Планирование эксперимента в электромеханике / Б. А. Ивоботенко, Н. Ф. Ильинский, И. П. Копылов. – М. : Энергия, 1975. – 184 с.
33. 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.
34. Казаков, Л. А. Электромагнитные устройства радиоэлектронной аппаратуры: справочник / Л. А. Казаков. – М. : Радио и связь, 1991. – 352 с.
35. Клименко, Б. В. Ассиметричный нагрев обмоток в стационарном режиме / Б. В. Клименко // Изв. вузов. Электромеханика. – 1971. – № 9. – С. 99–100.
36. Клименко, Б. В. Интегрирование уравнений динамики электромагнитов при наличии вторичных контуров / Б. В. Клименко // Электричество. – 1984. – № 11. – С. 52–55.
37. Клименко, Б. В. Новые устройства форсированного включения электромагнитов постоянного тока от источников переменного напряжения / Б. В. Клименко // Электротехника. – 1982. – № 4. – С. 22–25.

38. Клименко, Б. В. Сопоставление систем форсированного управления пусковыми обмотками / Б. В. Клименко, Г. Ш. Бер, Е. В. Кочанов, В. И. Растворцев // Вестник Харьковского политехнического ин-та. – 1988. – № 255. – С. 29–30.
39. Клименко, Б. В. Форсированные электромагнитные системы / Б. В. Клименко. – М. : Энергоатомиздат, – 1989. – 160 с.
40. Клименко, Б. В. Эффективность применения в контакторах систем форсированного управления с пусковыми обмотками / Б. В. Клименко, Д. М. Зецкер, Е. В. Качанов // Низковольтные аппараты защиты и управления. – Харьков. – 1987.
41. Клименко, Б. В. Электрические схемы питания электромагнитных систем с залипанием в контакторах переменного тока / Б. В. Клименко, А. А. Чепелюк // Вісник НТУ "ХПІ". – 2001. – № 16. – С. 93–96.
42. Кобленц, М. Г. Выбор оптимальных соотношений меди и стали в аппаратах постоянного тока / М. Г. Кобленц // Вестник электропромышленности. – 1961. – № 11. – С. 46–50.
43. Ковалев, О. Ф. Расчет нестационарного температурного поля электромагнитных захватов методом конечных элементов / О. Ф. Ковалев, Б. Н. Лобов, Е. Н. Краснов // Изв. вузов. Электромеханика. – 1995. – № 1-2. – С. 24–29.
44. Коц, Б. Э. Электромагниты постоянного тока с форсировкой / Б. Э. Коц. – М. : Энергия, 1973. – 80 с.
45. Куликов, А. Л. Современное состояние и перспективы электромеханических устройств РЗА / А. Л. Куликов, М. Г. Линт, В. А. Матисон, А. В. Михайлов // Сборник тезисов докладов II международной научно-практической конференции и выставки "Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем России – 2013" ("РЕЛАВЭКСПО 2013"). – Чебоксары: РИЦ "СРЗАУ", 2013. – С. 96.
46. Курбатов, П. А. Численный расчет электромагнитных полей / П. А. Курбатов, С. А. Ринчин. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 168 с.

47. Линт, М. Г. Современное состояние и перспективы электромеханических устройств РЗА / М. Г. Линт, В. А. Матисон, А. В. Михайлов // Релейная защита и автоматизация. – Чебоксары. – 2013. – № 2. – С. 38–40.
48. Лобов, Б. Н. Устройство форсированного включения электромагнитного привода / Б. Н. Лобов, Г. П. Мацупин, В. Я. Палий // Вестник ВЭЛНИИ. – Новочеркасск. – 2006. – № 3(52). – С. 102–110.
49. Лобов, Б. Н. Выбор схем форсированного питания электромагнитов / Б. Н. Лобов, Г. П. Мацупин, О. Б. Плахотин // Изв. вузов. Электромеханика. – 2004. – № 1. – С. 67.
50. Лобов, Б. Н. К расчету характеристик электромагнитных приводов электрических аппаратов / Б. Н. Лобов, А. В. Павленко, И. Б. Подберезная, В. В. Медведев // Известия вузов. Электромеханика. – 2017. – Т. 60. – № 1. – С. 35–40.
51. Лобов, Б. Н. Оптимизация электромагнитного механизма по статическим и динамическим показателям качества / Б. Н. Лобов, О. Б. Плахотин // Изв. вузов. Северокавказский регион. Технические науки. – 2006. – № 1. – С. 33–37.
52. Лобов, Б. Н. Методы, модели и алгоритмы автоматизированного проектирования оптимальных электромагнитных аппаратов: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора техн. наук: 05.09.01 / Б. Н. Лобов. – Новочеркасск, 2010. – 36 с.
53. Любчик, М. А. Анализ особенностей процессов теплоотдачи обмоток электрических аппаратов и устройств автоматики / М. А. Любчик, Б. В. Клименко, Б. Г. Грищенко // Изв. вузов. Электромеханика. – 1971. – № 8. – С. 893–899.
54. Любчик, М. А. Определение потокосцепления силовых электромагнитов / М. А. Любчик, Б. В. Клименко // Электротехника. – 1971. – № 9. – С. 57–58.
55. Любчик, М. А. Силовые электромагниты аппаратов и устройств автоматики постоянного тока (Расчет и элементы проектирования) / М. А. Любчик. – М. : Энергия, 1968. – 158 с.
56. Любчик, М. А. Оптимальное проектирование силовых электромагнитных механизмов / М. А. Любчик. – М. : Энергия, 1974. – с.121–122.

57. Михайлов, А. В. Вакуумные контакторы напряжением до 1140 В / А. В. Михайлов // Региональная энергетика и электротехника: проблемы и решения: сб. науч. тр. Вып. IX. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2013. – С. 157–161.
58. Михайлов, А. В. Разработка современных электромеханических реле / А. В. Михайлов // Энергия. – Чебоксары. – 2013. – № 4. – С. 24–26.
59. Михайлов, А. В. Минимизация массы стали и меди форсированного П-образного электромагнита с последовательно соединенными обмотками / А. В. Михайлов [и др.] // Вестник чувашского университета. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та. – 2017. – № 3. – С. 99–108.
60. Могилевский, Г. В. Применение теории подобия к проектированию электромагнитов / Г. В. Могилевский // Вестник электропромышленности. – 1959. – № 4. – С. 34–38.
61. Могилевский, Г. В. Уменьшение материалоемкости контакторов серии КТП 6000 / Г. В. Могилевский, Ю. И. Гридин // Электротехническая промышленность. Сер. Аппараты низкого напряжения. – 1982. – Вып. 6 (103). – С. 27–28.
62. Могилевский, Г. В. Устройства управления электромагнитами / Г. В. Могилевский [и др.]. – М. : Информэлектро, 1982.
63. Нейман, В. Ю. Моделирование FEMM магнитного поля для расчета тепловых характеристик электромагнитных двигателей постоянного тока / В. Ю. Нейман, А. А. Петрова // Сборник научных трудов НГТУ. – 2008. – № 2(52). – С. 101–108.
64. Нейман, В. Ю. Сравнение способов форсировки импульсных линейных электромагнитных двигателей / В. Ю. Нейман, А. А. Петрова // Электротехника. – 2007. – № 9. – С. 47–49.
65. Некрасов, С.А. Интервальные и двусторонние методы расчета магнитных систем / С. А. Некрасов // Электричество. – 2013. – № 8. – С. 55–59.
66. 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.
67. 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.
68. Никитенко, А. Г. Аналитический обзор методов расчета магнитных полей электрических аппаратов / А. Г. Никитенко, Ю. А. Бахвалов, В. Г. Щербаков // Электротехника. – 1977. – № 1. – С. 15–19.
69. 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.
70. Никитенко, А. Г. О выборе расчетных значений индукции при проектировании электромагнитов постоянного тока / А. Г. Никитенко // Изв. вузов. Электромеханика. – 1974. – № 3. – С. 278–284.
71. Павленко, А. В. К расчету динамических характеристик электромагнитных механизмов с индуктивно связанными катушками / А. В. Павленко // Изв. вузов. Электромеханика. – 1998. – № 5-6. – С. 67–70.
72. 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 // Электротехника. – 2007. – № 4. – С. 22–30.
73. Павленко, А. В. Математическое моделирование броневого электромагнитов переменного тока / А. В. Павленко, В. П. Гринченков, А. В. Шипулин // Изв. вузов. Электромеханика. – 1998. – № 1. – С. 67–70.
74. Павленко, А. В. Обобщенная математическая модель для расчета нестационарных магнитных полей и динамических характеристик электромагнитных механизмов // Электричество. – 2002. – № 7. – С. 49–53.
75. Руссова, Н. В. Математическое моделирование тепловых параметров электромагнитов постоянного тока и напряжения / Н. В. Руссова // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике:

- материалы IV Всероссийской научно-технической конференции. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2002. – С. 145–149.
76. Руссова, Н. В. Моделирование и синтез симметричных двухкатушечных П-образных электромагнитов постоянного и выпрямленного напряжения: автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. техн. наук: 05.09.01 / Н. В. Руссова. Чебоксары. – 2005. – 20 с.
77. Руссова, Н. В. Синтез оптимальных симметричных П-образных двухкатушечных электромагнитов с цилиндрическими сердечниками / Н. В. Руссова // Изв. вузов. Электромеханика. – 2002. – № 3. – С. 30–34.
78. Руссова, Н. В. Синтез оптимальных симметричных П-образных двухкатушечных электромагнитов постоянного напряжения с призматическими сердечниками при повторно-кратковременном режиме / Н. В. Руссова, Г. П. Свинцов, В. Н. Шоффа // Электротехника. – 2002. – № 2. – С. 55–60.
79. Руссова, Н. В. Экспериментальные обобщенные электромагнитные характеристики П-образных двухкатушечных электромагнитов постоянного тока с внешним прямоходовым якорем / Н. В. Руссова, Г. П. Свинцов // Изв. вузов. Электромеханика. – 1998. – № 5. – С. 5–6.
80. Руссова, Н.В. Моделирование и синтез П-образных электромагнитов постоянного тока и напряжения / Н. В. Руссова, Г. П. Свинцов. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2003. – 228 с.
81. Свинцов, Г. П. О некоторых возможностях синтеза схем форсированного управления электромагнитными аппаратами / Г. П. Свинцов // Электрические аппараты: межвузовский сб. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 1998. – С. 209–217.
82. Свинцов, Г. П. О подходах к форсированному управлению приводными электромагнитами / Г. П. Свинцов // Тезисы докладов III Международной конференции по электромеханике и электротехнологии (14-18 сентября 1998 г.). – Клязьма, 1998. – С. 152–153.

83. Свинцов, Г. П. Перспективные устройства форсированного управления приводными электромагнитами контакторов и магнитных пускателей / Г. П. Свинцов // Электротехника. – 1997. – № 1. – С. 43–47.
84. Свинцов, Г. П. Электромагнитные контакторы и пускатели: учебное пособие / Г. П. Свинцов. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 1998. – 260 с.
85. Софронов, Ю. В. Тепловой расчет катушек электрических аппаратов постоянного тока / Ю. В. Софронов, Н. В. Руссова. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2005. – 48 с.
86. Софронов, Ю. В. Проектирование электромеханических аппаратов автоматики / Ю. В. Софронов, Г. П. Свинцов, Н. Н. Николаев. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 1998. – 89 с.
87. Российская Федерация. Законы. Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации: Федер. закон № 261: [Принят Гос. Думой 11 ноября 2009 г.: одобр. Советом Федерации 18 ноября 2009 г.] // Собрание законодательства Российской Федерации. – 2009. – № 48. – Ст. 5711.
88. Федотов, А. И. Метод мгновенных коммутаций токов для расчета переходных процессов в выпрямительной нагрузке / А. И. Федотов, Р. Р. Каримов // Электротехника. – 2000. – № 8. – С. 36–39.
89. Федотов, А. И. Схемы замещения вентильных преобразователей для расчета гармоник тока и напряжения / А. И. Федотов, Е. А. Федотов, Н. В. Чернова // Электричество. – 2007. – № 4. – С. 50–56.
90. Шоффа, В. Н. Методы расчета магнитных систем постоянного тока / В. Н. Шоффа. – М. : МЭИ, 1998. – 40 с.
91. Arkhipova, E. V. Generalized Statistical Load Characteristics of a Forced Double – Winding Armored DS Electromagnet with a Flat Stop / E. V. Arkhipova, N. V. Russova, G. P. Svintsov // Russian Electrical Engineering. – 2012. – Vol. 83. – № 3. – P. 171–175.

92. Afshar, S. Optimal Configuration for Electromagnets and Coils in Magnetic Actuators / S. Afshar, M. Behrad Khamesse, A. Khajepour // IEEE Transactions on Magnetics. – 2012. – Vol: 49. – № 4. – P. 1372-1381.
93. Brauer, J. R. Magnetic Actuators and Sensors: Wiley-IEEE Press, 2014. – 400 p.
94. Dolan, A. Optimization of DC electromagnet using design of experiments and FEM / A. Dolan // Applied and Theoretical Electricity (ICATE). International Conference. – 2016. – P. 1-6.
95. Dergachev, P. Flywheel energy storage system with magnetic hts suspension and embedded in the flywheel motor-generator / P. Dergachev, A. Kosterin, P. Kurbatov, E Kurbatova // Proceedings of the IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC). – 2016. – P. 574.
96. Garanin, A. Yu. DC electromagnet traction force calculation / A. Yu. Garanin, E. V. Silaeva, O. A. Shlegel', V. N. Popenco // Russian Electrical Engineering. – 2003. – №. 2. – P. 55-58.
97. Li, Y. Optimal design of electromechanical devices using a hybrid finite element / air-gap element method / Y. Li, D. C. Aliprantis // Power and Energy Conference at Illinois (PECI), 2013 IEEE. – 2003. – P. 106-114.
98. Nazemi, A. R. Optimal shape design of iron pole section of electromagnet / A. R. Nazemi, M. N. Farahi, H. H. Mehne // Physics letters A. – 2008. – Vol. 372. – № 19. – P. 3440-3451.
99. Plavec, E. Genetic algorithm based plunger shape optimization of DC solenoid electromagnetic actuator / E. Plavec, M. Didovic // Telecommunications Forum (TELFOR). – 2016. – P. 531-535.
100. Zaitsev, Yu. M. Minimizing the power consumption of a Clapper-Type DC Electromagnet in Intermittent Operation / Yu. M. Zaitsev, I. P. Ivanov, O. A. Petrov, A. V. Prikazshchikov, N. V. Russova, G. P. Svintsov // Russian Electrical Engineering. – 2015. – Vol. 86. – № 8. – P. 474–478.
101. Zhang, X Research on electromagnetic actuators force characteristics force / X. Zhang, Y. Wang, Y. Xia, C. Zhu. S. Ma // Electronics, Computer and Applications, 2014 IEEE Workshop on. – 2014. – P. 622-625.

Патенты

102. Патент на изобретение 2566533 РФ, МПК Н01Н 43/12. Электромеханическое реле времени / М. Г. Линт, А. В. Михайлов, О. С. Черненко; патентообладатель ОАО «МРСК Центра и Приволжья». – № 2014110573/28; заявл. 19.03.2014; опубл. 27.10.2015. Бюл. № 30. – 7 с.
103. Патент на изобретение 2574956 РФ, МПК Н01Н 43/12. Электромеханическое реле времени / М. Г. Линт, А. В. Михайлов, О. С. Черненко; патентообладатель ОАО «МРСК Центра и Приволжья». – № 2014122222/12; заявл. 30.05.2014; опубл. 10.02.2016. Бюл. № 4. – 8 с.
104. Патент на изобретение 2581040 РФ, МПК Н01F 7/16. Втяжной электромагнит / М. Г. Линт, А. В. Михайлов, О. С. Черненко; патентообладатель ОАО «МРСК Центра и Приволжья». – № 2014122130/07; заявл. 30.05.2014; опубл. 10.04.2016. Бюл. № 10. – 6 с.
105. Патент на изобретение 2581046 РФ, МПК Н01Н 51/04. Указательное электромагнитное реле / М. Г. Линт, А. В. Михайлов, О. С. Черненко; патентообладатель ОАО «МРСК Центра и Приволжья». – № 2014110571/07; заявл. 19.03.2014; опубл. 10.04.2016. Бюл. № 10. – 13 с.
106. Патент на изобретение 2588606 РФ, МПК Н01Н 33/66. Вакуумный выключатель / А. В. Михайлов, М. А. Калинин; патентообладатель ЗАО «ЧЭАЗ». – № 2015107650/07; заявл. 04.03.2015; опубл. 10.07.2016. Бюл. № 19. – 7 с.
107. Патент на полезную модель 49356 РФ, МПК Н01Н 33/66. Вакуумный выключатель / А. В. Михайлов; патентообладатель ОАО «ЧЭАЗ». – № 2005114690/22; заявл. 13.05.2005; опубл. 10.11.2005. Бюл. № 31. – 2 с.
108. Патент на полезную модель 82065 РФ, МПК Н01Н 33/66. Вакуумный выключатель / А. В. Михайлов; патентообладатель ЗАО «ЧЭАЗ». – № 2008136644/22; заявл. 11.09.2008; опубл. 10.04.2009. Бюл. № 10. – 2 с.
109. Патент на полезную модель 136632 РФ, МПК Н01Н 47/00. Схема управления электромагнитным коммутационным аппаратом / Архипова Е. В. [и др.]; патентообладатель ОАО «ВНИИР-Прогресс». – № 2013127916/07; заявл. 18.06.2013; опубл. 10.01.2014. Бюл. № 1. – 2 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Условия эксплуатации и технические характеристики реле РВ100, РВ200

Условия эксплуатации:

- климатическое исполнение УХЛ4 или О, категория размещения «4» по ГОСТ 15150-69.
- диапазон рабочих температур окружающего воздуха от минус 30 до плюс 55 °С для исполнения УХЛ4 и от минус 10 до плюс 55 °С для исполнения О4.
- группа механического исполнения М39 по ГОСТ 17516.1-90, при этом реле должны быть также устойчивыми к воздействию многократных ударов с ускорением 3g, длительностью удара от 2 до 20 мс;
- степень защиты оболочки реле IP40, а контактных зажимов для присоединения внешних проводников - IP00 по ГОСТ 14255-69.

Таблица А.1 – Основные технические характеристики реле РВ 100, РВ 200

Наименование параметра	Значение
Напряжение срабатывания, %, не более	
- для реле серии РВ 100:	
- климатического исполнения УХЛ4	70
- климатического исполнения О4	80
- для реле серии РВ 200	85
Абсолютная величина разброса времени срабатывания реле, сек, не более:	
- в реле с пределами уставок от 0,1 до 1,3 сек	0,06
- в реле с пределами уставок от 0,25 до 3,5 сек	0,12
- в реле с пределами уставок от 0,5 до 9 сек	0,34
- в реле с пределами уставок от 1 до 20 сек	1,0
Время срабатывания контакта мгновенного действия, сек, не более	0,08
Время возврата подвижных частей в исходное положение, сек, не более	0,15

Продолжение таблицы А.1

Наименование параметра	Значение
Время замкнутого состояния скользящих контактов (при срабатывании реле), сек	
- в реле с пределами уставок от 0,1 до 1,3 сек	0,05-0,12
- в реле с пределами уставок от 0,25 до 3,5 сек	0,1-0,4
- в реле с пределами уставок от 0,5 до 9 сек	0,25-0,75
- в реле с пределами уставок от 1 до 20 сек	0,6-1,6
Коммутационная способность контактов реле (кроме скользящего) при напряжении от 24 V до 250 V:	
- в цепи постоянного тока с постоянной времени индуктивной нагрузки не более 0,005 сек и токе не более 1А, W	100
- в цепи переменного тока с коэффициентом мощности не менее 0,4 и токе не более 5А, VA	400
- в цепи переменного тока с коэффициентом мощности не менее 0,5 и токе не более 5А, VA	500
Длительно допустимый ток через контакты в замкнутом состоянии, А:	
- с выдержкой времени	5
- мгновенного действия	3
Потребляемая мощность установившегося режима, не более (при втянутом якоре):	
- для реле постоянного тока, Вт	30
- для реле переменного тока, ВА	20
Коммутационная износостойкость, циклы ВО	3000
Механическая износостойкость, циклы ВО	5000
Габаритные размеры выпрямительного устройства ВУ200, мм, не более	67×128×110
Габаритные размеры реле, мм, не более	98×147×137
Масса реле, кг, не более	1,5
Масса выпрямительного устройства ВУ 200, кг, не более	0,5

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Условия эксплуатации и технические характеристики
указательных реле РУ21 и РУ21-1*Условия эксплуатации:*

- Высота над уровнем моря до 2000 м;
- Окружающая среда взрывобезопасная, не содержащая пыли в количестве, нарушающем работу реле, а также агрессивных газов и паров в концентрациях, разрушающих металлы и изоляцию;
- Установка реле на вертикальной плоскости с допустимым отклонением не более 5° в любую сторону;
- Вибрация мест крепления реле в диапазоне частот от 10 до 100Гц при ускорении не более 0.5g;
- Изделие предназначено для установки в заземленных металлоконструкциях.
- Климатическое исполнение УХЛ или О, категория размещения «4» по ГОСТ 15150-69;
- Диапазон рабочих температур окружающего воздуха от минус 20 до плюс 55 °С для исполнения УХЛ4 и от минус 10 до плюс 55 °С для исполнения О4.

Технические характеристики:

- 1) Количество контактов РУ21 (возврат контактов и указателя действия в исходное состояние производится вручную): 2 замыкающих без самовозврата;
- 2) Количество контактов РУ21-1: 2 замыкающих и дополнительный контакт с самовозвратом;
- 3) Время срабатывания контакта с самовозвратом не более 15 мс;
- 4) Коммутационная способность контактов без самовозврата в цепях постоянного тока с постоянной времени индуктивной нагрузки не более 0,005 с при напряжении от 24 до 250 В или токе до 2 А не более 50 Вт;

- 5) Коммутационная способность контактов без самовозврата в цепях переменного тока с коэффициентом мощности не менее 0,5 при напряжении от 24 до 250 В или токе до 2 А не более 200 ВА;
- 6) Коммутационная износостойкость контактов без самовозврата (с нагрузкой на замыкающих контактах) не менее 250 циклов включения-отключения;
- 7) Механическая износостойкость не менее 5000 циклов включения-отключения;
- 8) Мощность активной нагрузки (коммутируемые: ток от 0,001 до 0,1 А; напряжение от 0,1 до 60 В) коммутируемая контактом с самовозвратом: 6 Вт;
- 9) Испытательное напряжение переменного тока частотой 50 Гц, приложенное между электрически независимыми частями реле, а также между ними и металлическими частями корпуса реле и выдерживаемое электрической изоляцией в состоянии поставки в течение 1 мин без пробоя и перекрытия: 2000 В;
- 10) Испытательное напряжение переменного тока частотой 50 Гц, приложенное между разобщающимися в процессе работы контактными частями реле и выдерживаемое электрической изоляцией в состоянии поставки в течение 1 мин без пробоя и перекрытия: 500 В;
- 11) Степень защиты оболочки реле IP40, а контактных зажимов для присоединения внешних проводников IP00 по ГОСТ 14255-69;
- 12) Габаритные размеры: не более 66×66×115 мм;
- 13) Масса не более 0,55 кг.

