

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

*На правах рукописи*

НИКИТИНА Олеся Алексеевна

**УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИК СИНТЕЗА  
ФОРСИРОВАННЫХ ВТЯЖНЫХ БРОНЕВЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТОВ  
ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ**

Специальность 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук, профессор  
Свинцов Геннадий Петрович

Чебоксары – 2017

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	4
РАЗДЕЛ 1 ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ УСТРОЙСТВА, СОЗДАННЫЕ НА ОСНОВЕ БРОНЕВЫХ МАГНИТНЫХ СИСТЕМ. ОБЗОР, КЛАССИФИКАЦИЯ И АНАЛИЗ. МЕТОДИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ .....	9
1.1 Основные характеристики втяжных броневых приводных электромагнитов коммутационных аппаратов .....	12
1.2 Схемы форсированного управления электромагнитами .....	19
1.3 Анализ методик проектирования броневых электромагнитов .....	21
1.4 Выводы .....	25
РАЗДЕЛ 2 РАЗРАБОТКА УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫХ МЕТОДИК ОПТИМИЗАЦИИ ОДНООБМОТОЧНЫХ ВТЯЖНЫХ БРОНЕВЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТОВ, УПРАВЛЯЕМЫХ ПО СХЕМЕ С БАЛЛАСТНЫМ РЕЗИСТОРОМ НА ОСНОВЕ ОБОБЩЕННЫХ ИХ ХАРАКТЕРИСТИК.....	26
2.1 Синтез втяжных броневых электромагнитов, минимизированных по объему активных материалов .....	31
2.2 Синтез втяжных броневых электромагнитов, минимизированных по массе активных материалов .....	36
2.3 Синтез втяжных броневых электромагнитов, минимизированных по стоимости активных материалов .....	38
2.4 Синтез втяжных броневых электромагнитов, минимизированных по установочной площади.....	44
2.5 Синтез втяжных броневых электромагнитов, минимизированных по высоте .....	46
2.6 Синтез втяжных броневых электромагнитов, минимизированных по габаритному объему .....	47
2.7 Выводы .....	49
РАЗДЕЛ 3 РАЗРАБОТКА МЕТОДИК СИНТЕЗА ФОРСИРОВАННЫХ ДВУХОБМОТОЧНЫХ ЭМ МИНИМИЗИРОВАННЫХ ПО ОСНОВНЫМ КРИТЕРИЯМ.....	50
3.1 Синтез электромагнитов с коаксиальным размещением пусковой и удерживающей обмоток.....	50
3.2 Синтез двухобмоточных электромагнитов с параллельным соединением обмоток ...	64
3.3 Выводы .....	67
РАЗДЕЛ 4 АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ОПТИМИЗАЦИИ И ВЫРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ИХ ПРИМЕНЕНИЮ.....	68

4.1 Анализ результатов оптимизационных расчетов форсированных электромагнитов, управляемых по схеме с балластным резистором .....	68
4.1.1 Минимизация массы активных материалов, используемых в конструкции электромагнита.....	68
4.2 Анализ результатов оптимизации форсированных электромагнитов, управляемых по двухобмоточным схемам.....	87
4.2.1 Минимизация стоимости активных материалов, используемых в конструкции электромагнита с пусковой и удерживающей обмотками .....	87
4.3 Выводы .....	94
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	96
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	96
ПРИЛОЖЕНИЕ А Матрица ортогонального центрально-композиционного плана второго порядка.....	114
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Результаты оптимизации форсированных однообмоточных втяжных броневых электромагнитов в схеме с балластным резистором, минимизированные по массе активных материалов.....	119
ПРИЛОЖЕНИЕ В Результаты оптимизации форсированных двухобмоточных броневых электромагнитов в схеме с переключением с пусковой обмотки на удерживающую, минимизированные по стоимости активных материалов .....	125
ПРИЛОЖЕНИЕ Г Сравнение результатов расчета втяжного броневых электромагнита по методике Б.Э. Коца и по разработанной методике оптимизации .....	134
ПРИЛОЖЕНИЕ Д Материалы об использовании и практической полезности результатов диссертационного исследования .....	138

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы.** Форсированное управление электромагнитами (ЭМ) применяется для снижения массо- и габаритных показателей, потребляемой мощности, стоимости и увеличения быстродействия электромагнитного аппарата. Форсированное управление обеспечивается подачей напряжения выше номинального, которое способствует протеканию значительно большего тока, чем необходимо для срабатывания ЭМ. С помощью схем форсировки ток снижается до допустимых значений по условию нагрева и удержания.

Зарубежные фирмы, в частности Siemens, ABB, Lovato Electric, Alton, активно применяют форсированное управление; отечественные же производители с сомнением относятся к данному виду управления, по причине применения дополнительных элементов управления, снижающих надежность аппарата. В связи с этим форсировка ЭМ только начинает занимать подобающее место при проектировании современных отечественных электромагнитных аппаратов.

Важным аспектом проектирования приводных ЭМ коммутационных аппаратов является обеспечение их оптимальности. Проектирование оптимальных ЭМ связано с поиском значений параметров, которые обеспечивают минимум функции цели. В качестве последней выбираются суммарная масса обмоточной меди и ферромагнитной стали (активных материалов), их объем, стоимость, а также габаритные показатели – высота, установочная площадь, габаритный объем.

**Степень разработанности темы исследования.** Большой вклад в изучение и решение проблем оптимизации электромеханических устройств внесли работы Афанасьева А.А., Гаранина А.Ю., Гордона А.В., Дергачева П.А., Иванова И.П., Казакова Л.А., Клименко Б.В., Ковалева О.Ф., Коробкова Ю.С., Коца Б.Э., Курбатова П.А., Лобова Б.Н., Неймана В.Ю., Нестерина В.А., Никитенко А.Г., Сливинской А.Г., Софронова Ю.В., Павленко А.В., Пеккера И.И., Руссовой Н.В., Шоффы В.Н. и других ученых.

Существующим методикам синтеза форсированных ЭМ присущ ряд недостатков, в которых не учитывается значение противодействующего усилия при притяннутом положении якоря, либо синтез осуществляется путем графического решения уравнений, характеризующих функционирование приводных ЭМ. Математическое описание синтеза приводных ЭМ с наиболее полным учетом процессов работы, в том числе условий возврата, позволяют улучшить качество и достоверность проектных решений.

В свою очередь применение оптимизационных методик, базирующихся на обобщенных электромагнитных и тепловых характеристиках, полученных совместным использованием методов конечных элементов, теории подобия и планирования эксперимента, обеспечивает

существенное сбережение ресурсов и электрической энергии, что является одной из важнейших задач электротехники.

Таким образом, усовершенствование методик синтеза втяжных броневых электромагнитов (ВБЭМ) является актуальной проблемой.

**Цель диссертационной работы** – усовершенствование методик проектирования форсированных оптимальных ВБЭМ с различными схемами форсировки и математическое описание оптимальных соразмерностей и параметров в виде полиномиальных зависимостей. Указанное позволяет значительно снизить затраты на доводку опытных образцов приводных ЭМ, что повышает качество проектных работ.

**Основные задачи, решаемые в работе.** Для достижения цели в ходе исследований по диссертационной работе были поставлены и решены следующие задачи:

1. Сравнительный анализ ВБЭМ и их методик проектирования с форсированным управлением.
2. Разработка усовершенствованных методик синтеза форсированных однообмоточных ВБЭМ в схеме с балластным резистором.
3. Разработка усовершенствованных методик синтеза форсированных двухобмоточных ВБЭМ.
4. Математическое описание оптимальных соразмерностей и параметров ВБЭМ в виде полиномиальных зависимостей.
5. Анализ, оценка и обобщение результатов проектирования оптимальных однообмоточных ВБЭМ в схеме с балластным резистором и двухобмоточных форсированных ВБЭМ.

**Объект исследования** – одно- и двухобмоточные ВБЭМ постоянного напряжения с форсированным управлением.

**Предмет исследования** – разработка усовершенствованных методик проектного и оптимизационного расчетов.

**Область исследования** – методики синтеза ВБЭМ с плоским стопом.

**Научная новизна работы:**

1. Предложенные методики проектирования форсированных ВБЭМ на базе использования обобщенных нагрузочных и тепловых характеристик, в отличие от известных, позволяют получить наилучший результат проектирования.
2. Предложенные оптимизационные методики с использованием двухразового сканирования факторного пространства позволяют с погрешностью, не превышающей 6 %, определить оптимальные значения параметров за приемлемое время, не требующие выполнения повторных оптимизационных расчетов.

3. Установлено, что наиболее существенное влияние на оптимальные соизмерности и параметры ЭМ оказывают: параметры механической характеристики ( $\delta_{кр}, P_{мк кр}$ ); ( $\delta_{к}, P_{мк к}$ ), температура окружающей среды  $T_0$ ; максимальная температура нагрева в толще высокоомной обмотки, принятая в качестве допустимой  $\Theta_{доп}$ .

4. Оригинальным результатом исследования являются полученные в удобной форме для расчета на ПЭВМ полиномиальные зависимости, учитывающие особенности конструкции и схемы работы, что позволяет автоматизировать процесс проектирования.

#### **Теоретическая и практическая значимость работы:**

1. Общие подходы к проектированию, предложенные в разработанных методиках применимы для любых типов форсированных нейтральных ЭМ.

2. Тематика диссертационного исследования соответствует приоритетным направлениям модернизации импортозамещения и технологического развития электротехники России: энергосбережение, повышение энергоэффективности и расширение номенклатуры. Полученные результаты исследования использовались при выполнении НИР в ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова» в рамках государственного задания Министерства образования и науки Российской Федерации:

– «Разработка и исследование ресурсо- и энергосберегающих приводов электрических аппаратов»;

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

3. Результаты исследования используются в учебном процессе при подготовке бакалавров и магистров на кафедре электрических и электронных аппаратов ФГБОУ ВО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова»;

4. Усовершенствованные методики синтеза применяются при разработке новых изделий в ОАО «ВНИИР-Прогресс» и модернизации изделий на основе броневого магнитных систем на ЗАО «ЧЭАЗ».

**Методология и методы исследования.** Методологической основой является совокупность методов, объединенных использованием теории подобия, планирования эксперимента, теории магнитных и электрических цепей, методов решения нелинейных уравнений и параметрического синтеза оптимальных соизмерностей и параметров ЭМ.

**Основные положения диссертационной работы, выносимые на защиту:**

1. Усовершенствованная методика синтеза форсированных ВБЭМ в схеме с балластным резистором, учитывающая условия срабатывания, нагрева магнитной системы и дополнительно условие возврата с использованием известных обобщенных нагрузочных и тепловых характеристик, полученных конечно-элементным моделированием.

2. Методика синтеза и оптимизации форсированных двухобмоточных ВБЭМ в схеме с пусковой и удерживающей обмотками, размещенными коаксиально.

3. Методика синтеза и оптимизации форсированного ВБЭМ с параллельным включением низкоомных и высокоомных обмоток, размещенных коаксиально.

4. Результаты оптимизации объема, массы, стоимости активных материалов и габаритных размеров с использованием усовершенствованных методик, обеспечивающих снижение затрат на разработку и повышающих качество проектных работ.

**Достоверность результатов работы** обеспечена использованием апробированных математических моделей электромагнитных и тепловых характеристик, полученных методами конечно-элементного моделирования, положений теории подобия и вычислительного эксперимента, сопоставленных с результатами расчета по полученным полиномиальным зависимостям. Их расхождения не превышают 6 %.

**Соответствие паспорту специальности 05.09.01** – электромеханика и электрические аппараты.

*Соответствие диссертации формуле специальности:* 05.09.01 «Электромеханика и электрические аппараты» (технические науки): в диссертационной работе целью исследования является совершенствование приводов электромагнитных аппаратов, а именно одно- и двухобмоточных ВБЭМ постоянного напряжения с форсированным управлением, с целью повышения энергетической эффективности, технологичности, снижения их себестоимости и эксплуатационных затрат.

*Соответствие диссертации области исследования:* отраженные в диссертации научные положения соответствуют области исследования специальности 05.09.01, а именно:

- к п. 4 «Разработка методов анализа и синтеза электрических аппаратов» относятся усовершенствованные методики синтеза форсированных одно- и двухобмоточных ВБЭМ с распространенными схемами форсированного управления учитывающие условия срабатывания, возврата и нагрева магнитной системы, а также полученные полиномиальные зависимости, упрощающие проектирование оптимальных ВБЭМ.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

- Региональный фестиваль студентов и молодежи «Человек. Гражданин. Ученый», Чебоксары, 2012 г.;
- Региональный фестиваль студентов и молодежи «Человек. Гражданин. Ученый», Чебоксары, 2014 г.;
- Всероссийская 48-я научная студенческая конференция по техническим, гуманитарным и естественным наукам, Чебоксары, 2014 г.;
- XI Республиканская научно-техническая конференция молодых специалистов, Чебоксары, 2014 г.;
- IX Всероссийская научно-техническая конференция «Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике», Чебоксары, 2014 г.;
- Региональный фестиваль студентов и молодежи «Человек. Гражданин. Ученый», Чебоксары, 2015 г.;
- Всероссийская 49-я научная студенческая конференция по техническим, гуманитарным и естественным наукам, Чебоксары, 2015 г.;
- XII Республиканская научно-техническая конференция молодых специалистов, Чебоксары, 2015 г.;
- Всероссийская 50-я научная студенческая конференция по техническим, гуманитарным и естественным наукам, Чебоксары, 2016 г.;
- Региональный фестиваль студентов и молодежи «Человек. Гражданин. Ученый», Чебоксары, 2016 г.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 15 печатных работ: из них 6 статей опубликовано в журналах из перечня ВАК, 3 патента, 1 статья в других печатных изданиях и 5 тезисов докладов.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы (178 наименований), приложений (27 страниц), включает в себя 140 страниц машинного текста, 33 рисунка и 34 таблицы.



## РАЗДЕЛ 1 ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ УСТРОЙСТВА, СОЗДАННЫЕ НА ОСНОВЕ БРОНЕВЫХ МАГНИТНЫХ СИСТЕМ. ОБЗОР, КЛАССИФИКАЦИЯ И АНАЛИЗ. МЕТОДИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Втяжные и клапанные электромагниты получили широкое применение в аппаратах различного назначения. Теория проектирования клапанных электромагнитов широко освещена в литературе, чего нельзя сказать о проектировании втяжных электромагнитов. В связи с этим существует необходимость в разработке новых и усовершенствовании известных методов и подходов к проектированию ВБЭМ (рисунок 1.1) [1,3-17,34, 38, 52, 54, 55, 74 и др.].

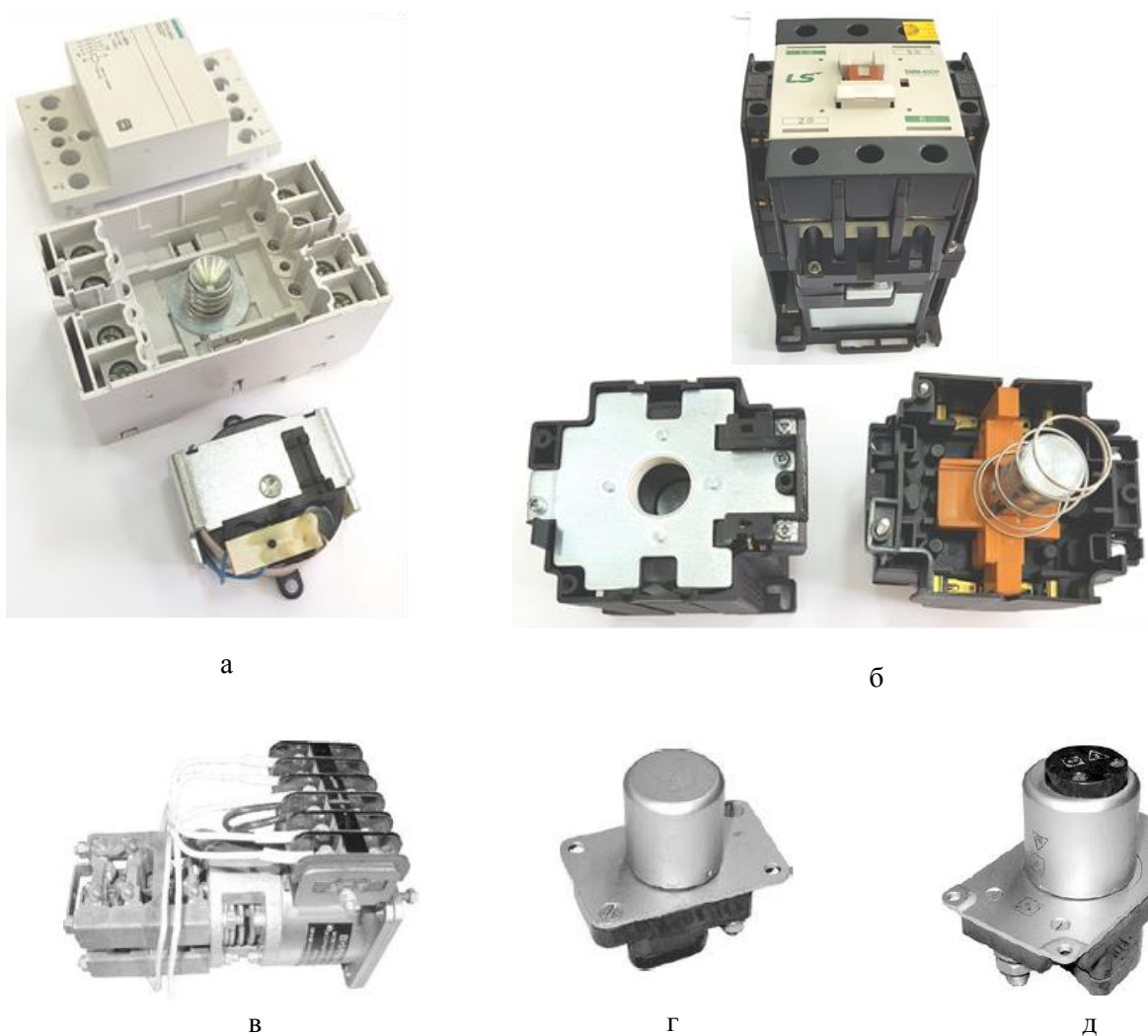


Рисунок 1.1 – Контакторы с броневой магнитной системой известных фирм:  
 а – модульный контактор 5TT5, Siemens;  
 б – контактор SMM-60 DP, LS Industrial Systems;  
 в – электромагнит серии BB400-15, ЗАО «ЧЭАЗ»;  
 г – контактор ТКД501ДОД, ЗАО «ЧЭАЗ»;  
 д – контактор ТКС601ДОД, ЗАО «ЧЭАЗ»

В качестве примера на рисунке 1.1 приведены контакторы с приводным ЭМ втяжного типа. В модульном контакторе (рисунок 1.1, а) приводной ЭМ выполнен с втяжным якорем с коническим полюсом. В качестве корпуса применена О-образная гнутая скоба. Высота стопа выбрана такой, что рабочий зазор находится внутри катушки.

Вариант втяжного ЭМ по рисунку 1.1, б выполнен с плоским проходным фланцем и якорем (стопом) с цилиндрическим полюсом. В качестве корпуса используется С-образная скоба (плунжерный ЭМ) [135].

Силовой ЭМ серии ВВ-400-15 (рисунок 1.1, в) применяется в системе управления высоковольтными выключателями.

Контакторы ТКД501ДОД и ТКС601ДОД являются однополюсными и применяются в электрооборудовании летательных аппаратах и общепромышленных устройствах. Они имеют цилиндрический корпус, втяжной якорь, усечено-конический полюс у ТКД501ДОД и плоский у ТКС601ДОД, причем контактор ТКС601ДОД управляется форсировано по схеме с последовательным соединением обмоток.

ВБЭМ также широко применяются в устройствах запорной аппаратуры [163], в качестве электромагнитных расцепителей автоматических выключателей, а также в устройствах бортовой техники.

Свое название втяжные электромагниты получили по признаку расположения рабочего зазора, находящегося внутри катушки электромагнита, якоря втягивающегося во внутрь катушки. Броневые электромагниты названы так в связи с тем, что их катушка охвачена снаружи цилиндрическим корпусом. ВБЭМ обладают обоими эти конструктивными особенностями. Габариты и масса зависят от необходимой величины совершаемой работы, на которую рассчитывается ЭМ.

На основе обзора броневых ЭМ дана их классификация (рисунок 1.2). В соответствии с которой они могут быть разделены на ЭМ с плоской форма полюса; с конической формой полюса; с усечено-конической формой полюса (выполняются с целью увеличения тяговых усилий при относительно больших рабочих зазорах ВБЭМ, что усложняет и удорожает технологию изготовления приводного ЭМ) [54 и др.]; без стопа с внешним развитым воротничком; с неразвитым воротничком; с внутренним воротничком; с шихтованным прямоугольным сердечником; с магнитными шунтами, с постоянным и переменным по ходу якоря сечением, а также с поворотным якорем.

Поскольку в работе поставлены задачи усовершенствования методик проектирования форсированных ЭМ, то увеличение тягового усилия при начальных (больших) зазорах позволяет использовать более простые технологичные формы рабочих полюсов с плоскими, цилиндрическими полюсами.

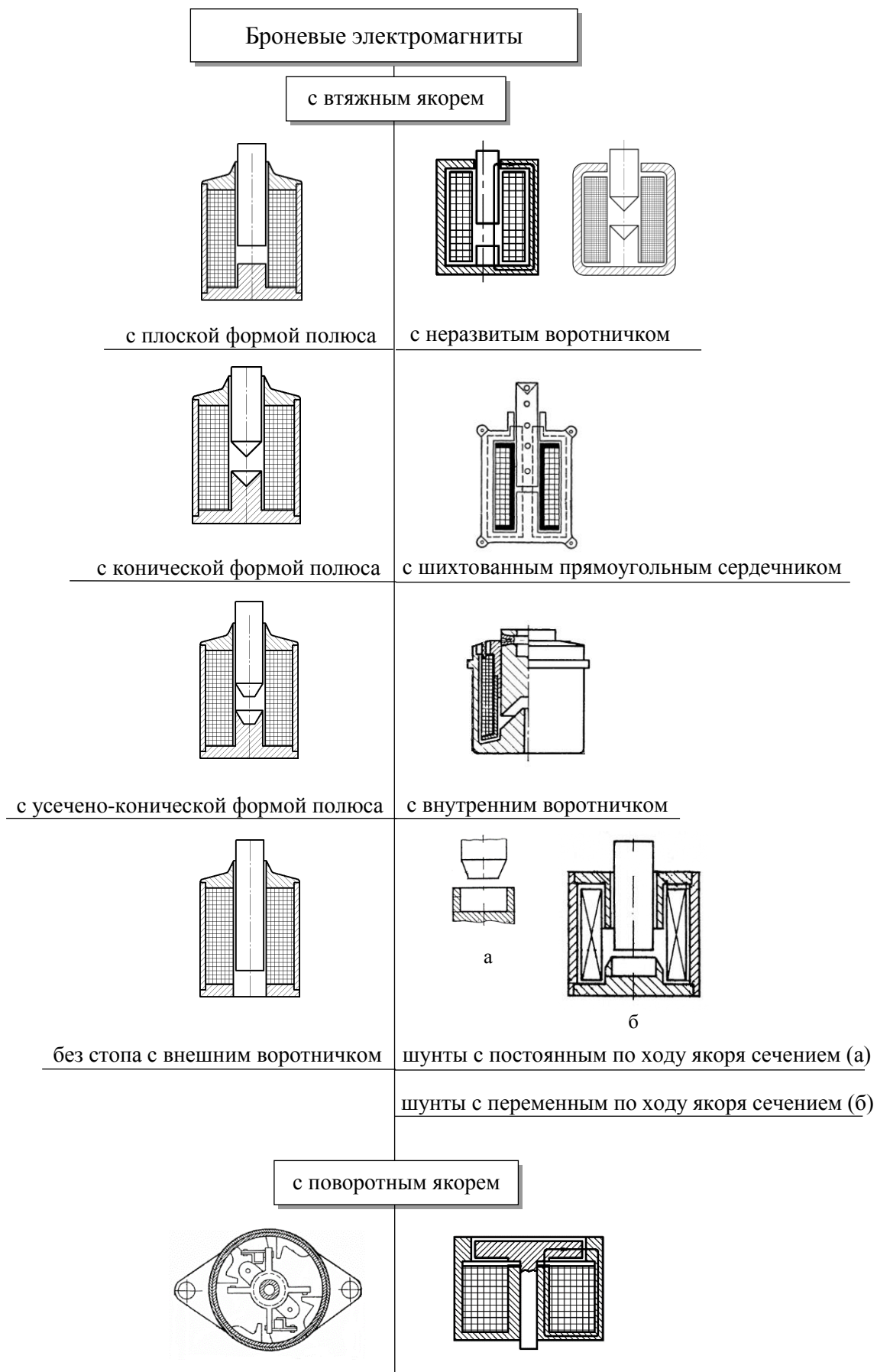


Рисунок 1.2 – Классификация ВБЭМ

### 1.1 Основные характеристики втяжных броневого приводных электромагнитов коммутационных аппаратов

Для минимизации массогабаритных показателей видоизменяют конструкции ЭМ. Одним из таких способов является использование различных вариаций форм полюсов рабочего воздушного зазора (рисунок 1.3, а): электромагниты с плоской, конической и усеченно-конической формой полюса. Выбор той или иной формы полюса приводит к изменению электромагнитных характеристик (рисунок 1.3, б). При замене плоской формы полюса на коническую достигается максимум полезной работы при заданном ходе якоря. Размеры фланцев и длины стопов также оказывают [38, 39, 54, 79, 87, 89 и др.] влияние на габариты ЭМ. Шихтованный ЭМ с прямоугольником сердечником используется, когда необходимо использование одной и той же конструкции при питании постоянным и переменным током.

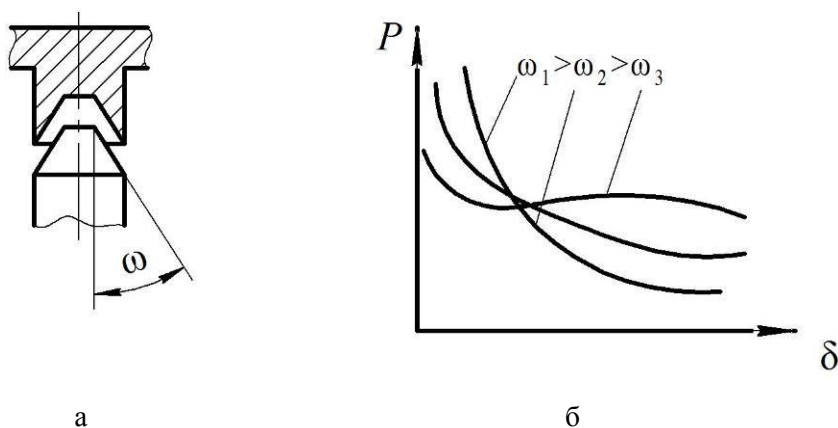


Рисунок 1.3 – Влияние формы полюсов с усеченно-коническими опорными поверхностями (а) на тяговые характеристики (б)

В разработанных усовершенствованных методиках используются математические модели статических характеристик, полученные Архиповой Е.В [6-9,12, 17]. Модели получены методом конечных элементов в программной среде FEMM постановкой численного эксперимента с использованием теории подобия и планирования эксперимента и теории многофакторного анализа для ВБЭМ (рисунок 1.4).

Обобщенная нагрузочная характеристика электромагнита (1.1) и (1.2) для однообмоточных ВБЭМ:

$$\begin{cases} P_{\text{эм}} = P_* P_{\text{баз}}, & (1.1) \\ F = F_* F_{\text{баз}} + (B_{1*} \delta_{\text{п1}} + B_{2*} \delta_{\text{п2}} + B_{3*} \delta_{\text{п3}}) \cdot (B_m / \mu_0), & (1.2) \end{cases}$$

где  $P_{\text{баз}} = \frac{B_m^2 \pi d_{\text{як}}^2}{8\mu_0}$ ;  $F_{\text{баз}} = \frac{B_m d_{\text{як}}}{\mu_0}$  - базисные значения электромагнитной и магнитодвижущих сил

соответственно;

$\delta_* = \frac{\delta}{d_{\text{як}}}$  - относительный воздушный рабочий зазор;

$\delta_{\text{п1}}, \delta_{\text{п2}}, \delta_{\text{п3}}, B_{1*}, B_{2*}, B_{3*}$  - паразитные зазоры и относительные значения магнитных индукций между проходным фланцем и корпусом, опорным фланцем и корпусом, опорным фланцем и стопом соответственно;

$P_*, F_*$  - безразмерные функции электромагнитной и магнитодвижущих сил соответственно.

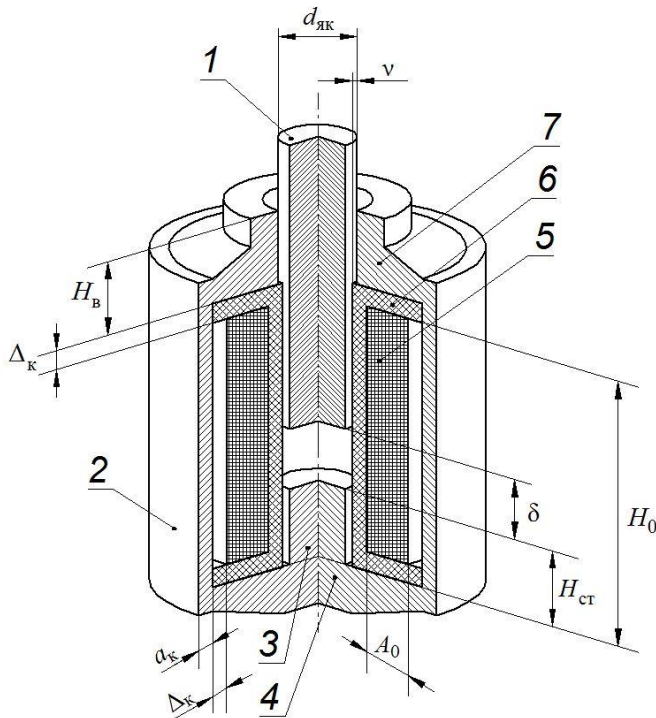


Рисунок 1.4 – Эскиз втяжного  
броневое электромагнита: 1 – якорь;  
2 – корпус; 3 – стоп; 4 – опорный фланец;  
5 – обмотка; 6 – каркас катушки;  
7 – проходной фланец

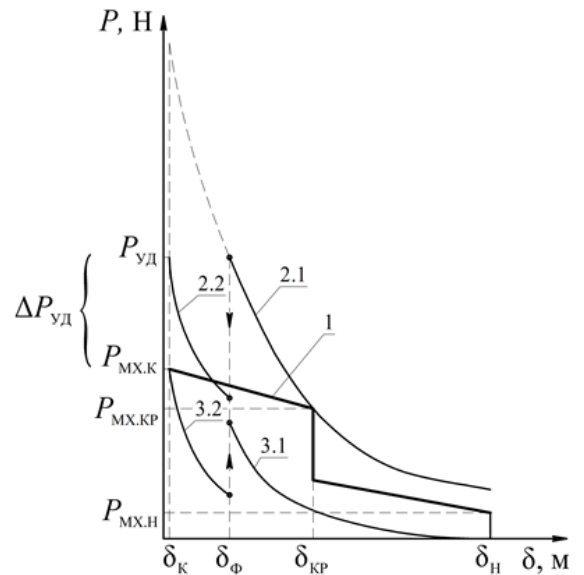


Рисунок 1.5 – Согласование  
характеристик:

1 – противодействующая  
характеристика; тяговые  
характеристики: 2.1 –  $P_{\text{эм}}$  при пуске;  
2.2 –  $P_{\text{эм}}$  при удержании; 3.1 –  $P_{\text{эм}}$  при  
отпуске; 3.2 –  $P_{\text{эм}}$  при возврате;  
 $\delta_{\text{ф}}$  – зазор, при котором размыкается  
форсировочный контакт

$$P_* = 10^{-6} \{ a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_4 x_4 + a_5 x_5 + [x_6 (a_6 + a_{16} x_1 + a_{26} x_2 + a_{46} x_4 + a_{126} x_1 x_2 + a_{146} x_1 x_4 + a_{246} x_2 x_4 + a_{66} x_6^2) + a_{66} x_6^2] + a_{11} x_1^2 + a_{22} x_2^2 + a_{33} x_3^2 + a_{44} x_4^2 + a_{55} x_5^2 + a_{12} x_1 x_2 + a_{14} x_1 x_4 + a_{23} x_2 x_3 + a_{25} x_2 x_5 + a_{235} x_2 x_3 x_5 \}^2, \quad (1.3)$$

где  $a_0 = 797 - 2122\delta_* + 3876\delta_*^2 - 2268\delta_*^3$ ;  $a_1 = -5,6 - 247\delta_* + 371\delta_*^2 - 164\delta_*^3$ ;

$a_2 = -17,5 + 298\delta_* - 590\delta_*^2 + 272\delta_*^3$ ;  $a_4 = 0,3 + 61,7\delta_* - 179\delta_*^2 + 134\delta_*^3$ ;

$a_5 = -0,2 + 85,8\delta_* - 219\delta_*^2 + 154\delta_*^3$ ;  $a_6 = 149 - 962\delta_* + 3212\delta_*^2 - 4520\delta_*^3 + 2273\delta_*^4$ ;

$a_{11} = -12,1 + 78,3\delta_* - 65,5\delta_*^2 - 48,1\delta_*^3$ ;  $a_{22} = -36,5 + 56,8\delta_* - 90,2\delta_*^2 - 1,8\delta_*^3$ ;

$a_{33} = -9,8 + 78,9\delta_* - 180\delta_*^2 + 125\delta_*^3$ ;  $a_{44} = -7,5 + 5,4\delta_* - 6,8\delta_*^2$ ;

$a_{55} = -3,5 - 0,5\delta_* + 1,4\delta_*^2$ ;  $a_{66} = -47 + 218\delta_* - 380\delta_*^2 + 214\delta_*^3$ ;

$a_{12} = -9,3 + 157\delta_* - 403\delta_*^2 + 368\delta_*^3$ ;  $a_{14} = 3,7 + 19,8\delta_* - 16,3\delta_*^2$ ;

$a_{16} = -23,9 + 222\delta_* - 929\delta_*^2 + 1462\delta_*^3 - 761\delta_*^4$ ;  $a_{23} = 5,9 - 19,8\delta_* + 42,3\delta_*^2 - 25,7\delta_*^3$ ;

$a_{25} = -2,82 + 4,9\delta_* - 10,5\delta_*^2$ ;  $a_{26} = 43,3 - 22,1\delta_* + 14,5\delta_*^2$ ;

$a_{46} = 2,5 - 40,6\delta_* + 75,3\delta_*^2 - 47,4\delta_*^3$ ;  $a_{126} = 8,4 - 65,2\delta_* + 74\delta_*^2$ ;

$a_{146} = 2 + 10,3\delta_* - 10,5\delta_*^2$ ;  $a_{235} = 1,9 + 2,5\delta_* - 0,2\delta_*^2$ ;

$a_{246} = -2,6 - 2,2\delta_*$ ;

$$F_* = 10^{-6} (b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_5 x_5 + b_6 x_6 + b_{22} x_2^2 + b_{44} x_4^2 + b_{66} x_6^2 + b_{12} x_1 x_2 + b_{14} x_1 x_4 + b_{26} x_2 x_6)^2, \quad (1.4)$$

где  $b_0 = 194 + 869\delta_* - 1364\delta_*^2 + 933\delta_*^3$ ;  $b_1 = 2,8 - 71,2\delta_* + 12,2\delta_*^2 + 17,1\delta_*^3$ ;

$b_2 = -7,84 + 77,7\delta_* - 16,4\delta_*^2 - 63,6\delta_*^3$ ;  $b_3 = -3,9 + 0,8\delta_* + \delta_*^2 + 1,2\delta_*^3$ ;

$b_5 = 7,2 + 14,9\delta_* - 33,5\delta_*^2 + 19,7\delta_*^3$ ;  $b_6 = 23 - 41,3\delta_* + 135\delta_*^2 - 92,9\delta_*^3$ ;

$b_{22} = -4,1 - 42,2\delta_* + 79,3\delta_*^2 - 84,8\delta_*^3$ ;  $b_{44} = -0,8 - 10,3\delta_* + 17,6\delta_*^2 - 17,1\delta_*^3$ ;

$b_{66} = -5,6 + 3,1\delta_* + 22,8\delta_*^2 - 33,6\delta_*^3$ ;  $b_{12} = -3,5 + 50,6\delta_* - 12,6\delta_*^2 + 124\delta_*^3$ ;

$b_{14} = 0,2 + 12,8\delta_* - 10,2\delta_*^2 + 5\delta_*^3$ ;  $b_{26} = 5,4 + 50,4\delta_* - 76,4\delta_*^2 + 53,8\delta_*^3$ .