Таблица Б.1 – Основные параметры реле РУ21 и РУ21-1 (постоянного тока)

Тип реле	Номинальный ток, А	Ток срабатывания, А	Потребляемая мощность, Вт, не более	Длительный ток, А
РУ21/0,006; РУ21-1/0,006	0,006	0,006	0,25	0,018
РУ21/0,01; РУ21-1/0,01	0,010	0,010	0,25	0,030

Продолжение таблицы Б.1

Тип реле	Номиналь- ный ток, А	Ток срабаты- вания, А	Потребляемая мощность, Вт, не более	Длитель- ный ток, А
РУ21/0,016; РУ21-1/0,016	0,016	0,016	0,25	0,048
РУ21/0,025; РУ21-1/0,025	0,025	0,025	0,25	0,075
РУ21/0,05; РУ21-1/0,05	0,050	0,050	0,25	0,150
РУ21/0,06; РУ21-1/0,06	0,060	0,060	0,25	0,180
РУ21/0,08; РУ21-1/0,08	0,080	0,080	0,25	0,240
РУ21/0,1; РУ21-1/0,1	0,100	0,100	0,25	0,300
РУ21/0,16; РУ21-1/0,16	0,160	0,160	0,25	0,480
РУ21/0,25; РУ21-1/0,25	0,250	0,250	0,25	0,750
РУ21/0,4; РУ21-1/0,4	0,400	0,400	0,25	1,200
Р21/0,5; Р21-1/0,5	0,500	0,500	0,25	1,500
РУ21/1; РУ21-1/1	1,000	1,000	0,25	3,000
РУ21/2; РУ21-1/2	2,000	2,000	0,25	6,000
РУ21/2,5; РУ21-1/2,5	2,500	2,500	0,25	7,500
РУ21/4; РУ21-1/4	4,000	4,000	0,25	12,000

Таблица Б.2 – Основные параметры реле РУ21 и РУ21-1 (постоянного тока)

Тип реле	Номинальное напряжение, В	Напряжение срабаты- вания, В	Потребляемая мощность, Вт, не более	Длительное напряже- ние, В
РУ21/220; РУ21-1/220	220	160,0	2,75	242,0
РУ21/110; РУ21-1/110	110	80,0	1,75	121,0
РУ21/48; РУ21-1/48	48	35,0	1,75	53,0
РУ21/24; РУ21-1/24	24	17,5	1,75	26,5

Таблица Б.3 – Основные параметры реле РУ21 (переменного тока)

Тип реле	Номинальный ток, А	Ток срабатывания, А	Потребляемая мощность, ВА, не более	Длительный ток, А
РУ21/0,025	0,025	0,025	2,0	0,0375
РУ21/0,05	0,050	0,050	2,0	0,075
РУ21/0,08	0,080	0,080	2,0	0,12
РУ21/0,1	0,100	0,100	2,0	0,15
РУ21/0,16	0,160	0,160	2,0	0,24
РУ21/0,25	0,250	0,250	2,0	0,375
РУ21/0,4	0,400	0,400	2,0	0,6
РУ21/0,5	0,500	0,500	2,0	0,75
РУ21/1	1,000	1,000	2,0	1,5
РУ21/2	2,500	2,500	2,0	3,75

Таблица Б.4 – Основные параметры реле РУ21 (переменного тока)

Тип реле	Номинальное напряжение, В	Напряжение срабатывания, В	Потребляемая мощность, Вт, не более	Длительное напряжение, В
РУ21/220	220	176	5,0	242,0
РУ21/110	110	88	5,0	121,0

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Результаты оптимизационных расчетов геометрических соизмерностей
форсированного электромагнита и его параметров

Таблица В.1 – Результаты оптимизационных расчетов V_a^* , δ^* , H^* , A^* , A_{II}^* , d^* , c^* , $B_{0,ср}$ по критерию «объем активных материалов электромагнита»

№	x_i	V_a^*	δ^*	H^*	A^*	A_{II}^*	d^*	c^*	$B_{0,ср}$
1		393,7	0,369	3,10	0,455	0,400	1,26	3,10	1,61
2		137,0	0,492	2,33	0,466	0,400	1,26	2,50	1,61
3		635,5	0,303	2,74	0,450	0,400	1,26	2,63	1,61
4		221,5	0,426	2,33	0,453	0,400	1,26	3,12	1,62
5		570,3	0,328	3,51	0,450	0,400	1,26	2,50	1,53
6		182,7	0,468	2,97	0,455	0,400	1,26	2,70	1,59
7		1184,9	0,235	2,11	0,450	0,400	1,26	2,50	1,07
8		323,2	0,377	2,68	0,450	0,400	1,26	2,50	1,53
9		517,9	0,348	3,73	0,455	0,400	1,26	2,92	1,61
10		175,7	0,485	3,16	0,455	0,400	1,26	3,10	1,62
11		817,2	0,292	3,45	0,450	0,400	1,26	2,68	1,62
12		283,9	0,410	2,97	0,450	0,400	1,26	3,34	1,62
13		1411	0,212	1,56	0,450	0,400	1,26	2,52	1,64
14		239,2	0,447	3,67	0,450	0,400	1,26	2,90	1,60
15		2425	0,174	1,37	0,450	0,400	1,26	2,50	0,65
16		405,1	0,364	3,32	0,450	0,400	1,26	2,50	1,57
17		348,5	0,372	2,68	0,455	0,400	1,26	2,79	1,61
18		125,1	0,495	2,04	0,450	0,400	1,27	2,50	1,54
19		569,5	0,315	2,55	0,464	0,400	1,26	2,90	1,60
20		199,3	0,426	1,98	0,455	0,400	1,26	2,75	1,63
21		507,9	0,334	3,16	0,450	0,400	1,26	2,50	1,51
22		161,2	0,481	2,74	0,450	0,400	1,26	2,72	1,58
23		1054,2	0,242	1,98	0,450	0,400	1,26	2,50	1,10
24		292,3	0,382	2,39	0,450	0,400	1,26	2,50	1,51
25		430,0	0,362	3,32	0,453	0,400	1,26	3,05	1,61
26		147,4	0,493	2,62	0,464	0,400	1,26	2,70	1,62
27		688,0	0,302	3,03	0,450	0,400	1,26	2,75	1,61
28		241,4	0,426	2,62	0,453	0,400	1,26	2,70	1,62
29		792,1	0,271	2,23	0,453	0,400	1,26	3,50	0,99
30		199,2	0,459	3,16	0,450	0,400	1,26	2,68	1,59
31		1388,0	0,220	1,95	0,450	0,400	1,26	2,50	0,95
32		347,8	0,373	2,90	0,450	0,400	1,26	2,50	1,55
33		396,5	0,367	3,10	0,453	0,400	1,26	3,03	1,61
34		137,1	0,493	2,39	0,450	0,400	1,26	2,55	1,61
35		639,9	0,302	2,74	0,450	0,400	1,26	2,59	1,61
36		222,6	0,425	2,33	0,455	0,400	1,26	3,08	1,62
37		574,9	0,328	3,51	0,450	0,400	1,26	2,50	1,52
38		184	0,470	3,03	0,455	0,400	1,26	2,79	1,59

Продолжение таблицы В.1

$\text{№} \backslash x_i$	V_a^*	δ^*	H^*	A^*	A_{Π}^*	d^*	c^*	$B_{0, \text{cp}}$
39	1145,8	0,241	2,33	0,450	0,400	1,26	2,50	1,14
40	325,6	0,376	2,68	0,450	0,400	1,26	2,50	1,53
41	522	0,348	3,80	0,450	0,400	1,26	2,99	1,61
42	177,5	0,485	3,90	0,485	0,400	1,26	3,03	1,62
43	823,4	0,291	3,45	0,453	0,400	1,26	2,65	1,62
44	286,2	0,397	2,74	0,453	0,400	1,26	2,70	1,62
45	744,1	0,314	4,31	0,450	0,400	1,26	2,50	1,57
46	241,4	0,447	3,67	0,455	0,400	1,26	2,90	1,60
47	1513,3	0,223	2,52	0,455	0,400	1,26	2,50	1,04
48	408,3	0,364	3,35	0,450	0,400	1,26	2,50	1,57
49	350	0,373	2,74	0,453	0,400	1,26	2,90	1,61
50	125,3	0,494	2,04	0,450	0,400	1,26	2,50	1,54
51	572,2	0,315	2,62	0,450	0,400	1,26	2,97	1,60
52	199,4	0,429	2,04	0,453	0,400	1,26	2,90	1,63
53	509,2	0,335	3,22	0,450	0,400	1,26	2,50	1,52
54	162,5	0,479	2,74	0,450	0,400	1,26	2,72	1,58
55	1026,3	0,247	2,17	0,450	0,400	1,26	2,50	1,16
56	293,8	0,384	2,46	0,450	0,400	1,26	2,54	1,52
57	433,3	0,361	3,32	0,455	0,400	1,26	3,01	1,61
58	147,6	0,493	2,68	0,450	0,400	1,26	2,75	1,62
59	692,8	0,301	0,303	0,450	0,400	1,26	2,72	1,61
60	242,1	0,424	2,55	0,472	0,400	1,26	3,30	1,63
61	624,4	0,324	3,80	0,450	0,400	1,26	2,50	1,55
62	200,5	0,458	3,16	0,450	0,400	1,26	2,65	1,60
63	12,68	0,235	2,33	0,455	0,400	1,26	2,50	1,09
64	349,9	0,373	2,90	0,450	0,400	1,26	2,50	1,55
65	392,8	0,370	3,03	0,455	0,400	1,26	3,08	1,61
66	137,4	0,493	2,33	0,450	0,400	1,27	2,52	1,60
67	635	0,306	2,74	0,450	0,400	1,26	2,75	1,60
68	222	0,429	2,33	0,450	0,400	1,26	3,25	1,62
69	660,8	0,292	2,33	0,453	0,400	1,26	2,50	1,12
70	182,2	0,472	2,97	0,450	0,400	1,26	2,77	1,58
71	1315,4	0,223	1,69	0,491	0,400	1,26	2,50	0,95
72	323,4	0,378	2,62	0,450	0,400	1,26	2,50	1,52
73	515,8	0,348	3,67	0,450	0,400	1,26	2,90	1,61
74	175,6	0,487	3,10	0,4561	0,400	1,26	3,06	1,62
75	815,1	0,293	3,38	0,450	0,400	1,26	2,68	1,62
76	283,7	0,402	2,74	0,450	0,400	1,26	2,83	1,62
77	7,337	0,317	4,28	0,450	0,400	1,26	2,52	1,58
78	238,5	0,449	3,61	0,453	0,400	1,26	2,90	1,60
79	1367,7	0,242	3,16	0,450	0,400	1,26	2,50	1,25
80	406,4	0,365	3,26	0,450	0,400	1,26	2,54	1,55
81	345,6	0,378	2,74	0,450	0,400	1,26	3,03	1,62
82	128,3	0,489	1,92	0,461	0,400	1,26	2,50	1,49
83	567,8	0,319	2,62	0,450	0,400	1,26	3,10	1,61
84	198,3	0,434	2,04	0,450	0,400	1,26	2,50	1,51
85	506	0,336	3,10	0,450	0,400	1,26	2,50	1,51

Продолжение таблицы В.1

$\text{№} \backslash x_i$	V_a^*	δ^*	H^*	A^*	A_{Π}^*	d^*	c^*	$B_{0, \text{cp}}$
86	161,4	0,481	2,68	0,450	0,400	1,26	2,72	1,57
87	984,1	0,257	2,39	0,450	0,400	1,26	2,50	1,25
88	292,7	0,383	2,33	0,450	0,400	1,26	2,50	1,50
89	427,2	0,366	3,32	0,450	0,400	1,26	3,14	1,62
90	147,5	0,494	2,62	0,450	0,400	1,27	2,74	1,61
91	683,7	0,305	3,03	0,450	0,400	1,26	2,81	1,62
92	240,2	0,416	2,39	0,453	0,400	1,26	2,86	1,63
93	616,3	0,326	3,73	0,450	0,400	1,26	2,50	1,56
94	198,6	0,460	3,10	0,45	0,400	1,26	2,65	1,60
95	1178,7	0,248	2,74	0,450	0,400	1,26	2,50	1,23
96	348,4	0,373	2,81	0,450	0,400	1,26	2,50	1,53
97	395,4	0,368	3,03	0,453	0,400	1,26	2,99	1,61
98	141,8	0,488	2,07	0,453	0,400	1,26	2,70	1,50
99	636,5	0,305	2,74	0,450	0,400	1,26	2,65	1,62
100	223,0	0,428	2,33	0,453	0,400	1,26	3,19	1,62
101	572,7	0,329	3,45	0,450	0,400	1,26	2,50	1,52
102	184,3	0,47	2,97	0,450	0,400	1,26	2,81	1,56
103	1087,4	0,255	2,81	0,450	0,400	1,26	2,50	1,29
104	327,6	0,374	2,55	0,450	0,400	1,26	2,50	1,49
105	518,9	0,350	3,73	0,453	0,400	1,26	2,95	1,62
106	177,0	0,485	3,10	0,461	0,400	1,26	3,03	1,62
107	818,5	0,296	3,51	0,450	0,400	1,26	2,83	1,63
108	285,9	0,400	2,74	0,450	0,400	1,26	2,79	1,62
109	739,8	0,316	4,28	0,450	0,400	1,26	2,50	1,58
110	240,9	0,449	3,61	0,458	0,400	1,26	2,90	1,59
111	1359,9	0,248	3,51	0,450	0,400	1,26	2,50	1,34
112	408,7	0,364	3,26	0,450	0,400	1,26	2,50	1,56
113	348,5	0,377	2,74	0,450	0,400	1,26	2,99	1,62
114	128,5	0,489	1,95	0,450	0,400	1,26	2,50	1,49
115	573	0,318	2,62	0,458	0,400	1,26	3,10	1,61
116	200,3	0,427	1,98	0,450	0,400	1,26	2,79	1,62
117	509,3	0,336	3,16	0,450	0,400	1,26	2,52	1,52
118	162,5	0,483	2,74	0,450	0,400	1,26	2,79	1,57
119	983,2	0,259	2,52	0,450	0,400	1,26	2,50	1,28
120	295	0,382	2,33	0,450	0,400	1,26	2,50	1,49
121	430,9	0,365	3,32	0,453	0,400	1,26	3,10	1,62
122	148	0,493	2,62	0,453	0,400	1,26	2,70	1,62
123	688,8	0,303	3,00	0,450	0,400	1,26	2,70	1,63
124	242	0,414	2,39	0,450	0,400	1,26	2,83	1,62
125	621,3	0,327	3,80	0,450	0,400	1,26	2,52	1,57
126	200,3	0,459	3,10	0,453	0,400	1,26	2,63	1,60
127	1170,1	0,253	3,03	0,450	0,400	1,26	2,50	1,31
128	350,9	0,374	2,87	0,450	0,400	1,26	2,54	1,54
129	384,9	0,372	2,93	0,453	0,400	1,26	3,05	1,62
130	142,5	0,49	2,04	0,510	0,400	1,26	2,68	1,46
131	623,2	0,309	2,68	0,455	0,400	1,26	2,72	1,62
132	216,9	0,434	2,27	0,455	0,400	1,26	3,30	1,62

Продолжение таблицы В.1

$\text{№}_0 \backslash x_i$	V_a^*	δ^*	H^*	A^*	A_{Π}^*	d^*	c^*	$B_{0, \text{cp}}$
133	566,3	0,330	3,35	0,450	0,400	1,26	2,5	1,51
134	180,0	0,478	2,97	0,450	0,400	1,26	2,94	1,57
135	1079,9	0,256	2,74	0,450	0,400	1,26	2,50	1,29
136	321,4	0,378	2,52	0,450	0,400	1,26	2,52	1,50
137	505,8	0,354	3,67	0,453	0,400	1,26	3,05	1,62
138	170,1	0,494	3,10	0,450	0,400	1,26	3,19	1,62
139	800,4	0,297	3,38	0,453	0,400	1,26	2,79	1,63
140	275,8	0,410	2,74	0,450	0,400	1,26	3,03	1,63
141	730,5	0,318	4,21	0,450	0,400	1,26	2,52	1,58
142	234,1	0,448	3,45	0,450	0,400	1,26	2,72	1,60
143	1349	0,250	3,57	0,450	0,400	1,26	2,50	1,37
144	401	0,366	3,16	0,450	0,400	1,26	2,50	1,55
145	340	0,381	3,68	0,450	0,403	1,26	3,05	1,62
146	128	0,463	1,92	0,450	0,403	1,32	2,65	1,47
147	556	0,313	2,39	0,450	0,403	1,26	2,66	1,62
148	194	0,437	1,98	0,450	0,403	1,26	3,05	1,62
149	504	0,338	3,10	0,450	0,400	1,26	2,54	1,52
150	159	0,484	2,62	0,450	0,400	1,26	2,70	1,57
151	977	0,260	2,46	0,450	0,408	1,26	2,50	1,28
152	290	0,384	2,27	0,450	0,400	1,26	2,50	1,50
153	421	0,364	3,16	0,450	0,408	1,26	2,90	1,62
154	146	0,493	2,39	0,480	0,400	1,26	2,52	1,62
155	674	0,305	2,90	0,450	0,400	1,26	2,70	1,62
156	234	0,424	2,39	0,455	0,400	1,26	3,10	1,63
157	614	0,328	3,70	0,450	0,400	1,26	2,50	1,56
158	195	0,463	3,03	0,450	0,400	1,26	2,65	1,60
159	1160	0,255	3,03	0,450	0,400	1,26	2,50	1,32
160	345	0,375	2,74	0,450	0,400	1,26	2,50	1,53
161	388	0,371	2,97	0,453	0,400	1,26	3,01	1,62
162	143	0,490	2,27	0,450	0,400	1,36	2,72	1,52
163	627	0,308	2,68	0,455	0,400	1,26	2,68	1,62
164	218	0,432	2,27	0,453	0,400	1,26	3,25	1,62
165	570	0,330	3,38	0,450	0,400	1,26	2,50	1,52
166	181	0,477	2,97	0,450	0,400	1,26	2,90	1,57
167	1084	0,257	2,81	0,450	0,400	1,26	2,50	1,31
168	324	0,378	2,55	0,450	0,405	1,26	2,54	1,50
169	510	0,353	3,67	0,455	0,400	1,26	3,01	1,62
170	171	0,494	3,10	0,455	0,400	1,26	3,19	1,62
171	806	0,296	3,38	0,453	0,400	1,26	2,75	1,63
172	277	0,409	2,74	0,450	0,400	1,26	2,99	1,63
173	735	0,318	4,21	0,450	0,400	1,26	2,50	1,58
174	236	0,444	3,38	0,450	0,400	1,26	2,57	1,60
175	1356	0,251	3,64	0,450	0,400	1,26	2,50	1,38
176	404	0,365	3,16	0,450	0,400	1,26	2,50	1,54
177	342	0,380	2,68	0,450	0,400	1,31	3,01	1,62
178	128	0,493	1,92	0,450	0,400	1,26	2,59	1,48
179	559	0,313	2,39	0,453	0,400	1,26	2,65	1,62

Продолжение таблицы В.1

$\text{№} \backslash x_i$	V_a^*	δ^*	H^*	A^*	A_{Π}^*	d^*	c^*	$B_{0, \text{cp}}$
180	195	0,436	1,98	0,450	0,403	1,26	3,01	1,62
181	506	0,337	3,10	0,450	0,400	1,26	2,50	1,52
182	160	0,483	2,62	0,450	0,400	1,26	2,70	1,57
183	982	0,259	2,46	0,450	0,400	1,26	2,50	1,27
184	292	0,383	2,27	0,450	0,400	1,26	2,50	1,49
185	424	0,370	3,32	0,450	0,400	1,26	3,34	1,63
186	147	0,491	2,39	0,480	0,400	1,26	2,50	1,62
187	679	0,306	2,97	0,453	0,400	1,26	2,81	1,63
188	235	0,423	2,39	0,455	0,400	1,26	3,06	1,63
189	618	0,327	3,70	0,450	0,400	1,26	2,50	1,56
190	197	0,462	3,03	0,450	0,400	1,26	2,65	1,59
191	1167	0,255	3,10	0,450	0,414	1,26	2,50	1,34
192	347	0,376	2,81	0,450	0,400	1,26	2,54	1,54
193	385	0,376	2,97	0,453	0,400	1,26	3,21	1,61
194	142	0,489	2,04	0,480	0,400	1,26	2,66	1,46
195	623	0,311	2,68	0,450	0,400	1,26	2,81	1,61
196	218	0,436	2,27	0,450	0,400	1,26	3,41	1,62
197	565	0,332	3,32	0,450	0,400	1,26	2,54	1,51
198	180	0,470	2,74	0,450	0,400	1,26	2,63	1,56
199	1078	0,256	2,65	0,450	0,400	1,26	2,50	1,28
200	322	0,378	2,46	0,450	0,400	1,26	2,50	1,50
201	505	0,358	3,67	0,453	0,400	1,26	3,21	1,62
202	171	0,494	3,03	0,450	0,400	1,26	3,12	1,62
203	799	0,298	3,32	0,453	0,400	1,26	2,77	1,63
204	277	0,410	2,68	0,455	0,400	1,26	2,99	1,62
205	728	0,319	4,08	0,450	0,400	1,26	2,50	1,57
206	234	0,446	3,32	0,450	0,403	1,26	2,57	1,60
207	1348	0,248	3,29	0,450	0,400	1,26	2,50	1,31
208	402	0,367	3,10	0,450	0,400	1,26	2,50	1,54
209	340	0,383	2,65	0,450	0,400	1,26	3,10	1,62
210	131	0,490	1,92	0,450	0,400	1,41	2,50	1,52
211	557	0,313	2,33	0,450	0,405	1,26	2,50	1,62
212	194	0,440	1,98	0,450	0,400	1,26	2,61	1,62
213	502	0,338	3,0	0,450	0,400	1,26	3,15	1,51
214	159	0,482	2,52	0,450	0,400	1,26	2,63	1,56
215	975	0,260	2,39	0,450	0,400	1,26	2,50	1,27
216	291	0,384	2,20	0,450	0,400	1,26	2,50	1,48
217	420	0,366	3,10	0,453	0,400	1,26	2,90	1,62
218	145	0,492	2,39	0,455	0,400	1,26	2,52	1,61
219	676	0,310	2,97	0,450	0,400	1,26	2,97	1,62
220	234	0,423	2,33	0,453	0,400	1,26	2,99	1,63
221	612	0,329	3,61	0,450	0,400	1,26	2,50	1,55
222	195	0,464	2,97	0,450	0,400	1,26	2,61	1,59
223	1163	0,252	2,81	0,450	0,400	1,26	2,50	1,27
224	345	0,375	2,68	0,450	0,400	1,26	2,50	1,52
225	387	0,375	2,97	0,453	0,400	1,26	3,14	1,62
226	142	0,487	2,04	0,480	0,400	1,26	2,52	1,50

Продолжение таблицы В.1

$\text{№} \backslash x_i$	V_a^*	δ^*	H^*	A^*	A_{Π}^*	d^*	c^*	$B_{0, \text{cp}}$
227	627	0,309	2,065	0,450	0,400	1,26	2,70	1,61
228	219	0,436	2,27	0,453	0,400	1,26	3,37	1,62
229	568	0,331	3,32	0,450	0,400	1,26	2,50	1,52
230	181	0,480	2,97	0,450	0,400	1,26	2,97	1,57
231	1083	0,258	2,74	0,450	0,408	1,26	2,20	1,30
232	324	0,377	2,46	0,450	0,400	1,26	2,50	1,49
233	509	0,356	3,67	0,450	0,400	1,26	3,14	1,62
234	172	0,494	3,03	0,455	0,400	1,26	3,12	1,62
235	805	0,297	3,32	0,453	0,400	1,26	2,74	1,63
236	278	0,412	2,74	0,450	0,400	1,26	3,10	1,63
237	733	0,319	4,15	0,450	0,400	1,26	2,50	1,58
238	236	0,451	3,45	0,450	0,400	1,26	2,79	1,59
239	1352	0,252	3,57	0,450	0,400	1,26	2,50	1,38
240	405	0,366	3,10	0,450	0,400	1,26	2,50	1,54
241	342	0,383	2,68	0,450	0,400	1,26	3,15	1,62
242	131	0,493	1,92	0,450	0,400	1,36	2,65	1,48
243	560	0,313	2,33	0,453	0,400	1,26	2,59	1,62
244	195	0,439	1,98	0,450	0,400	1,26	3,12	1,62
245	505	0,338	3,03	0,450	0,400	1,26	2,50	1,52
246	160	0,481	2,52	0,450	0,400	1,26	2,61	1,56
247	981	0,259	2,39	0,450	0,400	1,26	2,50	1,27
248	292	0,385	2,27	0,450	0,400	1,26	2,54	1,49
249	423	0,364	3,10	0,453	0,400	1,26	2,86	1,62
250	147	0,494	2,39	0,480	0,403	1,27	2,55	1,61
251	680	0,309	2,97	0,453	0,400	1,26	2,94	1,62
252	236	0,422	2,33	0,453	0,400	1,26	2,95	1,63
253	617	0,328	3,61	0,450	0,400	1,26	2,50	1,54
254	197	0,466	3,03	0,450	0,400	1,26	2,72	1,59
255	1163	0,256	3,03	0,450	0,400	1,26	2,50	1,33
256	347	0,376	2,74	0,450	0,400	1,26	2,52	1,53
257	1628	0,238	3,80	0,450	0,400	1,26	2,50	1,55
258	142	0,491	2,39	0,450	0,400	1,26	2,54	1,61
259	172	0,487	3,16	0,455	0,400	1,26	2,66	1,58
260	554	0,318	2,68	0,450	0,400	1,26	2,50	1,55
261	234	0,410	2,04	0,455	0,400	1,26	2,86	1,62
262	542	0,327	3,00	0,450	0,403	1,26	2,50	1,35
263	299	0,382	2,33	0,450	0,403	1,26	2,61	1,56
264	467	0,355	3,51	0,450	0,400	1,26	2,57	1,61
265	421	0,364	3,26	0,453	0,400	1,26	2,70	1,59
266	319	0,384	2,62	0,450	0,400	1,26	2,73	1,59
267	358	0,379	2,97	0,450	0,400	1,26	2,94	1,59
268	361	0,374	2,90	0,450	0,400	1,26	2,74	1,59
269	359	0,375	2,97	0,450	0,400	1,26	2,77	1,59
270	360	0,379	2,90	0,450	0,400	1,26	2,90	1,58
271	365	0,369	2,97	0,453	0,400	1,26	2,61	1,60
272	353	0,374	2,68	0,450	0,400	1,26	2,54	1,59
273	360	0,378	2,97	0,450	0,400	1,26	2,90	1,59