Магнитные индукции в местах сочленения элементов магнитопровода:  
– между проходным фланцем и корпусом:

$$B_{1*} = 10^{-6} (d_0 + d_1 x_1 + d_2 x_2 + d_4 x_4 + d_5 x_5 + d_6 x_6 + d_{11} x_1^2 + d_{22} x_2^2 + d_{66} x_6^2 + d_{12} x_1 x_2 + d_{24} x_2 x_4 + d_{26} x_2 x_6)^2, \quad (1.5)$$

где  $d_0 = 937,6 + 698,7\delta_* - 2603,8\delta_*^2 + 3912\delta_*^3 - 2023,9\delta_*^4$ ;  $d_1 = -3,4 + 9,1\delta_* - 25\delta_*^2 + 60\delta_*^3$ ;

$$d_2 = -37,2 - 3,8\delta_* + 73,7\delta_*^2 - 170,9\delta_*^3;$$

$$d_4 = 5,7 + 15,8\delta_* - 33,5\delta_*^2 + 45,2\delta_*^3;$$

$$d_5 = -14,1 + 96,9\delta_* - 213,3\delta_*^2 + 141,3\delta_*^3;$$

$$d_6 = 87,7 - 311,3\delta_* + 719,5\delta_*^2 - 493,9\delta_*^3;$$

$$d_{11} = -6,7 + 15,7\delta_* - 1,8\delta_*^2 - 33,8\delta_*^3;$$

$$d_{22} = -15,9 - 76,4\delta_* + 129\delta_*^2 - 133\delta_*^3;$$

$$d_{66} = -39,8 + 120\delta_* - 159,9\delta_*^2 + 55\delta_*^3;$$

$$d_{12} = -13,7 + 110,1\delta_* - 247,9\delta_*^2 + 215,8\delta_*^3;$$

$$d_{24} = 3,3 - 16,3\delta_* + 32\delta_*^2 + 4,8\delta_*^3;$$

$$d_{26} = 14,3 + 327,7\delta_* - 1462,8\delta_*^2 + 2556,5\delta_*^3 - 1503,3\delta_*^4;$$

– между опорным фланцем и корпусом:

$$B_{2*} = 10^{-6} (e_0 + e_1x_1 + e_2x_2 + e_4x_4 + e_5x_5 + e_6x_6 + e_{11}x_1^2 + e_{22}x_2^2 + e_{66}x_6^2 + e_{12}x_1x_2 + e_{24}x_2x_4 + e_{26}x_2x_6)^2, \quad (1.6)$$

где  $e_0 = 971,1 - 790,3\delta_* + 931,4\delta_*^2 - 194\delta_*^3 - 68,3\delta_*^4$ ;  $e_1 = -1 - 229,4\delta_* + 336,6\delta_*^2 - 189,2\delta_*^3$ ;

$$e_2 = -19,8 + 372,1\delta_* - 309\delta_*^2 + 69,8\delta_*^3;$$

$$e_4 = 2,4 + 203,8\delta_* - 368,2\delta_*^2 + 222,4\delta_*^3;$$

$$e_5 = 1 + 84,7\delta_* - 195,8\delta_*^2 + 130,8\delta_*^3;$$

$$e_6 = 88,1 - 317,4\delta_* + 719,4\delta_*^2 - 480,9\delta_*^3;$$

$$e_{11} = -7,6 + 63,3\delta_* - 32,1\delta_*^2 - 26,3\delta_*^3;$$

$$e_{22} = -16 + 62,5\delta_* - 56,9\delta_*^2 - 46,2\delta_*^3;$$

$$e_{66} = -38,4 + 149,2\delta_* - 230,7\delta_*^2 + 109,8\delta_*^3;$$

$$e_{12} = -4,9 + 230,7\delta_* - 496,9\delta_*^2 + 389,8\delta_*^3;$$

$$e_{24} = -1,3 - 95\delta_* + 127,9\delta_*^2 - 60,4\delta_*^3;$$

$$e_{26} = 16,8 + 286,4\delta_* - 1303,7\delta_*^2 + 2324,8\delta_*^3 - 1376\delta_*^4;$$

– между опорным фланцем и стопом:

$$B_{3*} = 10^{-6} (g_0 + g_1x_1 + g_2x_2 + g_4x_4 + g_5x_5 + g_6x_6 + g_{22}x_2^2 + g_{66}x_6^2 + g_{12}x_1x_2 + g_{14}x_1x_4 + g_{24}x_2x_4 + g_{26}x_2x_6)^2, \quad (1.7)$$

где  $g_0 = 967,1 - 1043,8\delta_* + 1664,9\delta_*^2 - 1162,2\delta_*^3 + 403,4\delta_*^4$ ;  $g_1 = 3,6 - 102,1\delta_* + 118,2\delta_*^2 - 52,7\delta_*^3$ ;

$$g_2 = -9,4 + 559\delta_* - 681,6\delta_*^2 + 310,4\delta_*^3;$$

$$g_4 = -0,9 + 84,2\delta_* - 182,9\delta_*^2 + 117,3\delta_*^3;$$

$$g_5 = 1,3 + 79,8\delta_* - 182,6\delta_*^2 + 121,5\delta_*^3;$$

$$g_6 = 88,4 - 322\delta_* + 725,4\delta_*^2 - 484,1\delta_*^3;$$

$$g_{22} = -25,1 - 31,2\delta_* + 143,1\delta_*^2 - 173,7\delta_*^3;$$

$$g_{66} = -34,8 + 156\delta_* - 244,8\delta_*^2 + 118,8\delta_*^3;$$

$$g_{12} = -7,2 + 169,9\delta_* - 387,5\delta_*^2 + 317,6\delta_*^3;$$

$$g_{14} = 1,8 + 30\delta_* - 51,7\delta_*^2 + 32,1\delta_*^3;$$

$$g_{24} = 0,5 - 35,3\delta_* + 33,5\delta_*^2 - 5,6\delta_*^3;$$

$$g_{26} = 18,4 + 273,5\delta_* - 1258\delta_*^2 + 2257\delta_*^3 - 1341\delta_*^4;$$

$$\delta_* = \delta / d_{\text{як}} < 0,75;$$

$$x_1 = 1,272H_* - 3,181, \quad 1,120 \leq H_* = H_0 / d_{\text{як}} \leq 5,500;$$

$$x_2 = 7,634H_{\text{ст}^*} - 1,908, \quad 0,0193 \leq H_{\text{ст}^*} = H_{\text{ст}} / H_0 \leq 0,4807;$$

$$x_3 = 12,723H_{\text{в}^*} - 4,453, \quad 0,2116 \leq H_{\text{в}^*} = H_{\text{в}} / d_{\text{як}} \leq 0,488;$$

$$x_4 = 5,456A_{\text{о}^*} - 3,279; \quad 0,280 \leq A_* = A_0 / d_{\text{як}} \leq 0,920;$$

$$x_5 = 95,42v_* - 2,862, \quad 1,1545 \cdot 10^{-2} \leq v_* = v / d_{\text{як}} \leq 4,8455 \cdot 10^{-2};$$

$$x_6 = 4,237B_m - 5,508, \quad 1,20 \leq B_m \leq 1,7156.$$

Пределы варьирования факторов соответствуют ограничениям, накладываемым на переменные при решении оптимизационных задач.

Среднее расхождение  $\frac{1}{n_{\Sigma}} \sum_{i=1}^{i=n_{\Sigma}} \frac{(Y - Y_i)}{Y}$  между полученными значениями в эксперименте

$Y$  и предсказанными значениями  $Y_i$  составляет:  $P_* - 5,7\%$ ;  $F_* - 4,4\%$ ;  $B_{1^*} - 3,9\%$ ,  $B_{2^*} - 4,9\%$ ,  $B_{3^*} - 3,8\%$ .

Математические модели характерных температур нагрева:

$$\Theta_{m^*} = 10^{-2} (202,6 + 16,2x_1 + 24,5x_4 - 18,2x_7 + 19,7x_8 - 3,7x_1^2 + 7,3x_7^2 + 5,1x_1x_4 - 3,6x_1x_7 - 3,8x_4x_7 + 2,9x_1x_8 + 4,5x_4x_8 - 3,6x_7x_8); \quad (1.8)$$

$$\Theta_{v^*} = 10^{-2} (191,3 + 14,6x_1 + 20,5x_4 - 17,2x_7 + 17,4x_8 - 3,1x_1^2 + 6,9x_7^2 + 4x_1x_4 - 3,2x_1x_7 - 3,7x_4x_7 + 2,6x_1x_8 + 3,6x_4x_8 - 3,4x_7x_8), \quad (1.9)$$

где  $\Theta_{m^*} = \Theta_{\text{доп}} / T_0$  – относительное значение максимальной температуры в толще обмотки;

$\Theta_{v^*} = \Theta_v / T_0$  – относительное значение среднеобъемной температуры обмотки;

$\Theta_{\text{доп}}$  – допустимая температура нагрева обмотки;

$$x_7 = 0,05 T_0 - 3; \quad x_8 = 1,761q_* - 4,401.$$

Обобщенная нагрузочная характеристика для двухобмоточных ВБЭМ:

$$P_* = 10^{-6} (a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4 + a_5x_5 + a_6x_6 + a_{11}x_1^2 + a_{22}x_2^2 + a_{33}x_3^2 + a_{44}x_4^2 + a_{66}x_6^2 + a_{77}x_7^2 + a_{12}x_1x_2 + a_{13}x_1x_3 + a_{15}x_1x_5 + a_{35}x_3x_5)^2, \quad (1.10)$$

где  $a_0 = 834 - 2466,3\delta_* + 4636,7\delta_*^2 - 2795,1\delta_*^3$ ;  $a_1 = -18,6 - 233,3\delta_* + 222,7\delta_*^2$ ;

$$a_2 = -0,3 - 7,6\delta_* - 7,1\delta_*^2 + 11,6\delta_*^3; \quad a_3 = 45,1 + 134,6\delta_* - 209,2\delta_*^2;$$

$$a_4 = -3,5 - 21,6\delta_* + 67,8\delta_*^2 - 47,7\delta_*^3; \quad a_5 = 4,1 + 55,5\delta_* - 166,7\delta_*^2 + 129,8\delta_*^3;$$

$$a_6 = 7,2 + 29,7\delta_* - 101,6\delta_*^2 + 73,9\delta_*^3; \quad a_{11} = 3,8 + 11,3\delta_* + 168,2\delta_*^2 - 244,5\delta_*^3;$$



$$\begin{aligned}
a_{22} &= 2,5 - 9,8\delta_* + 49,3\delta_*^2 - 41,7\delta_*^3; & a_{33} &= -17,4 + 97,5\delta_* - 229,8\delta_*^2 + 112,4\delta_*^3; \\
a_{44} &= 2,9 - 2,7\delta_* + 34\delta_*^2 - 30,6\delta_*^3; & a_{66} &= -0,06 + 1,8\delta_* + 29,3\delta_*^2 - 29,6\delta_*^3; \\
a_{77} &= 4 - 4,4\delta_* + 33,5\delta_*^2 - 29,4\delta_*^3; & a_{12} &= 0,3 + 7,6\delta_* + 8,2\delta_*^2 - 13,9\delta_*^3; \\
a_{13} &= 8,1 + 13,1\delta_* - 198\delta_*^2 + 310,9\delta_*^3; & a_{15} &= 3,3 + 9\delta_* + 10\delta_*^2 - 21,4\delta_*^3; \\
a_{35} &= -5,4 + 8,4\delta_* - 36,7\delta_*^2 + 43,9\delta_*^3,
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
F_* &= 10^{-3} (b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_5x_5 + b_6x_6 + b_7x_7 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 + \\
&+ b_{44}x_4^2 + b_{66}x_6^2 + b_{77}x_7^2 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{15}x_1x_5 + b_{25}x_2x_5 + b_{35}x_3x_5 + b_{125}x_1x_2x_5 + \\
&+ b_{135}x_1x_3x_5 + b_{136}x_1x_3x_6), \tag{1.11}
\end{aligned}$$

где  $b_0 = 35,6 + 429,9\delta_* - 595,6\delta_*^2 + 452,4\delta_*^3$ ;

$$\begin{aligned}
b_1 &= 0,4 - 27,3\delta_* - 129,7\delta_*^2 + 122,8\delta_*^3; & b_2 &= 0,04 - 0,05\delta_* - 9,5\delta_*^2 + 6,6\delta_*^3; \\
b_3 &= 0,2 + 50,8\delta_* + 92,5\delta_*^2 - 124,8\delta_*^3; & b_4 &= -2,2 - 10,3\delta_* + 18,7\delta_*^2 - 9,7\delta_*^3; \\
b_5 &= -0,5 + 18,3\delta_* - 32\delta_*^2 + 22,7\delta_*^3; & b_6 &= 3,5 + 18,5\delta_* - 34,7\delta_*^2 + 19,6\delta_*^3; \\
b_7 &= 1,7 - 7,5\delta_* + 31,4\delta_*^2 - 50,4\delta_*^3 + 28,2\delta_*^4; & b_{11} &= 1 - 16,3\delta_* + 122,5\delta_*^2 - 107,2\delta_*^3; \\
b_{22} &= 0,2 - 2,4\delta_* + 21,5\delta_*^2 - 20,3\delta_*^3; & b_{33} &= -0,8 - 5,5\delta_* + 20,3\delta_*^2 - 44,4\delta_*^3; \\
b_{44} &= 0,4 + 1,4\delta_* + 13,6\delta_*^2 - 14,1\delta_*^3; & b_{66} &= -0,3 - 2,3\delta_* + 20,8\delta_*^2 - 19,7\delta_*^3; \\
b_{77} &= 1,4 - 2,1\delta_* + 19,8\delta_*^2 - 17,9\delta_*^3; & b_{12} &= -0,004 - 0,2\delta_* + 11,9\delta_*^2 - 9,2\delta_*^3; \\
b_{13} &= -1,1 + 34,5\delta_* - 163\delta_*^2 + 183\delta_*^3; & b_{15} &= 0,2 + 1,3\delta_* + 16,1\delta_*^2 - 15,6\delta_*^3; \\
b_{25} &= 0,06 - 0,8\delta_* - 7,2\delta_*^2 + 5,8\delta_*^3; & b_{35} &= -0,4 + 1,8\delta_* - 24,9\delta_*^2 + 25,7\delta_*^3; \\
b_{125} &= -0,2 + 3,3\delta_* - 0,1\delta_*^2; & b_{135} &= 0,2 - 5,1\delta_* + 32,3\delta_*^2 - 30,6\delta_*^3; \\
b_{136} &= 0,6 - 9,1\delta_* + 30,9\delta_*^2 - 21,4\delta_*^3,
\end{aligned}$$

Магнитные индукции в местах сочленения элементов магнитопровода:

– между проходным фланцем и корпусом:

$$\begin{aligned}
B_{1*} &= 10^{-3} (d_0 + d_1x_1 + d_2x_2 + d_3x_3 + d_4x_4 + d_5x_5 + d_6x_6 + d_{11}x_1^2 + d_{33}x_3^2 + d_{12}x_1x_2 + \\
&+ d_{13}x_1x_3 + d_{35}x_3x_5), \tag{1.12}
\end{aligned}$$

где  $d_0 = 952,6 + 128,2\delta_* - 571,3\delta_*^2 + 517,1\delta_*^3$ ;  $d_1 = -8 - 55,8\delta_* + 156,8\delta_*^2$ ;

$$d_2 = 7,6 + 29\delta_*; \quad d_3 = -8,9 + 111,2\delta_* - 217,4\delta_*^2;$$

$$d_4 = 11,9 - 70,1\delta_* + 162,1\delta_*^2 - 105,6\delta_*^3; \quad d_5 = 11,3 - 44\delta_* + 63,7\delta_*^2;$$

$$d_6 = -19,7 + 110,4\delta_* - 265,3\delta_*^2 + 179\delta_*^3; \quad d_{11} = 5,5 - 36,8\delta_* + 213\delta_*^2 - 227,4\delta_*^3;$$

$$d_{33} = -7,8 - 5,8\delta_* - 81,6\delta_*^2; \quad d_{12} = -2,1 - 4,2\delta_* - 8,3\delta_*^2;$$

$$d_{13} = 9,6 - 101,6\delta_* + 195,3\delta_*^2; \quad d_{35} = 1,6 - 22\delta_* + 46,1\delta_*^2,$$

– между опорным фланцем и корпусом:

$$B_{2*} = 10^{-6} \left( e_0 + e_1 x_1 + e_2 x_2 + e_3 x_3 + e_5 x_5 + e_6 x_6 + e_{11} x_1^2 + e_{33} x_3^2 + e_{13} x_1 x_3 + e_{35} x_3 x_5 \right)^2, \quad (1.13)$$

где  $e_0 = 971,2 - 832,7\delta_* + 721,6\delta_*^2$ ;  $e_1 = -8,9 - 170,7\delta_* + 138,7\delta_*^2$ ;

$$e_2 = 3,2 + 25,7\delta_* - 8,4\delta_*^2; \quad e_3 = 21,9 + 330,3\delta_* - 173,6\delta_*^2;$$

$$e_5 = 8,4 + 93,8\delta_* - 93\delta_*^2; \quad e_6 = 7,8 + 14,2\delta_* - 22,6\delta_*^2;$$

$$e_{11} = -1,8 + 69,4\delta_* - 45,8\delta_*^2; \quad e_{33} = -0,7 + 103\delta_* - 123,3\delta_*^2;$$

$$e_{13} = 19,6 - 6,1\delta_* + 57\delta_*^2; \quad e_{35} = -6,1 - 62,6\delta_* + 39,9\delta_*^2,$$

– между опорным фланцем и стопом:

$$B_{3*} = 10^{-6} \left( g_0 + g_1 x_1 + g_3 x_3 + g_5 x_5 + g_6 x_6 + g_{11} x_1^2 + g_{22} x_2^2 + g_{33} x_3^2 + g_{44} x_4^2 + g_{77} x_7^2 + g_{13} x_1 x_3 + g_{35} x_3 x_5 \right)^2, \quad (1.14)$$

где  $g_0 = 955,6 - 868,2\delta_* + 783,2\delta_*^2$ ;  $g_1 = -3,9 - 80,7\delta_* - 28,5\delta_*^2 + 101,2\delta_*^3$ ;

$$g_3 = 33 + 521,3\delta_* - 553,9\delta_*^2 + 241,2\delta_*^3; \quad g_5 = 1,1 + 81,5\delta_* - 176,7\delta_*^2 + 112,6\delta_*^3;$$

$$g_6 = 6,2 + 42,9\delta_* - 107,2\delta_*^2 + 70,8\delta_*^3; \quad g_{11} = 3,7 - 14,3\delta_* + 153,4\delta_*^2 - 151,3\delta_*^3;$$

$$g_{22} = 3,6 - 1,8\delta_* + 37\delta_*^2 - 38,6\delta_*^3; \quad g_{33} = -15,6 + 38\delta_* - 9,2\delta_*^2 - 58,5\delta_*^3;$$

$$g_{44} = 4 + 5,9\delta_* + 23,1\delta_*^2 - 29,3\delta_*^3; \quad g_{77} = 4 + 11,9\delta_* + 7,4\delta_*^2 - 18\delta_*^3;$$

$$g_{13} = 5,6 + 82,5\delta_* - 292,2\delta_*^2 + 314,5\delta_*^3; \quad g_{35} = -3,6 - 8,1\delta_* - 32,3\delta_*^2 + 34,5\delta_*^3.$$

Кодированные факторы:  $x_1 = 1,272H_* - 3,181$ ,  $x_2 = 4,762A_{11*} - 2,857$ ,

$$x_3 = 7,634H_{ct*} - 1,908, \quad x_4 = 12,723H_{B*} - 4,453, \quad x_5 = 5,456A_* - 3,273, \quad x_6 = 95,42v_* - 2,862,$$

$$x_7 = 4,237B_m - 5,508.$$

Среднее расхождение  $\frac{1}{n_{\Sigma 1}} \sum_{i=1}^{i=n_{\Sigma 1}} \frac{(Y - Y_i)}{Y}$  между полученными значениями в эксперименте

$Y$  и предсказанными значениями  $Y_i$  составляет:  $P_* - 5,0\%$ ;  $F_* - 1,9\%$ ;  $B_{1*} - 3,5\%$ ,  $B_{2*} - 3,9\%$ ,  $B_{3*} - 3,5\%$ .

Математические модели характерных температур нагрева:

$$\Theta_{m*} = 10^{-2} \left( 164,5 + 11,7x_1 + 18,1x_{55} - 7x_{22} - 12,5x_8 + 14,2x_9 - 2,9x_1^2 + 6,4x_8^2 + 3,7x_1x_{55} - 2,5x_1x_8 + 2,2x_1x_9 - 2,8x_{55}x_8 + 3,4x_{55}x_9 - 2,5x_{55}x_8 \right); \quad (1.15)$$

$$\Theta_{vy*} = 10^{-2}(158,6 + 10,6x_1 + 15,6x_{55} - 6,1x_{22} - 11,9x_8 + 12,7x_9 - 2,5x_1^2 + 6,1x_8^2 + 3x_1x_{55} - 2,3x_1x_8 + 2x_1x_9 - 2,7x_{55}x_8 + 2,9x_{55}x_9 - 2,4x_8x_9); \quad (1.16)$$

$$\Theta_{vп*} = 10^{-2}(155,2 + 11,1x_1 + 14,6x_{55} - 5,7x_{22} - 11,8x_8 + 12,2x_9 - 2,4x_1^2 + 6,1x_8^2 + 3,2x_1x_{55} - 2,3x_1x_8 + 2,1x_1x_9 - 2,6x_{55}x_8 + 2,7x_{55}x_9 - 2,3x_8x_9), \quad (1.17)$$

где  $\Theta_{vy*} = \Theta_{vy} / T_0$  – относительное значение среднеобъемной температуры удерживающей обмотки;

$\Theta_{vп*} = \Theta_{vп} / T_0$  – относительное значение среднеобъемной температуры пусковой обмотки;

$$x_{22} = 10,22A_{п*} - 5,112; \quad x_8 = 0,05 T_0 - 3; \quad x_{55} = 5,464A_* - 3,279; \quad x_9 = 1,761q_{y*} - 4,401.$$

## 1.2 Схемы форсированного управления электромагнитами

Применение форсированного управления позволяет значительно улучшить массогабаритные показатели и снизить энергопотребление электромагнита [79, 82, 149 и др.]. Рассмотрим распространенные схемы форсировки (рисунок 1.6).

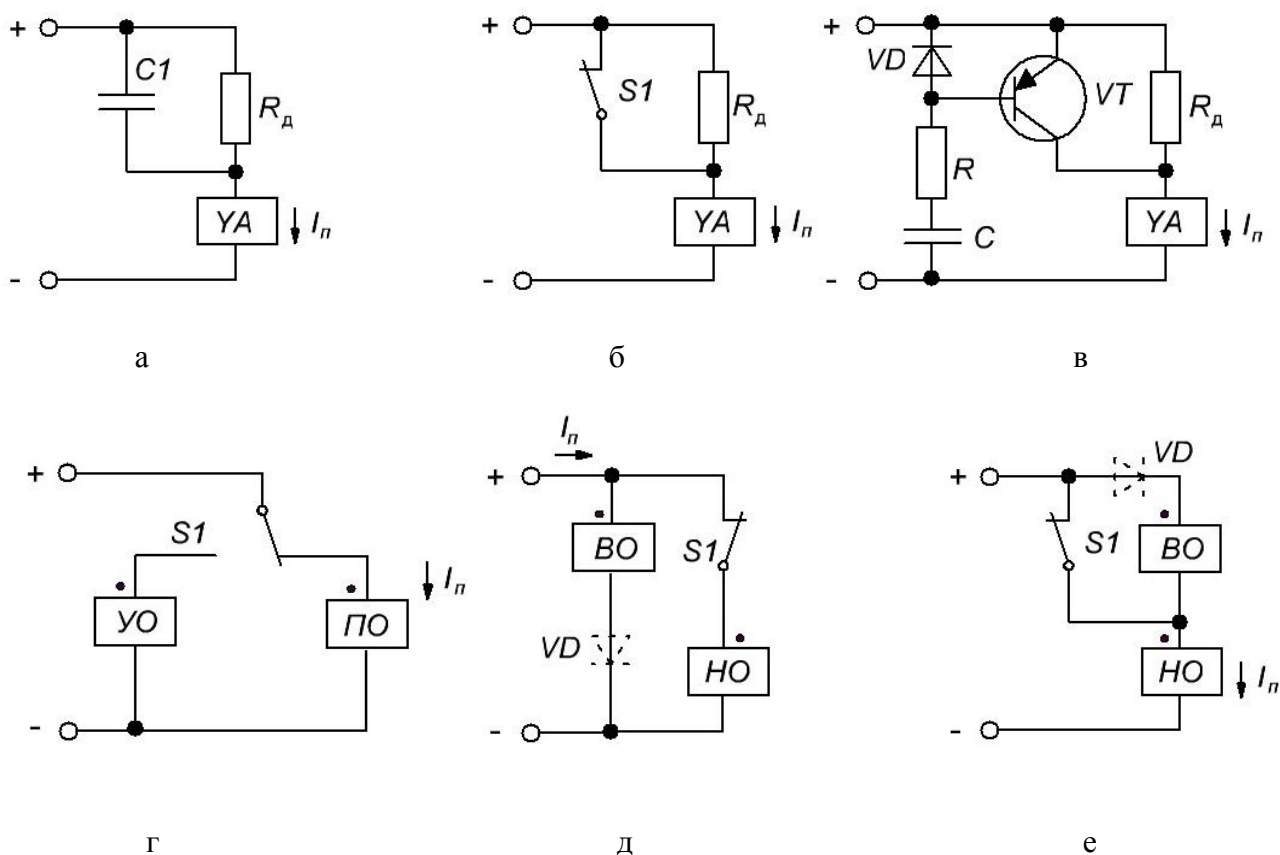


Рисунок 1.6 – Распространенные схемы форсированного управления

Одним из способов форсированного управления электромагнитами постоянного напряжения является включение в цепь обмотки токоограничивающего элемента [79, 82, 149]. Наиболее просты схемы форсированного управления, построенные с использованием добавочных резисторов (рисунок 1.6 а, б, в). Помимо простоты реализации данных схем к достоинствам относится возможность получения приемлемого коэффициента форсировки. При подключении обмотки к источнику напряжения форсировочный контакт  $SI$  шунтирует добавочное (балластное) сопротивление  $R_d$  и по обмотке протекает пусковой ток  $I_p$ . В качестве  $SI$  могут применяться конденсатор и транзистор (рисунок 1.6 а, в). Недостатком схемы на рисунке 1.6, б является повышенный износ шунтирующего контакта.

Распространенными схемами форсировки двухобмоточных электромагнитов являются схемы, изображенные на рисунке 1.6 г, д, е. При последовательном соединении низкоомной (НО) и высокоомной (ВО) обмоток (рисунок 1.6 е) напряжение сети прикладывается к НО электромагнита. ВО обмотка закорочена форсировочным контактом  $SI$ . При протекании тока  $I_p$  в НО в ВО наводится ЭДС взаимной индукции, создающая ток и магнитный поток, который препятствует нарастанию пускового тока. Это приводит к затягиванию процесса при срабатывании. Этот недостаток можно устранить введением в цепь последовательно с ВО диода  $VD$  [82].

При параллельном соединении НО и ВО обмоток (рисунок 1.6 д) токи в режиме пуска протекают в обеих обмотках. К минусам схемы можно отнести увеличение напряжения отпускания в следствие того, что в режиме удержания НО не обтекает током и соответственно значение МДС уменьшается.

На рисунке 1.6, г предлагается схема форсировки, в которой поочередно включаются обмотки электромагнита. При подаче напряжения сети ток  $I_p$  протекает по пусковой обмотке (ПО), при переключении  $SI$  – по удерживающей (УО). Это позволяет устранить недостатки схем, изображенных на рисунках 1.6, д, е.

Принцип работы рассмотренных простейших схем можно распространить на более сложные сочетания обмоток и токоограничивающих элементов (рисунок 1.7 а, б, в). Это позволяет сделать вывод, что проведенные исследования с базовыми простейшими схемами актуальны и для других, более сложных, схем форсированного управления.

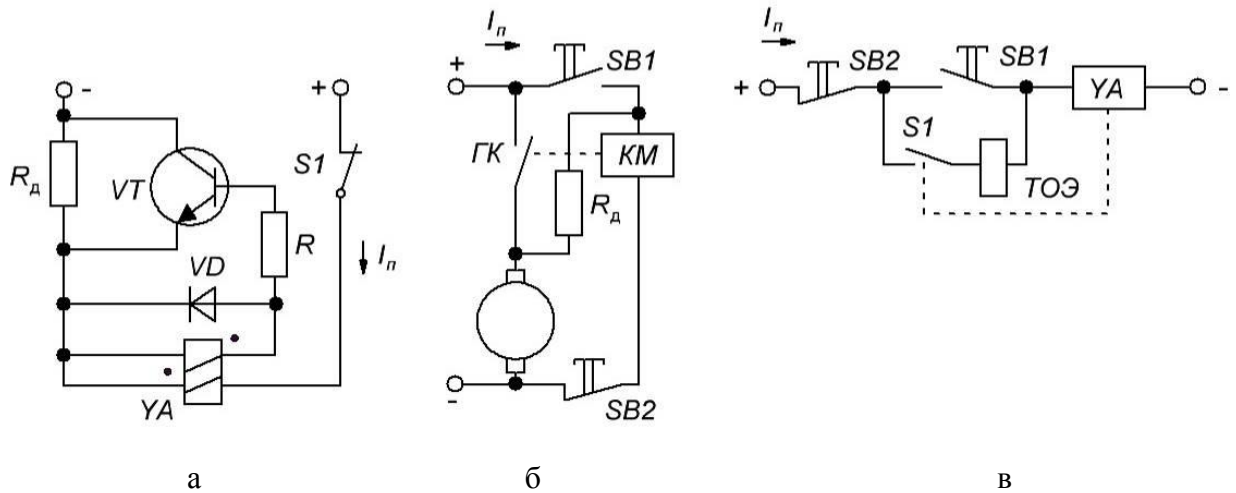


Рисунок 1.7 – Другие разновидности схем форсированного управления с использованием балластного резистора и токоограничивающего элемента

### 1.3 Анализ методик проектирования броневых электромагнитов

Проанализированы известные методики проектирования броневых электромагнитов, выявлены достоинства и недостатки подходов.

Методика А.Г. Никитенко, И.И. Пеккера, А.П. Алексеевой [105]

Проектирование осуществляется методом наискорейшего спуска по критерию минимум габаритного объема электромагнита. Тяговое усилие выражается через геометрические размеры электромагнита (рисунок 1.8) и теплофизические его параметры (1.18):

$$P_{эм} = 5,1\mu_0 \frac{2k_3\tau_{доп}k_\tau}{\rho_\tau} \cdot \frac{(a_k + \beta a_c)(a_k - a_c)}{a_k + a_c} \pi a_c^2 \times \left[ \frac{\text{sh } p\delta + p(\eta + \lambda \text{ch } p\delta) - \frac{p\lambda^2 g R_b}{2(1 + R_b \lambda g)} \text{ch } p\delta}{\text{sh } p\delta + \mu_0 \pi a_c^2 p \frac{R_b \text{ch } p\delta}{1 + R_b \lambda g}} \right] - 7,8\pi a_c (\lambda + \delta - a_c) \cdot 10^{-3}, \quad (1.18)$$

где  $K_3$  – коэффициент заполнения обмоточного окна,  $\tau_{доп}$  – допустимое превышение температуры обмотки,  $k_\tau$  – коэффициент теплоотдачи;  $\beta$  – коэффициент, учитывающий различные условия теплоотдачи с наружной и внутренней поверхностей обмотки;  $\rho_\tau$  – удельное электросопротивление провода, приведенное к допустимой температуре;  $R_b$  – магнитное сопротивление «воротничка».

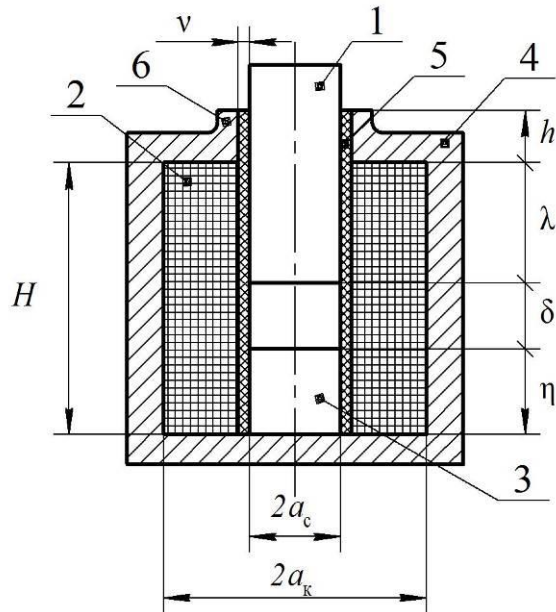


Рисунок 1.8 – Эскиз ВЭМ:

1 – сердечник, 2 – обмотка, 3 – стоп, 4 – корпус, 5 – разделительная трубка, 6 – воротничок

Геометрические размеры выражаются в безразмерной форме. В указанной методике некорректно учитывается режим форсировки электромагнита.

Авторами предлагается выражение для мощности, выделяющейся в обмотке  $P = U^2/R$ :

$$\frac{P_{\text{тр}}}{P_{\text{уд}}} = \frac{k_{\text{тр}} S_{\text{охл}} \tau_{\text{доп}}}{k_{\text{туд}} S_{\text{охл}} \tau_{\text{доп}}} = \frac{k_{\text{тр}}}{k_{\text{туд}}},$$

где  $P_{\text{тр}}$  – мощность в режиме пуска;  $P_{\text{уд}}$  – мощность в режиме удержания. Учитывать таким образом форсированный режим работы электромагнита является неверным решением.

Методика А.Г. Сливинской, А.В. Гордона [54]

В основу расчета по методике заложен конструктивный показатель КП (1.19), который характеризует форму ЭМ, а следовательно, и наиболее благоприятную конфигурацию его рабочего воздушного промежутка:

$$\text{КП} = \frac{\sqrt{P_{\text{эм}}}}{\delta_{\text{к}}}. \quad (1.19)$$

Существует определенная связь между диаметром якоря и диаметром корпуса, причем их соотношение практически не зависит от величины силы, на которую рассчитывают электромагниты. Поэтому можно считать, что внешний диаметр ЭМ пропорционален корню из начальной тяговой силы. Беря в основу выбора конструктивный показатель (расчет на минимум

веса) или необходимую форму тяговой характеристики, можно выбрать наиболее благоприятный тип ЭМ для поставленных условий. Для того, чтобы получить однозначное решение, хотя бы первого приближения, необходимо вносить целый ряд упрощений.

После определения основных размеров ЭМ проводится его проверочный расчет, задачей которого является уточнение размеров ЭМ и проверка правильности выбранных коэффициентов [106]. Изложенная методика определения основных размеров ЭМ не дает возможности точного и однозначного их нахождения. Для обобщения результатов проектных расчетов может быть применена [106] теория подобия.

При обоснованном выборе магнитной индукции может составить основу методики проектного расчета форсированных ЭМ.

Методика Л. А. Казакова [72]

В методике, предложенной Казаковым Л.А., также используется конструктивный показатель (КП) (1.20):

$$\text{КП} = \sqrt{P} / \delta. \quad (1.20)$$

Исходя из величины этого показателя, выбирается оптимальная форма стопа. Далее определяются основные размеры электромагнита. Удельная мощность рассеяния, поправочный коэффициент относительного падения намагничивающей силы выбираются по графическим зависимостям. Недостатки данной методики аналогичны методике, изложенной выше. Использование при расчетах графических зависимостей неудобно при компьютерных расчетах.

Методика Б. Э. Коца [82]

Расчет построен на приближенном выражении электромагнитной силы (в виде упрощенной формулы Максвелла), по которой находится сечения стопа, якоря и корпуса:

$$S_c = 2\mu_0 P / B_\delta^2. \quad (1.21)$$

Вычисляются радиус стопа и якоря:

$$r_c = \sqrt{S_c / \pi}. \quad (1.22)$$

И уточняется сечение сердечника:

$$S_c = \pi r_c^2. \quad (1.23)$$

Определяется падение напряжения в воздушном зазоре:

$$F_{\delta} = \frac{B_{\delta} \delta_{н}}{\mu_0}. \quad (1.24)$$

МДС в режиме пуска ( $F_{п}$ ) и удержания ( $F_{y}$ ):

$$F_{п} = k_{ст} F_{\delta}, \quad (1.25)$$

$$F_{y} = F_{к} / K_F, \quad (1.26)$$

где  $k_{ст}$  – коэффициент потерь в стали, который выбирается ориентировочно и уточняется в процессе расчета;  $F_{к}$  – МДС катушки в режиме пуска.

Толщина катушки:

$$A_0 = \sqrt[3]{\frac{p F_y^2}{2k_{т} K_3 \tau (H_0 / A_0)^2}}, \quad (1.27)$$

где  $k_{т}$  – коэффициент теплоотдачи;  $K_3$  – коэффициент заполнения окна катушки;  $p$  – удельное сопротивление меди.

Высота катушки:

$$H_0 = \left( \frac{H_0}{A_0} \right) A_0, \quad (1.28)$$

где  $\frac{H_0}{A_0}$  заданное соотношение.

В методике, предложенной Коцем Б.Э., без должного обоснования выбирается индукция в рабочем воздушном зазоре, коэффициент потерь в стали и паразитных зазорах, коэффициент форсировки по МДС, коэффициент теплоотдачи, отношение длины обмотки к толщине. Методика не определяет наилучшее проектное решение.

Методика Б. В. Клименко [79]

Суть методики заключается в выборе определяющего размера, а остальные размеры являются функциями от него. Причем величиной определяющего размера задаются произвольно. В методике предлагается задаться диаметром якоря  $d$ , с помощью которого можно определить размеры магнитопровода и катушки. При заданном допустимом пусковом токе  $I_{п}$  определяется сопротивление катушки в холодном состоянии:

$$R_x = K_{\max} U_{\text{ном}} / I_{п}, \quad (1.29)$$

где  $K_{\max}$  – кратность, определяющая допустимое превышение напряжения источника питания.



Сопротивление балластного резистора определяется графоаналитическим методом. МДС нагретой обмотки в режиме пуска и удержания определяется по следующим формулам:

$$F_{\text{п}} = K_{\text{мин}} U_{\text{ном}} N / R_{\Gamma}, \quad (1.30)$$

$$F_{\text{у}} = K_{\text{мин}} U_{\text{ном}} N / (R_{\Gamma} + R_{\text{д}}), \quad (1.31)$$

где  $K_{\text{мин}}$  – кратность, определяющая допустимое понижение напряжения источника питания,  $N$  – число витков. Зная МДС и размеры ЭМ строят графические зависимости и определяют определяющий размер  $d$ , исходя из условия  $d = \max(d_1, d_2)$ .

Применение графоаналитических методов повышает трудоемкость расчетов и снижает достоверность результатов.

#### 1.4 Выводы

1. Наглядно представлена классификация втяжных электромагнитных систем. В отдельную подгруппу выделены втяжные броневого магнитные системы, обмотка которых защищена от механического повреждения ферромагнитным корпусом, выполняющим функции «брони».

2. Из рассмотренных схем форсированного управления для разработки базовых методик выбраны схема с балластным резистором (раздел 2), схема с коаксиальным размещением пусковой и удерживающей обмоток (раздел 3.1) и схема с параллельным соединением обмоток (раздел 3.2), как одни из самых перспективных схем форсировки.

3. В известных методиках не учитываются условия возврата подвижной системы в исходное положение, что не позволяет однозначно определить диаметр якоря при известных относительных геометрических основных размерах магнитной системы.

Проведенный анализ существующих методик проектирования подтверждает необходимость разработки усовершенствованных методик расчета форсированных ВБЭМ, которые будут учитывать адекватно тепловые характеристики и условие срабатывания и возврата якоря, а также обеспечивать достоверность результатов расчетов.

4. В части известных методик проектирования не учитываются особенности схемных решений форсированного управления. Методики проектирования электромагнита не учитывают обоснованно сопротивления ферромагнитных элементов. Без должного обоснования выбираются значения коэффициента теплоотдачи, магнитной индукции в сечении сердечника, прилегающего к проходному фланцу. Усредненная максимальная магнитная индукция имеет место в сечении корпуса, прилегающего к проходному фланцу.

## РАЗДЕЛ 2 РАЗРАБОТКА УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫХ МЕТОДИК ОПТИМИЗАЦИИ ОДНООБМОТОЧНЫХ ВТЯЖНЫХ БРОНЕВЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТОВ, УПРАВЛЯЕМЫХ ПО СХЕМЕ С БАЛЛАСТНЫМ РЕЗИСТОРОМ НА ОСНОВЕ ОБОБЩЕННЫХ ИХ ХАРАКТЕРИСТИК

При разработке методики предлагается, как и в методике [79] принять основные геометрические размерности электромагнита в кратностях от диаметра якоря (рисунок 1.4), исключение составляет  $H_{ст*}$  :

$$H_* = H_0 / d_{як} - \text{относительная высота обмотки};$$

$$A_* = A_0 / d_{як} - \text{относительная толщина обмотки};$$

$$H_{ст*} = H_{ст} / H_0 - \text{относительная высота стопа};$$

$$H_{в*} = H_{в} / d_{як} - \text{относительная высота воротничка};$$

$$v_* = v_{в} / d_{як} - \text{относительный воздушный зазор в воротничке};$$

$$\Delta_* = \Delta_{к} / d_{як} - \text{относительная толщина каркаса катушки};$$

$$\delta_* = \delta / d_{як} - \text{относительный рабочий зазор}.$$

К исходным данным проектирования также относятся:

- значения паразитных (технологических) воздушных (немагнитных) зазоров  $\delta_{п1}, \delta_{п2}, \delta_{п3}$ ,  $0,1 \cdot 10^{-3} \leq \delta_{п1}, \delta_{п2}, \delta_{п3} \leq 0,2 \cdot 10^{-3}$  м ;
- конечное значение рабочего зазора  $\delta_{к}$ ,  $0,05 \cdot 10^{-3} \leq \delta_{к} \leq 0,2 \cdot 10^{-3}$  ;
- материал ферромагнитных элементов МС;
- температура нагрева обмотки допустимая  $\Theta_{доп}$ , температура окружающего воздуха  $T_0$  ;
- пределы уменьшения  $K_{U_{мин}}$  ( $0,7 \leq K_{U_{мин}} \leq 0,9$ ), увеличения  $K_{U_{макс}}$  ( $1,05 \leq K_{U_{макс}} \leq 1,25$ ) напряжения в питающей сети;
- кратность  $K_{отп}$  напряжения отпускания якоря,  $0,1 \leq K_{отп} \leq 0,3$  ;
- коэффициенты запаса по напряжению срабатывания  $K_{U_{ср}}$  и по напряжению отпускания  $K_{U_{отп}}$ , выбираемых с учетом необходимости компенсации возможных неблагоприятных технологических разбросов при изготовлении ЭМ.

Разработанная методика оптимизации ВБЭМ построена, как и в [62, 138] на трех уравнениях, записанных для самых неблагоприятных условий функционирования:

- уравнение срабатывания ЭМ

$$F_{\text{cp}} = \frac{U_{\text{cp}}}{R_{\Gamma}} N = \frac{K_{U \min} U_{\text{ном}}}{K_{U \text{cp}} R_{\Gamma}} N; \quad (2.1)$$

– уравнение отпускания (возврата) ЭМ

$$F_{\text{отп}} = \frac{U_{\text{отп}}}{R_{\text{х}} + R_{\text{д}}} N = \frac{K_{\text{отп}} K_{U \text{отп}} U_{\text{ном}}}{R_{\text{х}} + R_{\text{д}}} N; \quad (2.2)$$

– уравнение нагрева ЭМ (1.8)

$$\Theta_{m^*} = f(x_1, x_4, x_7, x_8), \quad (2.3)$$

где  $U_{\text{ном}}$  – номинальное напряжение источник питания;

$U_{\text{cp}}$  – напряжение срабатывания электромагнита;

$U_{\text{отп}}$  – напряжение отпускания электромагнита;

$R_{\text{д}}$  – добавочное сопротивление;

$R_{\Gamma}$  – сопротивление обмотки в горячем состоянии;

$R_{\text{х}}$  – сопротивление обмотки в холодном состоянии;

$N$  – число витков в обмотке.

Из (2.1) и (2.2) выразим  $U_{\text{ном}} N$ :

$$U_{\text{ном}} N = \frac{F_{\text{cp}} K_{U \text{cp}} R_{\Gamma}}{K_{U \min}}; \quad (2.4)$$

$$U_{\text{ном}} N = \frac{F_{\text{отп}} (R_{\text{х}} + R_{\text{д}})}{K_{\text{отп}} K_{U \text{отп}}}. \quad (2.5)$$

Приравняем (2.4) и (2.5)

$$\frac{F_{\text{cp}} K_{U \text{cp}} R_{\Gamma}}{K_{U \min}} = \frac{F_{\text{отп}} (R_{\text{х}} + R_{\text{д}})}{K_{\text{отп}} K_{U \text{отп}}} \text{ и после очевидных преобразований получим}$$

$$\frac{F_{\text{cp}} K_{U \text{cp}} K_{\text{отп}} K_{U \text{отп}}}{F_{\text{отп}} K_{U \min}} = \frac{R_{\text{х}}}{R_{\Gamma}} + \frac{R_{\text{д}}}{R_{\Gamma}}.$$

После преобразований последнего выражения имеем следующее выражение:

$$R_{\text{д}}^* = \frac{R_{\text{д}}}{R_{\Gamma}} = \frac{F_{\text{cp}} K_{U \text{cp}} K_{\text{отп}} K_{U \text{отп}}}{F_{\text{отп}} K_{U \min}} - \frac{\rho_{\text{х}}}{\rho_{\Gamma}}, \quad (2.6)$$

$$\text{где } \frac{\rho_{\text{х}}}{\rho_{\Gamma}} = \frac{1 + 0,0043T_0}{1 + 0,0043\Theta_{\text{в}}};$$

$\rho_{\text{х}}$ ,  $\rho_{\Gamma}$  – удельное сопротивление обмотки в холодном и горячем состоянии.

$\Theta_{\text{в}} = \Theta_{\text{в}^*} T_0$  – среднеобъемная температура обмотки, где  $\Theta_{\text{в}^*}$  вычисляется по формуле (1.9).

Запишем выражение, определяющее мощность ( $P_{уд.о}$ ), потребляемая обмоткой в режиме удержания:

$$P_{уд.о} = \frac{P_{п}}{(1 + R_{д*})^2}, \quad (2.7)$$

где  $P_{п} = \frac{U_{\max}^2}{R_{г}}$  – мощность, потребляемая обмоткой в режиме пуска;

$U_{\max} = K_{U_{\max}} U_{\text{ном}}$  – максимальное напряжение источника.

Мощность  $P_{п}$  можно также выразить через МДС срабатывания с учетом (2.1):

$$P_{п} = \left( \frac{U_{\text{ном}}}{R_{г}} N \right)^2 \frac{K_{U_{\max}}^2}{N^2} R_{г} = \left( \frac{F_{\text{сп}} K_{U_{\text{сп}}} K_{U_{\max}}}{K_{U_{\text{мин}}}} \right)^2 \frac{R_{г}}{N^2} = (F_{\text{сп}} K_{\text{макс}})^2 \frac{\rho_{г} \pi d_{\text{як}} (1 + 2\Delta_* + A_*)}{A_0 H_0 K_3}, \quad (2.8)$$

где  $K_{\text{макс}} = \frac{K_{U_{\text{сп}}} K_{U_{\max}}}{K_{U_{\text{мин}}}}$  – кратность максимального напряжения питания в долях от напряжения срабатывания;

$K_3$  – коэффициент заполнения обмоточного окна.

Мощность  $P_{уд.о}$  может быть представлена и в другом виде:

$$P_{уд.о} = q H_0 A_0 \pi d_{\text{як}} (1 + 2\Delta_* + A_*), \quad (2.9)$$

где  $q$  – мощность тепловых потерь в обмотке, отнесенная к ее объему.

Определим  $x_8$  для однообмоточного ВБЭМ:

$$x_8 = 1,761q_* - 4,401, \text{ где } q_* = \frac{x_8 + 4,401}{1,761} = \frac{q d_{\text{як}}}{K_{\text{т.баз}} T_0} = \frac{q d_{\text{як}}}{5,67(2,73 + 0,01T_0)^4};$$

$$q = \frac{(x_8 + 4,401) \cdot 5,67 \cdot (2,73 + 0,01T_0)^4}{1,761} = \frac{3,22(2,73 + 0,01T_0)^4 (x_8 + 4,401)}{d_{\text{як}}}.$$

На основании (2.3) и (1.8) определим  $x_8$ :

$$x_8 = \frac{100 \cdot \Theta_{\text{дог*}} - (202,6 + 16,2x_1 + 24,5x_4 - 18,2x_7 - 3,7x_1^2 + 7,3x_7^2 + 5,1x_1x_4 - 3,6x_1x_7 - 3,8x_4x_7)}{19,7 + 2,9x_1 + 4,5x_4 - 3,6x_7}, \quad (2.10)$$

где  $\Theta_{\text{дог*}}$  – относительная допустимая температура нагрева обмотки.

Определим значение  $P_{эмг}$  по формуле (1.1) при  $B_{m\Gamma} = 1,12$  Тл и сравним со значением

$P_{\text{мх кр}}$ :

$$\text{Если } P_{эмг} \leq P_{\text{мх кр}}, \text{ то } P_{\text{мх кр}} - P_*(B_m) \frac{B_m^2 \pi d_{\text{як}}^2}{8\mu_0} = 0; F = (F_{\text{пз}}(B_m) + F_*(B_m)) \frac{B_m d_{\text{як}}}{\mu_0}.$$

$$\text{Иначе } B_m = \sqrt{\frac{8\mu_0 P_{\text{мх кр}}}{\pi P_* (B_{m\Gamma})}} \cdot \frac{1}{d_{\text{як}}}; F = (F_{\text{пз}}(B_{m\Gamma}) + F_*(B_{m\Gamma})) \frac{B_{m\Gamma} d_{\text{як}}}{\mu_0}.$$

где  $F_{\text{пз}}(B_m) = (B_{1*}\delta_{\text{п1}} + B_{2*}\delta_{\text{п2}} + B_{3*}\delta_{\text{п3}})B_m / \mu_0$ ;

$$F_{\text{пз}}(B_{m\Gamma}) = (B_{1*}(B_{m\Gamma})\delta_{\text{п1}} + B_{2*}(B_{m\Gamma})\delta_{\text{п2}} + B_{3*}(B_{m\Gamma})\delta_{\text{п3}})B_m / \mu_0.$$

Расчет магнитодвижущих сил срабатывания  $F_{\text{ср}}$  и отпускания  $F_{\text{отп}}$ :

1) Условие срабатывания:

$$P_{\text{эм}} = P_{\text{мх кр}}; \delta = \delta_{\text{кр}}; \delta_* = \delta_{\text{кр}} / d_{\text{як}}$$

$$x_6 = \begin{cases} 4,237B_m - 5,508 \text{ при } P_{\text{эм}\Gamma} \geq P_{\text{мх кр}}, \\ 4,237B_{m\Gamma} - 5,508 \text{ при } P_{\text{эм}\Gamma} \leq P_{\text{мх кр}}. \end{cases} \quad (2.11)$$

$$(2.12)$$

$$P_{\text{мх кр}} = P_* \frac{B_m^2 \pi d_{\text{як}}^2}{8\mu_0};$$

$$F_{\text{ср}} = F_* \frac{B_m d_{\text{як}}}{\mu_0} = F_* \frac{1}{\mu_0 d_{\text{як}}} \sqrt{\frac{8\mu_0 P_{\text{мх кр}}}{\pi P_*}} d_{\text{як}};$$

$$F_{\text{ср}} = F_* \sqrt{\frac{8P_{\text{мх кр}}}{\mu_0 \pi P_*}}. \quad (2.13)$$

2) Условие отпускания:

$$P_{\text{эм}} = P_{\text{мх к}}; \delta = \delta_{\text{к}}; \delta_* = \delta_{\text{к}} / d_{\text{як}}$$

$$P_{\text{мх к}} = P_* \frac{B_m^2 \pi d_{\text{як}}^2}{8\mu_0};$$

$$F_{\text{отп}} = F_* \frac{B_m d_{\text{як}}}{\mu_0} = F_* \frac{1}{\mu_0 d_{\text{як}}} \sqrt{\frac{8\mu_0 P_{\text{мх к}}}{\pi P_*}} d_{\text{як}};$$

$$F_{\text{отп}} = F_* \sqrt{\frac{8P_{\text{мх к}}}{\mu_0 \pi P_*}}. \quad (2.14)$$

На основании (2.7) ÷ (2.9) получим уравнение проектирования:

$$f(d_{\text{як}}) = F_{\text{ср}} - \sqrt{\frac{qK_3}{\rho_{\Gamma}}} \frac{(1 + R_{\text{д}^*})}{K_{\text{max}}} H_* A_* \pi d_{\text{як}}^2 = 0, \quad (2.15)$$

$$\text{где } R_{\text{д}^*} = \frac{F_{\text{ср}}}{F_{\text{в}}} K_{\text{max}} K - \frac{\rho_{\text{x}}}{\rho_{\Gamma}}; K = \frac{K_{\text{отп}} K_{\text{Uотп}}}{K_{\text{U max}}}.$$

Уравнение решается одним из численных методов – методом деления отрезка пополам. Находится минимум функции сужением отрезка и вычисляется корень с заданной точностью.

Для того, чтобы приступить к оптимизации необходимо посчитать следующие параметры ЭМ (рисунок 1.4), причем принимается ограничение, что  $S_{\text{як}} = S_{\text{к}}$ , где  $S_{\text{к}}$  – поперечное сечение корпуса:

– внутренний диаметр корпуса электромагнита

$$D_{\text{вн}} = d_{\text{як}} + 2\Delta_{\text{к}} + 2A_0 + 2\Delta_{\text{к}}; \quad (2.16)$$

– наружный диаметр электромагнита

$$D_{\text{н}} = D_{\text{вн}} + 2a_{\text{к}}; \quad (2.17)$$

– толщина корпуса

$$a_{\text{к}} = \frac{D_{\text{вн}}}{2} \left( \sqrt{1 + \left( \frac{d_{\text{як}}}{D_{\text{вн}}} \right)^2} - 1 \right), \quad (2.18)$$

полученная из следующих выражений:

$$\frac{\pi d_{\text{як}}^2}{4} = \frac{\pi(D_{\text{н}}^2 - D_{\text{вн}}^2)}{4}.$$

$$d_{\text{як}}^2 = (D_{\text{н}} - D_{\text{вн}})(D_{\text{н}} + D_{\text{вн}}) = 2a_{\text{к}}(2D_{\text{вн}} + 2a_{\text{к}}).$$

$$\left( \frac{d_{\text{як}}}{2} \right)^2 = a_{\text{к}}D_{\text{вн}} + a_{\text{к}}^2$$

$$a_{\text{к}}^2 + a_{\text{к}}D_{\text{вн}} - \left( \frac{d_{\text{як}}}{2} \right)^2 = 0.$$

В качестве критериев оптимальности ВБЭМ были выбраны [30, 106] следующие:

1) объем активных материалов электромагнита

$$V_{\text{а}} = V_{\text{с}} + V_{\text{м}}; \quad (2.19)$$

$V_{\text{с}} = V_{\text{як}} + V_{\text{ст}} + V_{\text{оф}} + V_{\text{пф}} + V_{\text{к}}$  – объем ферромагнитной стали электромагнита;

$$V_{\text{як}} = \frac{\pi d_{\text{як}}^3}{4} (H_{*} + 2\Delta_{*} + H_{\text{в}*} + 0,25 - H_{\text{ст}*} H_{*}) - \text{объем якоря};$$

$$V_{\text{ст}} = \frac{\pi d_{\text{як}}^3}{4} (H_{\text{ст}*} H_{*} + \Delta_{*}) - \text{объем стопа};$$

$$V_{\text{оф}} = \frac{\pi \cdot 0,25^2 d_{\text{як}}^3}{3} [1 + (1 + 4\Delta_{*} + 2A_{*})^2 + (1 + 4\Delta_{*} + 2A_{*})] - \text{объем опорного фланца};$$

$$V_{\text{пф}} = \frac{0,2\pi d_{\text{як}}^3}{12} [(1 + 2v_{*} + 0,4)^2 + (1 + 4\Delta_{*} + 2A_{*})^2 + (1 + 2v_{*} + 0,4) \times$$

$$\times (1 + 4\Delta_{*} + 2A_{*})] + \frac{\pi d_{\text{як}}^3}{4} [(H_{\text{в}*} - 0,2)[(1,4 + 2v_{*})^2 - (1 - 2v_{*})^2]] - \text{объем проходного фланца};$$

$$V_k = \frac{\pi d_{\text{як}}^3}{4} (2a_{\text{к*}} + H_* + 2\Delta_*) - \text{объем корпуса};$$

$$V_0 = \pi (d_{\text{як}} + 2\Delta_k + A_0) H_0 A_0 - \text{объем обмотки электромагнита};$$

$$V_M = K_3 V_0 - \text{объем меди электромагнита},$$

где  $K_3$  – коэффициент заполнения обмотки;

2) масса активных материалов

$$m_a = m_c + m_M; \quad (2.20)$$

где  $m_c = 7800 \cdot V_c$  – масса стали в ЭМ;

$$m_M = 8900 \cdot V_M - \text{масса меди в ЭМ};$$

3) стоимость активных материалов

$$C_a = m_c \Pi_c + m_M \Pi_M, \quad (2.21)$$

где  $\Pi_c, \Pi_M$  – цена стали и цена меди соответственно.

4) установочная площадь электромагнита

$$S_y = D_H^2; \quad (2.22)$$

5) высота электромагнита

$$H_{\text{эм}} = 0,25d_{\text{як}} + H_0 + 2\Delta_k + H_B + 0,25d_{\text{як}}. \quad (2.23)$$

б) габаритный объем электромагнита

$$V_r = S_y (0,25d_{\text{як}} + H_0 + 2\Delta_k + H_B + 0,25d_{\text{як}}); \quad (2.24)$$

## **2.1 Синтез втяжных броневых электромагнитов, минимизированных по объему активных материалов**

Синтез [106] строится на базе проектного расчета ЭМ. Блок-схема методики проектного расчета представлена на рисунке 2.1. Вводятся исходные данные проектирования, выбирается диапазон изменения искомого диаметра якоря и с помощью метода деления отрезка пополам находится искомый диаметр якоря с учетом заданной точности.

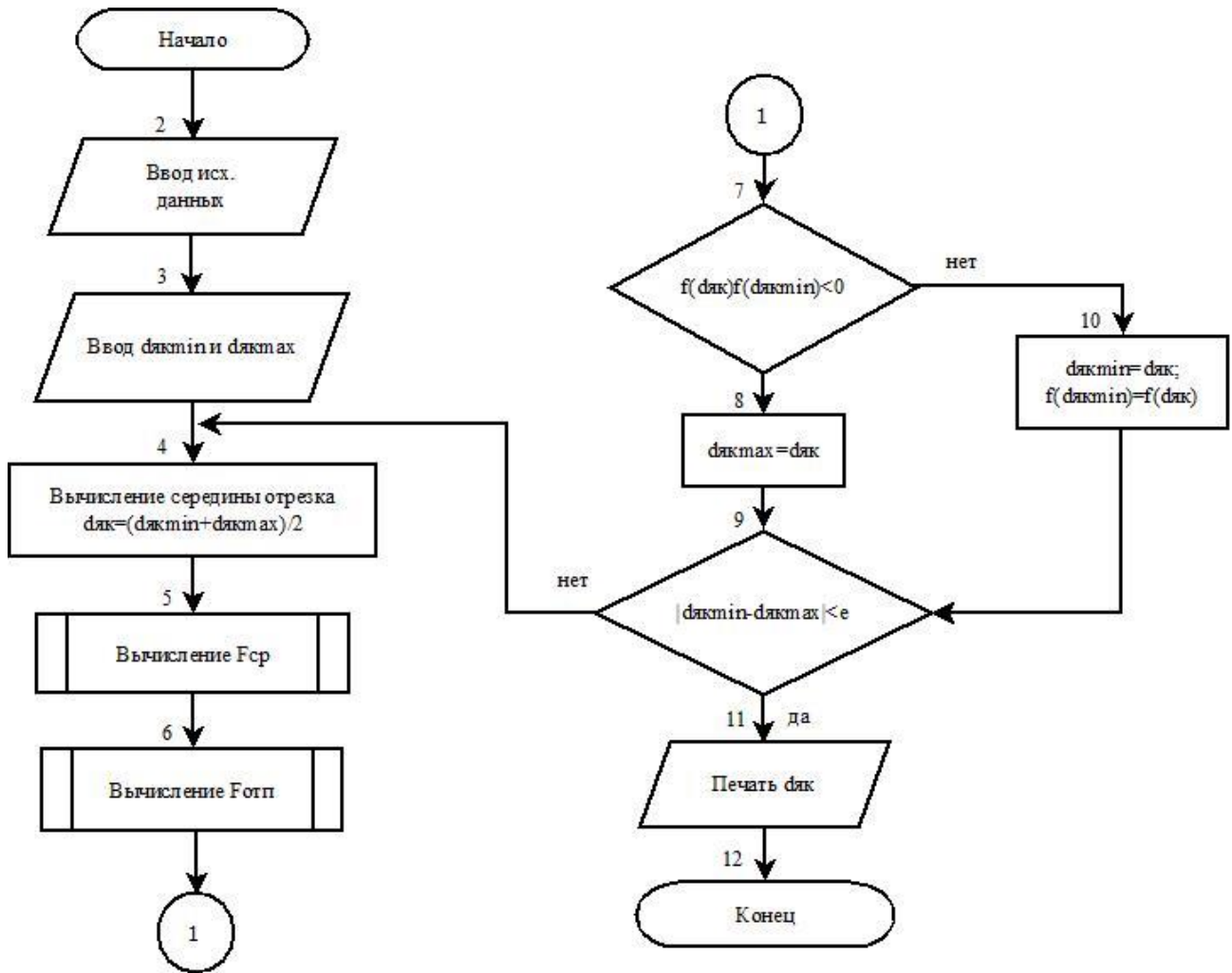


Рисунок 2.1 – Блок-схема методики проектного расчета

Оптимизационные расчеты проводятся перебором возможных значений относительной высоты обмотки, толщины намотки, высоты воротничка, задаваемых в долях диаметра якоря и относительной высоты стопа, задаваемых в долях высоты обмотки методом двухразового сканирования области исходных данных проектирования.

Выбирается те сочетания, которые обеспечивают минимальные значения частного критерия оптимальности (массы, потребляемой мощности, стоимости и т.д.). Блок-схема алгоритма представлена на рисунке (2.2).

Оптимизация форсированного ВБЭМ по объему активных материалов выполняется по критерию качества (2.19).



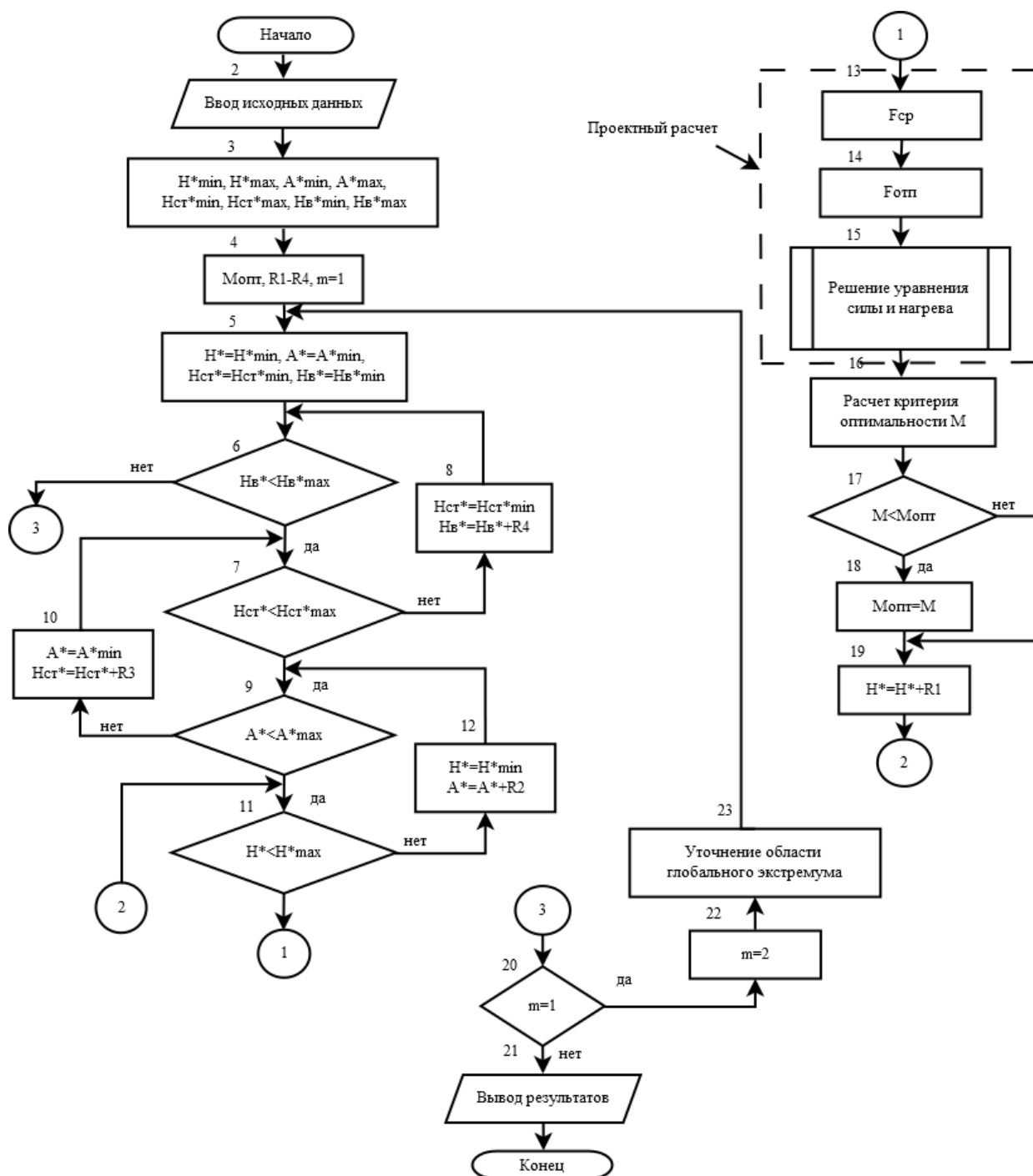


Рисунок 2.2 – Блок схема оптимизационной методики

Составлена матрица ортогонального центрально-композиционного плана второго порядка для  $n = 8$  факторов, которая приведена в ПРИЛОЖЕНИИ А. Всего количество опытов составило  $n_{22} = 2^n + 2n + 1 = 273$ . В качестве факторов выбраны 8 переменных, приведенных в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Характерные уровни факторов

$Z_i$ \ $z_i$	-2,045	-1	0	+1	+2,045
$Z_1 = \delta_{кр} \cdot 10^{-3}$ , М	4	6,04	8	9,96	12
$Z_2 = P_{мх.кр}$ , Н	2	8,643	15	21,357	28
$Z_3 = P_{мх.к} / P_{мх.кр}$	2,5	3,267	4	4,733	4,5*; 5,5
$Z_4 = T_0$ , °С	25	40,33	55	69,67	85
$Z_5 = \Theta_{доп}$ , °С	105; 115**	125,4	145	164,6	155**; 185
$Z_6 = K_{max}$	1,30	1,402	1,50	1,598	1,70
$Z_7 = K$	0,35	0,4011	0,45	0,4989	0,55
$Z_8 = K_3$	0,30	0,4022	0,50	0,5978	0,44**; 0,70

\* – Граница была изменена при оптимизации по критерию стоимость активных материалов  $C_a$ ;

\*\* – Граница была изменена при оптимизации по критерию масса активных материалов  $m_a$ .

$$z_1 = 0,51\delta_{кр} - 4,082; 4 \text{ мм} \leq \delta_{кр} \leq 12 \text{ мм}; \quad z_2 = 0,1573P_{мх.кр} - 2,36; 2 \text{ Н} \leq P_{мх.кр} \leq 28 \text{ Н};$$

$$z_3 = 1,364P_{мх.*} - 5,457; 2,5 \leq P_{мх.*} = P_{мх.к} / P_{мх.кр} \leq 5,5; \quad z_4 = 0,0682T_0 - 3,749; 25 \text{ °С} \leq T_0 \leq 85 \text{ °С};$$

$$z_5 = 0,051\Theta_{доп} - 7,398; 105 \text{ °С} \leq \Theta_{доп} \leq 185 \text{ °С}; \quad z_6 = 10,2K_{max} - 15,31; 1,30 \leq K_{max} \leq 1,70;$$

$$z_7 = 20,45K - 9,2025; 0,35 \leq K \leq 0,55; \quad z_8 = 10,225K_3 - 5,112; 0,30 \leq K_3 \leq 0,70.$$

Результаты расчетов оптимальных соизмерностей параметров приведены в ПРИЛОЖЕНИИ Б. По остальным критериям оптимальности проведен такой же объем вычислений в работе; даны конечные результаты в виде полиномиальных зависимостей. Вычисления критерия проводятся по (2.19).

Результаты оптимизации форсированных ВБЭМ в схеме с балластным резистором по объему активных материалов представлены в виде полиномиальных зависимостей:

$$V_a^* = 10^{-8} (385,1 - 70,2z_1 + 35,8z_2 + 10,4z_3 + 14,5z_4 - 10,4z_5 - 14,2z_7 - 3,91z_8 + 17,9z_1^2 - 8,46z_2^2 - 7,05z_1z_2)^4;$$

$$\delta_{опт}^* = 10^{-4} (66,1 + 7,86z_1 - 4,02z_2 - 1,04z_3 - 1,13z_4 + 1,04z_5 + 1,56z_7 + 0,7z_8 - 0,7z_1^2 + 1,30z_2^2)^2;$$

$$H_{опт}^* = 10^{-2} (415,7 - 7,0z_1 + 57,6z_4 - 12,5z_5 - 4,7z_7 + 11,7z_4^2 + 6,47z_5^2 + 5,73z_1z_2 - 9,97z_4z_5);$$

$$A_{опт}^* = 10^{-2} (71,0 - 5,85z_4 + 1,78z_5 - 1,64z_8 + 0,88z_4^2);$$

$$H_{ст.опт}^* = 0,480;$$

$$H_{в.опт}^* = 0,4364;$$

$$R_{\text{д.опт}}^* = 10^{-8} (108,5 + 8,56z_1 - 1,49z_2 - 4,55z_3 - 6,61z_4 + 2,80z_5 + 3,09z_6 + 7,00z_7 + 1,12z_8 - 1,09z_1^2 - 1,64z_4^2 + 1,6z_4z_5)^4;$$

$$B_{\text{м.ср}} = 10^{-4} (110,1 + 2,01z_1 + 2,44z_2 - 1,35z_3 + 1,19z_5 + 2,04z_7 - 1,56z_2^2)^2;$$

$$B_{\text{м.опт}} = 10^{-4} (112,1 + 2,07z_2 + 1,45z_4 - 1,92z_2^2 + 1,48z_4^2)^2;$$

$$F_{\text{ср}}^* = 10^{-4} (76,9 + 6,74z_1 - 3,33z_2 - 1,45z_3 - 2,53z_4 + 1,58z_5 + 2,22z_7 + 1,11z_8 + 1,65z_2^2 - 0,78z_1z_2)^2;$$

$$F_{\text{опт}}^* = 10^{-2} (9,72 - 0,16z_1 - 0,53z_2 + 0,6z_4 + 0,13z_7 + 0,18z_2^2 + 0,33z_4^2 + 0,11z_1z_2 - 0,23z_4z_5);$$

$$P_{\text{п}}^* = 10^{-8} (110,7 + 16,7z_1 - 8,13z_2 - 3,14z_3 - 6,52z_4 + 3,29z_5 + 3,46z_6 + 4,86z_7 + 4,15z_2^2 - 2,13z_1z_2 + 1,42z_1z_7)^4;$$

$$P_{\text{уд}}^* = 10^{-8} (65,0 + 7,06z_1 - 4,23z_2 - 2,69z_3 - 1,82z_4 + 1,11z_5 + 1,06z_6 + 1,98z_2^2 - 0,69z_1z_2)^4;$$

$$P_{\text{удо}}^* = 10^{-8} (51,7 + 3,30z_1 - 2,81z_2 - 0,82z_3 - 1,55z_7 - 0,83z_8 + 1,15z_2^2 + 0,60z_4^2)^4.$$

Усредненная величина расхождений между оптимальными и рассчитанными по полиномам значениями  $\Delta V_{\text{а}}^* = \frac{V_{\text{а}}^* - V_{\text{а.экс}}^*}{V_{\text{а.экс}}^*}$ :  $\Delta V_{\text{а}}^* = -0,84\%$ ;  $\Delta \delta_{\text{опт}}^* = 0,17\%$ ;  $\Delta H_{\text{опт}}^* = 2,06\%$ ;

$$\Delta A_{\text{опт}}^* = 0,62\%; \quad \Delta H_{\text{ст.опт}}^* = 0\%; \quad \Delta H_{\text{в.опт}}^* = -0,31\%; \quad \Delta R_{\text{д.опт}}^* = -1,30\%; \quad \Delta B_{\text{м.ср}} = 1,93\%;$$

$$\Delta B_{\text{м.опт}} = 2,88\%; \quad \Delta F_{\text{ср}}^* = -1,63\%; \quad \Delta F_{\text{опт}}^* = 2,26\%; \quad \Delta P_{\text{п}}^* = -3,71\%; \quad \Delta P_{\text{уд}}^* = -1,76\%; \quad \Delta P_{\text{удо}}^* = -1,25\%.$$

Максимальные расхождения между оптимальными и рассчитанными по полиномам значениями:  $-10,6\% \leq \Delta V_{\text{а}}^* \leq 0\%$ ;  $-5,02\% \leq \delta_{\text{опт}}^* \leq 4,79\%$ ;  $-8,51\% \leq \Delta H_{\text{опт}}^* \leq 8,46\%$ ;  
 $-3,19\% \leq \Delta A_{\text{опт}}^* \leq 3,08\%$ ;  $-4,4\% \leq \Delta H_{\text{в.опт}}^* \leq 2,37\%$ ;  $-10,2\% \leq \Delta R_{\text{д.опт}}^* \leq 5,88\%$ ;  
 $-5,7\% \leq \Delta B_{\text{м.ср}} \leq 5,58\%$ ;  $-9,63\% \leq \Delta B_{\text{м.опт}} \leq 7,11\%$ ;  $-6,0\% \leq \Delta F_{\text{ср}}^* \leq 4,62\%$ ;  
 $-3,55\% \leq \Delta F_{\text{опт}}^* \leq 6,61\%$ ;  $-11,7\% \leq \Delta P_{\text{п}}^* \leq 0\%$ ;  $-8,86\% \leq \Delta P_{\text{уд}}^* \leq -0,03\%$ ;  
 $-6,30\% \leq \Delta P_{\text{удо}}^* \leq 0\%$ .