Таблица В.2 – Результаты оптимизационных расчетов $B_{0.отп}$, $F_{ср}^*$, $F_{отп}^*$, $P_{п}^*$, $P_{но}^*$, $P_{во}^*$, n , $\theta_{но}^*$, $\theta_{во}^*$ по критерию «объем активных материалов электромагнита»

$\begin{matrix} x_i \\ \text{№} \end{matrix}$	$B_{0.отп}$	$F_{ср}^*$	$F_{отп}^*$	$P_{п}^*$	$P_{но}^* \cdot 10^{-4}$	$P_{во}^* \cdot 10^{-4}$	n	$\theta_{но}^*$	$\theta_{во}^*$
1	1,10	0,737	0,0547	6,756	0,82	12,10	3,41	0,956	0,977
2	0,96	0,973	0,0472	20,384	0,40	11,84	4,98	0,947	0,975
3	1,22	0,626	0,0459	4,564	0,55	8,11	3,46	0,955	0,973
4	1,12	0,829	0,0419	13,153	0,28	8,20	4,83	0,947	0,973
5	1,37	0,666	0,0539	4,401	1,15	7,61	2,31	0,969	0,971
6	1,28	0,922	0,0474	14,005	0,53	7,96	3,51	0,956	0,973
7	1,33	0,439	0,0377	2,274	1,00	4,90	2,18	0,966	0,962
8	1,39	0,739	0,0423	8,108	0,43	5,39	3,19	0,957	0,967
9	1,04	0,716	0,0521	5,018	0,81	10,29	3,18	0,975	0,984
10	0,95	0,961	0,0476	14,87	0,42	10,61	4,50	0,969	0,983
11	1,18	0,619	0,0445	3,44	0,53	6,87	3,22	0,974	0,981
12	1,08	0,811	0,0411	9,56	0,29	7,13	4,42	0,968	0,981
13	0,89	0,396	0,0319	2,266	1,02	6,37	2,11	0,977	0,973
14	1,22	0,905	0,0454	10,60	0,51	6,78	3,29	0,974	0,981
15	0,98	0,328	0,0266	1,448	0,89	4,05	2,09	0,978	0,967
16	1,34	0,739	0,0401	6,363	0,40	4,61	3,06	0,975	0,977
17	1,11	0,743	0,0545	8,413	0,84	13,73	3,62	0,950	0,975
18	0,97	0,931	0,0475	23,24	0,43	13,27	5,02	0,942	0,973
19	1,27	0,633	0,0482	5,333	0,61	9,36	3,48	0,949	0,970
20	1,12	0,837	0,0413	16,493	0,27	9,07	5,16	0,940	0,969
21	1,40	0,664	0,0554	5,214	1,28	8,81	2,37	0,964	0,969
22	1,31	0,937	0,0491	17,083	0,57	9,18	3,62	0,951	0,971
23	1,37	0,449	0,0396	2,750	1,11	5,62	2,24	0,961	0,959
24	1,41	0,737	0,0431	9,624	0,47	6,20	3,27	0,952	0,964
25	1,08	0,732	0,0539	6,502	0,90	12,44	3,30	0,968	0,981
26	0,96	0,975	0,0476	19,431	0,45	12,66	4,75	0,960	0,979
27	1,22	0,626	0,0460	4,359	0,60	8,32	3,31	0,967	0,977
28	1,12	0,831	0,0424	12,470	0,33	8,58	4,59	0,960	0,977
29	1,14	0,499	0,0405	3,366	1,28	7,84	2,20	0,973	0,972
30	1,25	0,919	0,0463	13,698	0,45	12,66	3,43	0,967	0,977
31	1,24	0,413	0,0341	2,157	1,05	4,90	2,17	0,973	0,977
32	1,38	0,743	0,0417	7,931	0,48	5,59	3,11	0,968	0,972
33	1,10	0,735	0,0544	7,559	0,75	12,23	3,61	0,956	0,978
34	0,96	0,974	0,0474	22,926	0,36	12,03	5,22	0,948	0,976
35	1,22	0,625	0,0457	5,097	0,50	8,21	3,65	0,955	0,973
36	1,12	0,830	0,0418	14,663	0,25	8,26	5,10	0,946	0,973
37	1,37	0,663	0,0537	4,873	1,05	7,76	2,44	0,968	0,972
38	1,28	0,923	0,0478	15,473	0,47	8,06	3,67	0,955	0,973
39	1,36	0,453	0,0400	3,829	0,93	5,07	2,25	0,965	0,963
40	1,39	0,736	0,0421	10,992	0,39	5,49	3,36	0,956	0,968
41	1,04	0,717	0,0522	3,904	0,74	10,42	3,35	0,975	0,984
42	0,95	0,956	0,0476	15,954	0,38	10,51	4,67	0,967	0,983
43	1,17	0,619	0,0443	3,829	0,49	7,01	3,4	0,973	0,981
44	1,05	0,802	0,0393	10,992	0,24	7,00	4,79	0,967	0,980
45	1,31	0,670	0,0506	3,904	0,93	6,56	2,38	0,982	0,980

Продолжение таблицы В.2

$\begin{matrix} x_i \\ \text{№} \end{matrix}$	$B_{0,отп}$	F_{cp}^*	$F_{отп}^*$	$P_{п}^*$	$P_{но}^* \cdot 10^{-4}$	$P_{во}^* \cdot 10^{-4}$	n	$\theta_{но}^*$	$\theta_{во}^*$
46	1,22	0,619	0,0453	11,65	0,46	6,85	3,45	0,973	0,981
47	1,26	0,802	0,0353	1,878	0,86	4,33	2,15	0,979	0,973
48	1,34	0,670	0,0401	7,121	0,36	4,67	3,23	0,974	0,977
49	1,12	0,901	0,0549	9,343	0,46	13,87	3,80	0,950	0,975
50	0,96	0,424	0,0472	26,202	0,39	13,32	5,33	0,942	0,973
51	1,27	0,634	0,0484	6,014	0,55	9,47	3,68	0,949	0,971
52	1,13	0,839	0,0418	18,27	0,25	9,25	5,39	0,940	0,970
53	1,40	0,669	0,0558	5,831	1,15	8,93	2,47	0,963	0,969
54	1,31	0,931	0,0489	18,867	0,51	9,28	3,81	0,950	0,971
55	1,40	0,462	0,0419	3,048	0,99	5,77	2,30	0,961	0,960
56	1,42	0,742	0,0437	10,719	0,42	6,27	3,43	0,951	0,964
57	1,08	0,731	0,0537	7,213	0,82	12,58	3,48	0,967	0,981
58	0,96	0,979	0,0478	22,054	0,40	12,73	5,04	0,961	0,980
59	1,21	0,625	0,0458	4,863	0,56	8,49	3,49	0,966	0,977
60	1,12	0,826	0,0420	13,613	0,27	8,41	4,81	0,958	0,976
61	1,36	0,669	0,0529	4,808	1,12	8,00	2,39	0,976	0,976
62	1,25	0,920	0,0461	15,35	0,50	8,24	3,63	0,966	0,977
63	1,32	0,439	0,0377	2,403	1,02	5,19	2,20	0,974	0,968
64	1,38	0,740	0,0416	8,824	0,43	5,67	3,30	0,967	0,972
65	1,11	0,737	0,0548	6,014	0,90	11,87	3,03	0,957	0,977
66	0,97	0,966	0,0476	18,017	0,50	11,57	4,38	0,949	0,976
67	1,24	0,626	0,0466	4,007	0,59	7,87	3,03	0,956	0,973
68	1,13	0,831	0,0423	11,609	0,31	8,07	4,25	0,948	0,973
69	1,22	0,533	0,0439	3,249	1,24	7,31	2,02	0,966	0,969
70	1,29	0,924	0,0480	12,43	0,58	7,80	3,09	0,957	0,973
71	1,26	0,415	0,0345	1,93	0,99	4,55	1,97	0,963	0,958
72	1,39	0,736	0,0423	7,171	0,46	5,21	2,82	0,958	0,967
73	1,04	0,717	0,0522	4,503	0,87	9,98	2,83	0,976	0,984
74	0,95	0,962	0,0477	13,1	0,45	10,31	3,97	0,969	0,983
75	1,18	0,619	0,0446	3,056	0,58	6,70	2,85	0,975	0,981
76	1,06	0,804	0,0398	8,705	0,30	6,80	4,00	0,968	0,981
77	1,33	0,679	0,0515	3,166	1,09	6,15	1,99	0,984	0,979
78	1,23	0,905	0,0456	9,364	0,55	6,57	2,90	0,975	0,981
79	1,37	0,471	0,0414	1,572	0,88	3,70	1,72	0,984	0,972
80	1,35	0,733	0,0403	5,557	0,43	4,46	2,68	0,975	0,977
81	1,13	0,753	0,0557	7,534	0,92	13,45	3,19	0,951	0,975
82	0,95	0,898	0,0467	19,38	0,47	12,85	4,34	0,941	0,972
83	1,29	0,640	0,0493	4,813	0,68	9,17	3,07	0,951	0,971
84	1,14	0,842	0,0423	14,45	0,31	9,05	4,49	0,941	0,970
85	1,41	0,665	0,0557	4,65	1,34	8,39	2,09	0,966	0,968
86	1,32	0,929	0,0491	14,95	0,61	8,91	3,19	0,952	0,971
87	1,45	0,485	0,0462	2,443	1,08	5,25	1,85	0,968	0,958
88	1,41	0,733	0,0431	8,51	0,50	5,99	2,89	0,952	0,964
89	1,09	0,741	0,0544	5,871	0,98	12,14	2,94	0,968	0,981
90	0,97	0,970	0,0480	17,188	0,49	12,33	4,18	0,962	0,980
91	1,23	0,633	0,0466	3,914	0,66	8,12	2,93	0,968	0,977
92	1,09	0,823	0,0408	11,316	0,33	8,16	4,17	0,960	0,976

Продолжение таблицы В.2

$\begin{matrix} x_i \\ \text{№} \end{matrix}$	$B_{0,\text{отп}}$	$F_{\text{ср}}^*$	$F_{\text{отп}}^*$	P_{Π}^*	$P_{\text{НО}}^* \cdot 10^{-4}$	$P_{\text{ВО}}^* \cdot 10^{-4}$	n	$\theta_{\text{НО}}^*$	$\theta_{\text{ВО}}^*$
93	1,37	0,675	0,0536	3,879	1,31	7,47	2,00	0,979	0,975
94	1,26	0,921	0,0464	12,239	0,60	7,90	3,05	0,968	0,977
95	1,40	0,473	0,0429	1,965	1,03	4,52	1,76	0,980	0,967
96	1,38	0,737	0,0415	6,948	0,50	5,38	2,74	0,969	0,972
97	1,10	0,734	0,0544	6,750	0,81	11,92	3,21	0,956	0,977
98	0,95	0,900	0,0470	17,785	0,43	11,73	4,37	0,948	0,976
99	1,23	0,631	0,0463	4,557	0,53	7,97	3,23	0,955	0,974
100	1,13	0,831	0,0421	12,957	0,28	8,14	4,49	0,947	0,973
101	1,38	0,664	0,0540	4,344	1,12	7,47	2,16	0,969	0,972
102	1,29	0,911	0,0478	13,507	0,53	7,90	3,22	0,956	0,973
103	1,44	0,492	0,0465	2,274	0,96	4,80	1,87	0,971	0,962
104	1,38	0,719	0,0414	7,803	0,42	5,27	2,97	0,956	0,967
105	1,04	0,723	0,0524	5,037	0,79	10,12	2,99	0,975	0,984
106	0,95	0,960	0,0475	14,595	0,41	10,42	4,19	0,969	0,983
107	1,19	0,626	0,0453	3,413	0,54	6,84	2,99	0,974	0,981
108	1,05	0,803	0,0396	9,705	0,27	6,88	4,22	0,968	0,981
109	1,32	0,677	0,0512	3,521	0,99	6,29	2,11	0,983	0,980
110	1,23	0,900	0,0455	10,275	0,50	6,64	3,04	0,974	0,981
111	1,40	0,495	0,0442	1,797	0,88	4,01	1,80	0,984	0,973
112	1,34	0,734	0,0401	6,236	0,39	4,53	2,85	0,974	0,977
113	1,13	0,750	0,0554	8,362	0,84	13,61	3,36	0,950	0,976
114	0,95	0,901	0,0467	21,979	0,43	13,10	4,61	0,942	0,973
115	1,28	0,639	0,0493	5,286	0,62	9,26	3,22	0,949	0,971
116	1,12	0,838	0,0415	16,327	0,27	9,02	4,80	0,941	0,970
117	1,41	0,670	0,0561	5,197	1,24	8,65	2,21	0,964	0,969
118	1,32	0,934	0,0496	16,607	0,57	9,11	3,34	0,951	0,971
119	1,46	0,493	0,0477	2,716	1,05	5,52	1,93	0,967	0,959
120	1,41	0,729	0,0428	9,429	0,46	6,06	3,05	0,951	0,964
121	1,09	0,739	0,0543	6,498	0,90	12,29	3,09	0,968	0,981
122	0,96	0,980	0,0477	19,556	0,43	12,42	4,46	0,961	0,980
123	1,22	0,632	0,0461	4,387	0,59	8,20	3,11	0,967	0,977
124	1,09	0,820	0,0406	12,618	0,30	8,24	4,40	0,960	0,977
125	1,37	0,679	0,0539	4,341	1,20	7,70	2,12	0,978	0,976
126	1,25	0,919	0,0462	13,573	0,54	8,00	3,21	0,967	0,977
127	1,43	0,492	0,0457	2,210	1,04	4,86	1,82	0,98	0,968
128	1,38	0,738	0,0419	7,733	0,46	5,52	2,88	0,968	0,972
129	1,11	0,745	0,0550	7,305	0,69	11,58	4,01	0,955	0,978
130	0,96	0,877	0,0470	17,363	0,37	10,75	5,23	0,942	0,973
131	1,25	0,634	0,0470	4,828	0,47	7,72	3,99	0,954	0,974
132	1,14	0,838	0,0427	13,980	0,24	7,81	5,60	0,945	0,973
133	1,38	0,661	0,0543	4,566	1,00	7,33	2,66	0,967	0,972
134	1,31	0,921	0,0491	14,41	0,47	7,75	3,69	0,955	0,974
135	1,45	0,492	0,0467	2,394	0,87	4,75	2,30	0,969	0,964
136	1,40	0,728	0,0423	8,307	0,37	5,18	3,66	0,955	0,968
137	1,06	0,728	0,0530	5,401	0,69	9,86	3,71	0,974	0,984
138	0,96	0,977	0,0484	16,15	0,35	10,16	5,27	0,968	0,984
139	1,20	0,626	0,0455	3,640	0,46	6,61	3,72	0,973	0,982

Продолжение таблицы В.2

$\begin{matrix} x_i \\ \text{№} \end{matrix}$	$B_{0,отп}$	F_{cp}^*	$F_{отп}^*$	$P_{п}^*$	$P_{но}^* \cdot 10^{-4}$	$P_{во}^* \cdot 10^{-4}$	n	$\theta_{но}^*$	$\theta_{во}^*$
140	1,08	0,815	0,0406	10,49	0,23	6,68	5,24	0,967	0,981
141	1,33	0,679	0,0518	3,71	0,90	6,22	2,59	0,982	0,980
142	1,22	0,907	0,0452	11,36	0,42	6,43	3,86	0,973	0,981
143	1,42	0,506	0,0457	1,909	0,82	4,06	2,19	0,984	0,974
144	1,35	0,734	0,0404	6,622	0,34	4,40	3,52	0,973	0,977
145	1,14	0,757	0,0560	8,967	0,73	13,20	4,15	0,949	0,976
146	1,01	0,866	0,0484	21,23	0,42	12,74	5,36	0,941	0,973
147	1,26	0,641	0,0476	5,925	0,49	8,78	4,14	0,948	0,972
148	1,15	0,846	0,0426	17,37	0,24	8,75	5,88	0,940	0,970
149	1,42	0,670	0,0567	5,472	1,12	8,52	2,71	0,963	0,970
150	1,32	0,935	0,0495	17,93	0,48	8,75	4,18	0,949	0,972
151	1,47	0,493	0,0478	2,813	0,96	5,44	2,30	0,965	0,961
152	1,42	0,733	0,0433	10,09	0,40	5,90	3,78	0,950	0,965
153	1,09	0,741	0,0539	6,942	0,77	11,86	3,78	0,967	0,981
154	0,96	0,978	0,0473	20,73	0,35	11,57	5,58	0,958	0,979
155	1,23	0,634	0,0463	4,70	0,51	7,95	3,87	0,966	0,978
156	1,12	0,832	0,0417	13,517	0,26	7,98	5,45	0,959	0,977
157	1,37	0,679	0,0541	4,587	1,08	7,58	2,61	0,976	0,976
158	1,27	0,925	0,0467	14,61	0,47	7,78	3,99	0,966	0,978
159	1,44	0,497	0,0467	2,331	0,96	4,87	2,22	0,978	0,968
160	1,38	0,735	0,0418	8,241	0,40	5,32	3,58	0,966	0,973
161	1,11	0,743	0,0548	8,133	0,63	11,70	4,23	0,954	0,978
162	1,03	0,868	0,0493	19,24	0,39	11,68	5,36	0,947	0,976
163	1,24	0,634	0,0468	5,40	0,42	7,80	4,22	0,953	0,974
164	1,14	0,837	0,0425	15,67	0,21	7,87	5,93	0,945	0,973
165	1,38	0,664	0,0543	5,106	0,91	7,50	2,81	0,966	0,973
166	1,30	0,922	0,0489	16,17	0,43	7,84	4,20	0,954	0,974
167	1,45	0,495	0,0473	2,67	0,81	4,92	2,43	0,968	0,964
168	1,40	0,728	0,0424	9,184	0,35	5,27	3,78	0,954	0,968
169	1,06	0,727	0,0529	6,00	0,63	9,96	3,91	0,973	0,984
170	0,96	0,974	0,0484	17,82	0,32	10,22	5,53	0,968	0,984
171	1,20	0,626	0,0453	4,065	0,42	6,69	3,93	0,972	0,982
172	1,08	0,814	0,0405	11,71	0,21	6,73	5,54	0,967	0,981
173	1,33	0,678	0,0506	4,138	0,81	6,34	2,74	0,981	0,981
174	1,21	0,907	0,0445	12,860	0,37	6,45	4,13	0,972	0,981
175	1,42	0,509	0,0460	2,140	0,76	4,20	2,32	0,982	0,975
176	1,35	0,730	0,0402	7,342	0,31	4,45	3,71	0,973	0,978
177	1,13	0,756	0,055/8	10,07	0,65	13,32	4,43	0,948	0,976
178	1,00	0,876	0,0481	24,50	0,36	12,81	5,80	0,940	0,973
179	1,26	0,640	0,0475	6,630	0,44	8,85	4,41	0,947	0,971
180	1,15	0,846	0,0425	19,43	0,22	8,81	6,22	0,939	0,970
181	1,41	0,672	0,0563	6,148	0,00	8,67	2,89	0,961	0,973
182	1,32	0,930	0,0493	19,85	0,44	8,83	4,40	0,948	0,961
183	1,47	0,492	0,0476	3,189	0,85	5,59	2,52	0,962	0,965
184	1,41	0,730	0,0431	11,21	0,36	5,96	3,99	0,948	0,982
185	1,11	0,746	0,0552	7,79	0,72	12,19	4,04	0,966	0,979
186	0,96	0,977	0,0472	23,12	0,32	11,66	5,88	0,958	0,978

Продолжение таблицы В.2

$\begin{matrix} x_i \\ \text{№} \end{matrix}$	$B_{0,отп}$	F_{cp}^*	$F_{отп}^*$	$P_{п}^*$	$P_{но}^* \cdot 10^{-4}$	$P_{во}^* \cdot 10^{-4}$	n	$\theta_{но}^*$	$\theta_{во}^*$
187	1,24	0,634	0,0468	5,177	0,48	8,09	4,04	0,965	0,977
188	1,12	0,831	0,0416	15,09	0,23	8,04	5,75	0,958	0,977
189	1,37	0,676	0,0539	5,084	0,98	7,72	2,76	0,975	0,978
190	1,26	0,919	0,0466	16,135	0,43	7,68	4,20	0,965	0,969
191	1,44	0,501	0,0472	2,528	0,92	5,03	2,24	0,977	0,973
192	1,39	0,740	0,0423	9,188	0,37	5,45	3,76	0,966	0,978
193	1,12	0,747	0,0557	6,443	0,76	11,34	3,52	0,955	0,975
194	0,95	0,878	0,0468	15,92	0,40	10,69	4,70	0,944	0,974
195	1,25	0,635	0,0475	4,28	0,51	7,58	3,51	0,955	0,973
196	1,15	0,839	0,0431	13,39	0,26	7,71	4,93	0,946	0,974
197	1,39	0,663	0,0549	4,044	1,09	7,09	2,34	0,969	0,972
198	1,28	0,910	0,0474	12,98	0,48	7,35	3,59	0,955	0,974
199	1,45	0,489	0,0465	2,132	0,91	4,52	2,04	0,971	0,963
200	1,40	0,726	0,0422	7,43	0,40	5,01	3,25	0,956	0,968
201	1,07	0,731	0,0537	4,783	0,76	9,63	3,26	0,974	0,984
202	0,97	0,973	0,0484	14,18	0,39	9,92	4,64	0,969	0,984
203	1,20	0,627	0,0456	3,235	0,50	6,42	3,29	0,973	0,981
204	1,08	0,813	0,0406	9,210	0,25	6,50	4,62	0,967	0,981
205	1,33	0,672	0,0518	3,258	0,96	5,94	2,28	0,982	0,980
206	1,22	0,908	0,0447	10,15	0,44	6,21	3,42	0,973	0,981
207	1,40	0,488	0,0440	1,665	0,83	3,76	1,95	0,984	0,973
208	1,35	0,732	0,0404	5,846	0,37	4,27	3,11	0,974	0,977
209	1,14	0,757	0,0563	7,977	0,79	12,88	3,69	0,950	0,976
210	1,07	0,853	0,0499	17,89	0,51	12,76	4,58	0,942	0,973
211	1,26	0,641	0,0474	5,25	0,52	8,52	3,64	0,948	0,971
212	1,16	0,847	0,0431	15,34	0,26	8,62	5,20	0,940	0,971
213	1,42	0,669	0,0565	4,883	1,18	8,17	2,41	0,964	0,969
214	1,32	0,927	0,0490	15,84	0,51	8,45	3,71	0,950	0,971
215	1,47	0,492	0,0479	2,524	1,01	5,21	2,06	0,966	0,960
216	1,42	0,728	0,0431	8,90	0,43	5,71	3,34	0,950	0,964
217	1,09	0,741	0,0540	6,262	0,81	11,50	3,44	0,967	0,981
218	0,96	0,987	0,0472	18,821	0,39	11,49	4,98	0,960	0,980
219	1,25	0,635	0,0476	4,085	0,58	7,85	3,35	0,966	0,978
220	1,11	0,831	0,0415	12,062	0,28	7,79	4,84	0,959	0,977
221	1,38	0,675	0,0542	4,042	1,16	7,26	2,30	0,977	0,976
222	1,27	0,925	0,0467	12,98	0,51	7,56	3,53	0,966	0,978
223	1,43	0,485	0,0452	2,063	0,97	4,54	1,99	0,979	0,968
224	1,39	0,732	0,0418	7,27	0,43	5,15	3,16	0,967	0,972
225	1,12	0,747	0,0554	7,203	0,69	11,47	3,72	0,955	0,978
226	0,95	0,894	0,0466	18,42	0,35	10,81	5,05	0,944	0,975
227	1,25	0,634	0,0469	4,805	0,46	7,63	3,73	0,954	0,974
228	1,15	0,838	0,0429	13,77	0,24	7,76	5,20	0,945	0,972
229	1,39	0,663	0,0546	4,534	0,98	7,24	2,49	0,967	0,974
230	1,31	0,926	0,0496	14,25	0,47	7,70	3,69	0,955	0,964
231	1,46	0,495	0,0474	2,336	0,88	4,71	2,09	0,970	0,968
232	1,39	0,723	0,0419	8,242	0,36	5,07	3,43	0,955	0,984
233	1,06	0,730	0,0534	5,346	0,69	9,77	3,45	0,974	0,984