На рисунке 2.3 проиллюстрировано влияние критического воздушного зазора при различных значениях факторов  $z_1$  и  $z_2$  на оптимальный объем активных материалов в ЭМ при  $P_{\text{мх.кр}} = 2 \text{ Н}$  и  $P_{\text{мх.кр}} = 28 \text{ Н}$ .

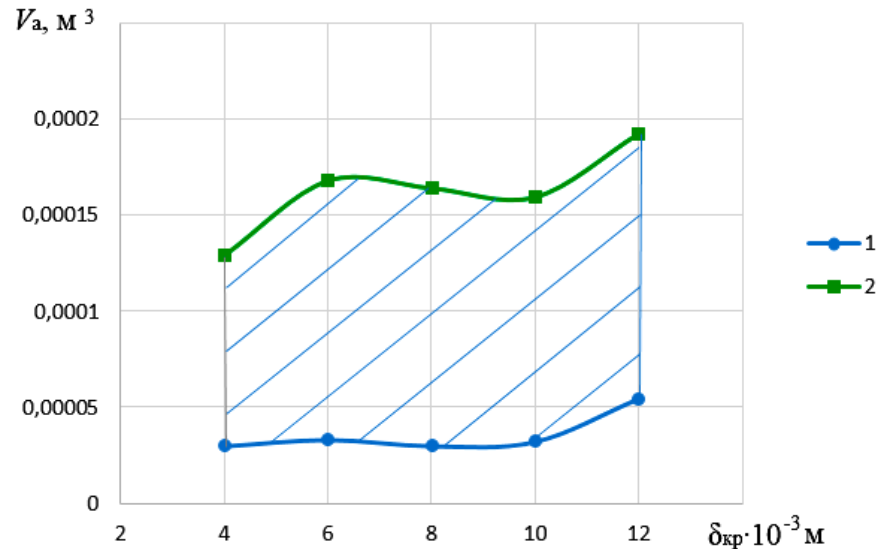


Рисунок 2.3 – Влияние критического рабочего воздушного зазора на оптимальный объем активных материалов в ЭМ при  $z_3 \div z_8 = 0$ :  
1 – при  $P_{\text{мх. кр}} = 2 \text{ Н}$ ; 2 – при  $P_{\text{мх. кр}} = 28 \text{ Н}$

## 2.2 Синтез втяжных броневых электромагнитов, минимизированных по массе активных материалов

Оптимизация форсированного ВБЭМ по массе активных материалов выполнена на основании формулы (2.20).

Результаты оптимизации представлены в виде полиномиальных зависимостей:

$$\ln m_a^* = 5,51 - 0,73z_1 + 0,36z_2 + 0,13z_3 + 0,15z_4 - 0,10z_5 - 0,15z_7 + 0,11z_1^2 - 0,11z_2^2;$$

$$\delta_{\text{опт}}^* = 10^{-4} (64,9 + 7,75z_1 - 4,01z_2 - 1,35z_3 - 1,09z_4 + 1,02z_5 + 1,52z_7 + 0,68z_8 - 0,7z_1^2 + 1,28z_2^2)^2;$$

$$H_{\text{опт}}^* = 10^{-2} (417,1 - 5,59z_1 + 57,4z_4 - 12,2z_5 - 5,09z_7 + 11,5z_4^2 + 5,73z_5^2 + 5,65z_1z_2 - 9,59z_4z_5);$$

$$A_{\text{опт}}^* = 10^{-2} (69,5 - 5,61z_4 + 1,69z_5 - 1,64z_8 + 0,88z_4^2);$$

$$H_{\text{ст.опт}}^* = 0,480;$$

$$H_{\text{в.опт}}^* = 0,4382;$$

$$R_{\text{д.опт}}^* = 10^{-8} (103,2 + 5,66z_1 - 1,07z_2 - 4,17z_3 - 4,79z_4 + 1,99z_5 + 2,24z_6 + 4,84z_7 - 1,27z_4^2 + 1,24z_4z_5)^4;$$

$$B_{\text{м.ср}} = 10^{-4} (108,5 + 2,12z_1 + 2,61z_2 - 1,89z_3 + 1,30z_5 + 2,20z_7 + 1,15z_8 - 1,56z_2^2)^2;$$

$$B_{\text{м.опт}} = 10^{-4} (113,0 + 2,04z_2 + 1,15z_3 + 1,48z_4 - 1,80z_2^2 + 1,49z_4^2)^2;$$

$$F_{\text{cp}}^* = 10^{-4} (75,7 + 6,35z_1 - 3,30z_2 - 1,78z_3 - 2,53z_4 + 1,49z_5 + 2,05z_7 + 1,04z_8 + 1,53z_2^2)^2;$$

$$F_{\text{отп}}^* = 10^{-4} (31,0 - 0,80z_2 + 0,93z_4 + 0,5z_4^2 - 0,33z_4z_5)^2;$$

$$P_{\text{п}}^* = 10^{-8} (105,3 + 10,2z_1 - 5,11z_2 - 2,52z_3 - 4,20z_4 + 2,05z_5 + 2,18z_6 + 2,93z_7 + 2,37z_2^2)^4;$$

$$P_{\text{уд}}^* = 10^{-8} (63,0 + 6,59z_1 - 3,98z_2 - 3,49z_3 - 1,89z_4 + 1,16z_5 + 0,90z_6 + 1,85z_2^2)^4;$$

$$P_{\text{удо}}^* = 10^{-8} (49,7 + 3,36z_1 - 2,99z_2 - 1,25z_3 - 1,37z_7 - 0,76z_8 + 1,55z_2^2 + 0,83z_4^2)^4.$$

Усредненная величина расхождений между оптимальными и рассчитанными по полиномам значениями:  $\Delta \ln m_a^* = 0,47\%$ ;  $\Delta \delta_{\text{отп}}^* = 0,15\%$ ;  $\Delta H_{\text{отп}}^* = 0,64\%$ ;  $\Delta A_{\text{отп}}^* = 0,34\%$ ;  
 $\Delta H_{\text{ст.отп}}^* = 0\%$ ;  $\Delta H_{\text{в.отп}}^* = -0,36\%$ ;  $\Delta R_{\text{д.отп}}^* = -1,33\%$ ;  $\Delta B_{\text{м.ср}} = 2,14\%$ ;  $\Delta B_{\text{м.отп}} = 2,53\%$ ;  
 $\Delta F_{\text{cp}}^* = -1,71\%$ ;  $\Delta F_{\text{отп}}^* = 1,80\%$ ;  $\Delta P_{\text{п}}^* = 3,60\%$ ;  $\Delta P_{\text{уд}}^* = -2,30\%$ ;  $\Delta P_{\text{удо}}^* = 0,18\%$ .

Максимальные расхождения между оптимальными и рассчитанными по полиномам значениями:  $-6,87\% \leq \Delta \ln m_a^* \leq 4,41\%$ ;  $-5,29\% \leq \Delta \delta_{\text{отп}}^* \leq 4,72\%$ ;  $-7,68\% \leq \Delta H_{\text{отп}}^* \leq 8,26\%$ ;  
 $-3,28\% \leq \Delta A_{\text{отп}}^* \leq 2,38\%$ ;  $-4,09\% \leq \Delta H_{\text{в.отп}}^* \leq 6,16\%$ ;  $-9,48\% \leq \Delta R_{\text{д.отп}}^* \leq 0\%$ ;  
 $-6,02\% \leq \Delta B_{\text{м.ср}} \leq 5,94\%$ ;  $-8,54\% \leq \Delta B_{\text{м.отп}} \leq 6,37\%$ ;  $-6,35\% \leq \Delta F_{\text{cp}}^* \leq 0\%$ ;  
 $-1,95\% \leq \Delta F_{\text{отп}}^* \leq 4,87\%$ ;  $-11,2\% \leq \Delta P_{\text{п}}^* \leq 7,5\%$ ;  $-8,71\% \leq \Delta P_{\text{уд}}^* \leq 6,2\%$ ;  
 $-8,38\% \leq \Delta P_{\text{удо}}^* \leq 5,29\%$ .

Проиллюстрируем порядок расчета полученных оптимальных значений соразмерностей по полиномиальным зависимостям в центре факторного пространства ( $z_i = 0$ ):

$$\delta_{\text{отп}}^* = 0,421; d_{\text{як.отп}} = \frac{8}{0,421} = 19,0 \text{ мм}; H_{\text{отп}}^* = 4,17; H_{\text{отп}} = 4,17 \cdot 19 = 79,2 \text{ мм}; A_{\text{отп}}^* = 0,695;$$

$$A_{\text{отп}} = 0,695 \cdot 19 = 13,2 \text{ мм}; H_{\text{ст.отп}}^* = 0,48; H_{\text{ст.отп}} = 79,2 \cdot 0,48 = 38,0 \text{ мм}; H_{\text{в.отп}}^* = 0,438;$$

$$H_{\text{в.отп}} = 0,438 \cdot 19 = 8,32 \text{ мм}; \Delta_* = \frac{\Delta_{\text{к.отп}}}{d_{\text{як.отп}}} = 0,1; \Delta_{\text{к.отп}} = 1,9 \text{ мм}; v_* = \frac{v_{\text{отп}}}{d_{\text{як.отп}}} = 0,012;$$

$$v_{\text{отп}} = 0,012 \cdot d_{\text{як}} = 0,23 \text{ мм}; \ln m_a^* = 5,51; m_a^* = 248; \frac{m_a}{\delta_{\text{кр}}^3 \cdot 7800} = 248;$$

$$m_a = (8 \cdot 10^{-3})^3 \cdot 7,8 \cdot 10^3 \cdot 248 = 0,990 \text{ кг}.$$

На рисунке 2.4 проиллюстрировано влияние критического рабочего воздушного зазора при различных значениях факторов  $z_1$  и  $z_2$  на оптимальную массу активных материалов в ЭМ при  $P_{\text{мх.кр}} = 2 \text{ Н}$  и  $P_{\text{мх.кр}} = 28 \text{ Н}$ .

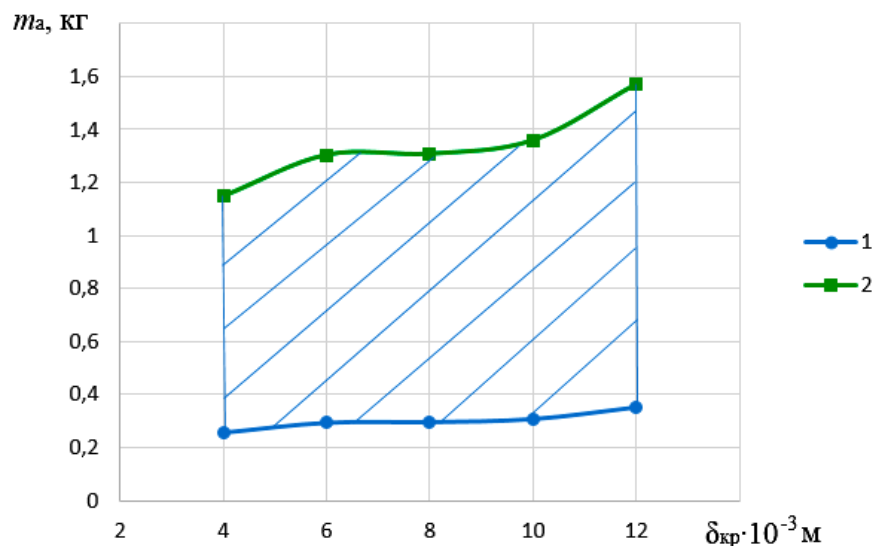


Рисунок 2.4 – Влияние критического рабочего воздушного зазора на оптимальную массу активных материалов в ЭМ при  $z_3 \div z_8 = 0$ :  
1 – при  $P_{\text{мх. кр}} = 2 \text{ Н}$ ; 2 – при  $P_{\text{мх. кр}} = 28 \text{ Н}$

### 2.3 Синтез втяжных броневых электромагнитов, минимизированных по стоимости активных материалов

Оптимизация форсированного ВБЭМ по стоимости активных материалов выполнена на основании минимизации выражения (2.21). Представим ее в другом виде:

$$C_a = 150m_c \left( 1 + z \frac{m_m}{m_c} \right), \quad (2.25)$$

где 150 – цена в рублях одного кг стали;

$z$  – кратность цены одного кг обмоточной меди в долях стали ( $4 \leq z \leq 6$ ).

Результаты оптимизации представлены в виде полиномиальных зависимостей для  $z = 4$ :

$$C_a = 10^{-8} (423,1 + 37,4z_2 + 10,6z_3 + 14,2z_4 - 9,88z_5 - 16,2z_7 - 8,82z_2^2)^4$$

$$\delta_{\text{опт}}^* = 10^{-4} (62,7 + 7,61z_1 - 3,80z_2 - 1,01z_3 - 1,27z_4 + 1,09z_5 + 1,52z_7 - 0,65z_1^2 + 1,28z_2^2)^2;$$

$$H_{\text{опт}}^* = 10^{-4} (198,5 + 9,81z_4)^2;$$

$$A_{\text{опт}}^* = 10^{-2} (52,2 - 4,10z_4 + 1,07z_5 - 1,44z_8);$$

$$H_{\text{ст.опт}}^* = 0,4793;$$

$$H_{\text{в.опт}}^* = 0,4455;$$

$$R_{\text{д.опт}}^* = 10^{-4} (130,4 + 15,7z_1 - 4,03z_2 - 8,49z_3 - 8,48z_4 + 3z_5 + 6,12z_6 + 13,8z_7 + 1,37z_8 - 5,42z_1^2 - 1,66z_2^2 - 2,43z_3^2 - 3,28z_4^2 - 3,71z_5^2 - 3,27z_6^2 + 8,66z_7^2 - 3,22z_8^2)^2;$$

$$B_{\text{м ср}} = 10^{-4} (108,3 + 2,29z_1 + 2,75z_2 - 1,44z_3 + 1,44z_5 + 2,39z_7 + 1,15z_8 - 1,71z_2^2)^2;$$

$$B_{\text{м опт}} = 10^{-4} (110,2 + 2,44z_2 + 1,20z_7 - 2,29z_2^2)^2;$$

$$F_{\text{ср}}^* = 10^{-2} (57,6 + 9,25z_1 - 5,10z_2 - 1,72z_3 - 2,70z_4 + 1,74z_5 + 2,61z_7 + 1,18z_8 - 0,99z_1^2 + 2,02z_2^2 - 0,62z_1z_4);$$

$$F_{\text{опт}}^* = 10^{-2} (9,24 - 0,41z_2 + 0,21z_4 + 0,11z_5 + 0,12z_7 + 0,16z_2^2);$$

$$P_{\text{п}}^* = 10^{-8} (113,3 + 16,0z_1 - 8,39z_2 - 2,74z_3 - 4,85z_4 + 2,49z_5 + 3,50z_6 + 4,20z_7 - 1,52z_1^2 + 3,51z_2^2)^4;$$

$$P_{\text{уд}}^* = 10^{-8} (66,2 + 6,90z_1 - 4,30z_2 - 2,59z_3 - 1,49z_4 + 0,99z_5 + 1,07z_6 - 0,67z_8 - 0,80z_1^2 + 1,78z_2^2)^4;$$

$$P_{\text{удо}}^* = 10^{-8} (52,9 + 3,52z_1 - 2,93z_2 - 0,99z_3 - 1,38z_7 - 0,70z_8 + 1,18z_2^2)^4.$$

Усредненная величина расхождений:  $\Delta C_a = 0,78\%$ ;  $\Delta \delta_{\text{опт}}^* = -0,46\%$ ;  $\Delta H_{\text{опт}}^* = 0,91\%$ ;

$$\Delta A_{\text{опт}}^* = 0,93\%; \Delta H_{\text{ст.опт}}^* = 0\%; \Delta H_{\text{в.опт}}^* = -0,56\%; \Delta R_{\text{д.опт}}^* = -0,05\%; \Delta B_{\text{м ср}} = 1,33\%;$$

$$\Delta B_{\text{м опт}} = 2,89\%; \Delta F_{\text{ср}}^* = -1,91\%; \Delta F_{\text{опт}}^* = -2,03\%; \Delta P_{\text{п}}^* = -1,96\%; \Delta P_{\text{уд}}^* = -0,86\%;$$

$$\Delta P_{\text{удо}}^* = -1,11\%.$$

Максимальные расхождения между оптимальными и рассчитанными по полиномам значениями:  $-7,04\% \leq \Delta C_a^* \leq 4,32\%$ ;  $-5,89\% \leq \Delta \delta_{\text{опт}}^* \leq 4,29\%$ ;  $-3,37\% \leq \Delta H_{\text{опт}}^* \leq 5,52\%$ ;  
 $-4,54\% \leq \Delta A_{\text{опт}}^* \leq 3,83\%$ ;  $-3,74\% \leq \Delta H_{\text{ст.опт}}^* \leq 0,15\%$ ;  $-3,86\% \leq \Delta H_{\text{в.опт}}^* \leq 2,08\%$ ;  
 $-9,60\% \leq \Delta R_{\text{д.опт}}^* \leq 6,05\%$ ;  $-6,1\% \leq \Delta B_{\text{м ср}} \leq 4,51\%$ ;  $-9,67\% \leq \Delta B_{\text{м опт}} \leq 7,04\%$ ;  
 $-11,6\% \leq \Delta F_{\text{ср}}^* \leq 7,32\%$ ;  $-5,36\% \leq \Delta F_{\text{опт}}^* \leq 7,3\%$ ;  $-9,71\% \leq \Delta P_{\text{п}}^* \leq 6,6\%$ ;  
 $-7,95\% \leq \Delta P_{\text{уд}}^* \leq 5,69\%$ ;  $-6,41\% \leq \Delta P_{\text{удо}}^* \leq 4,78\%$ .

На рисунке 2.5 проиллюстрировано влияние механической критической силы при различных значениях фактора  $z_2$  на оптимальную стоимость активных материалов в ЭМ.

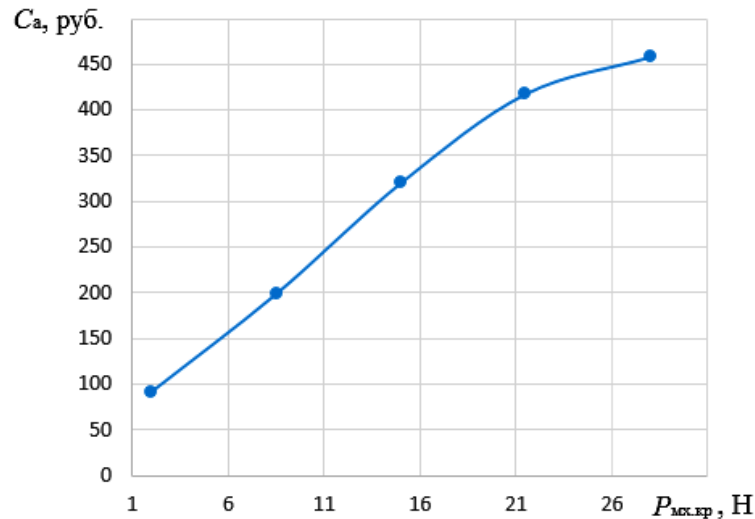


Рисунок 2.5 – Влияние механической критической силы на оптимальную стоимость активных материалов в ЭМ при  $z_1, z_3 \div z_8 = 0$

Результаты оптимизации представлены в виде полиномиальных зависимостей для  $z = 5$ :

$$C_a = 10^{-8} (440,4 + 38,9z_2 + 11,0z_3 + 14,5z_4 - 10,2z_5 - 17,0z_7 - 9,05z_2^2)^4;$$

$$\delta_{опт}^* = 10^{-4} (62,2 + 7,57z_1 - 3,77z_2 - 0,99z_3 - 1,21z_4 + 1,05z_5 + 1,51z_7 - 0,63z_1^2 + 1,25z_2^2)^2;$$

$$H_{опт}^* = 10^{-4} (197,1 + 10,0z_4)^2;$$

$$A_{опт}^* = 10^{-2} (50,0 - 3,89z_4 + z_5 - 1,36z_8);$$

$$H_{ст.опт}^* = 0,4795;$$

$$H_{в.опт}^* = 10^{-2} (44,7 + 0,46z_2);$$

$$R_{д.опт}^* = 10^{-4} (120,4 + 15,6z_1 - 4,06z_2 - 8,44z_3 - 8,49z_4 + 3,12z_5 + 6,10z_6 + 12,9z_7 + 1,33z_8 - 2,81z_1^2)^2;$$

$$B_{мсп} = 10^{-4} (107,7 + 2,38z_1 + 2,84z_2 - 1,44z_3 + 1,41z_5 + 2,45z_7 + 1,17z_8 - 1,76z_2^2)^2;$$

$$B_{мопт} = 10^{-4} (109,8 + 2,59z_2 + 1,19z_3 + 1,27z_7 - 2,35z_2^2)^2;$$

$$F_{сп}^* = 10^{-2} (57,2 + 9,18z_1 - 5,07z_2 - 1,66z_3 - 2,61z_4 + 1,69z_5 + 2,53z_7 + 1,15z_8 - 1,05z_1^2 + 1,89z_2^2 - 0,64z_1z_4);$$

$$F_{опт}^* = 10^{-2} (9,11 - 0,44z_2 - 0,1z_3 + 0,26z_4 + 0,16z_7 + 0,17z_2^2);$$

$$P_{п}^* = 10^{-8} (113,7 + 15,9z_1 - 8,42z_2 - 2,71z_3 - 4,81z_4 + 2,51z_5 + 3,50z_6 + 4,16z_7 - 1,63z_1^2 + 3,41z_2^2)^4;$$

$$P_{уд}^* = 10^{-8} (66,3 + 6,89z_1 - 4,32z_2 - 2,58z_3 - 1,45z_4 + 0,98z_5 + 1,08z_6 - 0,68z_8 - 0,82z_1^2 + 1,76z_2^2)^4;$$

$$P_{удо}^* = 10^{-8} (52,8 + 3,51z_1 - 2,96z_2 - 0,97z_3 - 1,39z_7 - 0,72z_8 + 1,19z_2^2)^4.$$



Усредненная величина расхождений между оптимальными и рассчитанными по полиномам значениями:  $\Delta C_a = 0,88\%$ ;  $\Delta \delta_{\text{опт}}^* = -0,49\%$ ;  $\Delta H_{\text{опт}}^* = 1,21\%$ ;  $\Delta A_{\text{опт}}^* = 0,73\%$ ;  $\Delta H_{\text{ст.опт}}^* = -0,12\%$ ;  $\Delta H_{\text{в.опт}}^* = -0,56\%$ ;  $\Delta R_{\text{д.опт}}^* = -1,45\%$ ;  $\Delta B_{\text{м.ср}} = 1,5\%$ ;  $\Delta B_{\text{м.опт}} = 2,84\%$ ;  $\Delta F_{\text{ср}}^* = -2,35\%$ ;  $\Delta F_{\text{опт}}^* = 1,66\%$ ;  $\Delta P_{\text{п}}^* = -2,01\%$ ;  $\Delta P_{\text{уд}}^* = -0,87\%$ ;  $\Delta P_{\text{удо}}^* = -0,93\%$ .

Максимальные расхождения между оптимальными и рассчитанными по полиномам значениями:  $-7,11\% \leq \Delta C_a^* \leq 4,40\%$ ;  $-5,49\% \leq \Delta \delta_{\text{опт}}^* \leq 4,08\%$ ;  $-2,96\% \leq \Delta H_{\text{опт}}^* \leq 6,04\%$ ;  $-5,82\% \leq \Delta A_{\text{опт}}^* \leq 3,82\%$ ;  $-4,70\% \leq \Delta H_{\text{ст.опт}}^* \leq 0,10\%$ ;  $-2,60\% \leq \Delta H_{\text{в.опт}}^* \leq 1,52\%$ ;  $-6,39\% \leq \Delta R_{\text{д.опт}}^* \leq 5,44\%$ ;  $-6,38\% \leq \Delta B_{\text{м.ср}} \leq 4,78\%$ ;  $-10,1\% \leq \Delta B_{\text{м.опт}} \leq 7,28\%$ ;  $-10,9\% \leq \Delta F_{\text{ср}}^* \leq 6,91\%$ ;  $-3,94\% \leq \Delta F_{\text{опт}}^* \leq 9,11\%$ ;  $-9,69\% \leq \Delta P_{\text{п}}^* \leq 6,6\%$ ;  $-7,97\% \leq \Delta P_{\text{уд}}^* \leq 5,69\%$ ;  $-6,37\% \leq \Delta P_{\text{удо}}^* \leq 4,74\%$ .

Результаты оптимизации представлены в виде полиномиальных зависимостей для  $z = 6$ :

$$C_a = 10^{-8} (456,1 + 40,3z_2 + 11,4z_3 + 14,8z_4 - 10,5z_5 - 17,7z_7 - 9,4z_2^2)^4;$$

$$\delta_{\text{опт}}^* = 10^{-4} (61,7 + 7,53z_1 - 3,74z_2 - 0,96z_3 - 1,18z_4 + 0,99z_5 + 1,50z_7 - 0,64z_1^2 + 1,25z_2^2)^2;$$

$$H_{\text{опт}}^* = 10^{-4} (196,6 + 10,1z_4)^2;$$

$$A_{\text{опт}}^* = 10^{-2} (48,0 - 3,75z_4 + 0,87z_5 - 1,27z_8);$$

$$H_{\text{ст.опт}}^* = 0,4796;$$

$$H_{\text{в.опт}}^* = 10^{-2} (44,7 + 0,46z_2);$$

$$R_{\text{д.опт}}^* = 10^{-4} (120,3 + 15,6z_1 - 4,16z_2 - 8,47z_3 - 8,44z_4 + 3,23z_5 + 6,10z_6 + 12,8z_7 + 1,35z_8 - 2,87z_1^2)^2;$$

$$B_{\text{м.ср}} = 10^{-4} (107,7 + 2,46z_1 + 2,89z_2 - 1,43z_3 + 1,34z_5 + 2,52z_7 + 1,17z_8 - 1,74z_2^2)^2;$$

$$B_{\text{м.опт}} = 10^{-4} (109,6 + 2,77z_2 + 1,30z_3 + 1,33z_7 - 2,40z_2^2)^2;$$

$$F_{\text{ср}}^* = 10^{-2} (56,8 + 9,13z_1 - 5,06z_2 - 1,61z_3 - 2,55z_4 + 1,62z_5 + 2,46z_7 + 1,16z_8 - 1,06z_1^2 + 1,85z_2^2 - 0,67z_1z_4);$$

$$F_{\text{опт}}^* = 10^{-2} (9,06 - 0,44z_2 + 0,26z_4 + 0,16z_7 + 0,17z_2^2);$$

$$P_{\text{п}}^* = 10^{-8} (113,8 + 15,9z_1 - 8,49z_2 - 2,74z_3 - 4,78z_4 + 2,49z_5 + 3,47z_6 + 4,08z_7 - 1,65z_1^2 + 3,39z_2^2)^4;$$

$$P_{\text{уд}}^* = 10^{-8} (66,4 + 6,91z_1 - 4,33z_2 - 2,58z_3 - 1,43z_4 + 0,97z_5 + 1,08z_6 - 0,69z_8 - 0,84z_1^2 + 1,75z_2^2)^4;$$

$$P_{\text{удо}}^* = 10^{-8} (52,9 + 3,52z_1 - 2,96z_2 - 0,97z_3 - 1,38z_7 - 0,71z_8 + 1,12z_2^2)^4.$$

Усредненная величина расхождений между оптимальными и рассчитанными по полиномам значениями:  $\Delta C_a = 0,88\%$ ;  $\Delta \delta_{\text{опт}}^* = -0,43\%$ ;  $\Delta H_{\text{опт}}^* = 1,21\%$ ;  $\Delta A_{\text{опт}}^* = 0,97\%$ ;  $\Delta H_{\text{ст.опт}}^* = -0,15\%$ ;  $\Delta H_{\text{в.опт}}^* = -0,49\%$ ;  $\Delta R_{\text{д.опт}}^* = -1,44\%$ ;  $\Delta B_{\text{м.ср}} = 1,24\%$ ;  $\Delta B_{\text{м.опт}} = 2,78\%$ ;  $\Delta F_{\text{ср}}^* = -2,35\%$ ;  $\Delta F_{\text{опт}}^* = 1,61\%$ ;  $\Delta P_{\text{н}}^* = -1,97\%$ ;  $\Delta P_{\text{уд}}^* = -0,88\%$ ;  $\Delta P_{\text{удо}}^* = -0,90\%$ .

Максимальные расхождения между оптимальными и рассчитанными по полиномам значениями:  $-7,14\% \leq \Delta C_a^* \leq 4,43\%$ ;  $-5,73\% \leq \Delta \delta_{\text{опт}}^* \leq 4,25\%$ ;  $-2,74\% \leq \Delta H_{\text{опт}}^* \leq 6,0\%$ ;  $-5,11\% \leq \Delta A_{\text{опт}}^* \leq 4,62\%$ ;  $-4,72\% \leq \Delta H_{\text{ст.опт}}^* \leq 0,08\%$ ;  $-2,61\% \leq \Delta H_{\text{в.опт}}^* \leq 1,72\%$ ;  $-6,60\% \leq \Delta R_{\text{д.опт}}^* \leq 5,15\%$ ;  $-6,26\% \leq \Delta B_{\text{м.ср}} \leq 4,55\%$ ;  $-9,84\% \leq \Delta B_{\text{м.опт}} \leq 7,02\%$ ;  $-10,9\% \leq \Delta F_{\text{ср}}^* \leq 6,94\%$ ;  $-4,20\% \leq \Delta F_{\text{опт}}^* \leq 9,06\%$ ;  $-9,51\% \leq \Delta P_{\text{н}}^* \leq 6,47\%$ ;  $-7,83\% \leq \Delta P_{\text{уд}}^* \leq 5,61\%$ ;  $-6,25\% \leq \Delta P_{\text{удо}}^* \leq 4,75\%$ .

Результаты оптимизации представлены в виде полиномиальных зависимостей любого  $z$ :

$$C_a = 10^{-8} \left( [-0,755z^2 + 24,0z + 339,0] + [-0,09z^2 + 2,38z + 29,3]z_2 + [-0,03z^2 + 0,73z + 8,13]z_3 + \right. \\ \left. + [-0,01z^2 + 0,38z + 12,9]z_4 + [0,01z^2 - 0,4z - 8,44]z_5 + [0,075z^2 - 1,455z - 11,6]z_7 + [-0,065z^2 + \right. \\ \left. + 0,355z - 9,2]z_2^2 \right)^4;$$

$$\delta_{\text{опт}}^* = 10^{-4} \left( [0,01z^2 - 0,59z + 64,9] + [-0,04z + 7,77]z_1 + [0,03z - 3,92]z_2 + [-0,025z - 0,99]z_3 + \right. \\ \left. + [-0,015z^2 + 0,195z - 1,81]z_4 + [-0,01z^2 + 0,05z + 1,05]z_5 + [-0,01z + 1,56]z_7 + [-0,015z^2 + 0,155z - \right. \\ \left. - 1,03]z_1^2 + [0,015z^2 - 0,165z + 1,7]z_2^2 \right)^2;$$

$$H_{\text{опт}}^* = 10^{-4} \left( [0,36z^2 - 4,56z + 210,9] + [-0,08z^2 + 0,94z + 7,33]z_4 \right)^2;$$

$$A_{\text{опт}}^* = 10^{-2} \left( [0,15z^2 - 3,57z + 64,1] + [-0,035z^2 + 0,525z - 5,64]z_4 + [-0,03z^2 + 0,2z + 0,75]z_5 + \right. \\ \left. + [0,005z^2 + 0,035z - 1,66]z_8 \right);$$

$$H_{\text{ст.опт}}^* = [-0,0001z^2 + 0,0007z + 0,4775];$$

$$H_{\text{в.опт}}^* = 10^{-2} \left( [-0,035z^2 + 0,415z + 43,5] + [-0,23z^2 + 2,53z - 6,44]z_2 \right);$$

$$\begin{aligned}
R_{\text{д.онт}}^* &= 10^{-4} \left( [5,01z^2 - 55,2z + 270,9] + [0,025z^2 - 0,265z + 16,3]_{z_1} + [-0,035z^2 + 0,285 - 4,61]_{z_2} + \right. \\
&+ [-0,04z^2 + 0,41z - 9,49]_{z_3} + [0,03z^2 - 0,28z - 7,84]_{z_4} + [-0,005z^2 + 0,165z + 2,42]_{z_5} + \\
&+ [0,01z^2 - 0,11z + 6,40]_{z_6} + [0,405z^2 - 4,525z + 25,4]_{z_7} + [0,03z^2 - 0,31z + 2,13]_{z_8} + \\
&+ [-1,335z^2 + 14,6z - 42,6]_{z_1^2} + [-0,83z^2 + 9,13z - 24,9]_{z_2^2} + [-1,215z^2 + 13,365z - 36,5]_{z_3^2} + \\
&+ [-1,64z^2 + 18,04z - 49,2]_{z_4^2} + [-1,855z^2 + 20,4z - 55,7]_{z_5^2} + [-1,635z^2 + 18,0z - 49,1]_{z_6^2} + \\
&+ [4,33z^2 - 47,6z + 129,9]_{z_7^2} + [-1,61z^2 + 17,7z - 48,3]_{z_8^2} \left. \right)^2 ;
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
B_{\text{м.ср}} &= 10^{-4} \left( [0,235z^2 - 2,675z + 115,2] + [-0,005z^2 + 0,135z + 1,83]_{z_1} + [-0,02z^2 + 0,27z + 1,99]_{z_2} + \right. \\
&+ [0,005z^2 - 0,045z - 1,34]_{z_3} + [-0,02z^2 + 0,15z + 1,16]_{z_5} + [0,005z^2 + 0,015z + 2,25]_{z_7} + \\
&+ [-0,01z^2 + 0,11z + 0,87]_{z_8} + [0,035z^2 - 0,365z - 0,81]_{z_2^2} \left. \right)^2 ;
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
B_{\text{м.онт}} &= 10^{-4} \left( [0,04z^2 - 0,71z + 112,4] + [0,015z^2 + 0,015z + 2,14]_{z_2} + [-0,54z^2 + 6,05z - 15,6]_{z_3} + \right. \\
&+ [-0,005z^2 + 0,115z + 0,82]_{z_7} + [0,005z^2 - 0,105z - 1,95]_{z_2^2} \left. \right)^2 ;
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
F_{\text{ср}}^* &= 10^{-2} \left( [-0,025z^2 - 0,125z + 58,5] + [0,01z^2 - 0,16z + 9,73]_{z_1} + [-0,01z^2 + 0,12z - 5,42]_{z_2} + \right. \\
&+ [-0,015z^2 + 0,225z - 3,36]_{z_4} + [-0,01z^2 + 0,04z + 1,74]_{z_5} + [-0,005z^2 + 0,105z - 2,06]_{z_3} + \\
&+ [0,005z^2 - 0,125z + 3,03]_{z_7} + [0,02z^2 - 0,21z + 1,7]_{z_8} + [0,025z^2 - 0,285z - 0,25]_{z_1^2} + \\
&+ [0,045z^2 - 0,535z + 3,44]_{z_2^2} + [-0,005z^2 + 0,025z - 0,64]_{z_1 z_4} \left. \right) ;
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
F_{\text{онт}}^* &= 10^{-2} \left( [0,04z^2 - 0,49z + 10,6] + [0,015z^2 - 0,165z + 0,01]_{z_2} + [0,1z^2 - z + 2,4]_{z_3} + \right. \\
&+ [-0,025z^2 + 0,275z - 0,49]_{z_4} + [0,055z^2 - 0,605z + 1,65]_{z_5} + [-0,02z^2 + 0,22z - 0,44]_{z_7} + \\
&+ [-0,005z^2 + 0,055z + 0,02]_{z_2^2} \left. \right) ;
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
P_{\text{н}}^* &= 10^{-8} \left( [-0,125z^2 + 1,515z + 109,2] + [-0,01z + 16,0]_{z_1} + [-0,02z^2 + 0,15z - 8,67]_{z_2} + \right. \\
&+ [-0,03z^2 + 0,3z - 3,46]_{z_3} + [-0,005z^2 + 0,085z - 5,11]_{z_4} + [-0,02z^2 + 0,2z + 2,01]_{z_5} + \\
&+ [-0,015z^2 + 0,135z + 3,20]_{z_6} + [-0,02z^2 + 0,14z + 3,96]_{z_7} + [0,045z^2 - 0,515z - 0,18]_{z_1^2} +
\end{aligned}$$

$$+ [0,04z^2 - 0,46z + 4,71]z_2^2)^4;$$

$$P_{уд}^* = 10^{-8} \left( [-0,025z^2 + 0,385z + 65,0] + [0,015z^2 - 0,145z + 7,24]z_1 + [0,005z^2 - 0,065z - 4,12]z_2 + \right. \\ \left. + [-0,005z^2 + 0,055z - 2,73]z_3 + [-0,01z^2 + 0,13z - 1,85]z_4 + [-0,01z + 1,03]z_5 + \right. \\ \left. + [-0,005z^2 + 0,055z + 0,93]z_6 + [-0,01z - 0,63]z_8 + [-0,02z - 0,72]z_1^2 + \right. \\ \left. + [0,005z^2 - 0,065z + 1,96]z_2^2 \right)^4;$$

$$P_{удо}^* = 10^{-8} \left( [0,025z^2 - 0,235z + 53,4] + [0,01z^2 - 0,1z + 3,76]z_1 + [0,015z^2 - 0,165z - 2,51]z_2 + \right. \\ \left. + [-0,01z^2 + 0,11z - 1,27]z_3 + [0,01z^2 - 0,1z - 1,14]z_7 + [0,015z^2 - 0,155z - 0,32]z_8 + \right. \\ \left. + [-0,04z^2 + 0,37z + 0,34]z_2^2 \right)^4.$$

## 2.4 Синтез втяжных броневых электромагнитов, минимизированных по установочной площади

Оптимизация форсированного ВБЭМ по установочной площади выполнена на основании формулы (2.22).

Результаты оптимизации представлены в виде полиномиальных зависимостей:

$$S_y^* = 10^{-2} (651,7 - 29,7z_4 + 7,1z_5);$$

$$\delta_{\text{опт}}^* = 10^{-4} (60,6 + 7,34z_1 - 3,66z_2 - 1,34z_3 - 2,09z_4 + 1,15z_5 + 1,51z_7 + 0,85z_8 - 0,62z_1^2 + 1,32z_2^2)^2;$$

$$H_{\text{опт}}^* = 3,854;$$

$$A_{\text{опт}}^* = 10^{-2} (47,4 - 3,18z_4 + 0,78z_5);$$

$$H_{\text{ст.опт}}^* = 0,480;$$

$$H_{\text{в.опт}}^* = 10^{-2} (45,0 + 0,49z_2);$$

$$R_{\text{д.опт}}^* = 10^{-8} (106,0 + 8,00z_1 - 2,32z_2 - 5,07z_3 - 2,05z_4 + 1,42z_5 + 2,75z_6 + 6,18z_7 - 1,83z_1^2)^4;$$

$$B_{\text{м.рп}} = 10^{-4} (105,5 + 2,77z_1 + 3,05z_2 - 2,38z_3 - 3,04z_4 + 1,94z_5 + 2,78z_7 + 1,57z_8 - 1,49z_2^2)^2;$$

$$B_{\text{м.отп}} = 10^{-4} (110,4 + 2,86z_2 + 1,32z_3 - 1,75z_4 + 1,39z_7 - 2,16z_2^2)^2;$$

$$F_{\text{рп}}^* = 10^{-4} (74,1 + 6,27z_1 - 3,52z_2 - 1,40z_3 - 1,87z_4 + 1,11z_5 + 1,58z_7 + 0,89z_8 - 0,97z_1^2 + 1,07z_2^2)^2;$$

$$F_{\text{отп}}^* = 10^{-2} (8,99 - 0,39z_2 - 0,14z_3 - 0,21z_4 + 0,12z_5 + 0,17z_7 + 0,10z_8 + 0,18z_2^2);$$

$$P_{\text{п}}^* = 10^{-8} (107,5 + 10,4z_1 - 5,49z_2 - 2,07z_3 - 2,02z_4 + 1,58z_5 + 2,27z_6 + 2,41z_7 - 1,32z_1^2 + 1,86z_2^2)^4;$$

$$P_{\text{уд}}^* = 10^{-8} (64,2 + 6,79z_1 - 4,26z_2 - 3,24z_3 - 1,22z_4 + 0,97z_5 + 1,04z_6 - 0,73z_8 - 0,83z_1^2 + 1,62z_2^2)^4;$$

$$P_{\text{удо}}^* = 10^{-8} (51,7 + 3,43z_1 - 2,85z_2 - 1,27z_3 - 0,63z_4 - 1,32z_7 - 0,74z_8 + 1,21z_2^2)^4.$$

Усредненная величина расхождений между оптимальными и рассчитанными по полиномам значениями:  $\Delta S_y^* = -0,17\%$ ;  $\Delta \delta_{\text{отп}}^* = -1,22\%$ ;  $\Delta H_{\text{отп}}^* = 0\%$ ;  $\Delta A_{\text{отп}}^* = -0,31\%$ ;  $\Delta H_{\text{ст.отп}}^* = 0\%$ ;  $\Delta H_{\text{в.отп}}^* = -0,21\%$ ;  $\Delta R_{\text{д.отп}}^* = -0,10\%$ ;  $\Delta B_{\text{м.сп}} = 0,42\%$ ;  $\Delta B_{\text{м.отп}} = 1,63\%$ ;  $\Delta F_{\text{сп}}^* = -0,65\%$ ;  $\Delta F_{\text{отп}}^* = -1,26\%$ ;  $\Delta P_{\text{п}}^* = -1,62\%$ ;  $\Delta P_{\text{уд}}^* = -0,88\%$ ;  $\Delta P_{\text{удо}}^* = -1,54\%$ .

Максимальные расхождения между оптимальными и рассчитанными по полиномам значениями:  $-2,63\% \leq \Delta S_y^* \leq 1,87\%$ ;  $-6,26\% \leq \Delta \delta_{\text{отп}}^* \leq 4,66\%$ ;  $-3,79\% \leq \Delta A_{\text{отп}}^* \leq 2,74\%$ ;  $-2,62\% \leq \Delta H_{\text{в.отп}}^* \leq 1,69\%$ ;  $-9,76\% \leq \Delta R_{\text{д.отп}}^* \leq 3,29\%$ ;  $-6,02\% \leq \Delta B_{\text{м.сп}} \leq 4,48\%$ ;  $-8,08\% \leq \Delta B_{\text{м.отп}} \leq 6,03\%$ ;  $-3,83\% \leq \Delta F_{\text{сп}}^* \leq 3,09\%$ ;  $-5,75\% \leq \Delta F_{\text{отп}}^* \leq 4,61\%$ ;  $-8,76\% \leq \Delta P_{\text{п}}^* \leq 5,95\%$ ;  $-7,37\% \leq \Delta P_{\text{уд}}^* \leq 5,28\%$ ;  $-6,11\% \leq \Delta P_{\text{удо}}^* \leq 4,71\%$ .

На рисунке 2.6 проиллюстрировано влияние температуры окружающей среды при различных значениях факторов  $z_4$  и  $z_5$  на оптимальную установочную площадь ЭМ при  $\Theta_{\text{доп}} = 115^\circ\text{C}$  и  $\Theta_{\text{доп}} = 155^\circ\text{C}$ .

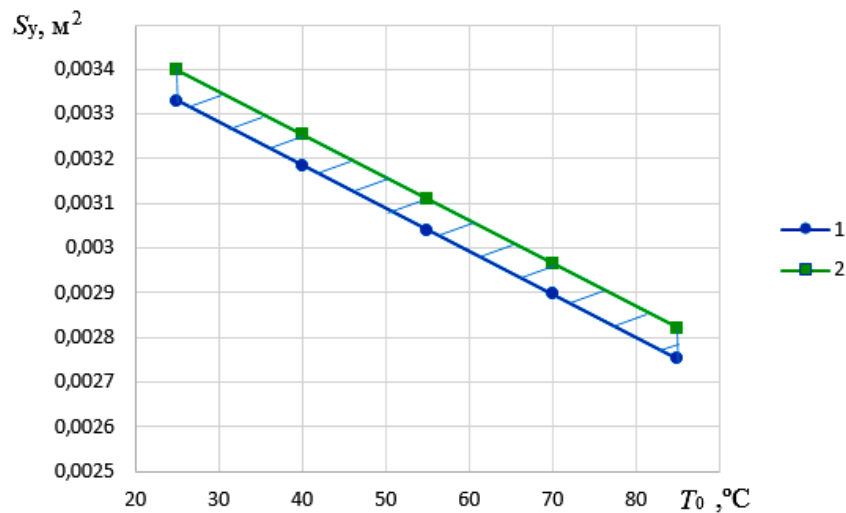


Рисунок 2.6 – Влияние температуры окружающей среды на оптимальную установочную площадь ЭМ при  $z_1 \div z_3, z_6 \div z_8 = 0$ :  
1 – при  $\Theta_{\text{доп}} = 115^\circ\text{C}$ ; 2 –  $\Theta_{\text{доп}} = 155^\circ\text{C}$

## 2.5 Синтез втяжных броневых электромагнитов, минимизированных по высоте

Оптимизация форсированного ВБЭМ по высоте электромагнита выполнена на основании формулы (2.23).

Результаты оптимизации представлены в виде полиномиальных зависимостей:

$$H_{\text{эм}}^* = 2,822;$$

$$\delta_{\text{опт}}^* = 10^{-4} (56,8 + 6,79z_1 - 3,42z_2 - 1,25z_3 - 1,69z_4 + 1,03z_5 + 1,48z_7 + 0,83z_8 + 1,35z_2^2)^2;$$

$$H_{\text{опт}}^* = 1,800;$$

$$A_{\text{опт}}^* = 0,9192;$$

$$H_{\text{ст.опт}}^* = 10^{-2} (45,4 + 1,14z_2);$$

$$H_{\text{в.опт}}^* = 10^{-2} (32,3 + 0,66z_2 + 0,64z_4);$$

$$R_{\text{д.опт}}^* = 10^{-12} (99,7 + 6,81z_1 - 2,15z_2 - 3,90z_3 - 1,90z_4 + 1,27z_5 + 2,15z_6 + 4,62z_7 - 1,72z_1^2)^6;$$

$$B_{\text{м.ср}} = 10^{-4} (86,5 + 2,01z_1 + 4,34z_2 - 2,16z_3 - 2,97z_4 + 1,84z_5 + 2,80z_7 + 1,55z_8 - 1,08z_2^2)^2;$$

$$B_{\text{м.опт}} = 10^{-4} (99,8 + 5,99z_2 + 2,40z_3 - 2,46z_4 + 1,52z_5 + 2,28z_7 + 1,25z_8 - 1,58z_2^2)^2;$$

$$F_{\text{ср}}^* = 10^{-4} (69,1 + 6,70z_1 - 3,62z_2 - 1,33z_3 - 1,84z_4 + 1,12z_5 + 1,59z_7 + 0,89z_8 - 0,81z_1^2 + 1,14z_2^2)^2;$$

$$F_{\text{опт}}^* = 10^{-2} (8,99 - 0,40z_2 - 0,14z_3 - 0,21z_4 + 0,12z_5 + 0,15z_7 + 0,09z_8 + 0,17z_2^2);$$

$$P_{\text{п}}^* = 10^{-8} (109,3 + 17,1z_1 - 8,99z_2 - 3,29z_3 - 4,39z_4 + 2,66z_5 + 3,34z_6 + 3,93z_7 - 1,39z_1^2 + 3,31z_2^2)^4;$$

$$P_{\text{уд}}^* = 10^{-8} (65,0 + 7,31z_1 - 4,48z_2 - 3,29z_3 - 1,87z_4 + 1,16z_5 + 1,05z_6 - 0,73z_8 - 0,80z_1^2 + 1,68z_2^2)^4;$$

$$P_{\text{удо}}^* = 10^{-8} (54,4 + 3,76z_1 - 3,07z_2 - 1,29z_3 - 1,21z_4 + 0,78z_5 - 1,48z_7 - 0,74z_8 + 1,18z_2^2)^4.$$

Усредненная величина расхождений между оптимальными и рассчитанными по полиномам значениями:  $\Delta H_{\text{эм}}^* = 0\%$ ;  $\Delta \delta_{\text{опт}}^* = -2,37\%$ ;  $\Delta H_{\text{опт}}^* = 0\%$ ;  $\Delta A_{\text{опт}}^* = -0,05\%$ ;

$$\Delta H_{\text{ст.опт}}^* = 1,65\%; \quad \Delta H_{\text{в.опт}}^* = 0,13\%; \quad \Delta R_{\text{д.опт}}^* = -0,23\%; \quad \Delta B_{\text{м.ср}} = 1,51\%; \quad \Delta B_{\text{м.опт}} = 0,94\%;$$

$$\Delta F_{\text{ср}}^* = -0,88\%; \quad \Delta F_{\text{опт}}^* = -1,49\%; \quad \Delta P_{\text{п}}^* = -1,74\%; \quad \Delta P_{\text{уд}}^* = -1,11\%; \quad \Delta P_{\text{удо}}^* = -1,82\%.$$

Максимальные расхождения между оптимальными и рассчитанными по полиномам значениями:  $-0,79\% \leq \Delta H_{\text{эм}}^* \leq 0,98\%$ ;  $-6,80\% \leq \Delta \delta_{\text{опт}}^* \leq 5,02\%$ ;  $-0,24\% \leq \Delta A_{\text{опт}}^* \leq 0,08\%$ ;

$$-3,62\% \leq \Delta H_{\text{ст.опт}}^* \leq 7,81\%; \quad -6,66\% \leq \Delta H_{\text{в.опт}}^* \leq 4,38\%; \quad -11,7\% \leq \Delta R_{\text{д.опт}}^* \leq 2,67\%;$$

$$-4,35\% \leq \Delta B_{\text{м.ср}} \leq 5,21\%; \quad -5,31\% \leq \Delta B_{\text{м.опт}} \leq 4,44\%; \quad -4,47\% \leq \Delta F_{\text{ср}}^* \leq 3,49\%;$$

$$-5,56 \% \leq \Delta F_{\text{опт}}^* \leq 4,42 \% ; -9,14 \% \leq \Delta P_{\text{п}}^* \leq 6,05 \% ; -7,54 \% \leq \Delta P_{\text{уд}}^* \leq 5,35 \% ;$$

$$-6,27 \% \leq \Delta P_{\text{удо}}^* \leq 4,69 \% .$$

## 2.6 Синтез втяжных броневых электромагнитов, минимизированных по габаритному объему

Оптимизация форсированного ВБЭМ по габаритному объему выполнена на основании формулы (2.24).

Результаты оптимизации представлены в виде полиномиальных зависимостей:

$$V_{\text{габ}}^* = 10^{-8} (505,9 - 93,2z_1 + 46,5z_2 + 17,1z_3 + 17,6z_4 - 12,3z_5 - 19,6z_7 - 10,9z_8 + 23,6z_1^2 - 11,0z_2^2 - 8,48z_1z_2)^4 ;$$

$$\delta_{\text{опт}}^* = 10^{-4} (64,5 + 7,68z_1 - 3,98z_2 - 1,33z_3 - 1,16z_4 + 0,99z_5 + 1,48z_7 + 0,87z_8 - 0,71z_1^2 + 1,27z_2^2)^2 ;$$

$$H_{\text{опт}}^* = 10^{-2} (441,0 - 5,48z_1 + 47,5z_4 - 10,8z_5 - 5,23z_7 + 8,15z_4^2 + 4,41z_5^2 + 5,65z_1z_2 - 7,09z_4z_5) ;$$

$$A_{\text{опт}}^* = 10^{-2} (62,7 - 4,29z_4 + 1,30z_5 + 0,85z_4^2) ;$$

$$H_{\text{ст.опт}}^* = 0,480 ;$$

$$H_{\text{в.опт}}^* = 0,4257 ;$$

$$R_{\text{д.опт}}^* = 10^{-8} (101,9 + 5,55z_1 - 4,19z_3 - 4,57z_4 + 1,90z_5 + 2,23z_6 + 4,88z_7 - 1,04z_4^2 + 1,04z_4z_5)^4 ;$$

$$B_{\text{м.ср}} = 10^{-4} (108,9 + 2,05z_1 + 2,61z_2 - 1,87z_3 + 1,22z_5 + 2,15z_7 + 1,26z_8 - 1,61z_2^2)^2 ;$$

$$B_{\text{м.опт}} = 10^{-4} (113,3 + 1,99z_2 + 1,18z_3 + 1,29z_4 - 1,89z_2^2 + 1,32z_4^2)^2 ;$$

$$F_{\text{ср}}^* = 10^{-4} (75,1 + 6,19z_1 - 3,17z_2 - 1,78z_3 - 2,43z_4 + 1,44z_5 + 2,03z_7 + 1,12z_8 + 1,53z_2^2)^2 ;$$

$$F_{\text{опт}}^* = 10^{-2} (9,87 - 0,13z_1 - 0,52z_2 + 0,55z_4 + 0,11z_7 + 0,16z_2^2 + 0,27z_4^2 + 0,11z_1z_2 - 0,18z_4z_5) ;$$

$$P_{\text{п}}^* = 10^{-8} (104,8 + 10,2z_1 - 4,89z_2 - 2,64z_3 - 3,70z_4 + 1,86z_5 + 2,107z_6 + 3,07z_7 + 2,33z_2^2 - 1,07z_1z_2)^4 ;$$

$$P_{\text{уд}}^* = 10^{-8} (63,0 + 6,69z_1 - 4,01z_2 - 3,37z_3 - 1,54z_4 + 0,99z_5 + 1,04z_6 + 1,85z_2^2)^4 ;$$

$$P_{\text{удо}}^* = 10^{-8} (51,6 + 3,54z_1 - 3,02z_2 - 1,16z_3 + 0,53z_4 - 1,46z_7 - 0,72z_8 - 0,64z_1^2 + 1,11z_2^2)^4 .$$

Усредненная величина расхождений между оптимальными и рассчитанными по полиномам значениями:  $\Delta V_{\text{габ}}^* = -0,57 \% ; \Delta \delta_{\text{опт}}^* = -0,03 \% ; \Delta H_{\text{опт}}^* = 0,52 \% ; \Delta A_{\text{опт}}^* = 0,32 \% ;$

$$\Delta H_{\text{ст.опт}}^* = 0\%; \quad \Delta H_{\text{в.опт}}^* = 0,52\%; \quad \Delta R_{\text{д.опт}}^* = -0,68\%; \quad \Delta B_{\text{м.кр}} = 1,95\%; \quad \Delta B_{\text{м.опт}} = 2,48\%;$$

$$\Delta F_{\text{кр}}^* = -1,41\%; \quad \Delta F_{\text{отп}}^* = 0,91\%; \quad \Delta P_{\text{п}}^* = -3,36\%; \quad \Delta P_{\text{уд}}^* = -1,75\%; \quad \Delta P_{\text{удо}}^* = 0,82\%.$$

Максимальные расхождения между оптимальными и рассчитанными по полиномам значениями:  $-9,93\% \leq \Delta V_{\text{габ}}^* \leq 7,06\%$ ;  $-5,15\% \leq \Delta \delta_{\text{отп}}^* \leq 4,36\%$ ;  $-6,94\% \leq \Delta H_{\text{отп}}^* \leq 5,49\%$ ;  
 $-4,96\% \leq \Delta A_{\text{отп}}^* \leq 2,56\%$ ;  $-4,6\% \leq \Delta H_{\text{в.опт}}^* \leq 1,91\%$ ;  $-8,70\% \leq \Delta R_{\text{д.опт}}^* \leq 6,1\%$ ;  
 $-6,22\% \leq \Delta B_{\text{м.кр}} \leq 5,25\%$ ;  $-9,23\% \leq \Delta B_{\text{м.опт}} \leq 6,83\%$ ;  $-6,21\% \leq \Delta F_{\text{кр}}^* \leq 4,69\%$ ;  
 $-4,33\% \leq \Delta F_{\text{отп}}^* \leq 6,3\%$ ;  $-11,5\% \leq \Delta P_{\text{п}}^* \leq 7,79\%$ ;  $-8,61\% \leq \Delta P_{\text{уд}}^* \leq 6,13\%$ ;  
 $-2,17\% \leq \Delta P_{\text{удо}}^* \leq 6,99\%$ .

На рисунке 2.7 проиллюстрировано влияние критического рабочего воздушного зазора при различных значениях факторов  $z_1$  и  $z_2$  на оптимальный габаритный объем ЭМ при  $P_{\text{мх. кр}} = 2$  Н и  $P_{\text{мх. кр}} = 28$  Н.

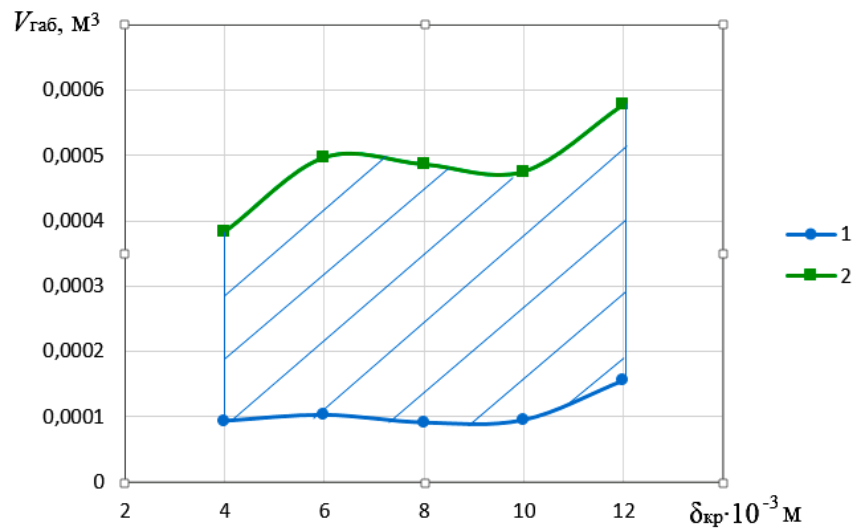


Рисунок 2.7 – Влияние критического рабочего воздушного зазора на оптимальный габаритный объем ЭМ при  $z_3 \div z_8 = 0$ :  
 1 – при  $P_{\text{мх. кр}} = 2$  Н; 2 – при  $P_{\text{мх. кр}} = 28$  Н



## 2.7 Выводы

1 Усовершенствована методика синтеза форсированного однообмоточного ВБЭМ в схеме с балластным резистором. Методика учитывает условия срабатывания, возврата и нагрева магнитной системы и представляет собой методику оптимизации, в основу которой заложен проектный расчет, в котором по полученному уравнению находятся размеры магнитной системы.

2. В результате синтеза форсированного однообмоточного ВБЭМ получены полиномиальные зависимости по критериям качества: объем, масса и стоимость активных материалов, установочная площадь, высота и габаритный объем электромагнита.

3. Полиномиальные зависимости наглядно позволяют оценить степень влияния параметров на исследуемые характеристики ЭМ.

4. Для критерия оптимальности стоимость активных материалов получены универсальные формулы в виде полиномов, которые позволяют производить расчет при разных кратностях отношения цены 1 кг обмоточной меди к 1 кг ферромагнитной стали.

5. В ходе исследований было установлено, что при разных критериях качества оптимальные относительные высота стопа в долях высоты обмотки и воротничка в долях диаметра якоря имеют значение 0,48 и 0,45 соответственно.

6. Максимальная величина расхождений между оптимальными и рассчитанными по полиномам значениями не превышает 12 %, что подтверждает приемлемое качество полученных результатов.

### РАЗДЕЛ 3 РАЗРАБОТКА МЕТОДИК СИНТЕЗА ФОРСИРОВАННЫХ ДВУХОБМОТОЧНЫХ ЭМ МИНИМИЗИРОВАННЫХ ПО ОСНОВНЫМ КРИТЕРИЯМ

Двухобмоточные ВБЭМ (рисунок 3.1) отличаются от однообмоточных наличием двух обмоток пусковой (низкоомной) и удерживающей (высокоомной). В работе рассматривается коаксиальное размещение обмоток. Как и в методике, предложенной в главе 2 необходимо задаться кратностями основных соизмерностей магнитной системы. Для двухобмоточных электромагнитов добавится параметр толщина пусковой обмотки, взятая в долях от толщины окна:  $A_{п*} = A_{п} / A_0$ .

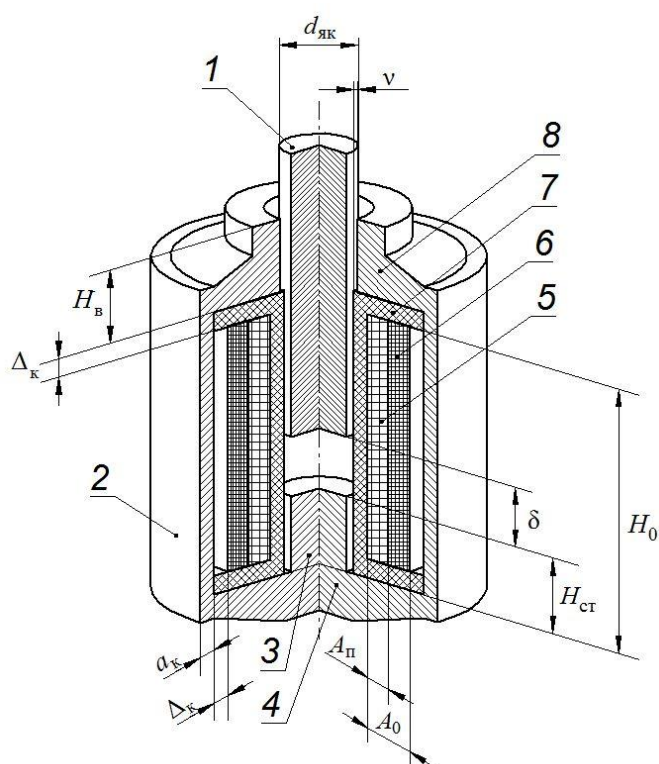


Рисунок 3.1 – Эскиз двухобмоточного ВБЭМ: 1 – якорь; 2 – корпус; 3 – стоп; 4 – опорный фланец; 5 – пусковая обмотка; 6 – удерживающая обмотка; 7 – каркас катушки; 8 – проходной фланец

#### 3.1 Синтез электромагнитов с коаксиальным размещением пусковой и удерживающей обмоток

Синтез электромагнитов с коаксиальным размещением пусковой и удерживающей обмоток осуществляется по схеме форсировки, представленной на рисунке 1.4, г. Записываются три уравнения:

– срабатывания ЭМ

$$F_{\text{сп}} = \frac{U_{\text{сп}}}{R_{\text{пор}}} N_{\text{по}} = \frac{K_{U_{\text{min}}} U_{\text{ном}}}{K_{U_{\text{сп}}} R_{\text{пор}}} N_{\text{по}}; \quad (3.1)$$

– возврата ЭМ

$$F_{\text{отп}} = \frac{U_{\text{отп}}}{R_{\text{yoх}}} N_{\text{yo}} = \frac{K_{\text{отп}} K_{U_{\text{отп}}} U_{\text{ном}}}{R_{\text{yoх}}} N_{\text{yo}} ; \quad (3.2)$$

– нагрева

$$\Theta_{m^*} = f(x_1, x_{22}, x_{55}, x_8, x_9), \quad (3.3)$$

где  $R_{\text{пог}}$  – сопротивление пусковой обмотки в горячем состоянии;

$R_{\text{yoх}}$  – сопротивление удерживающей обмотки в холодном состоянии;

$N_{\text{по}}, N_{\text{yo}}$  – число витков пусковой и удерживающей обмоток соответственно.

Запишем выражение рассеиваемой мощности в режиме удержания:

$$P_{\text{уд.р}} = q_y H_0 A_0 (1 - A_{\text{п}^*}) \pi d_{\text{як}} (1 + 2\Delta_* + (A_{\text{п}^*} + 1)A_*), \quad (3.4)$$

а также потребляемой мощности:

$$\frac{U_{\text{max}}^2}{R_{\text{yoг}}} = \left( K_{U_{\text{max}}} \frac{\rho_x}{\rho_{\text{yoг}}} \frac{F_{\text{отп}}}{K_{\text{отп}} K_{U_{\text{отп}}}} \right)^2 \frac{\rho_{\text{yoг}} \pi d_{\text{як}} (1 + 2\Delta_* + (A_{\text{п}^*} + 1)A_*)}{H_0 A_0 (1 - A_{\text{п}^*}) K_{3\text{yo}}}, \quad (3.5)$$

где  $K_{3\text{yo}}$  – коэффициент заполнения удерживающей обмотки;

$\rho_{\text{yoг}}$  – удельное сопротивление удерживающей обмотки в горячем состоянии.

Из равенства мощностей (3.4) и (3.5) и после преобразований получим:

$$\frac{q_{\text{yo}} K_{3\text{yo}} (H_0 A_0 (1 - A_{\text{п}^*}))^2}{\rho_{\text{yoг}}} = \left( K_{U_{\text{max}}} \frac{\rho_x}{\rho_{\text{yoг}}} \frac{F_{\text{отп}}}{K_{\text{отп}} K_{U_{\text{отп}}}} \right)^2. \quad (3.6)$$

На основании (3.3) и (1.15):

$$x_9 = \frac{100 \cdot \Theta_{\text{д}^*} - (164,5 + 11,7x_1 + 18,1x_{55} - 7x_{22} - 12,5x_8 - 2,9x_1^2 + 6,4x_8^2 + 3,7x_1x_{55} - 2,5x_1x_8 - 2,8x_{55}x_8 - 2,5x_{55}x_8)}{14,2 + 2,2x_1 + 3,4x_{55}}; \quad (3.7)$$

Магнитодвижущие силы срабатывания и возврата считаются по формулам (2.13), (2.14) соответственно при

$$x_7 = \begin{cases} 4,237B_m - 5,508 & \text{при } P_{\text{эмг}} \geq P_{\text{мк кр}}, \\ 4,237B_{m\text{г}} - 5,508 & \text{при } P_{\text{эмг}} \leq P_{\text{мк кр}}. \end{cases}$$

В режиме удержания  $q_{\text{по}} = 0$  и  $x_{10} = 8,183q_* - 2,046$  примет значение  $x_{10} = -2,046$ ,  
 $q_* = q_{\text{п}} / q_y$ .

Для данной методики получена формула кратности числа витков  $n = \frac{N_{\text{yo}}}{N_{\text{по}}}$ .

Выразим из (3.2)  $\frac{U_{\text{ном}}}{R_{\text{уог}}} N_{\text{yo}}$ :

$$\frac{U_{\text{ном}}}{R_{\text{уог}}} N_{\text{yo}} = \frac{F_{\text{отп}}}{K_{\text{отп}} K_{U_{\text{отп}}}}. \quad (3.8)$$

Из (3.1) выразим  $\frac{U_{\text{ном}}}{R_{\text{пог}}} N_{\text{по}}$  и приравняем к (3.9), умножив на недостающие параметры:

$$\frac{U_{\text{ном}}}{R_{\text{пог}}} N_{\text{по}} \cdot \frac{N_{\text{yo}}}{R_{\text{уох}}} = \frac{F_{\text{отп}}}{K_{\text{отп}} K_{U_{\text{отп}}}} \cdot \frac{N_{\text{по}}}{R_{\text{пог}}}.$$

Проведем преобразования выражения с учетом того, что  $R_{\text{пог}} = \frac{\rho_{\text{пог}} l_{\text{ср по}} N_{\text{по}}^2}{H_0 A_{\text{п}} K_{\text{з по}}}$  и

$$R_{\text{уох}} = \frac{\rho_{\text{x}} l_{\text{ср yo}} N_{\text{yo}}^2}{H_0 A_{\text{y}} K_{\text{з yo}}};$$

$$\frac{U_{\text{ном}}}{R_{\text{пог}}} N_{\text{по}} = \frac{F_{\text{отп}}}{K_{\text{отп}} K_{U_{\text{отп}}}} \cdot \frac{N_{\text{по}}}{R_{\text{пог}}} \cdot \frac{R_{\text{уох}}}{N_{\text{yo}}} = \frac{F_{\text{отп}}}{K_{\text{отп}} K_{U_{\text{отп}}}} \cdot \frac{\rho_{\text{x}}}{\rho_{\text{пог}}} \cdot \frac{l_{\text{ср yo}}}{l_{\text{ср по}}} \cdot \frac{K_{\text{з по}}}{K_{\text{з yo}}} \cdot \frac{A_{\text{п}}}{A_{\text{y}}} \cdot \frac{N_{\text{yo}}}{N_{\text{по}}}. \quad (3.9)$$

В соответствии с (3.1) получим:

$$\frac{U_{\text{ном}}}{R_{\text{пог}}} N_{\text{по}} = \frac{F_{\text{ср}} K_{U_{\text{ср}}}}{K_{U_{\text{мин}}}} = \frac{F_{\text{отп}}}{K_{\text{отп}} K_{U_{\text{отп}}}} \cdot \frac{\rho_{\text{x}}}{\rho_{\text{пог}}} \cdot \frac{l_{\text{ср yo}}}{l_{\text{ср по}}} \cdot \frac{K_{\text{з по}}}{K_{\text{з yo}}} \cdot \frac{A_{\text{п}}}{A_{\text{y}}} \cdot \frac{N_{\text{yo}}}{N_{\text{по}}}. \quad (3.10)$$

Из 3.11 найдем искомую кратность количества витков  $\frac{N_{\text{yo}}}{N_{\text{по}}} = n$ :

$$n = \frac{\left( \frac{F_{\text{ср}}}{F_{\text{отп}}} K_{\text{max}} K \right)}{\frac{\rho_{\text{x}}}{\rho_{\text{пог}}} \frac{l_{\text{ср yo}}}{l_{\text{ср по}}} \frac{K_{\text{з по}}}{K_{\text{з yo}}} \frac{A_{\text{п}^*}}{1 - A_{\text{п}^*}}}, \quad (3.11)$$

где  $\frac{l_{\text{ср yo}}}{l_{\text{ср по}}} = \frac{(1 + 2\Delta_* + (A_{\text{п}^*} + 1)A_*)}{(1 + 2\Delta_* + A_{\text{п}^*}A_*)}$ ;

$l_{\text{ср yo}}$  – средняя длина витка удерживающей обмотки;

$l_{\text{ср по}}$  – средняя длина витка пусковой обмотки.

С учетом (3.1), (3.2), (3.6) выводится уравнение для проектного расчета:

$$f(d_{\text{як}}) = d_{\text{як}}^2 H_* A_* (1 - A_{\text{п}^*}) \sqrt{\frac{q_{\text{yo}} K_{\text{з yo}}}{\rho_{\text{уог}}} - \frac{\rho_{\text{x}}}{\rho_{\text{уог}}} \frac{F_{\text{отп}} K_{U_{\text{max}}}}{K_{\text{отп}} K_{U_{\text{отп}}}}} = 0. \quad (3.12)$$

Уравнение, как и в разделе 2, решается численным методом – методом деления отрезка пополам.