Продолжение таблицы В.2

$\begin{matrix} x_i \\ \text{№} \end{matrix}$	$B_{0,\text{отп}}$	$F_{\text{сп}}^*$	$F_{\text{отп}}^*$	$P_{\text{п}}^*$	$P_{\text{но}}^* \cdot 10^{-4}$	$P_{\text{во}}^* \cdot 10^{-4}$	n	$\theta_{\text{но}}^*$	$\theta_{\text{во}}^*$
234	0,96	0,973	0,0483	15,75	0,35	9,98	4,89	0,968	0,982
235	1,20	0,626	0,0454	3,608	0,45	6,51	3,48	0,973	0,981
236	1,08	0,816	0,0409	10,31	0,23	6,62	4,86	0,967	0,980
237	1,34	0,679	0,0519	3,677	0,88	6,12	2,42	0,981	0,982
238	1,23	0,906	0,0456	11,10	0,42	6,37	3,57	0,973	0,974
239	1,42	0,509	0,0464	1,899	0,81	4,03	2,04	0,983	0,977
240	1,35	0,728	0,0403	6,478	0,34	4,32	3,27	0,973	0,976
241	1,14	0,757	0,0565	8,61	0,72	13,08	3,88	0,949	0,973
242	1,04	0,851	0,0492	20,11	0,44	12,73	4,88	0,941	0,971
243	1,26	0,640	0,0473	5,911	0,47	8,60	3,91	0,947	0,971
244	1,16	0,846	0,0429	17,12	0,24	8,68	5,49	0,940	0,970
245	1,42	0,671	0,0565	5,454	1,08	8,37	2,55	0,962	0,971
246	1,31	0,925	0,0487	12,65	0,46	8,53	3,92	0,949	0,9
247	1,47	0,491	0,0476	2,842	0,90	5,34	2,23	0,964	0,961
248	1,42	0,734	0,0438	9,438	0,40	5,86	3,50	0,950	0,965
249	1,09	0,739	0,0538	6,938	0,74	11,64	3,63	0,966	0,981
250	0,97	0,972	0,0477	19,91	0,36	11,50	5,07	0,958	0,979
251	1,25	0,635	0,0475	4,543	0,53	7,93	3,54	0,966	0,978
252	1,11	0,830	0,0413	13,47	0,25	7,85	5,11	0,959	0,977
253	1,37	0,671	0,0539	4,474	1,05	7,41	2,43	0,976	0,976
254	1,27	0,921	0,0472	14,19	0,48	7,71	3,68	0,966	0,978
255	1,45	0,501	0,0474	2,316	0,95	4,83	2,07	0,978	0,969
256	1,39	0,739	0,0423	8,155	0,40	5,29	3,33	0,966	0,973
257	1,42	0,524	0,0569	1,849	1,42	7,11	2,04	0,978	0,972
258	1,17	0,975	0,0408	20,80	0,25	7,35	4,91	0,955	0,974
259	1,05	0,969	0,0565	15,32	0,83	13,38	3,63	0,962	0,980
260	1,37	0,639	0,0422	5,183	0,43	5,51	3,25	0,962	0,971
261	0,81	0,804	0,0476	13,67	0,35	14,68	5,87	0,950	0,979
262	1,44	0,615	0,0471	4,408	0,86	5,16	2,21	0,973	0,968
263	1,30	0,747	0,0467	9,68	0,47	8,01	3,72	0,942	0,968
264	1,21	0,741	0,0433	5,976	0,45	6,09	3,34	0,978	0,983
265	1,24	0,737	0,0445	6,132	0,45	6,17	3,36	0,968	0,978
266	1,31	0,756	0,0474	9,426	0,55	8,53	3,56	0,955	0,972
267	1,30	0,750	0,0472	6,822	0,59	7,39	3,21	0,963	0,975
268	1,28	0,748	0,0460	8,642	0,46	7,51	3,65	0,961	0,975
269	1,28	0,750	0,0462	8,870	0,47	7,65	3,96	0,961	0,975
270	1,29	0,746	0,0470	6,799	0,57	7,26	3,03	0,962	0,975
271	1,26	0,748	0,0451	7,417	0,58	7,71	2,97	0,963	0,974
272	1,28	0,753	0,0455	8,455	0,41	7,00	4,08	0,959	0,975
273	1,29	0,749	0,0469	7,653	0,53	7,49	3,41	0,962	0,975

Таблица В.3 – Результаты оптимизационных расчетов C_a , δ^* , H^* , A^* , A_{II}^* , d^* , c^* , $B_{0,ср}$ по критерию «стоимость активных материалов», использованных в конструкции электромагнита

№	x_i	C_a , руб.	δ^*	H^*	A^*	A_{II}^*	d^*	c^*	$B_{0,ср}$
1		213,5	0,368	3,10	0,450	0,400	1,26	3,03	1,62
2		254,8	0,491	2,33	0,450	0,400	1,26	2,79	1,50
3		340,8	0,312	2,97	0,450	0,400	1,26	3,14	1,61
4		395,4	0,426	2,33	0,450	0,400	1,26	3,12	1,62
5		328,0	0,320	3,19	0,450	0,400	1,26	2,50	1,42
6		358,9	0,467	2,97	0,450	0,400	1,26	2,74	1,57
7		584,3	0,244	2,39	0,450	0,400	1,26	2,50	1,16
8		620,3	0,369	2,46	0,450	0,400	1,26	2,50	1,44
9		297,7	0,349	3,80	0,450	0,400	1,26	2,99	1,62
10		344,6	0,484	3,16	0,450	0,400	1,26	3,10	1,61
11		465,1	0,298	3,67	0,450	0,400	1,26	3,14	1,62
12		539,6	0,410	2,97	0,450	0,400	1,26	3,34	1,62
13		446,5	0,307	3,96	0,450	0,400	1,26	2,50	1,46
14		493,2	0,447	3,67	0,450	0,400	1,26	2,94	1,59
15		775,5	0,236	3,00	0,450	0,400	1,26	2,50	1,19
16		826,3	0,354	3,00	0,450	0,400	1,26	2,50	1,44
17		183,3	0,374	2,74	0,450	0,400	1,26	2,90	1,62
18		223	0,489	1,98	0,450	0,400	1,26	2,50	1,50
19		294	0,316	2,62	0,450	0,400	1,26	2,94	1,62
20		345,1	0,425	1,98	0,450	0,400	1,26	2,75	1,62
21		284,1	0,327	2,90	0,450	0,400	1,26	2,50	1,42
22		309,2	0,477	2,68	0,450	0,400	1,26	2,65	1,57
23		512,5	0,249	2,20	0,450	0,400	1,26	2,50	1,17
24		542,9	0,374	2,20	0,450	0,400	1,26	2,50	1,43
25		237,7	0,365	3,38	0,450	0,400	1,26	3,15	1,62
26		279	0,493	2,65	0,450	0,400	1,26	2,90	1,56
27		376,5	0,304	3,1	0,450	0,400	1,26	2,83	1,63
28		437,9	0,426	2,62	0,450	0,400	1,26	3,50	1,62
29		363,2	0,316	3,45	0,450	0,400	1,26	2,50	1,44
30		398,5	0,459	3,16	0,450	0,400	1,26	2,68	1,59
31		642,1	0,242	2,62	0,450	0,400	1,26	2,50	1,18
32		682,2	0,363	2,62	0,450	0,400	1,26	2,50	1,43
33		215,7	0,267	3,10	0,450	0,400	1,26	2,99	1,61
34		256,7	0,489	2,33	0,450	0,400	1,26	2,66	1,53
35		343,5	0,311	2,97	0,450	0,400	1,26	3,10	1,61
36		397,7	0,429	2,39	0,450	0,400	1,26	3,30	1,62
37		330,8	0,319	3,19	0,450	0,400	1,26	2,50	1,41
38		361,9	0,466	2,97	0,450	0,400	1,26	2,70	1,57
39		589	0,245	2,46	0,450	0,400	1,26	2,50	1,18
40		625,2	0,368	2,46	0,450	0,400	1,26	2,50	1,43
41		300,8	0,359	4,02	0,450	0,400	1,26	3,70	1,62
42		346,3	0,491	3,32	0,450	0,400	1,26	3,50	1,62
43		469,3	0,297	3,67	0,450	0,400	1,26	3,10	1,62

Продолжение таблицы В.3

№	x_i	C_a , руб.	δ^*	H^*	A^*	A_n^*	d^*	c^*	$B_{0,cp}$
44		544,1	0,409	2,97	0,450	0,400	1,26	3,30	1,62
45		450,7	0,306	3,96	0,450	0,400	1,26	2,50	1,46
46		497,7	0,446	3,67	0,450	0,400	1,26	2,94	1,58
47		781,9	0,236	3,00	0,450	0,400	1,26	2,50	1,18
48		833,2	0,354	3,03	0,450	0,400	1,26	2,50	1,45
49		185	0,373	2,74	0,450	0,400	1,26	2,86	1,62
50		224,6	0,494	2,04	0,450	0,400	1,27	2,70	1,48
51		296,3	0,315	2,62	0,450	0,400	1,26	2,90	1,61
52		345,5	0,429	2,04	0,450	0,400	1,26	2,90	1,62
53		286,5	0,326	2,90	0,450	0,400	1,26	2,50	1,41
54		311,6	0,476	2,68	0,450	0,400	1,26	2,61	1,58
55		516,4	0,248	2,20	0,450	0,400	1,26	2,50	1,17
56		547	0,373	2,20	0,450	0,400	1,26	2,50	1,42
57		239,7	0,366	3,45	0,450	0,400	1,26	2,30	1,62
58		280,5	0,493	2,68	0,450	0,400	1,26	2,75	1,62
59		379,9	0,303	3,10	0,450	0,400	1,26	2,79	1,63
60		441,8	0,425	2,62	0,450	0,400	1,26	3,50	1,61
61		366,4	0,315	3,45	0,450	0,400	1,26	2,50	1,43
62		402,0	0,458	3,16	0,450	0,400	1,26	2,65	1,60
63		647,2	0,242	2,65	0,450	0,400	1,26	2,50	1,18
64		687,6	0,364	2,65	0,450	0,400	1,26	2,50	1,44
65		217,1	0,372	3,10	0,450	0,400	1,26	3,19	1,62
66		262,2	0,493	2,33	0,450	0,400	1,26	3,10	1,43
67		346,9	0,309	2,81	0,450	0,400	1,26	2,83	1,61
68		404,2	0,429	2,33	0,450	0,400	1,26	3,25	1,62
69		333,3	0,321	3,10	0,450	0,400	1,26	2,50	1,41
70		366,4	0,468	2,90	0,450	0,400	1,26	2,74	1,56
71		593,7	0,246	2,39	0,450	0,400	1,26	2,50	1,18
72		633,2	0,369	2,39	0,450	0,400	1,26	2,50	1,43
73		302,5	0,353	3,80	0,450	0,400	1,26	3,15	1,62
74		352,7	0,484	3,10	0,450	0,400	1,26	3,03	1,61
75		473,8	0,297	3,51	0,450	0,400	1,26	2,90	1,62
76		552,4	0,414	2,97	0,450	0,400	1,26	3,54	1,62
77		453,4	0,307	3,80	0,450	0,400	1,26	2,50	1,43
78		502,8	0,447	3,54	0,450	0,400	1,26	2,90	1,56
79		787,5	0,236	2,90	0,450	0,400	1,26	2,50	1,18
80		843,1	0,359	2,97	0,450	0,400	1,26	2,50	1,45
81		186,5	0,378	2,97	0,450	0,400	1,26	3,03	1,62
82		228,5	0,495	1,98	0,450	0,400	1,26	2,83	1,43
83		300,8	0,319	2,62	0,450	0,400	1,26	3,10	1,61
84		350,3	0,434	2,04	0,450	0,400	1,26	3,03	1,62
85		288,9	0,327	2,81	0,450	0,400	1,26	2,50	1,40
86		315,9	0,478	2,62	0,450	0,400	1,26	2,61	1,57
87		521,0	0,249	2,14	0,450	0,400	1,26	2,50	1,17
88		554,4	0,374	2,14	0,450	0,400	1,26	2,50	1,42
89		241,8	0,369	3,38	0,450	0,400	1,26	3,35	1,62

Продолжение таблицы В.3

№	x_i	C_a , руб.	δ^*	H^*	A^*	A_n^*	d^*	c^*	$B_{0,cp}$
90		286,4	0,494	2,62	0,450	0,400	1,27	2,74	1,61
91		384,2	0,305	3,03	0,450	0,400	1,26	2,81	1,62
92		452,7	0,429	2,62	0,450	0,400	1,26	3,90	1,61
93		369,0	0,317	3,35	0,450	0,400	1,26	2,50	1,43
94		406,7	0,460	3,10	0,450	0,400	1,26	2,68	1,58
95		652,3	0,243	2,55	0,450	0,400	1,26	2,50	1,18
96		696,2	0,364	2,55	0,455	0,400	1,26	2,50	1,43
97		220,2	0,368	3,03	0,450	0,400	1,26	2,99	1,61
98		263,3	0,394	2,33	0,450	0,400	1,26	3,06	1,45
99		350,6	0,305	2,74	0,450	0,400	1,26	2,65	1,62
100		407,5	0,428	2,33	0,450	0,400	1,26	3,19	1,62
101		336,6	0,321	3,16	0,450	0,400	1,26	2,50	1,42
102		369,8	0,467	2,90	0,450	0,400	1,26	2,70	1,56
103		598,7	0,246	2,39	0,450	0,400	1,26	2,50	1,17
104		638,6	0,368	2,39	0,450	0,400	1,26	2,50	1,42
105		305,9	0,352	3,80	0,450	0,400	1,26	3,10	1,62
106		356,1	0,483	3,10	0,450	0,400	1,26	2,99	1,61
107		478,5	0,296	3,51	0,450	0,400	1,26	2,83	1,63
108		557,4	0,413	2,97	0,450	0,400	1,26	3,5	1,62
109		458,0	0,308	3,86	0,450	0,400	1,26	2,50	1,45
110		507,8	0,448	3,61	0,450	0,400	1,26	2,90	1,59
111		794,6	0,237	2,97	0,450	0,400	1,26	2,50	1,19
112		850,7	0,355	2,97	0,450	0,400	1,26	2,50	1,44
113		188,4	0,377	2,74	0,450	0,400	1,26	2,99	1,62
114		230,0	0,493	1,98	0,450	0,400	1,26	2,68	1,46
115		303,7	0,318	2,62	0,450	0,400	1,26	3,10	1,60
116		355,1	0,427	1,98	0,450	0,400	1,26	2,79	1,62
117		291,6	0,326	2,81	0,450	0,400	1,26	2,50	1,40
118		318,7	0,476	2,62	0,450	0,400	1,26	2,61	1,56
119		525,3	0,246	2,14	0,450	0,400	1,26	2,50	1,16
120		558,9	0,373	2,14	0,450	0,400	1,26	2,50	1,41
121		244,4	0,367	3,38	0,450	0,400	1,26	3,28	1,62
122		288,0	0,494	2,62	0,450	0,400	1,26	2,85	1,57
123		388,0	0,304	3,03	0,450	0,400	1,26	2,79	1,62
124		453,5	0,428	2,62	0,450	0,400	1,26	3,70	1,61
125		372,6	0,317	3,38	0,450	0,400	1,26	2,50	1,43
126		410,6	0,459	3,10	0,450	0,400	1,26	2,68	1,58
127		657,9	0,242	2,55	0,450	0,400	1,26	2,50	1,17
128		702,4	0,365	2,62	0,450	0,400	1,26	2,50	145,
129		216,5	0,375	3,03	0,450	0,400	1,26	3,25	1,61
130		261,0	0,485	2,11	0,450	0,400	1,26	2,50	1,51
131		346,7	0,311	2,74	0,450	0,400	1,26	2,86	1,61
132		399,0	0,433	2,27	0,450	0,400	1,26	3,30	1,62
133		337,4	0,320	3,00	0,450	0,400	1,26	2,50	1,39
134		365,5	0,470	2,81	0,450	0,400	1,26	2,65	1,57
135		601,9	0,245	2,30	0,450	0,400	1,26	2,50	1,16

Продолжение таблицы В.3

№	x_i	C_a , руб.	δ^*	H^*	A^*	A_n^*	d^*	c^*	$B_{0,cp}$
136		634,9	0,369	2,30	0,450	0,400	1,26	2,50	1,41
137		301,7	0,359	3,80	0,450	0,400	1,26	3,43	1,62
138		346,1	0,494	3,10	0,450	0,400	1,26	3,19	1,62
139		473,5	0,299	3,45	0,450	0,400	1,26	2,92	1,63
140		546,1	0,410	2,74	0,450	0,400	1,26	3,03	1,63
141		459,3	0,308	3,73	0,450	0,400	1,26	2,50	1,43
142		502,2	0,451	3,51	0,450	0,400	1,26	2,86	1,59
143		799,7	0,237	2,84	0,450	0,400	1,26	2,50	1,17
144		846,4	0,358	3,90	0,450	0,400	1,26	2,50	1,45
145		185,3	0,385	2,74	0,450	0,400	1,26	3,30	1,61
146		261,0	0,485	2,11	0,450	0,400	1,26	2,50	1,51
147		346,7	0,311	2,74	0,450	0,400	1,26	2,86	1,61
148		399,0	0,433	2,27	0,450	0,400	1,26	3,30	1,62
149		337,4	0,320	3,00	0,450	0,400	1,26	2,50	1,39
150		365,5	0,470	2,81	0,450	0,400	1,26	2,65	1,57
151		527,6	0,248	2,04	0,450	0,400	1,26	2,50	1,15
152		555,6	0,377	2,11	0,450	0,400	1,26	2,50	1,42
153		241,7	0,372	3,32	0,450	0,400	1,26	3,50	1,62
154		283,5	0,492	2,46	0,450	0,400	1,26	2,63	1,59
155		384,3	0,309	3,03	0,450	0,400	1,26	3,01	1,62
156		442,7	0,424	2,39	0,450	0,400	1,26	3,10	1,62
157		373,8	0,319	3,32	0,450	0,400	1,26	2,50	1,43
158		405,9	0,463	3,03	0,450	0,400	1,26	2,65	1,60
159		661,9	0,243	2,49	0,450	0,400	1,26	2,50	1,17
160		698,6	0,365	2,49	0,450	0,400	1,26	2,50	1,42
161		218,3	0,374	3,03	0,450	0,400	1,26	3,19	1,62
162		265,4	0,495	2,27	0,450	0,400	1,31	3,05	1,45
163		394,2	0,310	2,74	0,450	0,400	1,26	2,83	1,61
164		401,7	0,436	2,33	0,450	0,400	1,26	3,52	1,62
165		340,2	0,320	3,00	0,450	0,400	1,26	2,50	1,38
166		368,3	0,468	2,81	0,450	0,400	1,26	2,63	1,57
167		606,2	0,245	2,30	0,450	0,400	1,26	2,50	1,15
168		639,5	0,369	2,33	0,450	0,400	1,26	2,50	1,42
169		304,6	0,355	3,73	0,450	0,400	1,26	3,15	1,62
170		348,9	0,493	3,10	0,450	0,400	1,26	3,19	1,61
171		477,6	0,298	3,45	0,450	0,400	1,26	2,90	1,62
172		550,2	0,409	2,74	0,450	0,400	1,26	2,99	1,63
173		463,2	0,309	3,80	0,450	0,400	1,26	2,50	1,44
174		506,2	0,450	3,51	0,450	0,400	1,26	2,83	1,59
175		805,7	0,236	2,84	0,450	0,400	1,26	2,50	1,17
176		852,8	0,357	2,90	0,450	0,400	1,26	2,50	1,44
177		186,7	0,383	2,74	0,450	0,400	1,26	3,23	1,62
178		231,4	0,494	1,92	0,450	0,400	1,26	2,77	1,43
179		301,8	0,313	2,39	0,450	0,400	1,26	2,65	1,62
180		346,7	0,441	20,4	0,450	0,400	1,26	3,26	1,62
181		294,5	0,327	2,74	0,450	0,400	1,26	2,50	1,39

Продолжение таблицы В.3

№	x_i	C_a , руб.	δ^*	H^*	A^*	A_n^*	d^*	c^*	$B_{0,cp}$
182		317,4	0,483	2,62	0,450	0,400	1,26	2,70	1,57
183		531,4	0,246	2,04	0,450	0,400	1,26	2,50	1,14
184		559,3	0,376	2,11	0,450	0,400	1,26	2,50	1,42
185		243,2	0,370	2,32	0,450	0,400	1,26	3,34	1,63
186		2857	0,491	2,46	0,450	0,400	1,26	2,59	1,60
187		387,0	0,306	2,97	0,450	0,400	1,26	2,81	1,62
188		445,8	0,422	2,39	0,450	0,400	1,26	3,06	1,62
189		376,8	0,318	3,32	0,450	0,400	1,26	2,50	1,43
190		409,1	0,462	3,03	0,450	0,400	1,26	2,65	1,59
191		666,6	0,242	2,49	0,450	0,400	1,26	2,50	1,16
192		703,7	0,364	2,49	0,450	0,400	1,26	2,50	1,42
193		220,3	0,379	3,03	0,450	0,400	1,26	3,43	1,62
194		266,7	0,489	2,11	0,450	0,400	1,26	2,68	1,47
195		353,3	0,311	2,68	0,450	0,400	1,26	2,81	1,61
196		408,8	0,436	2,27	0,450	0,400	1,26	3,50	1,61
197		342,6	0,322	2,97	0,450	0,400	1,26	2,50	1,40
198		372,3	0,470	2,74	0,450	0,400	1,26	2,63	1,56
199		610,9	0,244	2,20	0,450	0,400	1,26	2,50	1,14
200		647,3	0,370	2,27	0,450	0,400	1,26	2,50	1,41
201		306,9	0,359	3,70	0,450	0,400	1,26	3,30	1,62
202		354,5	0,494	3,03	0,450	0,400	1,26	3,12	1,62
203		482,3	0,300	3,38	0,450	0,400	1,26	2,92	1,62
204		559,1	0,409	2,68	0,450	0,400	1,26	2,99	1,62
205		465,9	0,310	3,67	0,450	0,400	1,26	2,50	1,43
206		511,5	0,452	3,45	0,450	0,400	1,26	2,83	1,59
207		811,0	0,237	2,74	0,450	0,400	1,26	2,50	1,16
208		862,3	0,357	2,81	0,450	0,400	1,26	2,50	1,43
209		188,9	0,385	2,68	0,450	0,400	1,26	3,32	1,61
210		239,5	0,495	1,92	0,450	0,400	1,36	2,77	1,45
211		305,6	0,316	2,39	0,450	0,400	1,26	2,79	1,51
212		352,6	0,440	1,96	0,450	0,400	1,26	3,15	1,62
213		296,8	0,328	2,68	0,450	0,400	1,26	2,50	1,39
214		321,3	0,482	2,52	0,450	0,400	1,26	2,63	1,56
215		610,9	0,244	2,20	0,450	0,400	1,26	2,50	1,14
216		566,3	0,376	2,04	0,450	0,400	1,26	2,50	1,41
217		247,5	0,375	3,32	0,450	0,400	1,26	3,90	1,61
218		290,8	0,492	2,39	0,450	0,400	1,26	2,66	1,56
219		391,5	0,310	2,97	0,450	0,400	1,26	2,97	1,62
220		453,1	0,422	2,33	0,450	0,400	1,26	2,99	1,62
221		379,3	0,318	3,19	0,450	0,400	1,26	2,50	1,41
222		413,8	0,464	2,97	0,450	0,400	1,26	2,61	1,59
223		671,5	0,242	2,39	0,450	0,400	1,26	2,50	1,15
224		712,1	0,367	2,46	0,450	0,400	1,26	2,50	1,43
225		222,2	0,377	3,03	0,450	0,400	1,26	3,35	1,62
226		268,2	0,487	2,11	0,450	0,400	1,26	2,59	1,49
227		356,3	0,310	2,68	0,450	0,400	1,26	2,79	1,61