Расчет оптимальных параметров осуществляется по блок-схеме, приведенной на рисунке 3.2. Характерные уровни факторов представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Характерные уровни факторов

$Z_i \backslash z_i$	-2,045	-1	0	+1	+2,045
$Z_1 = \delta_{кр} \cdot 10^{-3}, \text{ м}$	4	6,04	8	9,96	12
$Z_2 = P_{\text{мх.кр}}, \text{ Н}$	2	8,64	15	21,36	28
$Z_3 = P_{\text{мх.к}} / P_{\text{мх.кр}}$	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5
$Z_4 = T_0, \text{ }^\circ\text{C}$	25	40,3	55	69,6	85
$Z_5 = \Theta_{\text{доп}}, \text{ }^\circ\text{C}$	115	125,1	135	145,1	155
$Z_6 = K_{\text{max}}$	1,30	1,402	1,50	1,598	1,70
$Z_7 = K_{3\text{yo}}$	0,30	0,34	0,37	0,40	0,44
$Z_8 = K_{3\text{по}}$	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60

$$z_1 = 0,51\delta_{кр} - 4,082; 4 \text{ мм} \leq \delta_{кр} \leq 12 \text{ мм};$$

$$z_2 = 0,1573P_{\text{мх.кр}} - 2,36; 2 \text{ Н} \leq P_{\text{мх.кр}} \leq 28 \text{ Н};$$

$$z_3 = 2,045P_{\text{мх.к}} - 7,157; 2,5 \leq P_{\text{мх.к}} = P_{\text{мх.к}} / P_{\text{мх.кр}} \leq 4,5;$$

$$z_4 = 0,0682T_0 - 3,749; 25 \text{ }^\circ\text{C} \leq T_0 \leq 85 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$z_5 = 0,1\Theta_{\text{доп}} - 13,5; 105 \text{ }^\circ\text{C} \leq \Theta_{\text{доп}} \leq 155 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$z_6 = 10,2K_{\text{max}} - 15,31; 1,30 \leq K_{\text{max}} \leq 1,70;$$

$$z_7 = 29,41K_{3\text{yo}} - 10,88; 0,30 \leq K_{3\text{yo}} \leq 0,44;$$

$$z_8 = 20,41K_{3\text{по}} - 10,2; 0,40 \leq K_{3\text{по}} \leq 0,60.$$

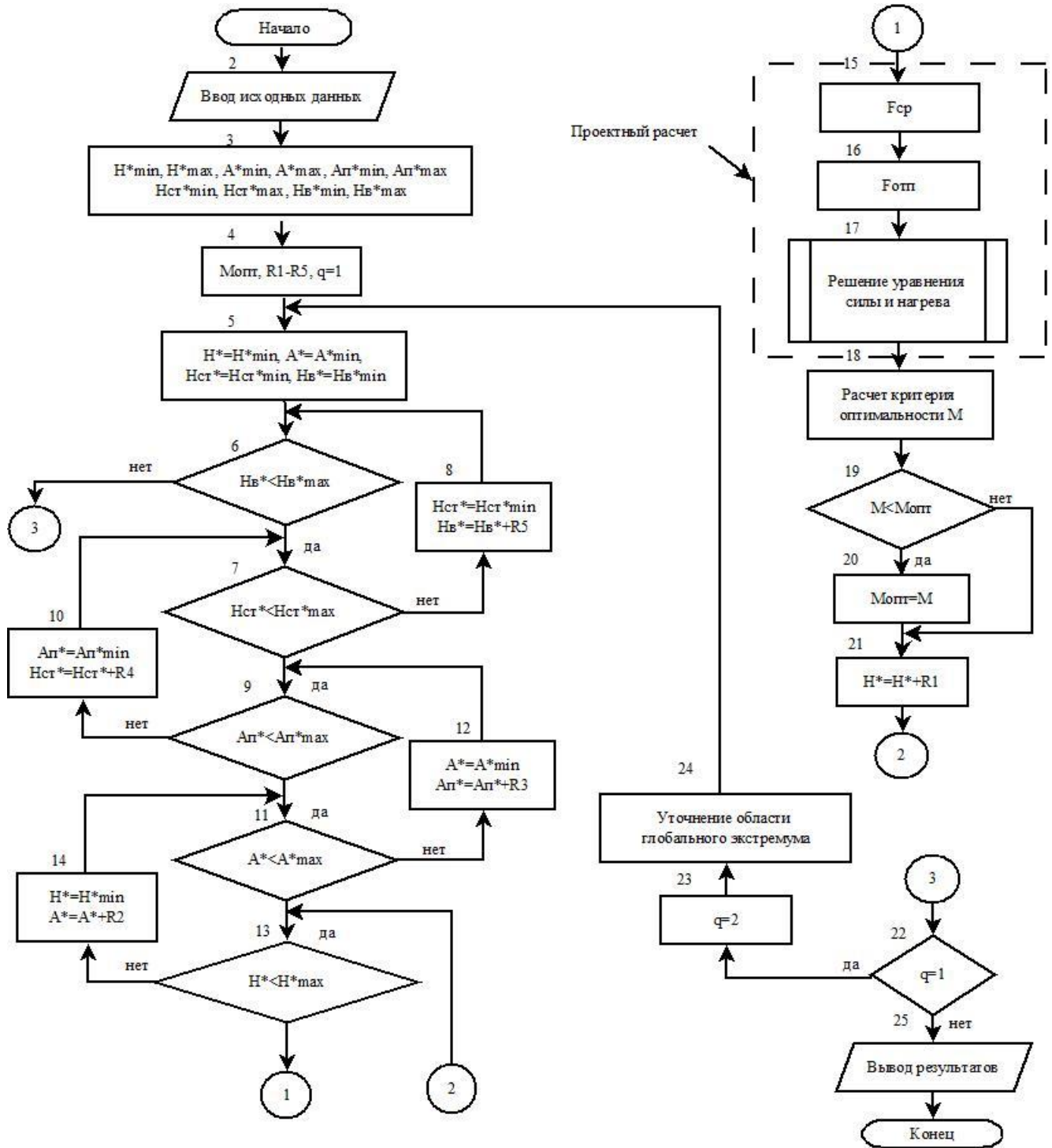


Рисунок 3.2 – Блок-схема методики оптимального проектирования форсированных двухобмоточных электромагнитов в схеме с пусковой и удерживающими обмотками

Результаты проектирования оптимальных форсированных двухобмоточных ВБЭМ по объему активных материалов (формула 2.19):

$$\ln V_a^* = 10^{-2}(533,9 - 73,5z_1 + 34,4z_2 + 8,95z_3 + 17,8z_4 - 10,1z_5 + 10,9z_1^2 - 11,5z_2^2);$$

$$\delta_{\text{опт}}^* = 10^{-4}(68,2 + 8,38z_1 - 4,07z_2 - 1,13z_3 - 1,55z_4 + 1,35z_5 - 0,77z_1^2 + 1,42z_2^2)^2;$$

$$H_{\text{опт}}^* = 10^{-4}(243,4 + 15,0z_4 - 4,68z_4^2)^2;$$

$$A_{\text{опт}}^* = 10^{-4}(79,6 - 5,31z_4 + 1,6z_5 - 0,85z_7 + 1,37z_4^2)^2;$$

$$A_{\text{п.опт}}^* = 0,2;$$

$$H_{\text{ст.опт}}^* = 0,500;$$

$$H_{\text{в.опт}}^* = 0,500;$$

$$B_{\text{м.ср}} = 10^{-8}(91,6 + 2,43z_2 - 2,91z_4 + 1,07z_5)^4;$$

$$B_{\text{м.опт}} = 10^{-4}(90,5 + 4,95z_2 + 1,58z_3 - 3,06z_4 + 1,9z_5 + 0,91z_7 - 1,51z_2^2 + 0,93z_4^2)^2;$$

$$\Theta_{\text{вп.опт}}^* = 10^{-2}(94,5 + 2,18z_4);$$

$$\Theta_{\text{вы.опт}}^* = 10^{-2}(94,9 + 1,55z_4);$$

$$F_{\text{ср}}^* = 10^{-8}(91,3 + 4,10z_1 - 2,55z_2 + 1,43z_2^2)^4;$$

$$F_{\text{опт}}^* = 10^{-4}(29,7 - 0,86z_2 + 0,33z_4)^2;$$

$$P_{\text{п}}^* = 10^{-12}(138,3 + 14,0z_1 - 7,81z_2 - 2,27z_3 - 3,13z_4 + 2,7z_5 + 3,0z_6 + 1,69z_7 - 2,26z_8 + 4,29z_2^2)^6;$$

$$P_{\text{уд}}^* = 10^{-8}(56,7 + 3,51z_1 - 3,27z_2 - 0,98z_3 + 0,61z_4 - 0,6z_1^2 + 1,24z_2^2)^4;$$

$$n = 10^{-8}(153,4 + 6,85z_1 - 2,08z_2 - 3,21z_3 - 1,85z_4 + 2,5z_6 - 3,77z_8 + 1,63z_2^2)^4.$$

Усредненная величина расхождений между оптимальными и рассчитанными по полиномам значениями:  $\Delta \ln V_a^* = -0,37\%$ ;  $\Delta \delta_{\text{опт}}^* = -1,26\%$ ;  $\Delta H_{\text{опт}}^* = -3,78\%$ ;  $\Delta A_{\text{опт}}^* = 1,78\%$ ;  $\Delta A_{\text{п.опт}}^* = 0\%$ ;  $\Delta H_{\text{ст.опт}}^* = 0\%$ ;  $\Delta H_{\text{в.опт}}^* = 0\%$ ;  $\Delta B_{\text{м.ср}} = 1,08\%$ ;  $\Delta B_{\text{м.опт}} = 0,53\%$ ;  $\Delta \Theta_{\text{вп.опт}} = -0,61\%$ ;  $\Delta \Theta_{\text{вы.опт}} = -0,15\%$ ;  $\Delta F_{\text{ср}}^* = -2,49\%$ ;  $\Delta F_{\text{опт}}^* = -1,81\%$ ;  $\Delta P_{\text{п}}^* = -3,49\%$ ;  $\Delta P_{\text{уд}}^* = -2,02\%$ ;  $\Delta n = -1,45\%$ .

Максимальные расхождения между оптимальными и рассчитанными по полиномам значениями:  $-7,22\% \leq \Delta \ln V_a^* \leq 1,64\%$ ;  $-6,36\% \leq \Delta \delta_{\text{опт}}^* \leq 4,76\%$ ;  $-8,85\% \leq \Delta H_{\text{опт}}^* \leq 5,09\%$ ;  $-0,84\% \leq \Delta A_{\text{опт}}^* \leq 6,87\%$ ;  $-9,43\% \leq \Delta B_{\text{м.ср}} \leq 7,51\%$ ;  $-7,53\% \leq \Delta B_{\text{м.опт}} \leq 7,59\%$ ;  $-2,15\% \leq \Delta \Theta_{\text{вп.опт}} \leq 1,47\%$ ;  $-1,38\% \leq \Delta \Theta_{\text{вы.опт}} \leq 1,26\%$ ;  $-6,12\% \leq \Delta F_{\text{ср}}^* \leq 4,9\%$ ;  $-6,10\% \leq \Delta F_{\text{опт}}^* \leq 7,16\%$ ;  $-8,35\% \leq \Delta P_{\text{п}}^* \leq 7,7\%$ ;  $-3,80\% \leq \Delta P_{\text{уд}}^* \leq 5,64\%$ ;  $-11,9\% \leq \Delta n \leq 8,71\%$ .

На рисунке 3.3 проиллюстрировано влияние критического рабочего воздушного зазора при различных значениях факторов  $z_1$  и  $z_2$  на оптимальный объем активных материалов в ЭМ при  $P_{\text{мх.кр}} = 2 \text{ Н}$  и  $P_{\text{мх.кр}} = 28 \text{ Н}$ .

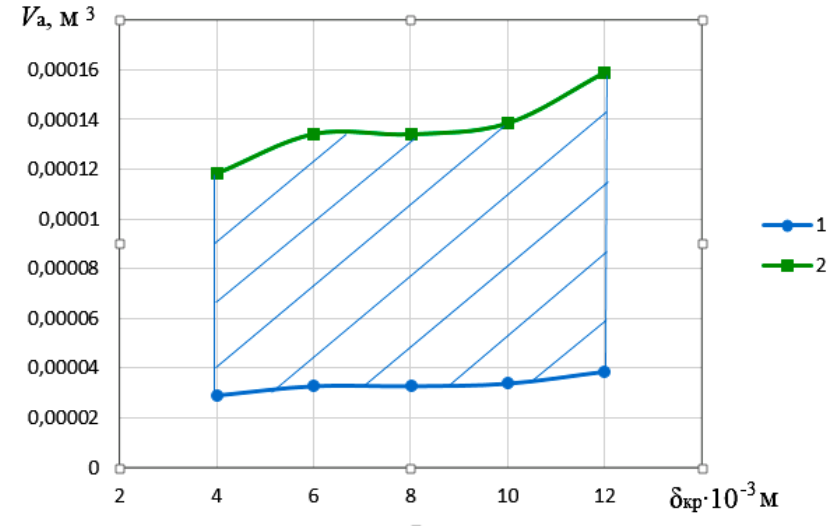


Рисунок 3.3 – Влияние критического рабочего воздушного зазора на оптимальный объем активных материалов в ЭМ при  $z_3 \div z_8 = 0$ :  
1 – при  $P_{\text{мх.кр}} = 2 \text{ Н}$ ; 2 – при  $P_{\text{мх.кр}} = 28 \text{ Н}$

Результаты проектирования оптимальных форсированных двухобмоточных ВБЭМ по массе активных материалов (формула 2.20):

$$\ln m_a^* = 10^{-2} (538,8 - 75,3z_1 + 34,5z_2 + 10,6z_3 + 16,6z_4 - 10,8z_5 + 11,1z_1^2 - 11,3z_2^2);$$

$$\delta_{\text{опт}}^* = 10^{-4} (68,0 + 8,45z_1 - 3,94z_2 - 1,2z_3 - 1,55z_4 + 1,31z_5 - 0,77z_1^2 + 1,44z_2^2)^2;$$

$$H_{\text{опт}}^* = 10^{-2} (592,3 + 66,4z_4 - 8,24z_5 - 6,07z_1^2 - 20,3z_4^2 - 9,49z_5^2 + 7,79z_4z_5);$$

$$A_{\text{опт}}^* = 10^{-2} (61,2 - 8,18z_4 + 2,41z_5 - 1,46z_7 + 2,23z_4^2);$$

$$A_{\text{п.опт}}^* = 0,2;$$

$$H_{\text{ст.опт}}^* = 0,5;$$

$$H_{\text{в.опт}}^* = 0,5;$$

$$B_{\text{м.кр}} = 10^{-2} (70,3 + 8,08z_2 - 2,74z_3 - 9,31z_4 + 3,20z_5 + 1,66z_7 + 2,7z_4^2 + 0,78z_5^2 - 1,07z_2z_4);$$

$$B_{\text{м.опт}} = 10^{-2} (81,3 + 9,09z_2 + 2,84z_3 - 5,41z_4 + 3,35z_5 + 1,64z_7 - 2,09z_2^2 + 1,74z_4^2);$$

$$\Theta_{\text{вп.опт}}^* = 10^{-2} (94,7 + 2,18z_4);$$

$$\Theta_{\text{вы.опт}}^* = 10^{-2} (95,1 + 1,57z_4);$$

$$F_{\text{кр}}^* = 10^{-8} (91,2 + 4,11z_1 - 2,49z_2 + 1,47z_2^2)^4;$$



$$F_{\text{отп}}^* = 10^{-4}(29,6 - 0,85z_2 + 0,3z_4)^2;$$

$$P_{\text{п}}^* = 10^{-12}(134,1 + 14,1z_1 - 7,67z_2 - 2,37z_3 - 3,14z_4 + 2,66z_5 + 2,99z_6 + 1,71z_7 - 1,95z_8 + 5,49z_2^2 - 4,59z_8^2)^6;$$

$$P_{\text{уд}}^* = 10^{-8}(56,5 + 3,53z_1 - 3,25z_2 - z_3 + 0,61z_4 - 0,66z_7 + 1,3z_2^2)^4;$$

$$n = 10^{-8}(149,9 + 6,98z_1 - 1,96z_2 - 3,32z_3 - 1,89z_4 + 2,5z_6 + 4,19z_7 + 2,66z_2^2 - 3,63z_8^2)^4.$$

Усредненная величина расхождений между оптимальными и рассчитанными по полиномам значениями:  $\Delta \ln m_a^* = -0,02\%$ ;  $\Delta \delta_{\text{отп}}^* = -1,27\%$ ;  $\Delta H_{\text{отп}}^* = -4,35\%$ ;  $\Delta A_{\text{отп}}^* = 3,79\%$ ;  $\Delta A_{\text{п.отп}}^* = 0\%$ ;  $\Delta H_{\text{ст.отп}}^* = 0\%$ ;  $\Delta H_{\text{в.отп}}^* = 0\%$ ;  $\Delta B_{\text{м.ср}} = 0,99\%$ ;  $\Delta B_{\text{м.отп}} = 0,90\%$ ;  $\Delta \Theta_{\text{в.п.отп}} = -0,63\%$ ;  $\Delta \Theta_{\text{в.у.отп}} = -0,16\%$ ;  $\Delta F_{\text{ср}}^* = -2,53\%$ ;  $\Delta F_{\text{отп}}^* = -1,70\%$ ;  $\Delta P_{\text{п}}^* = 2,03\%$ ;  $\Delta P_{\text{уд}}^* = -2,27\%$ ;  $\Delta n = 2,70\%$ .

Максимальные расхождения между оптимальными и рассчитанными по полиномам значениями:  $-7,12\% \leq \Delta \ln m_a^* \leq 4,63\%$ ;  $-6,82\% \leq \Delta \delta_{\text{отп}}^* \leq 5,09\%$ ;  $-11,9\% \leq \Delta H_{\text{отп}}^* \leq 11,3\%$ ;  $-0,26\% \leq \Delta A_{\text{отп}}^* \leq 9,71\%$ ;  $-9,78\% \leq \Delta B_{\text{м.ср}} \leq 8,36\%$ ;  $-7,98\% \leq \Delta B_{\text{м.отп}} \leq 8,86\%$ ;  $-2,11\% \leq \Delta \Theta_{\text{в.п.отп}} \leq 1,40\%$ ;  $-1,29\% \leq \Delta \Theta_{\text{в.у.отп}} \leq 1,24\%$ ;  $-6,02\% \leq \Delta F_{\text{ср}}^* \leq 5,07\%$ ;  $-5,16\% \leq \Delta F_{\text{отп}}^* \leq 7,55\%$ ;  $-11,5\% \leq \Delta P_{\text{п}}^* \leq 7,58\%$ ;  $-7,69\% \leq \Delta P_{\text{уд}}^* \leq 5,68\%$ ;  $-3,86\% \leq \Delta n \leq 6,19\%$ .

На рисунке 3.4 проиллюстрировано влияние критического рабочего воздушного зазора при различных значениях факторов  $z_1$  и  $z_2$  на оптимальную массу активных материалов в ЭМ при  $P_{\text{мх.кр}} = 2 \text{ Н}$  и  $P_{\text{мх.кр}} = 28 \text{ Н}$ .

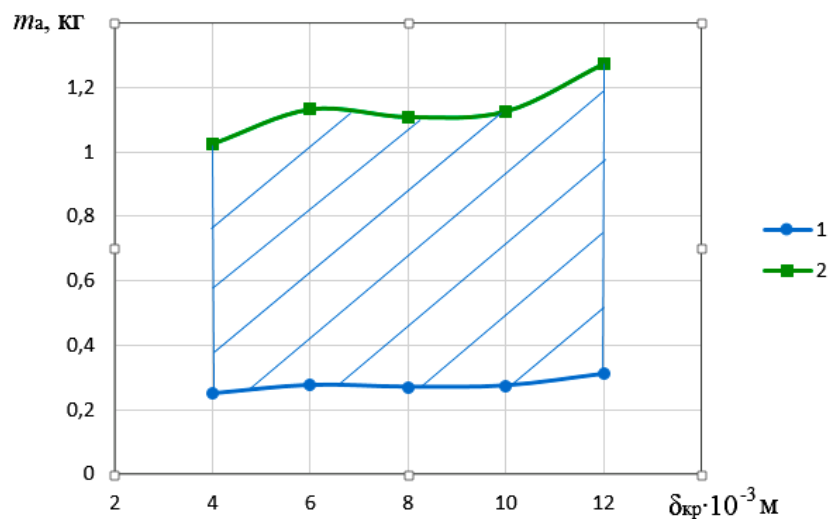


Рисунок 3.4 – Влияние критического рабочего воздушного зазора на оптимальную массу активных материалов в ЭМ при  $z_3 \div z_8 = 0$ :

1 – при  $P_{\text{мх.кр}} = 2 \text{ Н}$ ; 2 – при  $P_{\text{мх.кр}} = 28 \text{ Н}$

Результаты проектирования оптимальных форсированных двухобмоточных ВБЭМ по стоимости активных материалов (формула 2.21):

$$C_a = 10^{-8} (438,8 + 37,2z_2 + 11,4z_3 + 13,1z_4 - 10,4z_5 - 8,5z_2^2 - 4,7z_4^2)^4$$

$$\delta_{\text{опт}}^* = 10^{-4} (62,5 + 7,89z_1 - 3,59z_2 - 1,07z_3 - 1,3z_4 + 1,16z_5 + 1,8z_2^2 - 1,08z_4^2)^2;$$

$$H_{\text{опт}}^* = 10^{-4} (224,7 + 9,41z_4 + 3,61z_1^2 + 4,08z_2^2 + 3,49z_3^2 - 15,8z_4^2 + 3,46z_5^2 + 3,61z_6^2 + 3,49z_7^2 + 3,61z_8^2)^2;$$

$$A_{\text{опт}}^* = 10^{-8} (78,6 - 1,78z_4)^4;$$

$$A_{\text{п опт}}^* = 0,2;$$

$$H_{\text{ст. опт}}^* = 0,5;$$

$$H_{\text{в. опт}}^* = 0,5;$$

$$B_{\text{м ср}} = 10^{-8} (89,8 + 2,58z_2 - 2,42z_4 + 0,91z_5)^4;$$

$$B_{\text{м опт}} = 10^{-4} (84,1 + 4,85z_2 + 1,51z_3 - 2,38z_4 + 1,56z_5 - 1,09z_2^2)^2;$$

$$\Theta_{\text{вп опт}}^* = 10^{-2} (95,0 + 2,07z_4 - 1,22z_4^2);$$

$$\Theta_{\text{вы опт}}^* = 10^{-2} (96,0 + 1,65z_4);$$

$$F_{\text{ср}}^* = 10^{-4} (75,7 + 6,45z_1 - 3,77z_2 - 1,19z_3 - 0,96z_4 + 1,1z_5 + 2,55z_2^2 - 2,06z_4^2)^2;$$

$$F_{\text{опт}}^* = 10^{-2} (7,54 - 0,43z_2 - 0,13z_3 + 0,12z_5 + 0,25z_2^2 - 0,18z_4^2);$$

$$P_{\text{п}}^* = 10^{-8} (165,1 + 24,1z_1 - 13,0z_2 - 4,03z_3 - 5,2z_4 + 4,41z_5 + 5,42z_6 + 2,71z_7 - 4,1z_8 - 2,04z_1^2 + 6,58z_2^2 - 1,85z_1z_2)^4;$$

$$P_{\text{уд}}^* = 10^{-8} (57,6 + 3,5z_1 - 3,21z_2 - 0,98z_3 + 0,88z_4 - 0,67z_7 - 1,02z_1^2 + 0,82z_2^2 - 0,60z_3^2 + 1,88z_4^2 - 0,67z_5^2 - 0,67z_6^2 - 0,65z_7^2 - 0,67z_8^2)^4;$$

$$n = 10^{-8} (155,2 + 6,62z_1 - 1,68z_2 - 3,31z_3 - 2,47z_4 + 2,58z_6 + 4,15z_7 - 3,89z_8 + 1,69z_2^2 - 2,81z_4^2)^4.$$

Усредненная величина расхождений:  $\Delta C_a = 1,62\%$ ;  $\Delta \delta_{\text{опт}}^* = 1,20\%$ ;  $\Delta H_{\text{опт}}^* = -0,18\%$ ;  
 $\Delta A_{\text{опт}}^* = 1,17\%$ ;  $\Delta A_{\text{п опт}}^* = 0\%$ ;  $\Delta H_{\text{ст. опт}}^* = 0\%$ ;  $\Delta H_{\text{в. опт}}^* = 0\%$ ;  $\Delta B_{\text{м ср}} = 1,15\%$ ;  $\Delta B_{\text{м опт}} = -2,44\%$ ;  
 $\Delta \Theta_{\text{вп опт}}^* = 2,41\%$ ;  $\Delta \Theta_{\text{вы опт}}^* = 0,33\%$ ;  $\Delta F_{\text{ср}}^* = 1,07\%$ ;  $\Delta F_{\text{опт}}^* = 0,86\%$ ;  $\Delta P_{\text{п}}^* = -2,29\%$ ;  $\Delta P_{\text{уд}}^* = -0,01\%$ ;  
 $\Delta n = 2,18\%$ .

Максимальные расхождения между оптимальными и рассчитанными по полиномам значениями:  $-6,99\% \leq \Delta C_a^* \leq 3,89\%$ ;  $-7,42\% \leq \Delta \delta_{\text{опт}}^* \leq 11,7\%$ ;

$$\begin{aligned}
& -4,03 \% \leq \Delta H_{\text{опт}}^* \leq 5,61 \% \quad -6,06 \% \leq \Delta A_{\text{опт}}^* \leq 2,75 \% ; \quad -8,06 \% \leq \Delta B_{\text{м.ср}} \leq 3,47 \% ; \\
& -4,93 \% \leq \Delta B_{\text{м.опт}} \leq 5,71 \% ; \quad -7,92 \% \leq \Delta \Theta_{\text{вп.опт}} \leq 3,22 \% ; \quad -2,70 \% \leq \Delta \Theta_{\text{в.у.опт}} \leq 1,03 \% ; \\
& -9,15 \% \leq \Delta F_{\text{ср}}^* \leq 6,31 \% ; \quad -10,50 \% \leq \Delta F_{\text{опт}}^* \leq 7,05 \% ; \quad -4,98 \% \leq \Delta P_{\text{п}}^* \leq 8,33 \% ; \\
& -6,95 \% \leq \Delta P_{\text{уд}}^* \leq 10,74 \% ; \quad -11,6 \% \leq \Delta \eta \leq 8,44 \% .
\end{aligned}$$

На рисунке 3.5 проиллюстрировано влияние механической критической силы при различных значениях фактора  $z_2$  на оптимальную стоимость активных материалов в ЭМ.

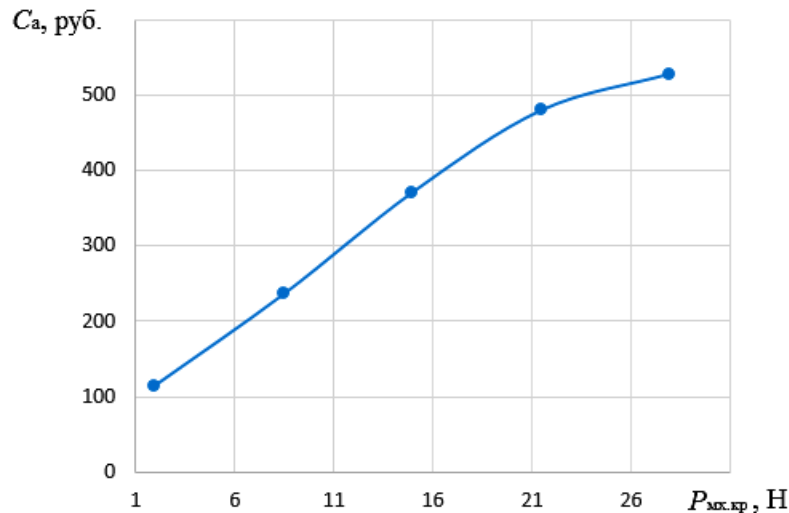


Рисунок 3.5 – Влияние механической критической силы на оптимальную стоимость активных материалов в ЭМ при  $z_1, z_3 \div z_8 = 0$

Результаты проектирования оптимальных форсированных двухобмоточных ВБЭМ по установочной площади (формула 2.22):

$$S_y^* = 10^{-2} (581,7 - 18,7z_4);$$

$$\delta_{\text{опт}}^* = 10^{-4} (64,6 + 7,82z_1 - 3,73z_2 - 1,15z_3 - 1,56z_4 + 1,26z_5 + 0,71z_7 - 0,72z_1^2 + 1,35z_2^2)^2;$$

$$H_{\text{опт}}^* = 6;$$

$$A_{\text{опт}}^* = 10^{-2} (39,8 - 2,11z_4 + 0,6z_5);$$

$$A_{\text{п.опт}}^* = 0,2;$$

$$H_{\text{ст.опт}}^* = 0,5;$$

$$H_{\text{в.опт}}^* = 0,5;$$

$$B_{\text{м.ср}} = 10^{-4} (80,7 + 4,44z_2 - 1,42z_3 - 1,99z_4 + 1,32z_5 + z_7 - 1,16z_2^2)^2;$$

$$B_{\text{м.опт}} = 10^{-4} (85,3 + 4,73z_2 + 1,56z_3 - 2,26z_4 + 1,53z_5 + 0,99z_7 - 1,28z_2^2)^2;$$

$$\Theta_{\text{вп опт}}^* = 10^{-2}(96,7 + 1,46z_4);$$

$$\Theta_{\text{vy опт}}^* = 10^{-2}(96,5 + 1,34z_4);$$

$$F_{\text{cp}}^* = 10^{-8}(88,5 + 4,03z_1 - 2,39z_2 - 1,11z_4 + 1,08z_2^2)^4;$$

$$F_{\text{отп}}^* = 10^{-12}(63,4 - 1,77z_2^2 + 0,64z_4^2)^6;$$

$$P_{\text{п}}^* = 10^{-12}(139,7 + 14,3z_1 - 7,77z_2 - 2,53z_3 - 3,37z_4 + 2,71z_5 + 3,13z_6 + 1,68z_7 - 2,24z_8 + 3,45z_2^2)^6;$$

$$P_{\text{уд}}^* = 10^{-12}(68,1 + 2,83z_1 - 2,57z_2 - 0,81z_3 + 0,99z_2^2)^6;$$

$$n = 10^{-4}(247,8 + 22,8z_1 - 6,71z_2 - 11,03z_3 - 6,9z_4 + 4,72z_5 + 8,19z_6 + 12,95z_7 - 12,3z_8 + 3,25z_2^2)^2.$$

Усредненная величина расхождений между оптимальными и рассчитанными по полиномам значениями:  $\Delta S_{\text{уст}}^* = 0,15\%$ ;  $\Delta \delta_{\text{отп}}^* = -1,18\%$ ;  $\Delta H_{\text{отп}}^* = 0\%$ ;  $\Delta A_{\text{отп}}^* = 0,04\%$ ;  $\Delta A_{\text{п опт}}^* = 0\%$ ;  $\Delta H_{\text{ст. опт}}^* = 0\%$ ;  $\Delta H_{\text{в. опт}}^* = 0\%$ ;  $\Delta B_{\text{м ср}} = 1,31\%$ ;  $\Delta B_{\text{м отп}} = 1,52\%$ ;  $\Delta \Theta_{\text{вп опт}} = -0,68\%$ ;  $\Delta \Theta_{\text{vy опт}}^* = 0,19\%$ ;  $\Delta F_{\text{cp}}^* = -1,15\%$ ;  $\Delta F_{\text{отп}}^* = 5,07\%$ ;  $\Delta P_{\text{п}}^* = -2,19\%$ ;  $\Delta P_{\text{уд}}^* = -1,22\%$ ;  $\Delta n = -0,81\%$ .

Максимальные расхождения между оптимальными и рассчитанными по полиномам значениями:  $-3,34\% \leq \Delta S_y^* \leq 2,1\%$ ;  $-6,27\% \leq \Delta \delta_{\text{отп}}^* \leq 4,74\%$ ;  $-4,05\% \leq \Delta A_{\text{отп}}^* \leq 1,86\%$ ;  $-5,59\% \leq \Delta B_{\text{м ср}} \leq 9,706\%$ ;  $-4,82\% \leq \Delta B_{\text{м отп}} \leq 8,20\%$ ;  $-0,79\% \leq \Delta \Theta_{\text{вп опт}} \leq 1,55\%$ ;  $-0,79\% \leq \Delta \Theta_{\text{vy опт}} \leq 1,43\%$ ;  $-10,3\% \leq \Delta F_{\text{cp}}^* \leq 3,66\%$ ;  $-1,65\% \leq \Delta F_{\text{отп}}^* \leq 7,38\%$ ;  $-4,42\% \leq \Delta P_{\text{п}}^* \leq 5,35\%$ ;  $-8,87\% \leq \Delta P_{\text{уд}}^* \leq 3,47\%$ ;  $-6,66\% \leq \Delta n \leq 7,36\%$ .

На рисунке 3.6 проиллюстрировано влияние температуры окружающей среды при различных значениях фактора  $z_4$  на оптимальную установочную площадь ЭМ.

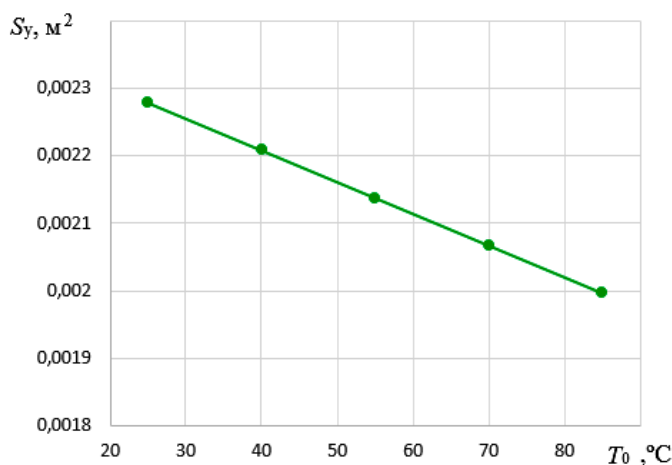


Рисунок 3.6 – Влияние температуры окружающей среды на оптимальную установочную площадь ЭМ при  $z_1 \div z_3, z_5 \div z_8 = 0$

Результаты проектирования оптимальных форсированных двухобмоточных ВБЭМ по высоте (формула 2.23):

$$H_{эм}^* = 10^{-2}(201,8 + 2,73z_2)$$

$$\delta_{опт}^* = 10^{-4}(49,8 + 6,19z_1 - 2,78z_2 - 0,85z_3 - 1,63z_4 + 0,96z_5 + 0,53z_7 - 0,53z_1^2 + 1,04z_2^2)^2;$$

$$H_{опт}^* = 1,0;$$

$$A_{опт}^* = 0,95;$$

$$A_{п\,опт}^* = 0,2;$$

$$H_{ст.опт}^* = 0;$$

$$H_{в.опт}^* = 10^{-4}(56,3 + 2,45z_2 + 0,79z_3 + 1,53z_4 - 0,83z_5 - 0,67z_7 - 0,94z_2^2)^2;$$

$$B_{м\,ср} = 10^{-4}(63,1 + 1,11z_1 + 3,41z_2 - 1,12z_3 - 2,25z_4 + 1,28z_5 + 0,66z_7 - 1,24z_2^2)^2;$$

$$B_{м\,опт} = 10^{-2}(51,1 + 6,00z_2 + 1,86z_3 - 3,27z_4 + 1,89z_5 + 1,02z_7 - 1,47z_2^2 - 0,588z_2z_4);$$

$$\Theta_{вп\,опт}^* = 10^{-2}(88,3 + 1,03z_4);$$

$$\Theta_{вы\,опт}^* = 10^{-2}(93,7 + 0,96z_4);$$

$$F_{ср}^* = 10^{-2}(37,9 + 7,66z_1 - 3,91z_2 + 1,19z_3 - 2,33z_4 + 1,33z_5 + 0,77z_7 - 0,40z_1^2 + 1,60z_2^2 - 0,43z_4^2 - 0,47z_1z_2);$$

$$F_{опт}^* = 10^{-2}(6,59 - 0,41z_2 - 0,13z_3 - 0,25z_4 + 0,14z_5 + 0,09z_7 + 0,17z_2^2);$$

$$P_{п}^* = 10^{-8}(146,8 + 23,6z_1 - 11,4z_2 - 3,49z_3 - 8,19z_4 + 4,61z_5 + 4,74z_6 + 2,24z_7 - 3,6z_8 - 2,33z_1^2 + 3,75z_2^2 + 1,68z_4^2)^4;$$

$$P_{уд}^* = 10^{-8}(63,4 + 3,84z_1 - 3,64z_2 - 1,12z_3 - 0,66z_7 - 1,06z_1^2 + 0,95z_2^2 + 1,59z_4^2 - 0,76z_5^2 - 0,68z_6^2 - 0,67z_7^2 - 0,68z_8^2)^4;$$

$$n = 10^{-8}(135,6 + 6,95z_1 - 1,37z_2 - 2,82z_3 - 2,54z_4 + 2,23z_6 - 3,39z_8)^4.$$

Усредненная величина расхождений между оптимальными и рассчитанными по полиномам значениями:  $\Delta H_{эм}^* = -0,04\%$ ;  $\Delta \delta_{опт}^* = -1,18\%$ ;  $\Delta H_{опт}^* = 0\%$ ;  $\Delta A_{опт}^* = 0\%$ ;  $\Delta A_{п\,опт}^* = 0\%$ ;  $\Delta H_{ст.опт}^* = 0\%$ ;  $\Delta H_{в.опт}^* = 1,48\%$ ;  $\Delta B_{м\,ср} = 0,17\%$ ;  $\Delta B_{м\,опт} = 0,70\%$ ;  $\Delta \Theta_{вп\,опт} = 0,48\%$ ;  $\Delta \Theta_{вы\,опт}^* = 0,11\%$ ;  $\Delta F_{ср}^* = -0,81\%$ ;  $\Delta F_{опт}^* = -2,29\%$ ;  $\Delta P_{п}^* = -3,31\%$ ;  $\Delta P_{уд}^* = -0,97\%$ ;  $\Delta n = 0,57\%$ .

Максимальные расхождения между оптимальными и рассчитанными по полиномам значениями:  $-3,28\% \leq \Delta H_{эм}^* \leq 2,41\%$ ;  $-6,10\% \leq \Delta \delta_{опт}^* \leq 4,63\%$ ;  $-5,96\% \leq \Delta H_{в.опт}^* \leq 4,83\%$ ;  $-6,20\% \leq \Delta B_{м\,ср} \leq 4,32\%$ ;  $-9,07\% \leq \Delta B_{м\,опт} \leq 4,59\%$ ;  $-3,94\% \leq \Delta \Theta_{вп\,опт} \leq 2,68\%$ ;

$$-0,91 \% \leq \Delta \Theta_{vy\,opt} \leq 1,24 \% ; -11,0 \% \leq \Delta F_{cp}^* \leq 7,48 \% ; -8,19 \% \leq \Delta F_{opt}^* \leq 5,91 \% ;$$

$$-8,80 \% \leq \Delta P_{п}^* \leq 6,18 \% ; -10,9 \% \leq \Delta P_{уд}^* \leq 9,73 \% ; -9,15 \% \leq \Delta n \leq 2,93 \% .$$

На рисунке 3.7 проиллюстрировано влияние механической критической силы при различных значения фактора  $z_2$  на оптимальную высоту ЭМ.

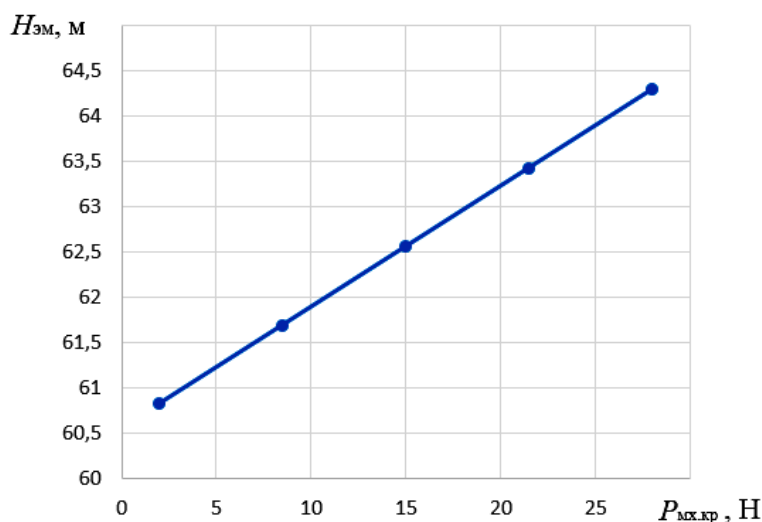


Рисунок 3.7 – Влияние механической критической силы на оптимальную высоту ЭМ при  $z_1, z_3, z_4 \div z_8 = 0$

Результаты проектирования оптимальных форсированных двухобмоточных ВБЭМ по габаритному объему (формула 2.24):

$$\ln V_{габ}^* = 10^{-2} (635 - 75,2z_1 + 34,6z_2 + 10,7z_3 + 13,9z_4 - 10,1z_5 - 6,95z_7 + 11,2z_1^2 - 11,2z_2^2);$$

$$\delta_{opt}^* = 10^{-4} (67,2 + 8,3z_1 - 3,9z_2 - 1,21z_3 - 1,61z_4 + 1,22z_5 + 0,79z_7 - 0,77z_1^2 + 1,39z_2^2)^2;$$

$$H_{opt}^* = 10^{-2} (614,4 + 41,3z_4 - 6,78z_5 - 6,17z_2^2 - 19,8z_4^2 - 9,59z_5^2 + 6,62z_4z_5);$$

$$A_{opt}^* = 10^{-2} (52,7 - 4,82z_4 + 1,36z_5 + 1,04z_4^2);$$

$$A_{п\,opt}^* = 0,2;$$

$$H_{ст.\,opt}^* = 0,5;$$

$$H_{в.\,opt}^* = 0,5;$$

$$B_{м\,cp} = 10^{-2} (66,9 + 8,06z_2 - 2,6z_3 - 7,54z_4 + 3,23z_5 + 1,8z_7 + 3,18z_4^2 + 1,03z_5^2 - 0,91z_2z_4 - 0,84z_4z_5);$$

$$B_{м\,opt} = 10^{-2} (79,1 + 8,68z_2 + 2,59z_3 - 4,88z_4 + 3,07z_5 + 1,89z_7 - 2,14z_2^2 + 1,44z_4^2);$$

$$\Theta_{вп\,opt}^* = 10^{-2} (95,7 + 1,93z_4);$$

$$\Theta_{vy\,opt}^* = 10^{-2} (95,7 + 1,5z_4);$$

$$F_{\text{cp}}^* = 10^{-8} (90,6 + 4,07z_1 - 2,47z_2 + 1,29z_2^2)^4;$$

$$F_{\text{отп}}^* = 10^{-2} (8,72 - 0,5z_2 - 0,15z_3 + 0,13z_5 + 0,1z_7 + 0,16z_2^2 - 0,12z_4^2 - 0,12z_5^2);$$

$$P_{\text{п}}^* = 10^{-12} (139,3 + 14,3z_1 - 7,81z_2 - 2,42z_3 - 3,32z_4 + 2,64z_5 + 3,03z_6 + 1,59z_7 - 2,30z_8 + 4,0z_2^2)^6;$$

$$P_{\text{уд}}^* = 10^{-8} (56,8 + 3,53z_1 - 3,26z_2 - 0,99z_3 + 0,57z_4 - 0,64z_7 + 1,22z_2^2)^4;$$

$$n = 10^{-4} (240,1 + 22,2z_1 - 6,43z_2 - 10,5z_3 - 6,84z_4 + 4,24z_5 + 7,91z_6 + 12,43z_7 - 12,0z_8 + 4,77z_2^2)^2.$$

Усредненная величина расхождений между оптимальными и рассчитанными по полиномам значениями:  $\Delta \ln V_{\text{габ}}^* = 0,20\%$ ;  $\Delta \delta_{\text{отп}}^* = -1,52\%$ ;  $\Delta H_{\text{отп}}^* = -3,55\%$ ;  $\Delta A_{\text{отп}}^* = 0,68\%$ ;  $\Delta A_{\text{п.отп}}^* = 0\%$ ;  $\Delta H_{\text{ст.отп}}^* = 0\%$ ;  $\Delta H_{\text{в.отп}}^* = 0\%$ ;  $\Delta B_{\text{м.ср}} = 1,58\%$ ;  $\Delta B_{\text{м.отп}} = 0,67\%$ ;  $\Delta \Theta_{\text{вп.отп}} = -0,68\%$ ;  $\Delta \Theta_{\text{вы.отп}} = -0,21\%$ ;  $\Delta F_{\text{cp}}^* = -2,42\%$ ;  $\Delta F_{\text{отп}}^* = -3,79\%$ ;  $\Delta P_{\text{п}}^* = 3,06\%$ ;  $\Delta P_{\text{уд}}^* = -2,76\%$ ;  $\Delta n = -1,22\%$ .

Максимальные расхождения между оптимальными и рассчитанными по полиномам значениями:  $-5,72\% \leq \Delta \ln V_{\text{габ}}^* \leq 3,96\%$ ;  $-6,78\% \leq \Delta \delta_{\text{отп}}^* \leq 5,08\%$ ;  $-6,15\% \leq \Delta H_{\text{отп}}^* \leq 4,23\%$ ;  $-3,23\% \leq \Delta A_{\text{отп}}^* \leq 2,95\%$ ;  $-9,47\% \leq \Delta B_{\text{м.ср}} \leq 6,47\%$ ;  $-9,11\% \leq \Delta B_{\text{м.отп}} \leq 4,55\%$ ;  $-1,79\% \leq \Delta \Theta_{\text{вп.отп}} \leq 0,85\%$ ;  $-1,17\% \leq \Delta \Theta_{\text{вы.отп}} \leq 1,03\%$ ;  $-5,97\% \leq \Delta F_{\text{cp}}^* \leq 4,45\%$ ;  $-5,40\% \leq \Delta F_{\text{отп}}^* \leq 6,62\%$ ;  $-9,57\% \leq \Delta P_{\text{п}}^* \leq 6,97\%$ ;  $-7,10\% \leq \Delta P_{\text{уд}}^* \leq 5,33\%$ ;  $-6,46\% \leq \Delta n \leq 5,10\%$ .

На рисунке 3.8 проиллюстрировано влияние критического рабочего воздушного зазора при различных значениях факторов  $z_1$  и  $z_2$  на оптимальный габаритный объем ЭМ при  $P_{\text{мх. кр}} = 2$  Н и  $P_{\text{мх. кр}} = 28$  Н.

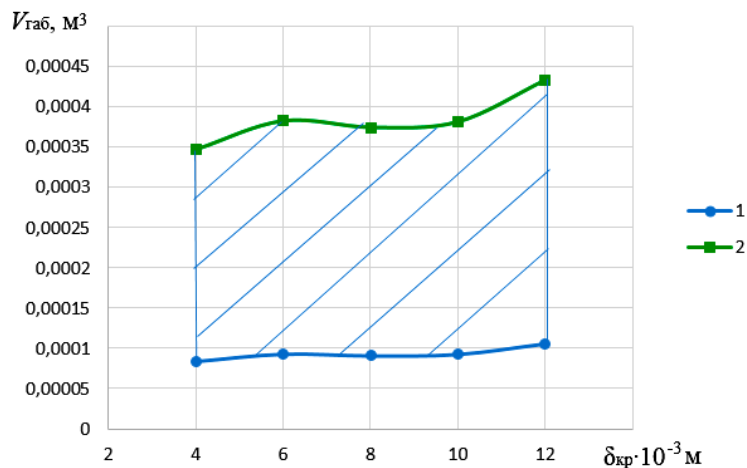


Рисунок 3.8 – Влияние критического рабочего воздушного зазора на оптимальный габаритный объем ЭМ при  $z_3 \div z_8 = 0$ :  
1 – при  $P_{\text{мх. кр}} = 2$  Н; 2 – при  $P_{\text{мх. кр}} = 28$  Н

### 3.2 Синтез двухобмоточных электромагнитов с параллельным соединением обмоток

В данном подразделе рассматривается методика проектирования оптимальных форсированных двухобмоточных ВБЭМ с параллельным соединением обмоток (рисунок 1.4, д).

В основу методики заложено уравнения:

– уравнение срабатывания ЭМ

$$F_{\text{ср}} = \frac{U_{\text{ср}}}{R_{\text{ног}}} N_{\text{но}} + \frac{U_{\text{ср}}}{R_{\text{вог}}} N_{\text{во}} = U_{\text{ср}} \left( \frac{N_{\text{но}}}{R_{\text{ног}}} + \frac{N_{\text{во}}}{R_{\text{вог}}} \right) = \frac{K_{U_{\text{мин}}} U_{\text{ном}}}{K_{U_{\text{ср}}}} \left( \frac{N_{\text{но}}}{R_{\text{ног}}} + \frac{N_{\text{во}}}{R_{\text{вог}}} \right); \quad (3.13)$$

– уравнение возврата ЭМ

$$F_{\text{отп}} = \frac{U_{\text{отп}}}{R_{\text{вох}}} N_{\text{во}} = \frac{K_{\text{отп}} K_{U_{\text{отп}}} U_{\text{ном}}}{R_{\text{вох}}} N_{\text{во}}; \quad (3.14)$$

– уравнение нагрева ЭМ

$$\Theta_{m^*} = f(x_1, x_{22}, x_{55}, x_8, x_9, ), \quad (3.15)$$

где  $R_{\text{ног}}$ ,  $R_{\text{вог}}$  – сопротивление низкоомной и высокоомной обмоток в горячем состоянии соответственно;

$R_{\text{вох}}$  – сопротивление высокоомной обмотки в холодном состоянии;

$N_{\text{но}}$ ,  $N_{\text{во}}$  – число витков низкоомной и высокоомной обмоток соответственно.

Мощность, рассеиваемая в режиме удержания:

$$P_{\text{уд.р}} = q_{\text{во}} H_0 A_0 (1 - A_{\text{но}^*}) \pi d_{\text{як}} (1 + 2\Delta_* + (A_{\text{но}^*} + 1)A_*), \quad (3.16)$$

где  $A_{\text{но}^*}$  – толщина окна низкоомной обмотки в относительных единицах.

Мощность, потребляемая в режиме удержания:

$$\frac{U_{\text{мах}}^2}{R_{\text{вог}}} = \left( K_{U_{\text{мах}}} \frac{\rho_x}{\rho_{\text{вог}}} \frac{F_{\text{отп}}}{K_{\text{отп}} K_{U_{\text{отп}}}} \right)^2 \frac{\rho_{\text{вог}} \pi d_{\text{як}} (1 + 2\Delta_* + (A_{\text{но}^*} + 1)A_*)}{H_0 A_0 (1 - A_{\text{но}^*}) K_{3\text{во}}}, \quad (3.17)$$

где  $K_{3\text{во}}$  – коэффициент заполнения высокоомной обмотки;

$\rho_{\text{вог}}$  – удельное сопротивление высокоомной обмотки в горячем состоянии.

Приравняем (3.17) и (3.18) и преобразуем к виду:

$$\frac{q_{\text{во}} K_{3\text{во}} (H_0 A_0 (1 - A_{\text{но}^*}))^2}{\rho_{\text{вог}}} = \left( K_{U_{\text{мах}}} \frac{\rho_x}{\rho_{\text{вог}}} \frac{F_{\text{отп}}}{K_{\text{отп}} K_{U_{\text{отп}}}} \right)^2. \quad (3.18)$$

Магнитодвижущие силы срабатывания и возврата рассчитываются по формулам (2.13), (2.14) соответственно при



$$x_7 = \begin{cases} 4,237B_m - 5,508 \text{ при } P_{\text{эмг}} \geq P_{\text{мх кр}}, \\ 4,237B_{m\Gamma} - 5,508 \text{ при } P_{\text{эмг}} \leq P_{\text{мх кр}}, \end{cases}$$

$x_9$  по формуле (3.7). В режиме удержания  $q_{\text{но}} = 0$  и  $x_{10} = 8,183q_* - 2,046$  примет значение  $x_{10} = -2,046$ ,  $q_* = q_{\text{но}} / q_{\text{во}}$ .

Выведем формулу кратности числа витков  $n = \frac{N_{\text{во}}}{N_{\text{но}}}$ .

Из (3.13) получим:

$$F_{\text{ср}} = \frac{K_{U\text{min}} U_{\text{ном}}}{K_{U\text{ср}}} \frac{N_{\text{во}}}{R_{\text{во}\Gamma}} \left( 1 + \frac{N_{\text{но}}}{N_{\text{во}}} \cdot \frac{R_{\text{во}\Gamma}}{R_{\text{но}\Gamma}} \right) = \frac{K_{U\text{min}}}{K_{U\text{ср}}} \cdot \frac{U_{\text{ном}} N_{\text{во}}}{R_{\text{во}\text{х}}} \cdot \frac{R_{\text{во}\text{х}}}{R_{\text{во}\Gamma}} \left( 1 + \frac{N_{\text{но}} / R_{\text{но}\Gamma}}{N_{\text{во}} / R_{\text{во}\Gamma}} \right).$$

С учетом (3.13) и того, что  $R_{\text{но}\Gamma} = \frac{\rho_{\text{но}\Gamma} l_{\text{ср}\text{но}} N_{\text{но}}^2}{H_0 A_{\text{но}} K_{3\text{но}}}$  и  $R_{\text{во}\text{х}} = \frac{\rho_{\text{во}\Gamma} l_{\text{ср}\text{во}} N_{\text{во}}^2}{H_0 A_{\text{во}} K_{3\text{во}}}$ :

$$F_{\text{ср}} = \frac{K_{U\text{min}}}{K_{U\text{ср}} K_{\text{отп}} K_{U\text{отп}}} \cdot \frac{\rho_{\text{х}}}{\rho_{\text{но}\Gamma}} \cdot F_{\text{отп}} \left( 1 + \frac{\rho_{\text{во}\Gamma}}{\rho_{\text{но}\Gamma}} \cdot \frac{l_{\text{ср}\text{во}}}{l_{\text{ср}\text{но}}} \cdot \frac{A_{\text{но}}}{A_{\text{во}}} \cdot \frac{K_{3\text{но}}}{K_{3\text{во}}} \cdot n \right). \quad (3.19)$$

Из 3.19 найдем искомую кратность количества витков  $n$ :

$$n = \frac{\left( \frac{F_{\text{ср}}}{F_{\text{отп}}} K_{\text{max}} K \frac{\rho_{\text{во}\Gamma}}{\rho_{\text{х}}} \right) - 1}{\frac{\rho_{\text{во}\Gamma}}{\rho_{\text{но}\Gamma}} \frac{l_{\text{ср}\text{во}}}{l_{\text{ср}\text{но}}} \frac{K_{3\text{но}}}{K_{3\text{во}}} \frac{A_{\text{но}^*}}{A_{\text{но}^*}}}, \quad (3.20)$$

где  $\frac{l_{\text{ср}\text{во}}}{l_{\text{ср}\text{но}}} = 1 + \frac{A_*}{1 + 2\Delta_* + A_{\text{но}^*} A_*}$ ;

$l_{\text{ср}\text{но}}$ ,  $l_{\text{ср}\text{во}}$  – средняя длина витка низкоомной и высокоомной обмоток соответственно;

С учетом (3.13), (3.14), (3.17) выводится уравнение для проектного расчета:

$$f(d_{\text{як}}) = d_{\text{як}}^2 H_* A_* (1 - A_{\text{но}^*}) \sqrt{\frac{q_{\text{во}} K_{3\text{во}}}{\rho_{\text{во}\Gamma}}} - \frac{\rho_{\text{х}}}{\rho_{\text{во}\Gamma}} \frac{F_{\text{отп}} K_{U\text{max}}}{K_{\text{отп}} K_{U\text{отп}}} = 0. \quad (3.21)$$

Уравнение (3.22) решается методом деления отрезка пополам [61].

При решении задачи проектирования оптимального ЭМ установлено равенство результатов расчетов двухобмоточных ВБЭМ в схеме с пусковой и удерживающими обмотками и параллельным соединением низкоомной и высокоомной обмоток. Результаты, представленные в таблицах 3.2, 3.3 показывают, что разница в полученных данных мала. Также схожи полученные уравнения проектирования (3.12) и (3.21).

Таблица 3.2 – Результаты расчетов параметров оптимального форсированного двухобмоточного ВБЭМ с пусковой и удерживающей обмотками по критерию качества масса активных материалов ( $A_{\text{но}}^* = 0,200$ ;  $H_{\text{ст}}^* = 0,500$ ;  $H_{\text{в}}^* = 0,500$ )

$x_i$ $u$	$m_a^*$	$\delta_{\text{опт}}^*$	$H_{\text{опт}}^*$	$A_{\text{опт}}^*$	$B_{\text{м ср}}^*$ ТЛ	$B_{\text{м опт}}^*$ ТЛ	$\Theta_{\text{вп}}^*$	$\Theta_{\text{vy}}^*$	$F_{\text{кп ср}}^*$	$F_{\text{кп опт}}^*$	$P_{\text{п}}^*$	$P_{\text{уд}}^*$	$n$
1	288,2	0,403	4,810	0,730	0,73	0,70	0,923	0,936	0,618	0,0875	5,02	0,1034	4,93
2	64,3	0,665	4,857	0,723	0,72	0,70	0,924	0,936	0,874	0,0877	16,55	0,1707	6,98
3	566,5	0,320	4,762	0,723	0,89	0,88	0,923	0,936	0,510	0,0774	2,77	0,0654	4,61
4	126,3	0,528	4,762	0,723	0,91	0,88	0,923	0,936	0,708	0,0774	8,80	0,1078	6,40
5	355,2	0,376	4,810	0,730	0,68	0,75	0,923	0,936	0,585	0,0843	4,19	0,0895	4,20
6	79,2	0,620	4,810	0,730	0,67	0,75	0,923	0,936	0,808	0,0843	13,21	0,1476	5,81
7	701,7	0,299	4,714	0,737	0,82	0,94	0,922	0,935	0,479	0,0748	2,26	0,0569	3,87
8	156,5	0,492	4,714	0,730	0,85	0,94	0,922	0,936	0,673	0,0747	7,41	0,0937	5,46
9	397,0	0,369	6,000	0,583	0,58	0,62	0,967	0,969	0,579	0,0902	3,67	0,1126	4,38
10	88,5	0,606	6,000	0,570	0,55	0,62	0,968	0,970	0,854	0,0898	13,40	0,1856	6,53

270	210,3	0,471	5,810	0,603	0,73	0,85	0,947	0,951	0,678	0,0873	7,08	0,0894	6,60
271	221,1	0,453	5,762	0,623	0,71	0,82	0,945	0,949	0,657	0,0856	0,87	0,0972	2,26
272	228,5	0,450	5,667	0,623	0,72	0,82	0,943	0,949	0,654	0,0846	5,21	0,0961	4,55
273	224,8	0,453	5,762	0,623	0,71	0,82	0,945	0,949	0,657	0,0856	6,25	0,0972	5,43

Таблица 3.3 – Результаты расчетов параметров оптимального форсированного двухобмоточного ВБЭМ с параллельным соединением низкоомной и высокоомной обмоток по критерию качества масса активных материалов ( $A_{\text{но}}^* = 0,200$ ;  $H_{\text{ст}}^* = 0,500$ ;  $H_{\text{в}}^* = 0,500$ )

$x_i$ $u$	$m_a^*$	$\delta_{\text{опт}}^*$	$H_{\text{опт}}^*$	$A_{\text{опт}}^*$	$B_{\text{м ср}}^*$ ТЛ	$B_{\text{м опт}}^*$ ТЛ	$\Theta_{\text{вп}}^*$	$\Theta_{\text{vy}}^*$	$F_{\text{кп ср}}^*$	$F_{\text{кп опт}}^*$	$P_{\text{п}}^*$	$P_{\text{уд}}^*$	$n$
1	288,8	0,404	4,905	0,723	0,72	0,70	0,922	0,936	0,620	0,0881	5,00	0,1037	4,92
2	64,4	0,665	4,857	0,723	0,72	0,70	0,922	0,936	0,873	0,0877	16,49	0,1705	6,97
3	567,7	0,321	4,762	0,730	0,89	0,88	0,921	0,936	0,511	0,0776	2,75	0,0653	4,59
4	126,6	0,529	4,762	0,730	0,91	0,88	0,921	0,936	0,710	0,0776	8,75	0,1077	6,38
5	355,9	0,376	4,810	0,730	0,68	0,75	0,921	0,936	0,585	0,0842	4,18	0,0894	4,20
6	79,4	0,618	4,762	0,730	0,67	0,75	0,921	0,936	0,803	0,0838	13,11	0,1471	5,80
7	703,2	0,298	4,667	0,737	0,82	0,94	0,920	0,935	0,477	0,0744	2,25	0,0567	3,87
8	156,8	0,491	4,714	0,730	0,85	0,94	0,920	0,936	0,673	0,0746	7,38	0,0936	5,46
9	398,3	0,368	6,000	0,577	0,57	0,62	0,963	0,969	0,577	0,0900	3,67	0,1123	4,39
10	88,8	0,605	6,000	0,570	0,55	0,62	0,964	0,969	0,852	0,0897	13,31	0,1852	6,52

270	210,8	0,470	5,810	0,603	0,73	0,85	0,944	0,951	0,678	0,0873	7,05	0,0892	6,59
271	221,6	0,453	5,762	0,630	0,71	0,82	0,942	0,949	0,659	0,0858	7,76	0,0971	6,76
272	229,0	0,451	5,714	0,623	0,72	0,82	0,941	0,949	0,655	0,0851	5,19	0,0965	4,53
273	225,3	0,451	5,714	0,623	0,72	0,82	0,941	0,949	0,655	0,0851	6,22	0,0965	5,44

### 3.3 Выводы

1. Усовершенствованы методики синтеза форсированных двухобмоточных ВБЭМ в схеме с пусковой и удерживающей обмотками и с параллельным соединением НО и ВО обмоток, позволяющие получить оптимальное решение.

2. Получены полиномиальные зависимости по критериям качества: объем, масса и стоимость активных материалов, установочная площадь, высота и габаритный объем электромагнита, отражающие влияние параметров проектирования на исследуемые характеристики ЭМ.

3. При решении задачи проектирования оптимальных двухобмоточных ВБЭМ в схеме с параллельным соединением низкоомной и высокоомной обмоток было установлено совпадение результатов расчетов со схемой с пусковой и удерживающими обмотками с погрешностью в 2-3 %.

4. В отличие от известных методик кратность числа витков обмоток находится на этапе проектного расчета и рекомендуется использовать при оценке перенапряжения при включении двухобмоточных электромагнитов.

5. Оптимальные относительные высота стопа и воротничка в исследованной области факторного пространства имеют значение 0,5 для всех критериев оптимальности независимо от условий проектирования.

## РАЗДЕЛ 4 АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ОПТИМИЗАЦИИ И ВЫРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ИХ ПРИМЕНЕНИЮ

### 4.1 Анализ результатов оптимизационных расчетов форсированных электромагнитов, управляемых по схеме с балластным резистором

#### 4.1.1 Минимизация массы активных материалов, используемых в конструкции электромагнита

Анализ влияния на оптимальные размеры в магнитной системе приводного электромагнита и на технико-эксплуатационные его параметры выполнены на основе полиномиальных моделей, полученных в подразделе 2.2.

Для наглядности результаты представлены здесь в размерном виде в табличной либо графической форме.

Оптимальные размеры ( $d_{\text{як}}$ ,  $H_0$ ,  $A_0$  рисунок 1.4), составляющие «ядро» [89] магнитной системы, представлены в таблицах 4.1, 4.2, 4.3 в зависимости от координат ( $\delta_{\text{кр}}$ ,  $P_{\text{мх.кр}}$ ) критической точки на механической характеристике приводного электромагнита коммутационного аппарата, температуры ( $T_0$ ) окружающего воздуха, и допустимой ( $\Theta_{\text{доп}}$ ) температуры нагрева обмотки.

В области  $4 \cdot 10^{-3} \leq \delta_{\text{кр}} \leq 12 \cdot 10^{-3}$  м,  $2 \leq P_{\text{мх.кр}} \leq 8,5$  Н имеет место монотонное увеличение:  $d_{\text{як}}$  (таблица 4.1);  $H_0$  (таблица 4.2);  $A_0$  (таблица 4.3). При  $4 \cdot 10^{-3} \leq \delta_{\text{кр}} \leq 12 \cdot 10^{-3}$  м;  $T_0 = 40$  °С;  $15 \leq P_{\text{мх.кр}} \leq 28$  Н наблюдается слабо выраженный минимум.

Таблица 4.1 – Зависимость диаметра якоря при принятых относительных  $P_{\text{мх}*} = 4$ ;  $K_{\text{max}} = 1,50$ ;  $K = 0,45$ ;  $K_3 = 0,50$  в случае минимизации суммарной массы обмоточной меди и ферромагнитной стали используемой в конструкции форсированного ВБЭМ

Исходные данные проектирования			Оптимальный диаметр якоря, мм				
$\Theta_{\text{доп}}$ , °С	$T_0$ , °С	$\delta_{\text{кр}} \cdot 10^{-3}$	4	6	8	10	12
		$P_{\text{мх.кр}}$					
115	40	2 (Н)	11,4	12,5	13,2	13,8	14,5
		8,5 (Н)	15,3	16,0	16,4	16,8	17,5
		15 (Н)	19,2	19,3	19,3	19,5	20,1
		21,5 (Н)	21,7	21,3	21,0	21,1	21,6
		28 (Н)	21,8	21,4	21,1	21,2	21,6

Продолжение таблицы 4.1

Исходные данные проектирования			Оптимальный диаметр якоря, мм				
$\Theta_{\text{доп}}, ^\circ\text{C}$	$T_0, ^\circ\text{C}$	$\delta_{\text{кр}} \cdot 10^{-3}$ $P_{\text{мх.кр}}$	4	6	8	10	12
115	70	2 (Н)	12,3	13,3	13,9	14,5	15,3
		8,5 (Н)	16,7	17,2	17,5	17,9	18,5
		15 (Н)	21,2	20,9	20,7	20,8	21,3
		21,5 (Н)	24,1	23,2	22,6	22,5	22,9
		28 (Н)	24,2	23,3	22,7	22,6	23,0
155	40	2 (Н)	10,6	11,8	12,5	13,1	13,9
		8,5 (Н)	14,1	15,0	15,5	16,0	16,7
		15 (Н)	17,5	17,9	18,1	18,4	19,0
		21,5 (Н)	19,7	19,8	19,7	19,9	20,4
		28 (Н)	19,8	19,8	19,7	19,9	20,5
	70	2 (Н)	11,5	12,5	13,2	13,8	14,6
		8,5 (Н)	15,4	16,1	16,5	16,9	17,6
		15 (Н)	19,3	19,4	19,4	19,6	20,1
		21,5 (Н)	21,8	21,5	21,1	21,2	21,7
		28 (Н)	21,9	21,5	21,2	21,2	21,7

Рост температуры  $T_0$  вызывает необходимость увеличения  $d_{\text{як}}$ ,  $H_0$  и некоторое уменьшение  $A_0$ .

Увеличение допустимой температуры ( $\Theta_{\text{доп}}$ ) нагрева обмотки вызывает уменьшение  $d_{\text{як}}$ ,  $H_0$ ,  $A_0$  (последняя в меньшей степени, чем первые две величины).

Относительная высота ( $H_{\text{ст}^*}$ ) стопа, определенная в долях высоты ( $H_0$ ) обмотки не зависит от исходных данных проектирования. Однако относительная высота обмотки, выраженная в долях диаметра якоря зависит от  $\delta_{\text{кр}}$ ,  $P_{\text{мх.кр}}$ ,  $P_{\text{мх}^*} = P_{\text{мх.к}} / P_{\text{мх.кр}}$ ,  $T_0$ ,  $\Theta_{\text{доп}}$ .

Таблица 4.2 – Зависимость высоты обмотки при принятых относительных  $P_{\text{мх}^*} = 4$ ;  $K_{\text{max}} = 1,50$ ;  $K = 0,45$ ;  $K_s = 0,50$  в случае минимизации суммарной массы обмоточной меди и ферромагнитной стали, используемой в конструкции форсированного ВБЭМ

Исходные данные проектирования			Оптимальная высота обмотки, мм				
$\Theta_{\text{доп}}, ^\circ\text{C}$	$T_0, ^\circ\text{C}$	$\delta_{\text{кр}} \cdot 10^{-3}$ $P_{\text{мх.кр}}$	4	6	8	10	12
115	40	2 (Н)	48,1	50,5	51,0	51,0	51,2
		8,5 (Н)	62,8	63,9	63,5	63,3	63,8
		15 (Н)	76,4	75,8	74,7	74,5	75,5
		21,5 (Н)	84,0	82,6	81,5	81,8	83,7
		28 (Н)	81,8	81,7	81,8	83,3	86,5

Продолжение таблицы 4.2

Исходные данные проектирования			Оптимальная высота обмотки, мм				
$\Theta_{\text{доп}}, ^\circ\text{C}$	$T_0, ^\circ\text{C}$	$\frac{\delta_{\text{кр}} \cdot 10^{-3}}{P_{\text{мх.кр}}}$	4	6	8	10	12
115	70	2 (Н)	70,1	73,6	74,6	75,3	76,4
		8,5 (Н)	93,4	94,2	93,6	93,5	94,7
		15 (Н)	116	113	111	110	111
		21,5 (Н)	129	124	121	121	123
		28 (Н)	127	123	122	122	126
155	40	2 (Н)	43,1	45,7	46,3	46,4	46,6
		8,5 (Н)	55,6	57,2	57,3	57,4	57,9
		15 (Н)	66,9	67,4	67,0	67,2	68,4
		21,5 (Н)	73,1	73,2	73,0	73,7	75,8
		28 (Н)	71,0	72,2	73,2	75,1	78,4
	70	2 (Н)	58,8	62,1	63,2	63,8	64,6
		8,5 (Н)	77,1	78,8	78,7	78,9	80,0
		15 (Н)	94,4	93,8	92,6	92,5	94,0
		21,5 (Н)	104	103	101	101	104
		28 (Н)	102	102	101	103	10

От тех же исходных данных проектирования зависит и диаметр якоря. Их взаимное влияние приводит к тому, что в выбранной области исходных данных проектирования наибольшее тяговое усилие создает ВБЭМ, рабочий воздушный зазор которого размещается равноудаленно от торцов обмотки.

Таблица 4.3 – Зависимость толщины обмотки при принятых относительных  $P_{\text{мх}^*} = 4$ ;  $K_{\text{макс}} = 1,50$ ;  $K = 0,45$ ;  $K_3 = 0,50$  в случае минимизации суммарной массы обмоточной меди и ферромагнитной стали, используемой в конструкции форсированного ВБЭМ

Исходные данные проектирования			Оптимальная толщина обмотки, мм				
$\Theta_{\text{доп}}, ^\circ\text{C}$	$T_0, ^\circ\text{C}$	$\frac{\delta_{\text{кр}} \cdot 10^{-3}}{P_{\text{мх.кр}}}$	4	6	8	10	12
115	40	2 (Н)	8,38	9,17	9,67	10,1	10,7
		8,5 (Н)	11,25	11,8	12,1	12,4	12,9
		15 (Н)	14,1	14,2	14,2	14,3	17,8
		21,5 (Н)	16,0	15,7	15,5	15,5	15,9
		28 (Н)	16,0	15,7	15,5	15,6	15,9
	70	2 (Н)	7,6	8,3	8,7	9,0	9,5
		8,5 (Н)	10,4	10,7	10,9	11,1	11,5
		15 (Н)	13,1	13,0	12,8	12,9	13,2
		21,5 (Н)	15,0	14,4	14,1	14,0	14,2
		28 (Н)	15,0	14,5	14,1	14,0	14,3

Продолжение таблицы 4.3

Исходные данные проектирования			Оптимальная толщина обмотки, мм				
$\Theta_{\text{доп}}, ^\circ\text{C}$	$T_0, ^\circ\text{C}$	$\delta_{\text{кр}} \cdot 10^{-3}$ $P_{\text{мх.кр}}$	4	6	8	10	12
155	40	2 (Н)	8,2	9,1	9,6	10,1	10,7
		8,5 (Н)	10,9	11,5	11,9	12,3	12,8
		15 (Н)	13,5	13,8	13,9	14,2	14,7
		21,5 (Н)	15,2	15,2	15,2	15,3	15,7
		28 (Н)	15,3	15,3	15,2	15,3	15,8
	70	2 (Н)	7,5	8,2	8,7	9,1	9,6
		8,5 (Н)	10,1	10,5	10,8	11,1	11,5
		15 (Н)	12,6	12,7	12,7	12,8	13,2
		21,5 (Н)	14,3	14,1	13,9	13,9	14,2
		28 (Н)	14,4	14,1	13,9	13,9	14,2

Относительная «высота» стопа зависит (таблица 4.4) от температуры окружающей среды. Большей  $T_0$  соответствует большее значение оптимальной высоты стопа. Большим значениям  $\Theta_{\text{доп}}$  соответствуют меньшие необходимые значения высоты стопа.

Таблица 4.4 – Зависимость высоты стопа при принятых относительных  $P_{\text{мх}^*} = 4$ ;  $K_{\text{макс}} = 1,50$ ;  $K = 0,45$ ;  $K_3 = 0,50$  в случае минимизации суммарной массы обмоточной меди и ферромагнитной стали, используемой в конструкции форсированного ВБЭМ

Исходные данные проектирования			Оптимальная высота стопа, мм				
$\Theta_{\text{доп}}, ^\circ\text{C}$	$T_0, ^\circ\text{C}$	$\delta_{\text{кр}} \cdot 10^{-3}$ $P_{\text{мх.кр}}$	4	6	8	10	12
115	40	2 (Н)	23,1	24,3	24,5	24,5	24,5
		8,5 (Н)	30,2	30,7	30,5	30,4	30,6
		15 (Н)	36,7	36,4	35,9	35,7	36,2
		21,5 (Н)	40,3	39,7	39,1	39,3	40,2
		28 (Н)	39,3	39,2	39,2	40,0	41,5
	70	2 (Н)	33,7	35,3	35,8	36,1	36,7
		8,5 (Н)	44,8	45,2	44,9	44,9	45,5
		15 (Н)	55,5	54,3	53,1	52,8	53,5
		21,5 (Н)	62,0	59,7	58,2	57,9	59,0
		28 (Н)	60,8	59,2	58,3	58,7	60,4
155	40	2 (Н)	20,7	21,9	22,2	22,3	22,4
		8,5 (Н)	26,7	27,5	27,5	27,5	27,8
		15 (Н)	32,1	32,4	32,2	32,3	32,8
		21,5 (Н)	35,1	35,1	35,0	35,4	36,4
		28 (Н)	34,1	34,7	35,1	36	37,6

Продолжение таблицы 4.4

Исходные данные проектирования			Оптимальная высота стопа, мм				
$\Theta_{\text{доп}}, ^\circ\text{C}$	$T_0, ^\circ\text{C}$	$\delta_{\text{кр}} \cdot 10^{-3}$	4	6	8	10	12
		$P_{\text{мх.кр}}$					
155	70	2 (Н)	28,2	29,8	30,3	30,6	31,0
		8,5 (Н)	37,0	37,8	37,8	37,9	38,4
		15 (Н)	45,3	45,0	44,4	44,4	45,1
		21,5 (Н)	50,1	49,2	48,5	48,7	49,8
		28 (Н)	49,1	48,8	48,7	49,4	51,1

Фактически интенсивность процессов теплообмена зависят от [37] условий на внешних поверхностях обмотки, магнитопровода, их температуры и качества материалов, а также конструктивного выполнения катушки в магнитной системе.

Увеличение  $\delta_{\text{кр}}$  от  $4 \cdot 10^{-3}$  м до  $12 \cdot 10^{-3}$  м при  $P_{\text{мх.кр}} = 2$  Н вызывает необходимость увеличения высоты воротничка в 1,3 раза (таблица 4.5). В том же диапазоне, но при  $P_{\text{мх.кр}} = 28$  Н высота воротничка практически неизменна.