Продолжение таблицы В.3

№	x_i	C_a , руб.	δ^*	H^*	A^*	A_n^*	d^*	c^*	$B_{0,cp}$
228		410,5	0,435	2,27	0,450	0,400	1,26	3,37	1,62
229		345,6	0,321	2,97	0,450	0,400	1,26	2,50	1,39
230		375,8	0,472	2,81	0,450	0,400	1,26	2,70	1,56
231		615,6	0,246	2,27	0,450	0,400	1,26	2,50	1,16
232		652,2	0,369	2,27	0,450	0,400	1,26	2,50	1,41
233		309,8	0,359	3,73	0,450	0,400	1,26	3,35	1,62
234		357,0	0,493	3,03	0,450	0,400	1,26	3,12	1,61
235		486,7	0,301	3,45	0,450	0,400	1,26	3,03	1,62
236		561,6	0,412	2,74	0,450	0,400	1,26	3,10	1,63
237		470,1	0,309	3,67	0,450	0,400	1,26	2,50	1,42
238		516,1	0,451	3,45	0,450	0,400	1,26	2,79	1,59
239		817,6	0,237	2,81	0,450	0,400	1,26	2,50	1,17
240		869,4	0,357	2,84	0,450	0,400	1,26	2,50	1,44
241		190,5	0,383	2,68	0,450	0,400	1,26	3,15	1,62
242		241,1	0,493	1,92	0,450	0,400	1,36	2,65	1,48
243		308,0	0,315	2,39	0,450	0,400	1,26	2,75	1,61
244		355,1	0,439	1,98	0,450	0,400	1,26	3,12	1,62
245		299,4	0,328	2,68	0,450	0,400	1,26	2,50	1,39
246		323,8	0,481	2,52	0,450	0,400	1,26	2,61	1,56
247		539,7	0,250	2,04	0,450	0,400	1,26	2,50	1,16
248		570,6	0,375	2,04	0,450	0,400	1,26	2,50	1,41
249		248,7	0,374	3,32	0,450	0,400	1,26	3,70	1,61
250		291,9	0,494	2,46	0,450	0,400	1,26	2,63	1,60
251		394,8	0,309	2,97	0,450	0,400	1,26	2,94	1,62
252		456,6	0,421	2,33	0,450	0,400	1,26	2,95	1,63
253		382,7	0,319	3,26	0,450	0,400	1,26	2,50	1,42
254		417,3	0,465	3,00	0,450	0,400	1,26	2,70	1,58
255		676,8	0,242	2,39	0,450	0,400	1,26	2,50	1,15
256		717,6	0,366	2,46	0,450	0,400	1,26	2,50	1,42
257		368,3	0,226	3,10	0,450	0,400	1,26	2,50	1,35
2583		452,1	0,491	2,39	0,450	0,400	1,26	2,54	1,61
259		201,1	0,491	3,22	0,450	0,400	1,26	2,90	1,54
260		624,5	0,314	2,55	0,450	0,400	1,26	2,50	1,50
261		238,5	0,409	2,04	0,450	0,400	1,26	2,86	1,61
262		620,4	0,312	2,49	0,450	0,400	1,26	2,50	1,19
263		322,0	0,379	2,27	0,450	0,400	1,26	2,50	1,56
264		566,5	0,361	3,67	0,450	0,400	1,26	2,90	1,61
265		496,8	0,366	3,32	0,450	0,400	1,26	2,81	1,59
266		352,1	0,384	2,62	0,450	0,400	1,26	2,77	1,59
267		405,5	0,372	2,81	0,450	0,400	1,26	2,59	1,60
268		413,4	0,377	2,97	0,450	0,400	1,26	2,90	1,58
269		400,8	0,375	2,97	0,450	0,400	1,26	2,77	1,59
270		417,4	0,375	2,81	0,450	0,400	1,26	2,65	1,59
271		401,6	0,372	3,03	0,450	0,400	1,26	2,75	1,59
272		417,4	0,374	2,68	0,450	0,400	1,26	2,54	1,59
273		409,9	0,378	2,97	0,450	0,400	1,26	2,90	1,59

Таблица В.4 – Результаты оптимизационных расчетов $B_{0.отп}$, $F_{ср}^*$, $F_{отп}^*$, $P_{п}^*$, $P_{но}^*$, $P_{во}^*$, n , $\theta_{но}^*$, $\theta_{во}^*$ по критерию «стоимость активных материалов», использованных в конструкции электромагнита

№	x_i	$B_{0.отп}$	$F_{ср}^*$	$F_{отп}^*$	$P_{п}^*$	$P_{но}^* \cdot 10^{-4}$	$P_{во}^* \cdot 10^{-4}$	n	$\theta_{но}^*$	$\theta_{во}^*$
1		1,10	0,740	0,0545	6,874	0,82	12,15	3,45	0,957	0,978
2		0,96	0,901	0,0473	17,98	0,44	11,95	4,67	0,948	0,976
3		1,26	0,633	0,0482	4,442	0,60	8,29	3,34	0,956	0,974
4		1,12	0,828	0,0418	13,16	0,28	8,21	4,84	0,947	0,973
5		1,34	0,619	0,0510	4,077	1,13	7,23	2,27	0,968	0,971
6		1,28	0,912	0,0473	13,82	0,53	7,97	3,49	0,956	0,973
7		1,38	0,459	0,0410	2,270	0,83	4,51	2,10	0,968	0,962
8		1,36	0,695	0,0400	7,638	0,42	5,20	3,17	0,956	0,967
9		1,04	0,723	0,0524	5,097	0,81	10,30	3,20	0,975	0,984
10		0,94	0,957	0,0475	14,87	0,42	10,64	4,50	0,969	0,983
11		1,20	0,626	0,0462	3,384	0,57	7,03	3,15	0,974	0,981
12		1,08	0,811	0,0411	9,65	0,29	7,14	4,42	0,968	0,981
13		1,29	0,621	0,0486	3,189	1,04	6,06	2,17	0,983	0,979
14		1,22	0,899	0,0454	10,46	0,51	6,78	3,27	0,974	0,981
15		1,34	0,455	0,0393	1,735	0,79	3,77	1,97	0,983	0,973
16		1,31	0,679	0,0378	5,776	0,39	4,36	2,99	0,974	0,976
17		1,12	0,749	0,0550	8,491	0,84	13,75	3,62	0,951	0,975
18		0,95	0,907	0,0467	22,50	0,43	13,28	4,97	0,942	0,973
19		1,27	0,640	0,0485	5,483	0,61	9,36	3,51	0,950	0,971
20		1,12	0,834	0,0412	16,51	0,27	9,09	5,16	0,941	0,969
21		1,37	0,626	0,0526	4,929	1,22	8,34	2,35	0,963	0,968
22		1,30	0,927	0,0484	16,96	0,55	9,09	3,63	0,951	0,971
23		1,41	0,466	0,0426	2,739	0,91	5,23	2,16	0,964	0,959
24		1,38	0,698	0,0408	9,191	0,45	5,92	3,27	0,950	0,964
25		1,09	0,739	0,0543	6,581	0,92	12,52	3,31	0,968	0,981
26		0,96	0,939	0,0479	18,31	0,48	12,55	4,60	0,961	0,980
27		1,23	0,633	0,0465	4,393	0,62	8,38	3,30	0,967	0,977
28		1,12	0,829	0,0424	12,48	0,33	8,59	4,59	0,960	0,977
29		1,32	0,620	0,0503	3,963	1,22	7,35	2,21	0,977	0,975
30		1,25	0,919	0,0463	13,68	0,56	8,14	3,43	0,967	0,977
31		1,37	0,459	0,0407	2,187	0,91	4,59	2,02	0,977	0,967
32		1,34	0,687	0,0391	7,317	0,45	5,28	3,07	0,967	0,972
33		1,10	0,738	0,0543	7,634	0,75	12,29	3,63	0,956	0,978
34		0,95	0,917	0,0470	20,81	0,38	12,07	5,03	0,948	0,976
35		1,25	0,631	0,0480	4,941	0,54	8,39	3,35	0,955	0,974
36		1,13	0,831	0,0423	14,58	0,26	8,36	5,06	0,947	0,973
37		1,34	0,616	0,0508	4,519	0,03	7,37	5,40	0,967	0,971
38		1,27	0,913	0,0471	15,49	1,47	8,06	3,69	0,955	0,974
39		1,39	0,962	0,0415	2,526	0,77	4,67	2,21	0,967	0,963
40		1,36	0,692	0,0398	8,474	0,38	5,27	3,34	0,955	0,967
41		1,06	0,731	0,0540	5,630	0,78	10,69	3,31	0,974	0,984
42		0,96	0,974	0,0486	16,72	0,40	10,94	4,72	0,969	0,984
43		1,20	0,624	0,0460	3,762	0,52	7,12	3,32	0,974	0,981

Продолжение таблицы В.4

№	x_i	$B_{0,отп}$	$F_{сп}^*$	$F_{отп}^*$	$P_{п}^*$	$P_{но}^* \cdot 10^{-4}$	$P_{во}^* \cdot 10^{-4}$	n	$\theta_{но}^*$	$\theta_{во}^*$
44	1,08	0,808	0,0409	10,71	0,27	7,20	4,66	0,968	0,981	
45	1,28	0,618	0,0484	3,532	0,95	6,19	2,29	0,981	0,979	
46	1,22	0,892	0,0453	11,51	0,47	6,86	3,43	0,974	0,981	
47	1,33	0,454	0,0391	1,930	0,72	3,87	2,09	0,981	0,974	
48	1,31	0,681	0,0379	6,452	0,36	4,44	3,15	0,973	0,977	
49	1,11	0,747	0,0548	6,448	0,76	13,9	3,82	0,950	0,975	
50	0,97	0,888	0,0476	23,67	0,42	13,54	5,06	0,942	0,973	
51	1,27	0,639	0,0483	6,112	0,55	9,47	3,71	0,949	0,971	
52	1,13	0,838	0,0418	18,28	0,25	9,26	5,39	0,941	0,970	
53	1,37	0,623	0,0523	5,462	1,12	8,50	2,48	0,962	0,969	
54	1,30	0,928	0,0481	19,05	0,50	9,19	3,85	0,950	0,971	
55	1,41	0,465	0,0423	3,047	0,82	5,35	2,29	0,961	0,960	
56	1,38	0,695	0,0406	10,20	0,40	5,99	3,45	0,949	0,964	
57	1,09	0,740	0,0547	7,296	0,85	12,76	3,47	0,967	0,981	
58	0,96	0,979	0,0478	22,05	0,40	12,75	5,04	0,961	0,980	
59	1,22	0,632	0,0463	4,898	0,56	8,49	3,49	0,966	0,978	
60	1,12	0,824	0,0422	13,76	0,30	8,66	4,82	0,960	0,977	
61	1,32	0,618	0,0501	4,391	1,12	7,51	2,33	0,976	0,975	
62	1,25	0,920	0,0461	15,35	0,50	8,24	3,63	0,966	0,977	
63	1,37	0,460	0,0408	2,435	0,84	4,73	2,14	0,976	0,968	
64	1,34	0,689	0,0392	8,178	0,42	5,38	3,24	0,966	0,972	
65	1,11	0,744	0,0552	6,101	0,90	11,87	3,04	0,957	0,978	
66	0,96	0,867	0,0477	14,75	0,52	11,66	3,96	0,948	0,976	
67	1,25	0,633	0,0472	4,039	0,61	7,93	3,02	0,957	0,973	
68	1,13	0,831	0,0423	11,61	0,31	8,07	4,25	0,948	0,973	
69	1,34	0,616	0,0510	3,620	1,20	6,91	2,01	0,970	0,970	
70	1,28	0,906	0,0474	12,14	0,57	7,72	3,07	0,957	0,973	
71	1,39	0,763	0,0418	2,032	0,89	4,39	1,85	0,970	0,962	
72	1,36	0,692	0,0400	6,772	0,45	5,03	2,81	0,957	0,967	
73	1,05	0,727	0,0531	4,530	0,88	10,04	2,82	0,976	0,984	
74	0,94	0,960	0,0475	13,27	0,45	10,37	4,00	0,969	0,983	
75	1,20	0,625	0,0456	3,041	0,59	6,74	2,82	0,975	0,981	
76	1,09	0,815	0,0416	8,525	0,32	7,01	3,89	0,968	0,981	
77	1,29	0,611	0,0484	2,789	1,11	5,74	1,91	0,983	0,978	
78	1,22	0,881	0,0452	9,018	0,56	6,50	2,86	0,975	0,981	
79	1,34	0,453	0,0392	1,548	0,82	3,58	1,75	0,984	0,972	
80	1,32	0,684	0,0381	5,171	0,42	4,24	2,65	0,975	0,976	
81	1,13	0,753	0,0557	7,534	0,92	13,45	3,19	0,951	0,975	
82	0,96	0,872	0,0474	18,264	0,51	13,01	4,19	0,942	0,973	
83	1,29	0,640	0,0493	4,813	0,68	9,17	3,07	0,951	0,971	
84	1,14	0,842	0,0423	14,45	0,31	9,05	4,49	0,941	0,970	
85	1,37	0,622	0,0525	4,372	1,29	7,97	2,08	0,965	0,968	
86	1,31	0,926	0,0483	15,09	0,59	8,82	3,22	0,951	0,971	
87	1,41	0,466	0,0426	2,451	0,95	5,00	1,92	0,965	0,958	
88	1,38	0,695	0,0407	8,141	0,48	5,71	2,90	0,951	0,963	
89	1,10	0,743	0,0550	5,848	1,00	12,22	2,92	0,968	0,981	

Продолжение таблицы В.4

№	x_i	$B_{0,отп}$	$F_{сп}^*$	$F_{отп}^*$	$P_{п}^*$	$P_{но}^* \cdot 10^{-4}$	$P_{во}^* \cdot 10^{-4}$	n	$\theta_{но}^*$	$\theta_{во}^*$
90	0,97	0,970	0,0480	17,19	0,49	12,33	4,18	0,962	0,980	
91	1,23	0,633	0,0466	3,914	0,66	8,12	2,93	0,968	0,977	
92	1,13	0,828	0,0430	10,878	0,37	8,47	4,00	0,960	0,977	
93	1,33	0,618	0,0504	3,52	430	7,03	1,95	0,978	0,974	
94	1,26	0,913	0,0464	12,04	0,61	7,89	3,02	0,968	0,977	
95	1,37	0,459	0,0409	1,956	0,96	4,38	1,79	0,979	0,967	
96	1,34	0,685	0,0391	6,493	0,49	5,10	2,72	0,968	0,971	
97	1,10	0,736	0,0544	6,755	0,81	11,93	3,21	0,957	0,978	
98	0,96	0,876	0,0478	16,69	0,47	11,83	4,20	0,948	0,976	
99	1,23	0,631	0,0463	4,557	0,53	7,93	3,23	0,955	0,974	
100	1,13	0,830	0,0421	12,96	0,28	8,14	4,49	0,947	0,973	
101	1,35	0,622	0,0514	4,060	1,10	7,13	2,13	0,968	0,971	
102	1,28	0,907	0,0472	13,58	0,52	7,82	3,25	0,956	0,973	
103	1,9	0,462	0,0416	2,259	0,82	4,47	1,96	0,968	0,963	
104	1,36	0,689	0,0398	7,507	0,41	5,09	2,96	0,956	0,967	
105	1,05	0,724	0,0528	5,032	0,81	10,19	2,97	0,975	0,984	
106	0,94	0,959	0,0473	14,80	0,41	10,47	4,22	0,969	0,983	
107	1,19	0,626	0,0453	3,413	0,54	6,84	2,99	0,974	0,981	
108	1,09	0,810	0,0414	9,430	0,30	7,08	4,09	0,968	0,981	
109	1,29	0,616	0,0485	3,132	1,01	5,93	2,03	0,982	0,979	
110	1,22	0,896	0,0454	10,30	0,50	6,66	3,05	0,974	0,981	
111	1,34	0,456	0,0396	1,727	0,77	3,71	1,85	0,982	0,973	
112	1,31	0,680	0,0379	5,727	0,39	4,30	2,79	0,974	0,977	
113	1,13	0,750	0,0554	8,362	0,84	13,61	3,36	0,950	0,976	
114	0,96	0,886	0,0471	21,06	0,45	13,14	4,50	0,942	0,973	
115	1,28	0,636	0,0491	5,315	0,62	9,28	3,23	0,950	0,971	
116	1,12	0,838	0,0415	16,33	0,27	9,02	4,80	0,941	0,970	
117	1,37	0,619	0,0522	4,843	1,18	8,14	2,20	0,963	0,969	
118	1,30	0,920	0,0481	16,65	0,54	8,91	3,38	0,950	0,971	
119	1,41	0,464	0,0423	2,725	0,87	5,12	2,04	0,963	0,960	
120	1,38	0,692	0,0405	9,029	0,43	5,79	3,06	0,950	0,964	
121	1,10	0,741	0,0548	6,497	0,91	12,39	3,08	0,968	0,981	
122	0,96	0,946	0,0478	18,32	0,46	12,4	4,32	0,961	0,980	
123	1,23	0,631	0,0464	4,338	0,60	8,23	3,09	0,967	0,977	
124	1,13	0,828	0,0427	12,19	0,33	8,53	4,24	0,960	0,977	
125	1,33	0,619	0,0504	3,923	1,19	7,22	2,07	0,977	0,975	
126	1,25	0,906	0,0462	13,26	0,56	7,99	3,17	0,967	0,977	
127	1,37	0,458	0,0406	2,174	0,88	4,50	1,90	0,977	0,968	
128	1,35	0,693	0,0395	7,302	0,45	5,24	2,87	0,967	0,972	
129	1,12	0,746	0,0565	7,268	0,71	11,68	3,98	0,955	0,978	
130	0,94	0,904	0,0464	19,76	0,34	11,12	5,58	0,947	0,976	
131	1,25	0,634	0,0475	4,793	0,48	7,81	3,95	0,954	0,974	
132	1,14	0,834	0,0426	14,0	0,24	7,83	5,60	0,946	0,973	
133	1,34	0,611	0,0508	4,223	0,97	6,93	2,62	0,966	0,972	
134	1,28	0,915	0,0474	14,75	0,44	7,57	4,07	0,954	0,974	
135	1,39	0,461	0,0413	2,387	0,72	4,38	2,43	0,966	0,964	

Продолжение таблицы В.4

№	x_i	$B_{0,отп}$	$F_{сп}^*$	$F_{отп}^*$	$P_{п}^*$	$P_{но}^* \cdot 10^{-4}$	$P_{во}^* \cdot 10^{-4}$	n	$\theta_{но}^*$	$\theta_{во}^*$
136	1,36	0,687	0,0398	7,985	0,35	4,93	3,67	0,954	0,967	
137	1,07	0,733	0,0540	5,382	0,72	10,0	3,67	0,974	0,984	
138	0,96	0,977	0,0484	16,15	0,35	10,16	5,27	0,968	0,984	
139	1,21	0,628	0,0459	3,625	0,47	6,67	3,69	0,973	0,982	
140	1,08	0,815	0,0406	10,49	0,23	6,68	5,24	0,967	0,981	
141	1,29	0,610	0,0485	3,268	0,91	5,81	2,48	0,981	0,980	
142	1,23	0,904	0,0457	11,14	0,43	6,47	3,80	0,973	0,981	
143	1,34	0,452	0,0392	1,815	0,68	3,65	2,28	0,981	0,974	
144	1,32	0,685	0,0384	3,139	0,34	4,20	3,46	0,973	0,977	
145	1,15	0,757	0,0568	8,903	0,74	13,3	4,14	0,949	0,976	
146	0,94	0,904	0,0464	19,76	0,34	11,12	5,58	0,947	0,976	
147	1,25	0,634	0,0475	4,793	0,48	7,81	3,95	0,954	0,974	
148	1,14	0,834	0,0426	13,99	0,24	7,83	5,60	0,946	0,973	
149	1,34	0,611	0,0508	4,223	0,97	6,93	2,62	0,966	0,972	
150	1,28	0,915	0,0474	17,75	0,44	7,57	4,07	0,954	0,974	
151	1,40	0,462	0,0419	2,887	0,76	5,00	2,53	0,960	0,961	
152	1,39	0,700	0,0412	9,732	0,38	5,67	3,79	0,949	0,964	
153	1,11	0,472	0,0555	6,896	0,80	12,05	3,80	0,966	0,981	
154	0,96	0,963	0,0474	20,70	0,37	11,79	5,56	0,960	0,980	
155	1,25	0,635	0,0476	4,592	0,54	8,08	3,78	0,966	0,978	
156	1,12	0,828	0,0417	13,524	0,26	7,99	5,45	0,959	0,977	
157	1,33	0,621	0,0508	4,155	1,07	7,14	2,54	0,975	0,976	
158	1,27	0,925	0,0467	14,61	0,47	7,78	3,99	0,966	0,978	
159	1,37	0,458	0,0408	2,296	0,79	4,45	2,34	0,975	0,969	
160	1,35	0,686	0,0393	7,705	0,39	5,05	3,55	0,966	0,972	
161	1,12	0,745	0,0554	8,105	0,64	11,80	4,20	0,954	0,978	
162	1,00	0,855	0,0489	18,86	0,39	11,56	5,33	0,947	0,976	
163	1,25	0,633	0,0473	5,353	0,43	7,89	4,18	0,953	0,974	
164	1,15	0,840	0,0432	15,57	0,22	7,97	5,87	0,945	0,974	
165	1,34	0,609	0,0506	4,687	0,89	7,05	2,77	0,964	0,972	
166	1,28	0,913	0,0472	16,44	0,40	7,64	4,30	0,954	0,974	
167	1,38	0,459	0,0411	2,658	0,65	4,48	2,58	0,964	0,965	
168	1,36	0,690	0,0400	8,929	0,32	5,01	3,87	0,953	0,968	
169	1,06	0,729	0,0533	6,015	0,64	10,05	3,90	0,973	0,984	
170	0,96	0,971	0,0483	17,83	0,32	10,24	5,54	0,968	0,984	
171	1,20	0,625	0,0458	4,027	0,43	6,75	3,90	0,973	0,982	
172	1,08	0,814	0,0405	11,71	0,21	6,73	5,54	0,967	0,981	
173	1,29	0,616	0,0488	3,679	0,83	5,98	2,64	0,980	0,980	
174	1,23	0,904	0,0455	12,47	0,39	6,54	4,03	0,972	0,982	
175	1,33	0,451	0,0390	2,020	0,62	3,73	2,42	0,979	0,974	
176	1,32	0,682	0,0382	6,813	0,31	4,25	3,65	0,972	0,977	
177	1,14	0,757	0,0566	9,961	0,67	13,44	4,8	0,978	0,976	
178	0,96	0,871	0,0473	22,82	0,39	12,80	5,26	0,940	0,974	
179	1,26	0,639	0,0474	6,642	0,44	8,86	4,41	0,947	0,972	
180	1,16	0,848	0,0433	19,27	0,22	8,91	6,19	0,939	0,971	
181	1,37	0,619	0,0523	5,701	0,96	8,15	2,86	0,959	0,970	

Продолжение таблицы В.4

№	x_i	$B_{0,отп}$	$F_{сп}^*$	$F_{отп}^*$	$P_{п}^*$	$P_{но}^* \cdot 10^{-4}$	$P_{во}^* \cdot 10^{-4}$	n	$\theta_{но}^*$	$\theta_{во}^*$
182	1,32	0,930	0,0493	19,85	0,44	8,83	4,40	0,948	0,972	
183	1,40	0,461	0,0417	3,214	0,69	5,10	2,64	0,958	0,961	
184	1,39	0,698	0,0411	10,82	0,34	5,73	4,00	0,947	0,965	
185	1,11	0,746	0,0552	7,788	0,72	12,19	4,04	0,966	0,982	
186	0,96	0,966	0,0473	23,29	0,33	11,88	5,89	0,960	0,980	
187	1,23	0,633	0,0468	5,184	0,48	8,10	4,05	0,965	0,978	
188	1,11	0,828	0,0415	15,11	0,23	8,05	5,75	0,958	0,977	
189	1,33	0,619	0,0506	4,61	0,97	7,27	2,89	0,974	0,976	
190	1,26	0,919	0,0466	16,14	0,43	7,86	4,20	0,965	0,978	
191	1,37	0,457	0,0406	2,556	0,72	4,55	2,48	0,974	0,969	
192	1,35	0,683	0,0392	8,556	0,35	5,11	3,74	0,965	0,972	
193	1,13	0,750	0,0563	6,445	0,78	11,45	3,50	0,956	0,978	
194	0,96	0,884	0,0470	16,56	0,40	10,94	4,78	0,947	0,976	
195	1,25	0,635	0,0475	4,28	0,51	7,58	3,51	0,955	0,974	
196	1,15	0,832	0,0431	12,18	0,17	7,71	4,89	0,946	0,973	
197	1,35	0,615	0,0513	3,783	1,04	6,70	2,32	0,967	0,971	
198	1,28	0,910	0,0474	12,98	0,48	7,35	3,59	0,955	0,974	
199	1,38	0,457	0,0409	2,132	0,75	4,17	2,17	0,967	0,963	
200	1,37	0,689	0,0400	7,107	0,38	4,80	3,25	0,955	0,967	
201	1,07	0,539	0,0539	4,787	0,76	9,68	3,26	0,974	0,984	
202	0,97	0,484	0,0484	14,18	0,39	9,92	4,64	0,969	0,984	
203	1,21	0,460	0,0460	3,208	0,51	6,47	3,26	0,974	0,982	
204	1,08	0,405	0,0405	9,209	0,26	6,51	4,62	0,967	0,981	
205	1,30	0,488	0,0488	2,913	0,97	5,59	2,20	0,982	0,979	
206	1,24	0,906	0,0458	9,923	0,46	6,29	3,37	0,974	0,981	
207	1,34	0,450	0,0391	1,617	0,71	3,47	2,02	0,982	0,973	
208	1,32	0,678	0,0382	5,390	0,36	4,04	3,05	0,973	0,977	
209	1,15	0,757	0,0567	7,917	0,80	12,93	3,67	0,950	0,976	
210	1,04	0,839	0,0495	17,47	0,51	12,60	4,55	0,942	0,973	
211	1,28	0,640	0,0482	5,206	0,54	8,61	3,65	0,949	0,971	
212	1,16	0,847	0,0431	15,34	0,46	8,62	5,20	0,940	0,971	
213	1,38	0,621	0,0527	4,57	1,12	7,71	2,40	0,968	0,969	
214	1,32	0,927	0,0490	15,84	0,51	8,45	3,71	0,950	0,971	
215	1,38	0,457	0,0409	2,132	0,75	4,17	2,17	0,967	0,963	
216	1,39	0,696	0,0410	8,593	0,41	5,48	3,35	0,949	0,964	
217	1,30	0,748	0,0563	6,137	0,89	11,84	3,34	0,966	0,982	
218	0,96	0,938	0,0473	17,50	0,42	11,48	4,80	0,960	0,980	
219	1,25	0,635	0,0476	4,085	0,58	7,85	3,35	0,966	0,978	
220	1,11	0,829	0,0414	12,07	0,28	7,79	4,84	0,959	0,977	
221	1,33	0,613	0,0505	3,652	1,13	6,79	2,24	0,976	0,975	
222	1,27	0,925	0,0467	12,98	0,51	7,56	3,53	0,966	0,978	
223	1,37	0,456	0,0405	2,049	0,82	4,24	2,08	0,976	0,968	
224	1,35	0,688	0,0396	6,861	0,42	4,91	3,14	0,966	0,972	
225	1,13	0,749	0,0560	7,177	0,71	11,58	3,70	0,955	0,978	
226	0,95	0,896	0,0467	19,04	0,35	11,03	5,12	0,946	0,976	
227	1,25	0,633	0,0473	4,753	0,47	7,67	3,70	0,954	0,974	

Продолжение таблицы В.4

$\begin{matrix} x_i \\ \text{№} \end{matrix}$	$B_{0,\text{отп}}$	$F_{\text{сп}}^*$	$F_{\text{отп}}^*$	$P_{\text{п}}^*$	$P_{\text{но}}^* \cdot 10^{-4}$	$P_{\text{во}}^* \cdot 10^{-4}$	n	$\theta_{\text{но}}^*$	$\theta_{\text{во}}^*$
228	1,15	0,837	0,0429	13,78	0,24	7,77	5,20	0,946	0,974
229	1,35	0,613	0,0511	4,194	0,95	6,83	2,45	0,966	0,972
230	1,29	0,914	0,0478	14,44	0,44	7,51	3,77	0,953	0,974
231	1,36	0,460	0,0414	2,371	0,70	4,32	2,28	0,965	0,964
232	1,07	0,686	0,0398	7,886	0,35	4,85	3,42	0,954	0,968
233	0,96	0,731	0,0539	5,312	0,70	9,84	3,43	0,974	0,985
234	1,21	0,969	0,0482	15,76	0,35	10,0	4,89	0,968	0,984
235	1,08	0,627	0,0464	3,551	0,47	6,61	3,42	0,973	0,982
236	1,29	0,816	0,0409	10,31	0,23	6,62	4,6	0,967	0,981
237	1,29	0,608	0,0486	3,228	0,89	5,71	2,32	0,981	0,980
238	1,23	0,906	0,0456	11,10	0,42	6,37	3,57	0,973	0,982
239	1,34	0,453	0,0394	1,803	0,66	3,59	2,14	0,981	0,974
240	1,32	0,680	0,0382	6,022	0,33	4,12	3,22	0,973	0,977
241	1,14	0,757	0,0505	8,861	0,72	13,08	3,88	0,949	0,976
242	1,04	0,851	0,0492	20,11	0,44	12,73	4,88	0,941	0,973
243	1,27	0,639	0,0480	5,812	0,49	8,70	3,86	0,948	0,972
244	1,16	0,846	0,0429	17,12	0,24	8,68	5,49	0,940	0,971
245	1,37	0,618	0,0524	5,067	1,02	7,85	2,53	0,960	0,969
246	1,31	0,925	0,0487	17,65	0,46	8,53	3,92	0,949	0,971
247	1,41	0,465	0,0425	2,865	0,75	4,96	2,36	0,960	0,961
248	1,39	0,693	0,0408	9,542	0,37	5,54	3,54	0,948	0,964
249	1,12	0,746	0,0560	6,819	0,80	11,96	3,53	0,966	0,982
250	0,97	0,971	0,0477	20,59	0,36	11,71	5,18	0,960	0,980
251	1,25	0,634	0,0474	4,549	0,53	7,94	3,54	0,966	0,978
252	1,11	0,829	0,0413	13,47	0,25	7,86	5,11	0,959	0,977
253	1,34	0,619	0,0508	4,103	1,04	7,01	2,38	0,975	0,976
254	1,27	0,912	0,0469	14,02	0,48	7,67	3,66	0,966	0,978
255	1,37	0,455	0,0403	2,279	0,75	4,34	2,21	0,975	0,969
256	1,35	0,686	0,0394	7,612	0,38	4,98	3,31	0,965	0,972
257	1,35	0,455	0,0501	1,623	1,31	6,37	2,01	0,976	0,971
258	1,17	0,975	0,0408	20,8	0,25	7,35	4,91	0,955	0,974
259	1,06	0,946	0,0571	14,58	0,89	13,44	3,53	0,963	0,980
260	1,36	0,618	0,0409	5,018	0,42	5,37	3,24	0,961	0,971
261	0,81	0,800	0,0475	13,87	0,35	14,7	5,88	0,951	0,979
262	1,38	0,569	0,0414	4,359	0,71	4,43	2,34	0,969	0,967
263	1,29	0,744	0,0459	9,835	0,45	7,91	3,80	0,942	0,968
264	1,23	0,738	0,0446	5,767	0,49	6,18	3,24	0,978	0,983
265	1,25	0,738	0,0450	6,103	0,46	6,22	3,33	0,969	0,979
266	1,31	0,756	0,0474	9,426	0,55	8,53	3,56	0,955	0,972
267	1,27	0,751	0,0454	7,100	0,54	7,23	3,33	0,962	0,975
268	1,29	0,745	0,0467	8,449	0,48	7,57	3,59	0,961	0,975
269	1,28	0,750	0,0462	8,870	0,47	7,65	3,96	0,961	0,975
270	1,28	0,752	0,0459	7,069	0,53	7,18	3,12	0,962	0,975
271	1,27	0,745	0,0457	7,28	0,61	7,78	2,93	0,963	0,974
272	1,28	0,753	0,0455	8,455	0,41	7,00	4,08	0,959	0,975
273	1,29	0,749	0,0469	7,653	0,53	7,49	3,41	0,962	0,975

Таблица В.5 – Результаты оптимизационных расчетов S_y , δ^* , H^* , A^* , A_{Π}^* , d^* , c^* , $B_{0,ср}$ по критерию «установочная площадь электромагнита»

№	x_i	S_y	δ^*	H^*	A^*	A_{Π}^*	d^*	c^*	$B_{0,ср}$
1		117,7	0,359	2,74	0,510	0,400	1,26	2,55	1,59
2		62,1	0,486	2,27	0,458	0,400	1,26	2,50	1,56
3		161,0	0,302	2,68	0,461	0,400	1,26	2,50	1,62
4		88,73	0,416	2,20	0,450	0,400	1,26	2,74	1,62
5		136,4	0,329	3,45	0,480	0,400	1,26	2,50	1,53
6		70,1	0,466	2,68	0,545	0,400	1,26	2,50	1,56
7		224,5	0,255	2,87	0,450	0,400	1,26	2,50	1,30
8		104,81	0,377	2,55	0,496	0,400	1,26	2,50	1,51
9		127,6	0,344	3,45	0,510	0,400	1,26	2,54	1,62
10		68,5	0,474	2,68	0,575	0,400	1,26	2,50	1,61
11		174,84	0,289	3,38	0,450	0,416	1,26	2,50	1,63
12		95,36	0,393	2,62	0,466	0,400	1,26	2,50	1,62
13		148,7	0,320	4,15	0,540	0,430	1,26	2,52	1,58
14		76,47	0,437	3,45	0,450	0,400	1,26	2,50	1,60
15		241,45	0,246	3,51	0,455	0,400	1,26	2,50	1,33
16		110,8	0,364	3,32	0,450	0,400	1,26	2,52	1,56
17		110,6	0,364	2,55	0,455	0,400	1,26	2,50	1,61
18		60,92	0,490	1,98	0,453	0,400	1,26	2,50	1,50
19		156,4	0,310	2,33	0,521	0,403	1,26	2,50	1,62
20		84,43	0,419	1,92	0,453	0,400	1,26	2,57	1,63
21		132,0	0,338	3,10	0,510	0,403	1,26	2,52	1,52
22		65,72	0,473	2,62	0,450	0,400	1,26	2,54	1,57
23		222,5	0,259	2,46	0,496	0,400	1,26	2,50	1,57
24		101,0	0,383	2,33	0,485	0,400	1,26	2,50	1,50
25		119,0	0,353	3,03	0,491	0,430	1,26	2,50	1,62
26		62,58	0,485	2,55	0,450	0,400	1,26	2,54	1,62
27		166,6	0,297	2,97	0,464	0,580	1,26	2,50	1,62
28		89,95	0,404	2,27	0,464	0,400	1,26	2,50	1,63
29		138,7	0,328	3,37	0,502	0,408	1,26	2,50	1,57
30		71,0	0,455	3,03	0,466	0,400	1,26	2,50	1,60
31		231,3	0,252	3,03	0,458	0,400	1,26	2,50	1,30
32		105,34	0,372	2,90	0,450	0,427	1,26	2,50	1,54
33		117,8	0,357	2,74	0,510	0,405	1,26	2,52	1,59
34		61,99	0,485	2,30	0,450	0,400	1,26	2,50	1,56
35		161,15	0,302	2,74	0,450	0,400	1,26	2,54	1,62
36		88,85	0,414	2,20	0,450	0,400	1,27	2,70	1,62
37		136,64	0,329	3,45	0,485	0,400	1,26	2,50	1,53
38		70,24	0,457	2,74	0,540	0,400	1,26	2,55	1,57
39		227,1	0,257	2,81	0,510	0,400	1,26	2,50	1,30
40		103,87	0,375	2,65	0,450	0,400	1,26	2,50	1,51
41		127,6	0,343	3,45	0,510	0,400	1,26	2,50	1,62
42		67,89	0,466	2,84	0,472	0,400	1,26	2,50	1,61
43		175,7	0,289	3,38	0,461	0,430	1,26	2,50	1,63
44		95,64	0,391	2,65	0,450	0,400	1,26	2,50	1,62
45		148,9	0,320	4,15	0,545	0,400	1,26	2,50	1,58

Продолжение таблицы В.5

№	x_i	S_y	δ^*	H^*	A^*	A_{π}^*	d^*	c^*	$B_{0,cp}$
46		76,87	0,440	3,38	0,496	0,403	1,26	2,50	1,61
47		232,7	0,251	3,86	0,455	0,400	1,26	2,50	1,42
48		111,9	0,362	3,32	0,464	0,520	1,26	2,50	1,56
49		110,86	0,364	2,55	0,466	0,400	1,26	2,50	1,61
50		60,73	0,490	2,04	0,450	0,400	1,31	2,50	1,53
51		157,1	0,310	2,33	0,532	0,403	1,26	2,50	1,62
52		84,49	0,417	1,92	0,450	0,400	1,26	2,54	1,63
53		130,4	0,336	3,19	0,466	0,400	1,26	2,50	1,53
54		66,09	0,474	2,55	0,485	0,400	1,26	2,50	1,57
55		221,0	0,260	2,52	0,510	0,400	1,26	2,50	1,29
56		101,44	0,383	2,33	0,496	0,400	1,26	2,50	1,50
57		119,1	0,354	3,03	0,496	0,403	1,26	2,50	1,63
58		62,75	0,482	2,55	0,450	0,414	1,26	2,50	1,62
59		165,93	0,297	2,97	0,461	0,495	1,26	2,50	1,63
60		89,94	0,403	2,30	0,450	0,400	1,26	2,50	1,63
61		138,64	0,327	3,80	0,480	0,400	1,26	2,50	1,57
62		71,23	0,455	3,03	0,477	0,400	1,26	2,50	1,60
63		227,85	0,255	3,16	0,480	0,400	1,26	2,50	1,34
64		105,24	0,373	2,90	0,455	0,400	1,26	2,50	1,55
65		116,6	0,357	2,68	0,491	0,400	1,26	2,50	1,58
66		62,57	0,485	2,27	0,466	0,400	1,36	2,50	1,56
67		161,4	0,301	2,65	0,450	0,490	1,26	2,50	1,60
68		88,66	0,412	2,04	0,480	0,403	1,26	2,57	1,60
69		134,94	0,330	3,38	0,466	0,444	1,26	2,50	1,52
70		69,1	0,465	2,74	0,480	0,400	1,26	2,54	1,56
71		229,0	0,235	2,65	0,450	0,400	1,26	2,50	1,25
72		103,56	0,376	2,55	0,461	0,400	1,26	2,50	1,50
73		126,3	0,344	3,45	0,480	0,400	1,26	2,54	1,62
74		67,60	0,473	2,74	0,510	0,400	1,26	2,54	1,60
75		173,4	0,290	3,32	0,450	0,416	1,26	2,50	1,63
76		95,34	0,392	2,62	0,455	0,400	1,31	2,50	1,62
77		146,0	0,319	4,15	0,491	0,452	1,26	2,50	1,58
78		75,83	0,439	3,38	0,455	0,408	1,26	2,50	1,60
79		249	0,242	3,16	0,450	0,400	1,26	2,50	1,25
80		110,3	0,366	3,19	0,477	0,400	1,26	2,50	1,56
81		110,77	0,371	2,62	0,450	0,400	1,26	2,70	1,62
82		61,03	0,489	1,98	0,450	0,400	1,32	2,50	1,51
83		154,6	0,310	2,33	0,485	0,400	1,26	2,50	1,62
84		84,77	0,415	1,85	0,450	0,430	1,26	2,50	1,61
85		130,1	0,338	3,03	0,491	0,460	1,26	2,50	1,51
86		65,42	0,476	2,55	0,461	0,400	1,26	2,54	1,57
87		221,8	0,257	2,39	0,461	0,400	1,26	2,50	1,25
88		99,8	0,383	2,33	0,453	0,400	1,26	2,50	1,50
89		117,96	0,353	3,03	0,461	0,400	1,26	2,50	1,62
90		62,92	0,482	2,49	0,455	0,460	1,26	2,50	1,60
91		164,1	0,298	2,90	0,450	0,517	1,26	2,50	1,62

Продолжение таблицы В.5

$\begin{matrix} x_i \\ \text{№} \end{matrix}$	S_y	δ^*	H^*	A^*	A_{Π}^*	d^*	c^*	$B_{0,cp}$
92	89,89	0,403	2,27	0,453	0,460	1,26	2,50	1,62
93	136,78	0,328	3,73	0,461	0,430	1,26	2,50	1,56
94	70,44	0,458	2,97	0,477	0,400	1,26	2,50	1,60
95	238,2	0,248	2,74	0,461	0,400	1,26	2,50	1,24
96	106,6	0,378	2,68	0,551	0,400	1,26	2,50	1,54
97	116,7	0,357	2,74	0,480	0,400	1,26	2,54	1,59
98	62,3	0,485	2,27	0,458	0,400	1,31	2,50	1,56
99	160,6	0,303	2,68	0,453	0,400	1,26	2,54	1,61
100	89,34	0,415	2,04	0,510	0,400	1,26	2,63	1,61
101	135,4	0,329	3,45	0,450	0,460	1,26	2,50	1,52
102	69,49	0,465	2,68	0,521	0,400	1,26	2,50	1,56
103	223,9	0,256	2,81	0,455	0,403	1,26	2,50	1,30
104	104,0	0,377	2,55	0,472	0,400	1,26	2,50	1,50
105	126,5	0,342	3,45	0,180	0,400	1,27	2,50	1,62
106	67,98	0,476	2,74	0,540	0,400	1,26	2,57	1,61
107	174,3	0,290	3,32	0,461	0,430	1,26	2,50	1,63
108	94,87	0,392	2,62	0,450	0,400	1,26	2,50	1,62
109	147,11	0,320	4,15	0,510	0,435	1,26	2,52	1,58
110	76,12	0,440	3,38	0,466	0,411	1,26	2,50	1,60
111	238,4	0,248	3,51	0,453	0,400	1,26	2,50	1,34
112	110,2	0,365	3,26	0,455	0,400	1,26	2,50	1,56
113	110,4	0,365	2,55	0,450	0,400	1,27	2,54	1,61
114	60,96	0,490	1,98	0,450	0,400	1,30	2,50	1,51
115	155,2	0,310	2,33	0,496	0,400	1,26	2,50	1,62
116	84,4	0,421	1,92	0,450	0,405	1,26	2,61	1,62
117	130,8	0,338	3,10	0,480	0,471	1,26	2,54	1,51
118	65,42	0,473	2,55	0,455	0,400	1,26	2,50	1,57
119	255,1	0,258	2,33	0,510	0,416	1,26	2,50	1,25
120	100,23	0,383	2,33	0,461	0,400	1,26	2,50	1,50
121	117,8	0,353	3,03	0,466	0,400	1,26	2,50	1,62
122	62,34	0,485	2,49	0,464	0,400	1,26	2,50	1,61
123	163,6	0,299	2,90	0,450	0,411	1,26	2,50	1,63
124	90,22	0,404	2,27	0,464	0,460	1,26	2,50	1,06
125	137,4	0,327	3,37	0,466	0,534	1,26	2,50	1,37
126	70,57	0,455	3,03	0,450	0,411	1,26	2,50	1,60
127	228,5	0,235	3,03	0,453	0,400	1,26	2,50	1,31
128	107,2	0,378	2,68	0,556	0,400	1,26	2,50	1,54
129	114,4	0,358	2,68	0,461	0,400	1,26	2,50	1,59
130	61,75	0,487	2,20	0,453	0,400	1,36	2,50	1,56
131	158,5	0,305	2,55	0,466	0,400	1,26	2,50	1,62
132	86,85	0,410	1,98	0,450	0,400	1,26	2,50	1,60
133	133,9	0,331	3,38	0,453	0,400	1,26	2,52	1,52
134	67,91	0,466	2,68	0,472	0,400	1,26	2,50	1,56
135	222,6	0,257	2,74	0,466	0,414	1,26	2,50	1,30
136	103,7	0,377	2,55	0,450	0,501	1,26	2,54	1,49
137	124,1	0,344	3,38	0,466	0,400	1,26	2,50	1,62

Продолжение таблицы В.5

№	x_i	S_y	δ^*	H^*	A^*	A_{π}^*	d^*	c^*	$B_{0,cp}$
138	66,18	0,474	2,68	0,491	0,400	1,26	2,50	1,61	
139	171,8	0,293	3,19	0,472	0,400	1,26	2,50	1,63	
140	93,91	0,396	2,55	0,450	0,430	1,26	2,54	1,62	
141	145,2	0,320	4,08	0,496	0,400	1,26	2,50	1,58	
142	75,27	0,442	3,32	0,464	0,460	1,26	2,50	1,60	
143	232,7	0,251	3,57	0,455	0,403	1,26	2,50	1,37	
144	110,6	0,369	3,03	0,526	0,400	1,26	2,50	1,55	
145	110,1	0,372	2,39	0,510	0,403	1,27	2,57	1,61	
146	60,66	0,491	1,98	0,450	0,400	1,43	2,50	1,54	
147	152,13	0,310	2,33	0,450	0,400	1,26	2,52	1,62	
148	83,66	0,428	1,85	0,464	0,400	1,26	2,70	1,63	
149	128,7	0,339	3,03	0,472	0,400	1,26	2,50	1,52	
150	65,41	0,483	2,39	0,540	0,400	1,26	2,54	1,56	
151	219,0	0,261	2,39	0,496	0,400	1,26	2,50	1,28	
152	100,0	0,382	2,30	0,450	0,520	1,26	2,50	1,49	
153	116,35	0,355	2,97	0,458	0,430	1,26	2,50	1,62	
154	61,56	0,494	2,33	0,521	0,400	1,26	2,50	1,62	
155	163,7	0,304	2,68	0,526	0,405	1,26	2,50	1,63	
156	88,46	0,410	2,20	0,453	0,400	1,26	2,57	1,63	
157	135,74	0,328	3,70	0,450	0,400	1,26	2,50	1,56	
158	40,38	0,457	2,97	0,464	0,520	1,26	2,50	1,59	
159	224,8	0,256	3,03	0,464	0,400	1,26	2,50	1,33	
160	104,56	0,378	2,74	0,480	0,400	1,26	2,54	1,54	
161	114,6	0,358	2,74	0,450	0,403	1,27	2,54	1,60	
162	61,99	0,487	2,20	0,464	0,400	1,36	2,50	1,56	
163	161,3	0,302	2,62	0,461	0,520	1,26	2,50	1,60	
164	87,06	0,414	2,04	0,450	0,400	1,26	2,61	1,61	
165	133,95	0,331	3,38	0,455	0,400	1,26	2,50	1,52	
166	68,04	0,464	2,74	0,450	0,400	1,26	2,52	1,57	
167	223,3	0,257	2,74	0,480	0,400	1,26	2,50	1,30	
168	103,0	0,378	2,55	0,450	0,405	1,26	2,54	1,50	
169	124,4	0,343	3,45	0,450	0,403	1,26	2,52	1,62	
170	66,32	0,475	2,74	0,480	0,400	1,26	2,55	1,61	
171	174,4	0,290	3,32	0,458	0,550	1,26	2,50	1,63	
172	93,72	0,396	2,55	0,450	0,405	1,26	2,54	1,63	
173	145,2	0,319	4,15	0,480	0,400	1,26	2,50	1,58	
174	74,91	0,443	3,32	0,461	0,400	1,26	2,50	1,60	
175	234,8	0,253	3,51	0,510	0,403	1,26	2,50	1,38	
176	110,5	0,369	3,10	0,510	0,405	1,26	2,52	1,55	
177	110,05	0,371	2,39	0,510	0,400	1,26	2,55	1,61	
178	60,58	0,491	1,98	0,450	0,400	1,41	2,50	1,54	
179	152,4	0,310	2,33	0,450	0,400	1,26	2,50	1,62	
180	83,87	0,428	1,85	0,472	0,400	1,26	2,70	1,63	
181	128,3	0,337	3,10	0,450	0,400	1,26	2,50	1,52	
182	65,26	0,475	2,49	0,466	0,460	1,26	2,50	1,56	
183	219,9	0,260	2,39	0,496	0,400	1,26	2,50	1,27	

Продолжение таблицы В.5

$\begin{matrix} \diagdown \\ \text{№} \end{matrix}$ x_i	S_y	δ^*	H^*	A^*	A_{Π}^*	d^*	c^*	$B_{0,cp}$
184	99,33	0,383	2,30	0,450	0,430	1,26	2,50	1,50
185	116,3	0,355	2,97	0,458	0,400	1,26	2,50	1,62
186	61,74	0,495	2,33	0,532	0,400	1,26	2,50	1,62
187	164,0	0,303	2,74	0,510	0,414	1,26	2,54	1,63
188	88,60	0,406	2,20	0,450	0,430	1,26	2,50	1,63
189	136,0	0,328	3,73	0,450	0,422	1,26	2,50	1,57
190	70,34	0,458	2,97	0,469	0,490	1,26	2,50	1,59
191	223,8	0,256	3,10	0,461	0,411	1,26	2,50	1,34
192	105,2	0,378	2,68	0,515	0,400	1,26	2,50	1,54
193	112,95	0,359	2,62	0,466	0,400	1,26	2,50	1,59
194	62,65	0,486	2,04	0,480	0,400	1,29	2,50	1,50
195	159,1	0,304	2,55	0,453	0,460	1,26	2,54	1,60
196	86,64	0,411	1,95	0,450	0,400	1,26	2,50	1,60
197	133,3	0,333	3,26	0,472	0,403	1,26	2,50	1,51
198	67,44	0,466	2,68	0,450	0,400	1,26	2,52	1,56
199	222,8	0,256	2,65	0,450	0,400	1,26	2,50	1,28
200	103,8	0,381	2,39	0,510	0,400	1,26	2,54	1,49
201	123,20	0,344	3,35	0,450	0,400	1,26	2,50	1,62
202	65,78	0,472	2,68	0,461	0,400	1,26	2,50	1,60
203	172,2	0,296	3,03	0,526	0,400	1,26	2,50	1,63
204	94,62	0,402	2,33	0,556	0,400	1,26	2,50	1,63
205	143,34	0,320	4,08	0,466	0,400	1,26	2,50	1,58
206	74,37	0,445	3,26	0,466	0,435	1,26	2,50	1,60
207	237,8	0,248	3,29	0,450	0,400	1,26	2,50	1,31
208	109,2	0,369	3,03	0,496	0,400	1,26	2,50	1,55
209	109,1	0,369	2,33	0,491	0,400	1,26	2,50	1,60
210	60,80	0,490	1,92	0,450	0,400	1,41	2,50	1,52
211	152,0	0,311	2,27	0,466	0,430	1,26	2,50	1,62
212	84,06	0,426	1,85	0,458	0,460	1,26	2,70	1,62
213	127,7	0,338	3,00	0,450	0,400	1,26	2,50	1,51
214	64,93	0,483	2,39	0,510	0,405	1,26	2,55	1,55
215	215,9	0,261	2,39	0,461	0,400	1,26	2,50	1,28
216	99,11	0,386	2,20	0,472	0,400	1,26	2,50	1,49
217	115,3	0,357	2,90	0,458	0,400	1,26	2,50	1,62
218	61,10	0,493	2,33	0,491	0,400	1,26	2,50	1,61
219	161,8	0,303	2,68	0,491	0,405	1,26	2,50	1,63
220	88,85	0,416	2,20	0,496	0,403	1,26	2,70	1,63
221	136,7	0,333	3,45	0,540	0,408	1,26	2,50	1,55
222	68,85	0,461	2,90	0,450	0,400	1,26	2,50	1,60
223	229,0	0,253	2,81	0,461	0,400	1,26	2,50	1,28
224	103,5	0,377	2,74	0,450	0,414	1,26	2,54	1,53
225	114,1	0,359	2,68	0,450	0,400	1,27	2,52	1,59
226	62,05	0,486	2,20	0,458	0,400	1,41	2,50	1,57
227	158,0	0,304	2,55	0,450	0,416	1,26	2,50	1,61
228	86,79	0,412	1,98	0,450	0,400	1,26	2,54	1,60
229	133,2	0,331	3,32	0,450	0,400	1,26	2,50	1,52

Продолжение таблицы В.5

№	x_i	S_y	δ^*	H^*	A^*	A_{Π}^*	d^*	c^*	$B_{0,cp}$
230	67,58	0,465	2,68	0,450	0,400	1,26	2,50	1,56	
231	220,2	0,258	2,74	0,458	0,411	1,26	2,50	1,30	
232	104,8	0,381	2,33	0,545	0,400	1,26	2,50	1,49	
233	123,65	0,344	3,38	0,450	0,400	1,26	2,52	1,62	
234	65,92	0,473	2,68	0,472	0,400	1,26	2,50	1,60	
235	172,2	0,296	3,10	0,510	0,405	1,26	2,52	1,63	
236	93,56	0,396	2,49	0,464	0,430	1,26	2,50	1,62	
237	143,5	0,319	4,15	0,450	0,400	1,26	2,50	1,58	
238	74,63	0,445	3,26	0,475	0,430	1,26	2,50	1,60	
239	230,2	0,252	3,57	0,450	0,403	1,26	2,50	1,38	
240	109,4	0,368	3,10	0,480	0,425	1,26	2,52	1,55	
241	109,1	0,370	2,39	0,480	0,400	1,26	2,55	1,61	
242	60,80	0,490	1,98	0,450	0,400	1,47	2,50	1,55	
243	152,1	0,311	2,27	0,469	0,400	1,26	2,50	1,62	
244	84,31	0,427	1,85	0,469	0,460	1,26	2,70	1,62	
245	127,6	0,338	3,03	0,450	0,400	1,26	2,50	1,52	
246	64,94	0,481	2,39	0,510	0,400	1,26	2,52	1,56	
247	216,7	0,262	2,39	0,485	0,416	1,26	2,50	1,28	
248	99,16	0,385	2,27	0,450	0,400	1,26	2,54	1,49	
249	116,3	0,354	2,97	0,450	0,476	1,26	2,50	1,62	
250	61,25	0,493	2,39	0,480	0,400	1,28	2,54	1,62	
251	162,1	0,303	2,74	0,480	0,405	1,26	2,54	1,63	
252	88,85	0,405	2,20	0,450	0,490	1,26	2,50	1,62	
253	138,4	0,334	3,38	0,586	0,400	1,26	2,50	1,55	
254	69,06	0,461	2,90	0,461	0,400	1,26	2,50	1,60	
255	222,5	0,256	3,03	0,453	0,400	1,26	2,50	1,33	
256	103,4	0,376	2,74	0,450	0,427	1,26	2,50	1,54	
257	259,3	0,240	3,73	0,496	0,455	1,26	2,50	1,56	
258	61,16	0,491	2,39	0,450	0,400	1,26	2,54	1,61	
259	63,62	0,482	3,03	0,472	0,400	1,26	2,52	1,57	
260	144,5	0,319	2,68	0,458	0,400	1,26	2,50	1,56	
261	93,16	0,398	1,92	0,450	0,400	1,27	2,54	1,60	
262	136,0	0,328	3,03	0,455	0,405	1,26	2,50	1,37	
263	104,1	0,376	2,27	0,466	0,550	1,26	2,50	1,54	
264	117,5	0,356	3,38	0,491	0,400	1,26	2,50	1,61	
265	114,0	0,361	3,10	0,480	0,400	1,26	2,52	1,59	
266	104,5	0,383	2,39	0,540	0,414	1,26	2,54	1,60	
267	107,5	0,372	2,68	0,491	0,400	1,26	2,50	1,59	
268	107,5	0,371	2,74	0,480	0,400	1,26	2,50	1,60	
269	108,5	0,372	2,74	0,510	0,400	1,26	2,52	1,60	
270	106,6	0,372	2,74	0,450	0,400	1,26	2,54	1,59	
271	108,9	0,367	2,90	0,455	0,400	1,26	2,50	1,60	
272	105,4	0,374	2,68	0,453	0,400	1,26	2,54	1,60	
273	107,6	0,372	2,74	0,480	0,400	1,26	2,54	1,60	

Таблица В.6 – Результаты оптимизационных расчетов $B_{0,отп}$, $F_{ср}^*$, $F_{отп}^*$, $P_{п}^*$, $P_{но}^*$, $P_{во}^*$, n , $\theta_{но}^*$, $\theta_{во}^*$ по критерию «установочная площадь электромагнита»

$\begin{matrix} x_i \\ \text{№} \end{matrix}$	$B_{0,отп}$	$F_{ср}^*$	$F_{отп}^*$	$P_{п}^*$	$P_{но}^* \cdot 10^{-4}$	$P_{во}^* \cdot 10^{-4}$	n	$\theta_{но}^*$	$\theta_{во}^*$
1	1,08	0,716	0,0527	6,330	0,79	11,42	3,36	0,952	0,974
2	0,95	0,931	0,0466	19,230	0,40	11,84	4,86	0,947	0,975
3	1,22	0,628	0,0455	4,589	0,52	7,94	3,48	0,954	0,973
4	1,10	0,823	0,0406	13,460	0,26	8,05	4,94	0,947	0,972
5	1,38	0,658	0,0545	4,148	1,19	7,45	2,24	0,968	0,970
6	1,27	0,896	0,0466	12,440	0,51	7,41	3,35	0,950	0,969
7	1,44	0,493	0,0465	2,291	1,00	4,90	1,99	0,972	0,962
8	1,39	0,722	0,0421	7,464	0,44	5,24	3,08	0,954	0,965
9	1,03	0,712	0,0511	4,821	0,77	9,76	3,15	0,973	0,982
10	0,92	0,934	0,0459	13,200	0,39	9,66	4,32	0,963	0,979
11	1,17	0,623	0,0439	3,404	0,54	6,84	3,10	0,974	0,981
12	1,03	0,801	0,0387	9,880	0,26	6,79	4,58	0,967	0,980
13	1,34	0,662	0,0523	2,897	1,16	5,98	1,89	0,982	0,976
14	1,19	0,902	0,0437	10,960	0,46	6,63	3,40	0,974	0,982
15	1,39	0,492	0,0437	1,787	0,90	4,03	1,91	0,984	0,972
16	1,34	0,736	0,0401	6,314	0,40	4,61	3,05	0,975	0,977
17	1,09	0,739	0,0531	8,558	0,79	13,41	3,68	0,950	0,975
18	0,96	0,908	0,0468	22,490	0,43	13,27	4,97	0,942	0,973
19	1,25	0,635	0,0467	5,204	0,56	8,73	3,47	0,944	0,967
20	1,10	0,935	0,0405	16,800	0,26	8,98	5,24	0,940	0,969
21	1,42	0,659	0,0568	4,718	1,34	8,45	2,22	0,962	0,965
22	1,29	0,924	0,0476	17,150	0,54	9,00	3,67	0,950	0,971
23	1,46	0,487	0,0474	2,560	1,07	5,38	2,00	0,965	0,955
24	1,41	0,730	0,0432	9,115	0,47	6,04	3,19	0,949	0,962
25	1,06	0,728	0,0521	6,017	0,92	11,93	3,01	0,966	0,979
26	0,95	0,971	0,0468	19,960	0,43	12,45	4,84	0,961	0,980
27	1,20	0,626	0,0449	3,115	0,93	8,37	1,87	0,968	0,980
28	1,06	0,817	0,0394	12,920	0,28	8,12	4,80	0,959	0,976
29	1,37	0,672	0,0542	3,985	1,29	7,54	2,12	0,977	0,973
30	1,24	0,916	0,0455	13,650	0,53	7,97	3,45	0,966	0,976
31	1,42	0,489	0,0453	2,192	1,06	4,88	1,93	0,980	0,967
32	1,38	0,737	0,0418	7,356	0,51	5,61	2,81	0,968	0,973
33	1,07	0,714	0,0525	6,961	0,73	11,57	3,48	0,951	0,975
34	0,95	0,935	0,0466	21,816	0,36	12,03	5,16	0,948	0,976
35	1,22	0,631	0,0456	5,186	0,48	8,14	3,69	0,955	0,973
36	1,10	0,817	0,0405	14,817	0,24	8,13	5,18	0,946	0,972
37	1,38	0,659	0,0542	4,621	1,07	7,59	2,38	0,966	0,970
38	1,28	0,900	0,0469	13,925	0,47	7,58	3,53	0,949	0,969
39	1,45	0,490	0,0473	2,339	0,94	4,84	2,01	0,968	0,959
40	1,38	0,729	0,0417	8,902	0,39	5,49	3,36	0,956	0,968
41	1,02	0,711	0,0509	5,376	0,70	9,89	3,33	0,972	0,982
42	0,91	0,935	0,0453	16,361	0,35	10,27	4,80	0,967	0,982
43	1,17	0,621	0,0439	3,613	0,51	6,91	3,10	0,973	0,981
44	1,07	0,798	0,0385	11,160	0,24	6,92	4,86	0,967	0,980
45	1,34	0,662	0,0521	3,414	0,99	6,16	2,20	0,980	0,976

Продолжение таблицы В.6

$\begin{matrix} x_i \\ \text{№} \end{matrix}$	$B_{0,\text{отп}}$	$F_{\text{ср}}^*$	$F_{\text{отп}}^*$	P_{Π}^*	$P_{\text{НО}}^* \cdot 10^{-4}$	$P_{\text{ВО}}^* \cdot 10^{-4}$	n	$\theta_{\text{НО}}^*$	$\theta_{\text{ВО}}^*$
46	1,20	0,896	0,0400	11,360	0,43	6,55	3,44	0,971	0,979
47	1,42	0,518	0,0464	2,067	0,87	4,36	2,01	0,984	0,973
48	1,34	0,731	0,0398	5,407	0,50	4,69	2,15	0,974	0,979
49	1,09	0,739	0,0532	9,409	0,72	13,51	3,86	0,948	0,974
50	0,99	0,901	0,0479	24,210	0,42	13,66	5,09	0,942	0,973
51	1,25	0,634	0,0467	5,721	0,51	8,80	3,64	0,942	0,967
52	1,10	0,832	0,0404	18,700	0,24	9,07	5,52	0,940	0,969
53	1,41	0,669	0,0560	5,722	1,16	8,88	2,47	0,962	0,969
54	1,29	0,918	0,0476	18,190	0,49	8,89	3,79	0,947	0,969
55	1,47	0,491	0,0484	2,797	1,02	5,55	2,08	0,963	0,956
56	1,42	0,730	0,0433	10,003	0,43	6,10	3,34	0,947	0,962
57	1,06	0,729	0,0521	7,083	0,78	12,03	3,47	0,964	0,979
58	0,94	0,968	0,0465	21,519	0,40	12,60	4,87	0,961	0,980
59	1,20	0,628	0,0449	4,037	0,69	8,42	2,59	0,966	0,979
60	1,06	0,817	0,0393	14,640	0,26	8,28	5,10	0,959	0,976
61	1,37	0,675	0,0538	4,665	1,14	7,84	2,34	0,976	0,975
62	1,25	0,916	0,0455	14,990	0,49	8,03	3,62	0,965	0,976
63	1,44	0,498	0,0470	2,378	1,03	5,06	1,99	0,978	0,966
64	1,38	0,740	0,0416	8,735	0,43	5,66	3,26	0,967	0,972
65	1,07	0,714	0,0523	5,770	0,83	11,14	3,02	0,954	0,975
66	1,02	0,887	0,0486	14,930	0,52	11,78	3,95	0,948	0,975
67	1,21	0,623	0,0453	3,392	0,72	7,80	2,30	0,957	0,975
68	1,08	0,810	0,0400	11,340	0,28	7,63	4,27	0,945	0,970
69	1,38	0,661	0,0543	3,482	1,36	7,12	1,75	0,971	0,970
70	1,27	0,900	0,0465	11,860	0,55	7,47	3,07	0,954	0,972
71	1,43	0,482	0,0449	2,037	0,99	4,55	1,80	0,972	0,961
72	1,39	0,725	0,0419	6,961	0,46	5,19	2,79	0,957	0,966
73	1,03	0,714	0,0512	4,430	0,83	9,63	2,83	0,974	0,983
74	0,92	0,934	0,0458	12,380	0,43	9,74	3,93	0,966	0,981
75	1,17	0,624	0,0440	3,030	0,57	6,62	2,75	0,975	0,981
76	1,07	0,779	0,0395	8,280	0,31	6,74	3,91	0,968	0,980
77	1,34	0,670	0,0519	2,666	1,25	5,86	1,62	0,984	0,978
78	1,20	0,902	0,0439	9,466	0,51	6,42	2,91	0,974	0,981
79	1,37	0,471	0,0414	1,572	0,88	3,70	1,70	0,984	0,972
80	1,35	0,732	0,0404	5,385	0,43	4,37	2,65	0,974	0,976
81	1,11	0,748	0,0543	7,641	0,88	13,25	3,24	0,951	0,975
82	1,00	0,884	0,0480	18,550	0,52	13,20	4,19	0,943	0,973
83	1,25	0,636	0,0446	4,842	0,59	8,65	3,16	0,947	0,969
84	1,09	0,822	0,0401	13,670	0,31	8,81	4,16	0,941	0,970
85	1,41	0,663	0,0564	3,908	1,56	8,06	1,67	0,965	0,967
86	1,30	0,921	0,0479	14,920	0,58	8,69	3,22	0,950	0,970
87	1,45	0,485	0,0465	2,405	1,09	5,22	1,83	0,968	0,957
88	1,41	0,734	0,0431	8,483	0,50	5,99	2,89	0,952	0,964
89	1,05	0,730	0,0520	5,217	1,06	11,78	2,46	0,968	0,981
90	0,94	0,953	0,0465	14,9505	0,56	12,25	3,44	0,961	0,980
91	1,20	0,629	0,0451	3,166	0,84	8,05	2,05	0,968	0,979
92	1,06	0,814	0,0393	10,070	0,37	8,13	3,47	0,960	0,977

Продолжение таблицы В.6

$\begin{matrix} x_i \\ \text{№} \end{matrix}$	$B_{0,\text{отп}}$	$F_{\text{ср}}^*$	$F_{\text{отп}}^*$	P_{Π}^*	$P_{\text{НО}}^* \cdot 10^{-4}$	$P_{\text{ВО}}^* \cdot 10^{-4}$	n	$\theta_{\text{НО}}^*$	$\theta_{\text{ВО}}^*$
93	1,37	0,678	0,0540	3,611	1,41	7,38	1,80	0,979	0,975
94	1,25	0,917	0,0458	11,950	0,58	7,69	3,03	0,966	0,976
95	1,40	0,473	0,0432	1,934	1,04	4,49	1,74	0,980	0,966
96	1,40	0,731	0,0426	6,128	0,52	5,09	2,57	0,965	0,967
97	1,07	0,717	0,0524	6,513	0,77	11,42	3,20	0,954	0,976
98	0,98	0,908	0,0476	17,800	0,43	11,84	4,34	0,948	0,975
99	1,22	0,629	0,0457	4,574	0,52	7,89	3,26	0,955	0,973
100	1,09	0,812	0,0403	12,288	0,26	7,60	4,46	0,942	0,969
101	1,38	0,661	0,0542	3,809	1,31	7,38	1,77	0,970	0,972
102	1,27	0,896	0,0465	12,601	0,50	7,39	3,16	0,951	0,970
103	1,45	0,492	0,0467	2,242	0,98	4,78	1,85	0,971	0,962
104	1,39	0,724	0,0420	7,625	0,42	5,24	2,92	0,955	0,966
105	1,03	0,710	0,0510	4,897	0,76	9,77	2,98	0,974	0,983
106	0,93	0,937	0,0461	13,420	0,39	9,74	4,08	0,964	0,981
107	1,17	0,662	0,0440	3,218	0,55	6,69	2,75	0,974	0,981
108	1,03	0,802	0,0386	9,950	0,26	6,77	4,31	0,968	0,980
109	1,34	0,667	0,0522	2,965	1,12	5,99	1,78	0,982	0,977
110	1,20	0,900	0,0439	10,300	0,47	6,48	3,02	0,973	0,980
111	1,40	0,495	0,0443	1,790	0,88	4,01	1,79	0,984	0,973
112	1,35	0,736	0,0402	6,204	0,39	4,52	2,84	0,974	0,977
113	1,10	0,737	0,0535	8,402	0,80	13,32	3,41	0,950	0,975
114	0,98	0,894	0,0475	21,310	0,45	13,25	4,51	0,942	0,973
115	1,25	0,635	0,0466	5,315	0,54	8,72	3,31	0,946	0,968
116	1,11	0,835	0,0407	16,320	0,27	8,93	4,77	0,941	0,969
117	1,41	0,663	0,0565	4,290	1,49	8,35	1,71	0,964	0,968
118	1,29	0,920	0,0475	16,790	0,52	8,81	3,42	0,950	0,970
119	1,46	0,482	0,0467	2,425	1,05	5,16	1,78	0,964	0,955
120	1,41	0,732	0,0431	9,319	0,46	6,05	3,03	0,950	0,964
121	1,06	0,732	0,0521	6,582	0,82	11,89	3,16	0,966	0,980
122	0,95	0,968	0,0467	19,350	0,42	12,17	4,47	0,960	0,979
123	1,21	0,631	0,0451	4,360	0,58	8,12	3,05	0,967	0,977
124	1,06	0,814	0,0394	11,060	0,34	8,18	3,64	0,959	0,977
125	1,37	0,675	0,0539	3,313	1,61	7,39	1,37	0,979	0,977
126	1,24	0,919	0,0455	13,480	0,54	7,95	3,14	0,967	0,977
127	1,43	0,492	0,0458	2,201	1,04	4,85	1,81	0,980	0,967
128	1,39	0,728	0,0424	6,757	0,47	5,16	2,70	0,963	0,967
129	1,07	0,722	0,0526	7,190	0,65	11,17	4,04	0,954	0,977
130	1,02	0,888	0,0487	18,230	0,40	11,50	5,25	0,948	0,976
131	1,23	0,631	0,0459	4,846	0,44	7,55	4,03	0,952	0,973
132	1,08	0,814	0,0397	14,430	0,21	7,46	5,84	0,945	0,972
133	1,39	0,665	0,0547	4,562	1,01	7,36	2,65	0,967	0,972
134	1,27	0,906	0,0466	14,420	0,43	7,37	4,06	0,953	0,973
135	1,45	0,492	0,0472	2,268	0,92	4,70	2,16	0,970	0,962
136	1,39	0,723	0,0421	6,710	0,50	5,26	2,61	0,956	0,970
137	1,03	0,719	0,0512	5,420	0,65	9,56	3,77	0,973	0,983
138	0,92	0,914	0,0456	15,370	0,32	9,53	5,26	0,966	0,982
139	1,18	0,623	0,0444	3,628	0,44	6,43	3,75	0,972	0,981

Продолжение таблицы В.6

$\begin{matrix} x_i \\ \text{№} \end{matrix}$	$B_{0,\text{отп}}$	$F_{\text{ср}}^*$	$F_{\text{отп}}^*$	P_{Π}^*	$P_{\text{НО}}^* \cdot 10^{-4}$	$P_{\text{ВО}}^* \cdot 10^{-4}$	n	$\theta_{\text{НО}}^*$	$\theta_{\text{ВО}}^*$
140	1,04	0,805	0,0389	9,993	0,24	6,57	4,85	0,967	0,981
141	1,34	0,669	0,0522	3,430	0,92	6,01	2,48	0,981	0,978
142	1,21	0,900	0,0441	9,894	0,48	6,36	3,17	0,972	0,982
143	1,42	0,506	0,0459	1,881	0,83	4,05	2,16	0,984	0,973
144	1,36	0,725	0,0410	5,939	0,35	4,25	3,33	0,971	0,975
145	1,12	0,739	0,0544	8,378	0,69	12,45	4,07	0,944	0,973
146	1,09	0,856	0,0506	20,120	0,48	13,18	5,14	0,942	0,973
147	1,25	0,640	0,0468	6,061	0,46	8,68	4,24	0,948	0,971
148	1,13	0,841	0,0414	17,600	0,22	8,48	6,04	0,938	0,969
149	1,42	0,668	0,0566	5,327	1,11	8,37	2,68	0,961	0,969
150	1,32	0,921	0,0489	16,180	0,47	8,19	4,02	0,942	0,967
151	1,48	0,490	0,0483	2,683	0,96	5,28	2,29	0,963	0,957
152	1,41	0,730	0,0429	7,847	0,56	6,03	2,54	0,951	0,968
153	1,06	0,735	0,0522	6,666	0,78	11,64	3,57	0,966	0,981
154	0,96	0,976	0,0474	19,830	0,35	11,31	5,46	0,956	0,978
155	1,23	0,628	0,0458	4,296	0,50	7,51	3,69	0,961	0,975
156	1,08	0,824	0,0399	13,980	0,24	7,76	5,63	0,958	0,976
157	1,37	0,679	0,0541	4,587	1,08	7,58	2,61	0,976	0,976
158	1,25	0,914	0,0457	11,180	0,65	7,83	2,68	0,966	0,979
159	1,45	0,498	0,0471	2,282	0,98	4,84	2,19	0,978	0,968
160	1,39	0,736	0,0426	7,875	0,42	5,28	3,48	0,965	0,971
161	1,08	0,723	0,0528	8,033	0,61	11,44	4,23	0,954	0,978
162	1,02	0,888	0,0488	20,040	0,36	11,54	5,50	0,946	0,975
163	1,22	0,623	0,0454	1,141	0,58	7,88	2,84	0,953	0,976
164	1,09	0,820	0,0402	16,080	0,19	7,59	6,13	0,945	0,972
165	1,38	0,665	0,0545	5,075	0,92	7,49	2,80	0,966	0,972
166	1,27	0,906	0,0466	16,450	0,39	7,58	4,32	0,953	0,974
167	1,46	0,492	0,0474	2,551	0,82	4,80	2,37	0,967	0,962
168	1,40	0,728	0,0424	9,184	0,35	5,27	3,78	0,954	0,968
169	1,03	0,723	0,0510	6,167	0,59	9,80	3,99	0,973	0,984
170	0,93	0,946	0,0461	17,410	0,30	9,72	5,58	0,966	0,983
171	1,17	0,621	0,0440	3,013	0,61	6,80	2,43	0,973	0,984
172	1,04	0,807	0,0389	11,870	0,20	6,58	5,58	0,967	0,981
173	1,34	0,673	0,0520	3,935	0,83	6,22	2,67	0,980	0,979
174	1,21	0,905	0,0442	12,740	0,36	6,38	4,12	0,972	0,981
175	1,43	0,501	0,0466	1,924	0,79	4,01	2,18	0,981	0,972
176	1,36	0,728	0,0410	6,668	0,33	4,33	3,48	0,970	0,975
177	1,11	0,743	0,0540	9,528	0,61	12,56	4,36	0,943	0,973
178	1,07	0,864	0,0501	23,000	0,42	13,22	5,51	0,942	0,973
179	1,25	0,639	0,0466	6,750	0,42	8,77	4,48	0,947	0,971
180	1,13	0,841	0,0414	19,450	0,20	8,51	6,34	0,937	0,969
181	1,41	0,672	0,0563	6,148	1,00	8,67	2,89	0,961	0,970
182	1,30	0,915	0,0477	17,080	0,50	3,61	8,68	0,947	0,972
183	1,47	0,489	0,0481	2,988	0,87	5,40	2,43	0,960	0,958
184	1,42	0,734	0,0433	10,520	0,40	6,30	3,60	0,949	0,966
185	1,06	0,735	0,0522	7,972	0,64	11,72	4,18	0,965	0,981
186	0,97	0,978	0,0475	21,936	0,32	11,36	5,73	0,955	0,977

Продолжение таблицы В.6

$\begin{matrix} x_i \\ \text{№} \end{matrix}$	$B_{0,\text{отп}}$	$F_{\text{ср}}^*$	$F_{\text{отп}}^*$	P_{Π}^*	$P_{\text{НО}}^* \cdot 10^{-4}$	$P_{\text{ВО}}^* \cdot 10^{-4}$	n	$\theta_{\text{НО}}^*$	$\theta_{\text{ВО}}^*$
187	1,22	0,628	0,0459	4,761	0,47	7,71	3,81	0,962	0,976
188	1,07	0,821	0,0395	14,571	0,23	7,91	5,36	0,958	0,977
189	1,37	0,681	0,0541	4,883	1,04	7,74	2,57	0,975	0,977
190	1,25	0,916	0,0458	13,130	0,54	7,87	3,10	0,965	0,979
191	1,45	0,501	0,0475	2,501	0,93	5,01	2,23	0,977	0,969
192	1,40	0,733	0,0425	8,423	0,38	5,22	3,61	0,962	0,970
193	1,07	0,722	0,0526	6,357	0,70	10,83	3,57	0,954	0,977
194	0,97	0,885	0,0471	16,080	0,40	10,77	4,71	0,945	0,974
195	1,23	0,627	0,0459	3,782	0,58	7,48	3,92	0,955	0,975
196	1,08	0,813	0,0397	12,710	0,23	7,31	5,15	0,946	0,972
197	1,39	0,661	0,0549	3,913	1,10	6,97	2,29	0,968	0,971
198	1,27	0,908	0,0467	13,130	0,46	7,28	3,63	0,955	0,974
199	1,45	0,489	0,0465	2,132	0,91	4,52	2,04	0,971	0,963
200	1,41	0,721	0,0429	6,795	0,41	4,85	3,10	0,952	0,964
201	1,03	0,722	0,0511	4,933	0,69	9,38	3,38	0,974	0,984
202	0,92	0,939	0,0457	13,980	0,36	9,47	4,71	0,968	0,983
203	1,19	0,618	0,0448	3,003	0,48	6,05	3,21	0,970	0,979
204	1,06	0,803	0,0392	8,504	0,23	5,98	4,52	0,962	0,977
205	1,34	0,675	0,0522	3,205	0,97	5,90	2,25	0,982	0,979
206	1,22	0,903	0,0444	9,258	0,48	6,14	3,04	0,973	0,981
207	1,40	0,488	0,0440	1,665	0,83	3,76	1,95	0,984	0,973
208	1,36	0,730	0,0410	5,488	0,38	4,16	3,00	0,972	0,975
209	1,10	0,739	0,0537	7,722	0,72	12,16	3,71	0,946	0,973
210	1,07	0,853	0,0499	17,890	0,51	12,76	4,58	0,942	0,973
211	1,26	0,639	0,0468	4,916	0,55	8,41	3,35	0,947	0,971
212	1,12	0,835	0,0412	13,450	0,30	8,54	4,31	0,939	0,971
213	1,42	0,669	0,0565	4,883	1,18	8,17	2,41	0,964	0,969
214	1,32	0,918	0,0489	14,500	0,52	8,10	3,52	0,945	0,968
215	1,47	0,493	0,0483	2,513	1,01	5,19	2,08	0,966	0,959
216	1,42	0,732	0,0437	8,685	0,43	5,67	3,29	0,949	0,963
217	1,07	0,737	0,0524	6,365	0,76	11,26	3,51	0,966	0,980
218	0,96	0,973	0,0473	17,970	0,39	11,24	4,88	0,958	0,978
219	1,22	0,630	0,0458	3,953	0,54	7,43	3,32	0,963	0,976
220	1,10	0,826	0,0405	11,930	0,27	7,59	4,83	0,958	0,976
221	1,39	0,665	0,0554	3,498	1,23	6,85	2,09	0,975	0,972
222	1,26	0,924	0,0461	13,130	0,49	7,50	3,57	0,966	0,977
223	1,43	0,486	0,0455	2,029	0,98	4,51	1,97	0,979	0,967
224	1,39	0,739	0,0425	7,074	0,46	5,22	3,00	0,968	0,973
225	1,08	0,721	0,0527	7,151	0,65	11,12	3,78	0,954	0,977
226	1,06	0,869	0,0498	16,820	0,43	11,48	4,69	0,948	0,975
227	1,23	0,630	0,0458	4,695	0,46	7,55	3,59	0,953	0,974
228	1,09	0,813	0,0400	14,090	0,21	7,41	5,40	0,945	0,972
229	1,39	0,663	0,0546	4,534	0,98	7,24	2,49	0,967	0,972
230	1,27	0,906	0,0465	14,620	0,42	7,36	3,83	0,954	0,974
231	1,46	0,496	0,0477	2,294	0,89	4,68	2,05	0,970	0,963
232	1,41	0,717	0,0427	7,299	0,37	4,81	3,22	0,949	0,963
233	1,03	0,722	0,0511	5,490	0,63	9,53	3,56	0,974	0,984

Продолжение таблицы В.6

$\begin{matrix} x_i \\ \text{№} \end{matrix}$	$B_{0,\text{отп}}$	$F_{\text{ср}}^*$	$F_{\text{отп}}^*$	P_{Π}^*	$P_{\text{НО}}^* \cdot 10^{-4}$	$P_{\text{ВО}}^* \cdot 10^{-4}$	n	$\theta_{\text{НО}}^*$	$\theta_{\text{ВО}}^*$
234	0,92	0,939	0,0458	15,410	0,32	9,52	4,94	0,967	0,983
235	1,19	0,620	0,0447	3,364	0,44	6,21	3,35	0,970	0,980
236	1,04	0,804	0,0389	9,719	0,23	6,43	4,49	0,966	0,981
237	1,34	0,679	0,0519	3,677	0,88	6,12	2,42	0,981	0,980
238	1,22	0,901	0,0444	10,296	0,43	6,20	3,25	0,972	0,981
239	1,42	0,509	0,0464	1,888	0,82	4,03	2,02	0,983	0,974
240	1,36	0,731	0,0409	5,903	0,37	4,29	2,94	0,972	0,977
241	1,11	0,743	0,0539	8,717	0,66	12,45	3,93	0,946	0,974
242	1,12	0,843	0,0515	18,970	0,51	13,17	4,65	0,943	0,973
243	1,26	0,639	0,0469	5,845	0,46	8,46	3,91	0,946	0,970
244	1,12	0,835	0,0413	14,793	0,27	8,57	4,52	0,938	0,971
245	1,42	0,671	0,0565	5,454	1,08	8,37	2,55	0,962	0,970
246	1,32	0,916	0,0488	16,340	0,46	8,20	3,79	0,944	0,968
247	1,48	0,493	0,0487	2,610	0,98	5,24	2,04	0,964	0,958
248	1,42	0,734	0,0438	9,898	0,40	5,86	3,50	0,950	0,965
249	1,06	0,734	0,0522	6,020	0,87	11,63	2,87	0,967	0,982
250	0,98	0,968	0,0479	19,814	0,37	11,52	5,08	0,958	0,979
251	1,22	0,631	0,0458	4,475	0,49	7,63	3,53	0,964	0,977
252	1,07	0,816	0,0396	11,170	0,31	7,94	3,84	0,959	0,978
253	1,40	0,660	0,0557	3,746	1,12	6,86	2,20	0,972	0,970
254	1,26	0,923	0,0461	14,420	0,45	7,56	3,74	0,965	0,977
255	1,45	0,501	0,0475	2,306	0,96	4,83	2,06	0,978	0,968
256	1,39	0,740	0,0421	7,709	0,43	5,30	3,04	0,967	0,973
257	1,43	0,521	0,0580	1,544	1,66	6,78	1,63	0,978	0,969
258	1,17	0,975	0,0408	20,800	0,25	7,35	4,91	0,955	0,974
259	1,04	0,954	0,0558	14,880	0,82	13,11	3,60	0,961	0,979
260	1,38	0,641	0,0424	5,140	0,43	5,50	3,24	0,962	0,970
261	0,79	0,785	0,0461	13,625	0,34	14,42	5,93	0,951	0,978
262	1,45	0,619	0,0477	4,357	0,88	5,17	2,17	0,973	0,967
263	1,28	0,731	0,0454	6,965	0,69	8,02	2,29	0,942	0,971
264	1,21	0,735	0,0432	5,676	0,45	5,91	3,27	0,977	0,981
265	1,23	0,732	0,0438	5,993	0,43	5,99	3,35	0,967	0,977
266	1,31	0,756	0,0467	8,505	0,54	8,00	3,32	0,949	0,968
267	1,27	0,745	0,0451	6,759	0,53	6,99	3,27	0,959	0,973
268	1,27	0,749	0,0451	8,587	0,43	7,26	3,68	0,958	0,974
269	1,27	0,747	0,0453	8,472	0,44	7,27	3,92	0,957	0,972
270	1,27	0,750	0,0452	7,135	0,51	7,11	3,16	0,961	0,975
271	1,25	0,748	0,0445	7,482	0,57	7,64	3,00	0,962	0,974
272	1,28	0,754	0,0455	8,443	0,41	6,99	4,08	0,959	0,975
273	1,27	0,748	0,0453	7,673	0,48	7,18	3,47	0,959	0,974

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Оценка расхождений относительных размеров между оптимизированными и аппроксимированными (рассчитанными по полиномам) значениями

Таблица Г.1 – оценка расхождений относительных размеров δ_{ca}^* между оптимизированными и аппроксимированными значениями, полученными при минимизации стоимости активных материалов (C_a)

№ опыта	Значение δ_{ca}^*		Расхождение, %	№ опыта	Значение δ_{ca}^*		Расхождение, %
	Оптимизированное	Аппроксимированное			Оптимизированное	Аппроксимированное	
1.	0,3680	0,3714	-0,93	37.	0,3190	0,3334	-4,51
2.	0,4910	0,4992	-1,68	38.	0,4660	0,4612	1,03
3.	0,3120	0,3086	1,09	39.	0,2450	0,2469	-0,79
4.	0,4260	0,4364	-2,44	40.	0,3680	0,3747	-1,83
5.	0,3200	0,3334	-4,19	41.	0,3560	0,3617	-1,60
6.	0,4670	0,4612	1,24	42.	0,4910	0,4895	0,31
7.	0,2440	0,2469	-1,21	43.	0,2970	0,2989	-0,63
8.	0,3690	0,3747	-1,56	44.	0,4090	0,4267	-4,32
9.	0,3490	0,3617	-3,64	45.	0,3060	0,3237	-5,77
10.	0,4840	0,4895	-1,14	46.	0,4460	0,4515	-1,23
11.	0,2998	0,2989	0,31	47.	0,2360	0,2372	-0,52
12.	0,4100	0,4267	-4,07	48.	0,3540	0,3650	-3,11
13.	0,3070	0,3237	-5,43	49.	0,3730	0,3793	-1,68
14.	0,4470	0,4515	-1,00	50.	0,4940	0,5071	-2,65
15.	0,2360	0,2372	-0,52	51.	0,3150	0,3165	-0,46
16.	0,3540	0,3650	-3,11	52.	0,4290	0,4443	-3,56
17.	0,3740	0,3793	-1,41	53.	0,3290	0,3412	-4,67
18.	0,4890	0,5071	-3,69	54.	0,4760	0,4690	1,46
19.	0,3160	0,3165	-0,14	55.	0,2480	0,2548	-2,73
20.	0,4250	0,4443	-4,53	56.	0,3730	0,3826	-2,57
21.	0,3270	0,3412	-4,53	57.	0,3660	0,3695	-0,97
22.	0,4470	0,4690	-4,93	58.	0,4930	0,4973	-0,88
23.	0,2490	0,2548	-2,32	59.	0,3030	0,3067	-1,23
24.	0,3740	0,3826	-2,30	60.	0,4250	0,4345	-2,24
25.	0,3650	0,3695	-1,24	61.	0,3150	0,3315	-5,24
26.	0,4930	0,4973	-0,88	62.	0,4580	0,4593	-0,29
27.	0,3040	0,3067	-0,90	63.	0,2420	0,2451	-1,26
28.	0,4260	0,4345	-2,00	64.	0,3640	0,3729	-2,43
29.	0,3160	0,3315	-4,91	65.	0,3720	0,3714	0,15
30.	0,4590	0,4593	-0,07	66.	0,4930	0,4992	-1,26
31.	0,2420	0,2451	-1,26	67.	0,3090	0,3086	0,13
32.	0,3630	0,3729	-2,71	68.	0,4290	0,4364	-1,73
33.	0,3670	0,3714	-1,20	69.	0,3210	0,3334	-3,86
34.	0,4890	0,4992	-2,09	70.	0,4680	0,4612	1,45
35.	0,3110	0,3086	0,77	71.	0,2460	0,2469	-0,38
36.	0,4290	0,4364	-1,73	72.	0,3690	0,3747	-1,56

Продолжение таблицы Г.1

№ опыта	Значение $\delta_{са}^*$		Расхождение, %	№ опыта	Значение $\delta_{са}^*$		Расхождение, %
	Оптимизированное	Аппроксимированное			Оптимизированное	Аппроксимированное	
73.	0,3530	0,3617	-2,46	119.	0,2490	0,2548	-2,32
74.	0,4840	0,4895	-1,14	120.	0,3730	0,3826	-2,57
75.	0,2970	0,2989	-0,63	121.	0,3670	0,3695	-0,69
76.	0,4140	0,4267	-3,06	122.	0,4940	0,4973	-0,68
77.	0,3070	0,3237	-5,43	123.	0,3040	0,3067	-0,90
78.	0,4470	0,4515	-1,00	124.	0,4280	0,4345	-1,52
79.	0,2360	0,2372	-0,52	125.	0,3170	0,3315	-4,58
80.	0,3560	0,3650	-2,53	126.	0,4590	0,4593	-0,07
81.	0,3780	0,3793	-0,33	127.	0,2420	0,2451	-1,26
82.	0,4950	0,5071	-2,44	128.	0,3650	0,3729	-2,15
83.	0,3190	0,3165	0,80	129.	0,3750	0,3714	0,95
84.	0,4340	0,4443	-2,36	130.	0,4850	0,4992	-2,93
85.	0,3270	0,3412	-4,35	131.	0,3110	0,3086	0,77
86.	0,4780	0,4690	1,88	132.	0,4330	0,4364	-0,79
87.	0,2490	0,2548	-2,32	133.	0,3200	0,3334	-4,19
88.	0,3740	0,3826	-2,30	134.	0,4700	0,4612	1,87
89.	0,3690	0,3695	-0,15	135.	0,2450	0,2469	-0,79
90.	0,4940	0,4973	-0,68	136.	0,3690	0,3747	-1,56
91.	0,3050	0,3067	-0,56	137.	0,3590	0,3617	-0,75
92.	0,4290	0,4345	-1,29	138.	0,4940	0,4895	0,91
93.	0,3170	0,3315	-4,58	139.	0,2990	0,2989	0,04
94.	0,4600	0,4593	0,15	140.	0,4100	0,4267	-4,07
95.	0,2430	0,2451	-0,84	141.	0,3080	0,3237	-5,09
96.	0,3640	0,3729	-2,43	142.	0,4510	0,4515	-0,10
97.	0,3680	0,3714	-0,93	143.	0,2370	0,2372	-0,09
98.	0,4940	0,4992	-1,06	144.	0,3580	0,3650	-1,96
99.	0,3050	0,3086	-1,18	145.	0,3850	0,3793	1,49
100.	0,4280	0,4364	-1,97	146.	0,4850	0,5071	-4,55
101.	0,3210	0,3334	-3,86	147.	0,3110	0,3165	-1,75
102.	0,4670	0,4612	1,24	148.	0,4330	0,4443	-2,60
103.	0,2460	0,2469	-0,38	149.	0,3200	0,3412	-6,64
104.	0,3680	0,3747	-1,83	150.	0,4700	0,4690	0,21
105.	0,3520	0,3617	-2,76	151.	0,2480	0,2548	-2,73
106.	0,4830	0,4895	-1,35	152.	0,3770	0,3826	-1,48
107.	0,2960	0,2989	-0,97	153.	0,3720	0,3695	0,66
108.	0,4130	0,4267	-3,31	154.	0,4920	0,4973	-1,08
109.	0,3080	0,3237	-5,09	155.	0,3090	0,3067	0,74
110.	0,4480	0,4515	-0,77	156.	0,4240	0,4345	-2,48
111.	0,2370	0,2372	-0,09	157.	0,3190	0,3315	-3,92
112.	0,3550	0,3650	-2,82	158.	0,4630	0,4593	0,80
113.	0,3770	0,3793	-0,60	159.	0,2430	0,2451	-0,84
114.	0,4930	0,5071	-2,85	160.	0,3650	0,3729	-2,15
115.	0,3180	0,3165	0,49	161.	0,3740	0,3714	0,69
116.	0,4270	0,4443	-4,04	162.	0,4950	0,4992	-0,85
117.	0,3260	0,3412	-4,67	163.	0,3100	0,3086	0,45
118.	0,4760	0,4690	1,46	164.	0,4360	0,4364	-0,10

Продолжение таблицы Г.1

№ опыта	Значение $\delta_{са}^*$		Расхождение, %	№ опыта	Значение $\delta_{са}^*$		Расхождение, %
	Оптимизированное	Аппроксимированное			Оптимизированное	Аппроксимированное	
165.	0,3200	0,3334	-4,19	211.	0,3160	0,3165	-0,14
166.	0,4680	0,4612	1,45	212.	0,4400	0,4443	-0,97
167.	0,2450	0,2469	-0,79	213.	0,3280	0,3412	-4,03
168.	0,3690	0,3747	-1,56	214.	0,4820	0,4690	2,69
169.	0,3550	0,3617	-1,89	215.	0,2440	0,2548	-4,42
170.	0,4930	0,4895	0,71	216.	0,3760	0,3826	-1,75
171.	0,2980	0,2989	-0,30	217.	0,3750	0,3695	1,46
172.	0,4090	0,4267	-4,32	218.	0,4920	0,4973	-1,08
173.	0,3090	0,3237	-4,75	219.	0,3100	0,3067	1,06
174.	0,4500	0,4515	-0,33	220.	0,4220	0,4345	-2,97
175.	0,2360	0,2372	-0,52	221.	0,3180	0,3315	-4,25
176.	0,3570	0,3650	-2,25	222.	0,4640	0,4593	1,01
177.	0,3830	0,3793	0,98	223.	0,2420	0,2451	-1,26
178.	0,4940	0,5071	-2,65	224.	0,3670	0,3729	-1,60
179.	0,3130	0,3165	-1,10	225.	0,3770	0,3714	1,48
180.	0,4410	0,4443	-0,74	226.	0,4870	0,4992	-2,51
181.	0,3270	0,3412	-4,35	227.	0,3100	0,3086	0,45
182.	0,4830	0,4690	2,89	228.	0,4350	0,4364	-0,33
183.	0,2480	0,2548	-2,73	229.	0,3210	0,3334	-3,86
184.	0,3760	0,3826	-1,75	230.	0,4720	0,4612	2,29
185.	0,3700	0,3695	0,13	231.	0,2460	0,2469	-0,38
186.	0,4910	0,4973	-1,29	232.	0,3690	0,3747	-1,56
187.	0,3060	0,3067	-0,24	233.	0,3590	0,3617	-0,75
188.	0,4220	0,4345	-2,97	234.	0,4930	0,4895	0,71
189.	0,3180	0,3315	-4,25	235.	0,3010	0,2989	0,70
190.	0,4620	0,4593	0,58	236.	0,4120	0,4267	-3,56
191.	0,2420	0,2451	-1,26	237.	0,3090	0,3237	-4,75
192.	0,3640	0,3729	-2,43	238.	0,4510	0,4515	-0,10
193.	0,3790	0,3714	2,00	239.	0,2370	0,2372	-0,09
194.	0,4890	0,4992	-2,09	240.	0,3570	0,3650	-2,25
195.	0,3110	0,3086	0,77	241.	0,3830	0,3793	0,98
196.	0,4360	0,4364	-0,10	242.	0,4930	0,5071	-2,85
197.	0,3220	0,3334	-3,54	243.	0,3150	0,3165	-0,46
198.	0,4700	0,4612	1,87	244.	0,4390	0,4443	-1,20
199.	0,2440	0,2469	-1,21	245.	0,3280	0,3412	-4,03
200.	0,3700	0,3747	-1,28	246.	0,4810	0,4690	2,49
201.	0,3590	0,3617	-0,75	247.	0,2500	0,2548	-1,91
202.	0,4940	0,4895	0,91	248.	0,3750	0,3826	-2,02
203.	0,3000	0,2989	0,37	249.	0,3740	0,3695	1,19
204.	0,4090	0,4267	-4,32	250.	0,4940	0,4973	-0,68
205.	0,3100	0,3237	-4,41	251.	0,3090	0,3067	0,74
206.	0,4520	0,4515	0,12	252.	0,4210	0,4345	-3,21
207.	0,2370	0,2372	-0,09	253.	0,3190	0,3315	-3,92
208.	0,3570	0,3650	-2,25	254.	0,4650	0,4593	1,22
209.	0,3850	0,3793	1,49	255.	0,2420	0,2451	-1,26
210.	0,4950	0,5071	-2,44	256.	0,3660	0,3729	-1,87

Продолжение таблицы Г.1

№ опыта	Значение δ_{ca}^*		Расхождение, %
	Оптимизированное	Аппроксимированное	
257.	0,2260	0,2281	-0,95
258.	0,4910	0,4895	0,30
259.	0,4910	0,4791	2,42
260.	0,3140	0,3265	-3,99
261.	0,4090	0,4265	-4,27
262.	0,3120	0,3245	-4,02
263.	0,3790	0,3855	-1,70
264.	0,3610	0,3656	-1,26
265.	0,3660	0,3675	-0,41
266.	0,3840	0,3835	0,12
267.	0,3720	0,3755	-0,94
268.	0,3770	0,3755	0,40
269.	0,3750	0,3755	-0,13
270.	0,3750	0,3755	-0,13
271.	0,3720	0,3755	-0,94
272.	0,3740	0,3755	-0,40
273.	0,3780	0,3755	0,66