Таблица 4.5 – Зависимость высоты внешнего воротничка при принятых относительных  $P_{\text{мх}*} = 4$ ;  $K_{\text{max}} = 1,50$ ;  $K = 0,45$ ;  $K_3 = 0,50$  в случае минимизации суммарной массы обмоточной меди и ферромагнитной стали, используемой в конструкции форсированного ВБЭМ

Исходные данные проектирования			Оптимальная высота воротничка, мм				
$\Theta_{\text{доп}}, ^\circ\text{C}$	$T_0, ^\circ\text{C}$	$\delta_{\text{кр}} \cdot 10^{-3}$	4	6	8	10	12
		$P_{\text{мх.кр}}$					
115	40	2 (Н)	5,0	5,5	5,8	6,0	6,4
		8,5 (Н)	6,7	7,0	7,2	7,4	7,7
		15 (Н)	8,4	8,4	8,4	8,5	8,8
		21,5 (Н)	9,5	9,3	9,2	9,2	9,5
		28 (Н)	9,5	9,4	9,2	9,3	9,5
	70	2 (Н)	5,4	5,8	6,1	6,4	6,7
		8,5 (Н)	7,3	7,6	7,7	7,8	8,1
		15 (Н)	9,3	9,2	9,0	9,1	9,3
		21,5 (Н)	10,6	10,2	9,9	9,9	10,0
		28 (Н)	10,6	10,2	10,0	9,9	10,1
155	40	2 (Н)	4,7	5,2	5,5	5,8	6,1
		8,5 (Н)	6,2	6,6	6,8	7,0	7,3
		15 (Н)	7,7	7,8	7,9	8,1	8,3
		21,5 (Н)	8,6	8,7	8,6	8,7	8,9
		28 (Н)	8,7	8,7	8,6	8,7	9,0



Продолжение таблицы 4.5

Исходные данные проектирования			Оптимальная высота воротничка, мм				
$\Theta_{\text{доп}}, ^\circ\text{C}$	$T_0, ^\circ\text{C}$	$\delta_{\text{кр}} \cdot 10^{-3}$	4	6	8	10	12
		$P_{\text{мх.кр}}$					
155	70	2 (Н)	5,0	5,5	5,8	6,1	6,4
		8,5 (Н)	6,7	7,0	7,2	7,1	7,7
		15 (Н)	8,4	8,5	8,5	8,6	8,8
		21,5 (Н)	9,6	9,4	9,3	9,3	9,5
		28 (Н)	9,6	9,4	9,3	9,3	9,5

При  $\delta_{\text{кр}} = \text{const}$  высота воротничка с ростом  $P_{\text{мх.кр}}$  от 2 до 21,5 Н монотонно увеличивается от 1,5 до 1,9 раз.

Были рассчитаны значения магнитной индукции в наиболее нагруженном сечении магнитной системы при срабатывании ( $0,90 \text{ Тл} \leq B_{\text{мсп}} \leq 1,15 \text{ Тл}$ ) и отпуске ( $1,01 \text{ Тл} \leq B_{\text{мотп}} \leq 1,16 \text{ Тл}$ ) электромагнита. Таким образом, при срабатывании и отпуске электромагнит находится на границе ( $1,05 \text{ Тл} \leq B_{\text{мг}} \leq 1,15 \text{ Тл}$ ) своей линейности. Зависимости МДС срабатывания и отпусания приведены соответственно на рисунке 4.1 и рисунке 4.2.

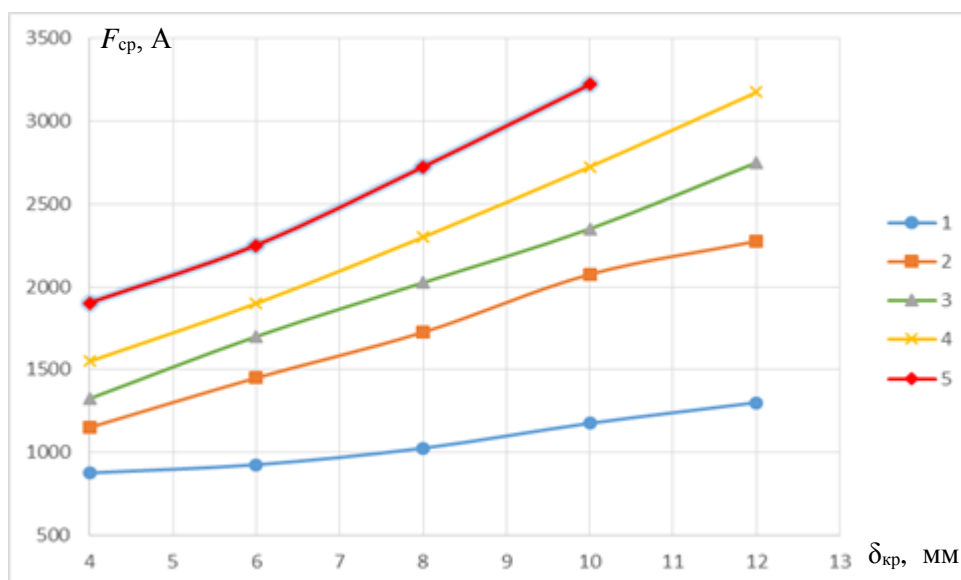


Рисунок 4.1 – Зависимость МДС срабатывания электромагнита от величины критического значения рабочего воздушного зазора при  $P_{\text{мх.кр}}$ : 2Н (1); 8,5 Н (2); 15 Н (3) 21,5 Н (4); 28 Н (5);  $P_{\text{мх}*} = 4$ ;

$$K_{\text{max}} = 1,50; K = 0,45; K_3 = 0,50; T_0 = 40 ^\circ\text{C}; \Theta_{\text{доп}} = 115 ^\circ\text{C}$$

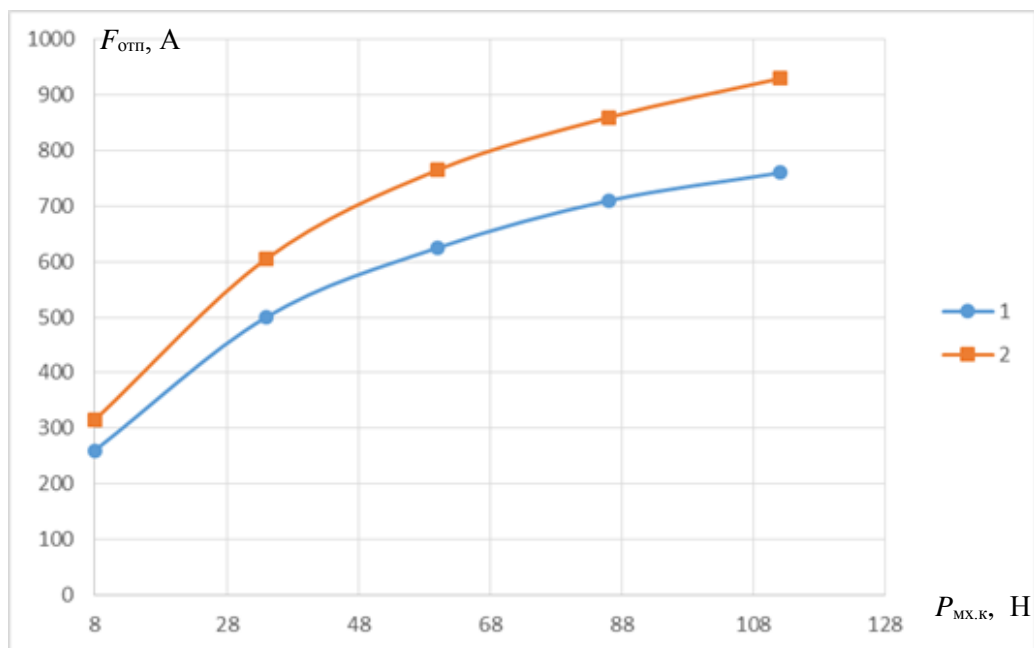


Рисунок 4.2 – Зависимость МДС отпускания от величины конечного значения механического усилия при  $\delta_{к} = 0,0001$  м,  $\delta_{пг} = 0,0001$  м;  $v_* = 0,002$ ;  $K_{max} = 1,50$ ;  $K = 0,45$ ;  $K_3 = 0,50$ ;

$$\Theta_{доп} = 115 \text{ } ^\circ\text{C};$$

1 – при  $T_0 = 40 \text{ } ^\circ\text{C}$ ; 2 – при  $T_0 = 70 \text{ } ^\circ\text{C}$

Зависимости потребляемой электромагнитом мощности в режиме его включения, удержания с учетом мощности рассеиваемой балластным резистором и потребляемой обмоткой мощности приведены на рисунке 4.3.

Влияние параметров механической характеристики на потребляемую ЭМ мощность иллюстрируют семейства кривых, изображенный на рисунках 4.3-4.5.

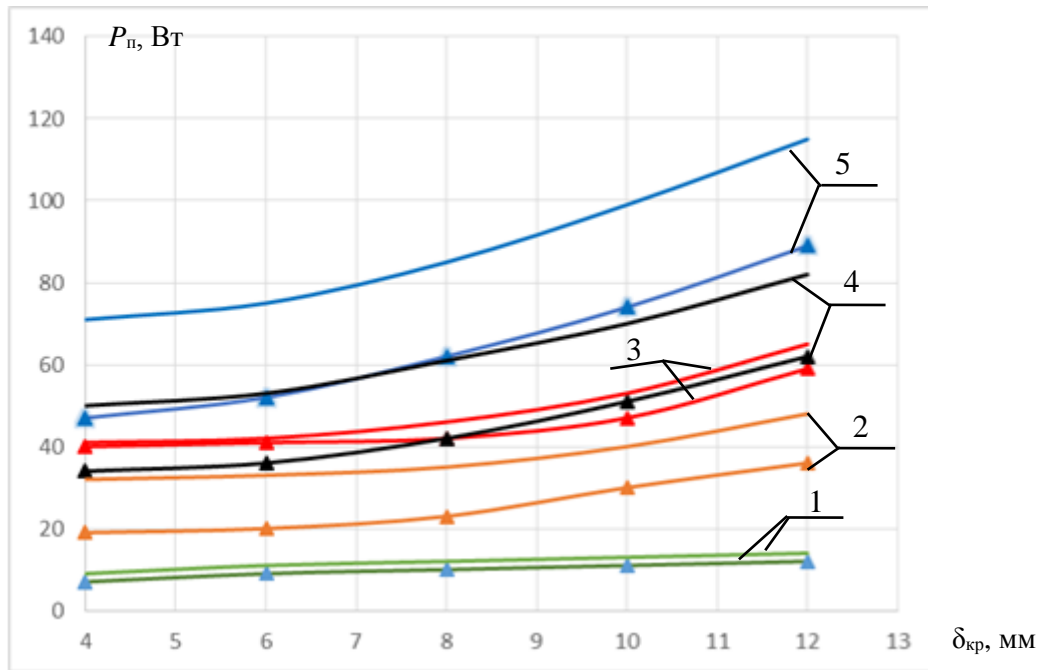


Рисунок 4.3 – Зависимость мощности потребляемой электромагнитом в период его включения при  $P_{\text{мх.кр}}$ : 2Н (1); 8,5 Н (2); 15 Н (3); 21,5 Н (4); 28 Н (5): при  $\Theta_{\text{доп}} = 115^\circ\text{C}$ :

— ( $T_0 = 40^\circ\text{C}$ ); —▲ ( $T_0 = 70^\circ\text{C}$ );  $P_{\text{мх}^*} = 4$ ;  $K_{\text{мах}} = 1,50$ ;  $K = 0,45$ ;  $K_3 = 0,50$

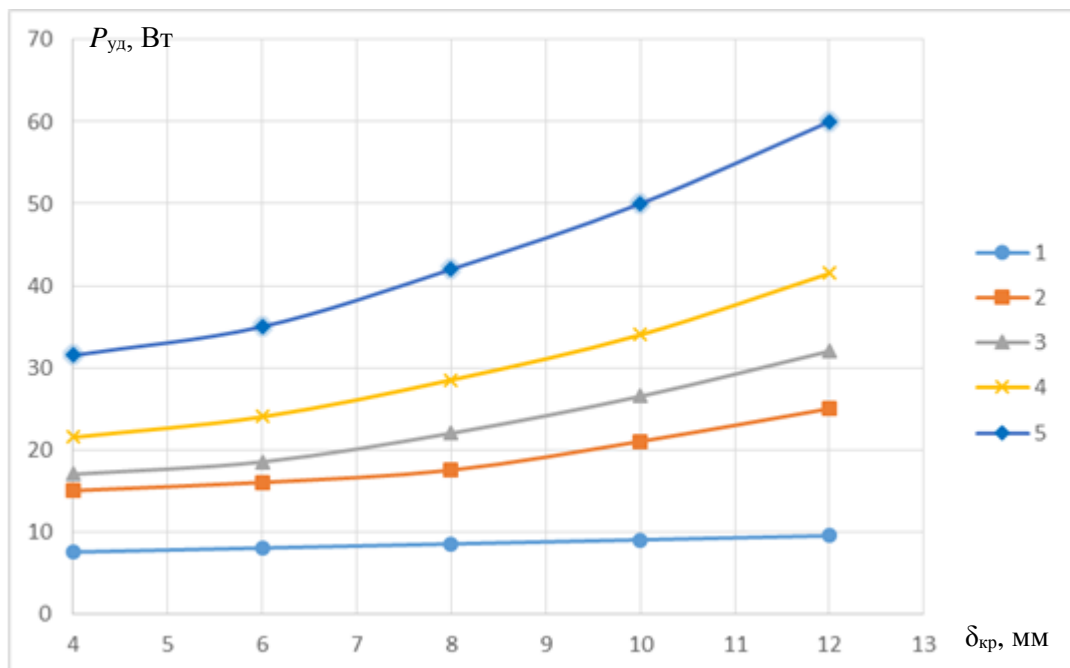


Рисунок 4.4 – Зависимость мощности потребляемой электромагнитом в период его удержания при  $P_{\text{мх.кр}}$ : 2Н (1); 8,5 Н (2); 15 Н (3); 21,5 Н (4); 28 Н (5): при  $T_0 = 40^\circ\text{C}$ ;  $\Theta_{\text{доп}} = 115^\circ\text{C}$ ;  $P_{\text{мх}^*} = 4$ ;

$K_{\text{мах}} = 1,50$ ;  $K = 0,45$ ;  $K_3 = 0,50$

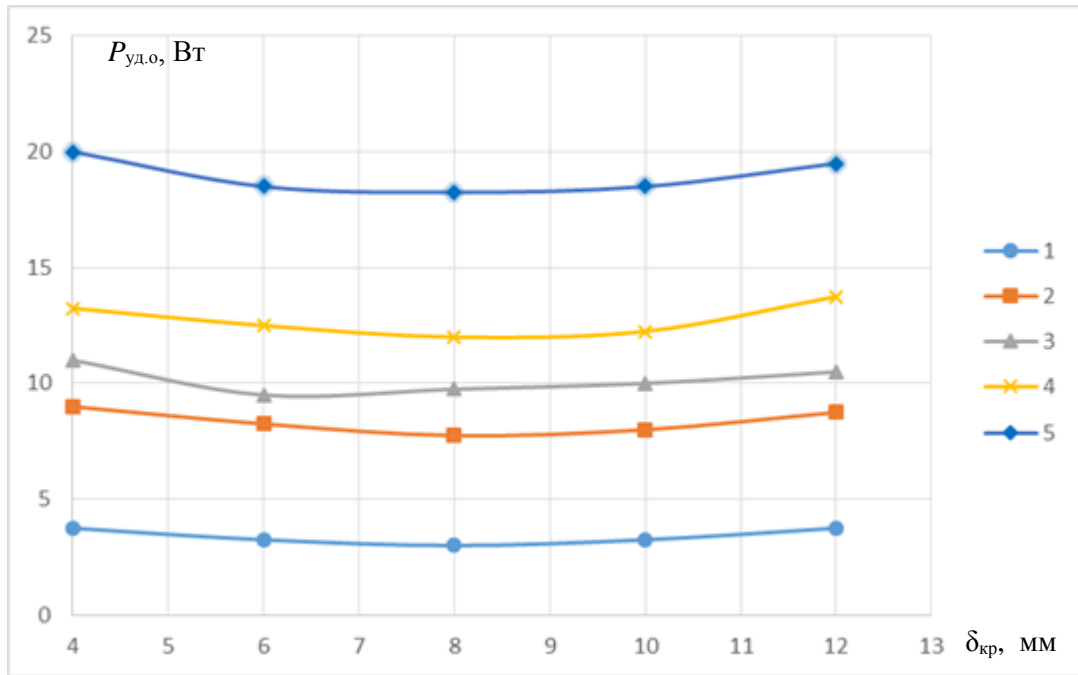


Рисунок 4.5 – Зависимость потребляемой обмоткой мощности в длительном режиме удержания при  $P_{мх.кр}$ : 2Н (1); 8,5 Н (2); 15 Н (3); 21,5 Н (4); 28 Н (5): при  $T_0 = 40^\circ\text{C}$ ;  $\Theta_{доп} = 115^\circ\text{C}$ ;  $P_{мх*} = 4$ ;  $K_{max} = 1,50$ ;  $K = 0,45$ ;  $K_3 = 0,50$

Представляет интерес оценка влияния коэффициентов, характеризующих условия функционирования и эксплуатации, оговариваемых в техническом задании на проектирование.

Коэффициент  $K_{max} = \frac{K_{U_{max}} \cdot K_{U_{cp}}}{K_{U_{min}}}$ , определяется как отношение максимального напряжения к напряжению срабатывания электромагнита. При минимизации массы активных материалов коэффициент  $K_{max}$  оказывает непосредственное влияние (см. раздел 2) на относительное значение сопротивления балластного резистора к сопротивлению горячей обмотки электромагнита ( $R_{д*}$ ) и на мощность, потребляемую в режиме включения и удержания электромагнита. В таблицах 4.6, 4.7, 4.8 приведены результаты расчетов  $R_{д*}$  соответственно при  $K_{max} = 1,3; 1,5; 1,7$ .

Из данных этих таблиц видно, что с ростом  $K_{max}$ , в указанных пределах, увеличивается примерно в 1,5 раза  $R_{д*}$  в точке ( $P_{мх.кр} = 28\text{Н}$ ;  $\delta_{кр} = 4 \cdot 10^{-3}\text{ м}$ ;  $T_0 = 40^\circ\text{C}$ ;  $\Theta_{доп} = 115^\circ\text{C}$ ) и в 1,4 раза в точке ( $P_{мх.кр} = 28\text{Н}$ ;  $\delta_{кр} = 12 \cdot 10^{-3}\text{ м}$ ;  $T_0 = 40^\circ\text{C}$ ;  $\Theta_{доп} = 115^\circ\text{C}$ ).

Из данных таблиц 4.9, 4.10, 4.11 следует, что при увеличении  $K_{max}$  от 1,30 до 1,70 увеличивается мощность, потребляемая при включении в 1,53 раза в точке ( $P_{мх.кр} = 28\text{Н}$ ;

$\delta_{кр} = 4 \cdot 10^{-3}$  м;  $T_0 = 40$  °С;  $\Theta_{доп} = 115$  °С) и в 1,33 раза в точке ( $P_{мх.кр} = 28$ Н;  $\delta_{кр} = 12 \cdot 10^{-3}$  м;  $T_0 = 40$  °С;  $\Theta_{доп} = 115$  °С).

Из данных таблиц 4.12, 4.13, 4.14 следует, что при варьировании  $K_{max}$  от 1,30 до 1,70 мощность потребляемая в продолжительном режиме работы может быть увеличена в 1,22 раза в точке ( $P_{мх.кр} = 28$ Н;  $\delta_{кр} = 12 \cdot 10^{-3}$  м;  $T_0 = 40$  °С;  $\Theta_{доп} = 115$  °С) и в 1,37 раза в точке ( $P_{мх.кр} = 28$ Н;  $\delta_{кр} = 4 \cdot 10^{-3}$  м;  $T_0 = 40$  °С;  $\Theta_{доп} = 115$  °С).

Таблица 4.6 – Зависимость относительной величины сопротивления балластного резистора в долях сопротивления горячей обмотки при принятых  $P_{мх*} = 4,5$ ;  $K_{max} = 1,30$ ;  $K = 0,45$ ;  $K_3 = 0,50$  в случае минимизации суммарной массы обмоточной меди и ферромагнитной стали, используемой в конструкции форсированного ВБЭМ

Исходные данные проектирования			Относительная величина сопротивления балластного резистора				
$\Theta_{доп}$ , °С	$T_0$ , °С	$\frac{\delta_{кр} \cdot 10^{-3}}{P_{мх.кр}}$	4	6	8	10	12
115	40	2 (Н)	0,623	0,802	1,016	1,271	1,571
		8,5 (Н)	0,593	0,765	0,973	1,219	1,510
		15 (Н)	0,564	0,730	0,930	1,169	1,451
		21,5 (Н)	0,536	0,696	0,890	1,121	1,394
		28 (Н)	0,509	0,664	0,850	1,074	1,339
	70	2 (Н)	0,319	0,429	0,565	0,731	0,932
		8,5 (Н)	0,301	0,406	0,537	0,697	0,891
		15 (Н)	0,283	0,384	0,510	0,665	0,851
		21,5 (Н)	0,267	0,363	0,484	0,633	0,813
		28 (Н)	0,251	0,343	0,459	0,602	0,777
155	40	2 (Н)	0,666	0,853	1,077	1,343	1,655
		8,5 (Н)	0,634	0,815	1,032	1,289	1,592
		15 (Н)	0,604	0,778	0,988	1,237	1,531
		21,5 (Н)	0,574	0,742	0,945	1,187	1,472
		28 (Н)	0,546	0,708	0,904	1,138	1,414
	70	2 (Н)	0,448	0,588	0,760	0,966	1,211
		8,5 (Н)	0,424	0,560	0,725	0,924	1,161
		15 (Н)	0,402	0,532	0,691	0,883	1,113
		21,5 (Н)	0,380	0,505	0,658	0,844	1,066
		28 (Н)	0,359	0,479	0,627	0,806	1,021

Таблица 4.7 – Зависимость относительной величины сопротивления балластного резистора в долях сопротивления горячей обмотки при принятых  $P_{\text{мх}*} = 4,5$ ;  $K_{\text{мак}} = 1,50$ ;  $K = 0,45$ ;  $K_3 = 0,50$  в случае минимизации суммарной массы обмоточной меди и ферромагнитной стали, используемой в конструкции форсированного ВБЭМ

Исходные данные проектирования			Относительная величина сопротивления балластного резистора				
$\Theta_{\text{доп}}, ^\circ\text{C}$	$T_0, ^\circ\text{C}$	$\frac{\delta_{\text{кр}} \cdot 10^{-3}}{P_{\text{мх.кр}}}$	4	6	8	10	12
115	40	2 (Н)	0,762	0,968	1,214	1,504	1,843
		8,5 (Н)	0,727	0,926	1,164	1,446	1,775
		15 (Н)	0,693	0,886	1,116	1,389	1,709
		21,5 (Н)	0,660	0,846	1,069	1,334	1,644
		28 (Н)	0,629	0,808	1,024	1,280	1,582
	70	2 (Н)	0,404	0,534	0,694	0,887	1,118
		8,5 (Н)	0,382	0,508	0,661	0,848	1,071
		15 (Н)	0,361	0,482	0,630	0,810	1,025
		21,5 (Н)	0,341	0,457	0,599	0,773	0,982
		28 (Н)	0,322	0,433	0,570	0,737	0,939
155	40	2 (Н)	0,811	1,027	1,284	1,586	1,938
		8,5 (Н)	0,774	0,983	1,232	1,525	1,868
		15 (Н)	0,739	0,941	1,182	1,466	1,799
		21,5 (Н)	0,705	0,900	1,133	1,408	1,732
		28 (Н)	0,672	0,860	1,086	1,353	1,667
	70	2 (Н)	0,557	0,721	0,920	1,156	1,436
		8,5 (Н)	0,529	0,687	0,879	1,108	1,380
		15 (Н)	0,502	0,655	0,840	1,062	1,325
		21,5 (Н)	0,477	0,624	0,802	1,017	1,271
		28 (Н)	0,452	0,594	0,766	0,973	1,220

Коэффициент  $K = \frac{K_{\text{отп}} \cdot K_{U_{\text{отп}}}}{K_{U_{\text{мак}}}}$  представляет взаимосвязь коэффициентов, регламентирующих отпускание якоря ( $K_{\text{отп}}$ ) приводного электромагнита коммутационного аппарата, коэффициент запаса по напряжению отпусканию ( $K_{U_{\text{отп}}}$ ) и коэффициент кратности максимального напряжения в долях номинального.

Зависимость диаметра якоря от величины комплекса коэффициента « $K$ » приведена в таблице 4.15 при  $\delta_{\text{кр}} = 4 \cdot 10^{-3}$  м и  $\delta_{\text{кр}} = 12 \cdot 10^{-3}$  м;  $\Theta_{\text{доп}} = 115$  °С.

Таблица 4.8 – Зависимость относительной величины сопротивления балластного резистора в долях сопротивления горячей обмотки при принятых  $P_{\text{мх.кп}}^* = 4,5$ ;  $K_{\text{мак}} = 1,70$ ;  $K = 0,45$ ;  $K_3 = 0,50$  в случае минимизации суммарной массы обмоточной меди и ферромагнитной стали, используемой в конструкции форсированного ВБЭМ

Исходные данные проектирования			Относительная величина сопротивления балластного резистора				
$\Theta_{\text{доп}}, ^\circ\text{C}$	$T_0, ^\circ\text{C}$	$\delta_{\text{кр}} \cdot 10^{-3}$	4	6	8	10	12
		$P_{\text{мх.кп}}$					
115	40	2 (H)	0,922	1,159	1,440	1,768	2,150
		8,5 (H)	0,882	1,159	1,383	1,702	2,073
		15 (H)	0,843	1,065	1,328	1,638	1,999
		21,5 (H)	0,805	1,020	1,275	1,575	1,926
		28 (H)	0,768	0,976	1,223	1,515	1,855
	70	2 (H)	0,505	0,658	0,844	1,066	1,33
		8,5 (H)	0,479	0,627	0,806	1,021	1,277
		15 (H)	0,454	0,596	0,769	0,977	1,225
		21,5 (H)	0,431	0,567	0,734	0,935	1,175
		28 (H)	0,408	0,539	0,700	0,894	1,126
155	40	2 (H)	0,979	1,227	1,519	1,861	2,257
		8,5 (H)	0,937	1,177	1,460	1,792	2,177
		15 (H)	0,896	1,128	1,403	1,725	2,100
		21,5 (H)	0,856	1,081	1,347	1,660	2,024
		28 (H)	0,818	1,035	1,293	1,597	1,951
	70	2 (H)	0,684	0,875	1,104	1,374	1,691
		8,5 (H)	0,652	0,836	1,057	1,319	1,627
		15 (H)	0,621	0,799	1,012	1,266	1,565
		21,5 (H)	0,591	0,762	0,969	1,215	1,505
		28 (H)	0,562	0,727	0,927	1,165	1,446

Таблица 4.9 – Зависимость мощности потребляемой электромагнитом при его включении в условиях:  $P_{\text{мх.кп}}^* = 4,5$ ;  $K_{\text{мак}} = 1,30$ ;  $K = 0,45$ ;  $K_3 = 0,50$  в случае минимизации суммарной массы обмоточной меди и ферромагнитной стали, используемой в конструкции форсированного ВБЭМ

Исходные данные проектирования			Мощность потребляемая электромагнитом при его включении, Вт				
$\Theta_{\text{доп}}, ^\circ\text{C}$	$T_0, ^\circ\text{C}$	$\delta_{\text{кр}} \cdot 10^{-3}$	4	6	8	10	12
		$P_{\text{мх.кп}}$					
115	40	2 (H)	9,70	9,60	10,4	11,6	13,1
		8,5 (H)	24,0	25,2	28,3	32,7	38,2
		15 (H)	29,3	32,0	37,2	44,1	52,7
		21,5 (H)	36,5	40,4	47,6	57,2	68,9
		28 (H)	53,2	58,2	67,9	80,7	96,6

Продолжение таблицы 4.9

Исходные данные проектирования			Мощность потребляемая электромагнитом при его включении, Вт				
$\Theta_{\text{доп}}, ^\circ\text{C}$	$T_0, ^\circ\text{C}$	$\delta_{\text{кр}} \cdot 10^{-3}$ $P_{\text{мх.кр}}$	4	6	8	10	12
115	70	2 (Н)	6,80	7,00	7,70	8,80	10,2
		8,5 (Н)	15,9	17,4	20,3	24,2	29,0
		15 (Н)	18,5	21,4	26,0	31,9	39,2
		21,5 (Н)	22,7	26,7	32,9	41,0	50,9
		28 (Н)	33,5	38,8	47,3	58,3	71,8
155	40	2 (Н)	12,8	12,5	13,3	14,6	16,4
		8,5 (Н)	32,3	33,2	36,8	41,9	48,4
		15 (Н)	40,1	42,7	48,8	57,1	67,3
		21,5 (Н)	50,3	54,4	62,8	74,2	88,2
		28 (Н)	72,9	78,0	89,2	105	123
	70	2 (Н)	9,10	9,10	10,0	11,2	12,8
		8,5 (Н)	21,8	23,3	26,7	31,3	37,1
		15 (Н)	26,0	29,1	34,6	41,8	50,6
		21,5 (Н)	32,1	36,6	44,1	54,0	66,0
		28 (Н)	47,1	53,0	63,1	76,5	92,8

Увеличение  $K$  от 0,35 до 0,55 приводит к монотонному снижению оптимального диаметра якоря. Наиболее существенно увеличивается диаметр якоря при увеличении  $P_{\text{мх.кр}}$  от 2 до 1,5 Н.

Таблица 4.10 – Зависимость мощности потребляемой электромагнитом при включении в условиях  $P_{\text{мх}*} = 4,5$ ;  $K_{\text{пmax}} = 1,50$ ;  $K = 0,45$ ;  $K_3 = 0,50$  в случае минимизации суммарной массы обмоточной меди и ферромагнитной стали, используемой в конструкции форсированного ВБЭМ

Исходные данные проектирования			Мощность потребляемая при включении, мм				
$\Theta_{\text{доп}}, ^\circ\text{C}$	$T_0, ^\circ\text{C}$	$\delta_{\text{кр}} \cdot 10^{-3}$ $P_{\text{мх.кр}}$	4	6	8	10	12
115	40	2 (Н)	11,6	11,3	12,0	13,2	14,8
		8,5 (Н)	29,3	30,1	33,3	37,9	43,8
		15 (Н)	36,4	38,8	44,2	51,6	60,8
		21,5 (Н)	45,7	49,4	57,0	67,2	79,8
		28 (Н)	66,3	70,7	80,8	94,6	112
	70	2 (Н)	8,2	8,3	9,0	10,2	11,6
		8,5 (Н)	19,8	21,2	24,2	28,4	33,5
		15 (Н)	23,6	26,5	31,4	37,9	45,8
		21,5 (Н)	29,2	33,3	40,0	48,9	59,7
		28 (Н)	42,9	48,1	57,3	69,3	83,9



Продолжение таблицы 4.10

Исходные данные проектирования			Мощность потребляемая при включении, мм				
$\Theta_{\text{доп}}, ^\circ\text{C}$	$T_0, ^\circ\text{C}$	$\delta_{\text{кр}} \cdot 10^{-3}$ $P_{\text{мх.кр}}$	4	6	8	10	12
155	40	2 (Н)	15,1	14,5	15,3	16,6	18,5
		8,5 (Н)	39,1	39,4	42,9	48,4	55,2
		15 (Н)	49,4	51,4	57,6	66,4	77,4
		21,5 (Н)	62,3	65,8	74,6	86,7	102
		28 (Н)	89,9	93,9	106	122	142
	70	2 (Н)	10,9	10,8	11,6	12,9	14,6
		8,5 (Н)	26,9	28,1	31,6	36,5	42,6
		15 (Н)	32,7	35,7	41,5	49,3	58,8
		21,5 (Н)	40,7	45,2	53,2	63,8	76,9
		28 (Н)	59,4	65,0	75,8	90,2	108

Таблица 4.11 – Зависимость мощности потребляемой электромагнитом при включении в условиях  $P_{\text{мх}*} = 4,5$ ;  $K_{\text{max}} = 1,70$ ;  $K = 0,45$ ;  $K_3 = 0,50$  в случае минимизации суммарной массы обмоточной меди и ферромагнитной стали, используемой в конструкции форсированного ВБЭМ

Исходные данные проектирования			Мощность потребляемая при включении, Вт				
$\Theta_{\text{доп}}, ^\circ\text{C}$	$T_0, ^\circ\text{C}$	$\delta_{\text{кр}} \cdot 10^{-3}$ $P_{\text{мх.кр}}$	4	6	8	10	12
115	40	2 (Н)	13,7	13,2	13,8	15,0	16,7
		8,5 (Н)	35,5	33,2	38,9	43,7	49,9
		15 (Н)	44,8	46,6	52,2	60,1	69,9
		21,5 (Н)	56,6	59,7	67,6	78,5	92,0
		28 (Н)	81,6	85,1	95,5	110	128
	70	2 (Н)	9,9	9,8	10,5	11,7	13,2
		8,5 (Н)	24,4	25,5	28,6	33,1	38,6
		15 (Н)	29,7	32,4	37,6	44,6	53,2
		21,5 (Н)	37,1	41,0	48,2	57,8	69,6
		28 (Н)	54,0	59,0	68,7	81,6	97,5
155	40	2 (Н)	17,8	16,8	17,5	18,9	20,8
		8,5 (Н)	46,9	46,4	49,9	55,5	62,7
		15 (Н)	60,1	61,4	67,7	76,9	88,5
		21,5 (Н)	76,4	78,9	87,9	101	117
		28 (Н)	110	112	124	141	163
	70	2 (Н)	12,9	12,6	13,4	14,8	16,5
		8,5 (Н)	32,8	33,6	37,1	42,3	48,8
		15 (Н)	40,7	43,3	49,4	57,7	67,9
		21,5 (Н)	51,1	55,1	63,6	75,0	89,1
		28 (Н)	74,0	79,0	90,2	106	125

Таблица 4.12 – Зависимость потребляемой приводом мощности в режиме удержания при принятых  $P_{\text{мх}*} = 4,5$ ;  $K_{\text{пмах}} = 1,30$ ;  $K = 0,45$ ;  $K_3 = 0,50$  в случае минимизации суммарной массы обмоточной меди и ферромагнитной стали, используемой в конструкции форсированного ВБЭМ

Исходные данные проектирования			Мощность потребляемая электромагнитом при его включении, Вт				
$\Theta_{\text{доп}}, ^\circ\text{C}$	$T_0, ^\circ\text{C}$	$\delta_{\text{кр}} \cdot 10^{-3}$	4	6	8	10	12
		$P_{\text{мх.кр}}$					
115	40	2 (Н)	6,3	6,3	6,9	7,8	8,9
		8,5 (Н)	13,2	14,4	16,7	19,8	23,6
		15 (Н)	14,2	16,4	20,0	24,6	30,3
		21,5 (Н)	16,7	19,9	24,7	30,9	38,5
		28 (Н)	25,5	29,6	36,2	44,8	55,2
	70	2 (Н)	4,8	5,0	5,6	6,4	7,5
		8,5 (Н)	9,6	10,9	13,0	15,8	19,3
		15 (Н)	9,9	12,0	15,2	19,3	24,3
		21,5 (Н)	11,5	14,4	18,6	24,0	30,7
		28 (Н)	17,8	21,7	27,6	35,1	44,3
155	40	2 (Н)	8,1	8,1	8,7	9,8	11,1
		8,5 (Н)	17,6	18,8	21,5	25,1	29,6
		15 (Н)	19,3	21,8	26,0	31,6	38,4
		21,5 (Н)	23,1	26,7	32,4	39,9	49,0
		28 (Н)	34,9	39,5	47,3	57,6	70,1
	70	2 (Н)	6,3	6,4	7,1	8,1	9,3
		8,5 (Н)	13,1	14,4	16,9	20,3	24,3
		15 (Н)	13,8	16,3	20,1	25,0	31,0
		21,5 (Н)	16,2	19,6	24,7	31,3	39,4
		28 (Н)	24,8	29,4	36,4	45,5	56,6

Таблица 4.13 – Зависимость потребляемой приводом мощности в режиме удержания при принятых  $P_{\text{мх}*} = 4,5$ ;  $K_{\text{пмах}} = 1,50$ ;  $K = 0,45$ ;  $K_3 = 0,50$  в случае минимизации суммарной массы обмоточной меди и ферромагнитной стали, используемой в конструкции форсированного ВБЭМ

Исходные данные проектирования			Мощность потребляемая электромагнитом при его включении, Вт				
$\Theta_{\text{доп}}, ^\circ\text{C}$	$T_0, ^\circ\text{C}$	$\delta_{\text{кр}} \cdot 10^{-3}$	4	6	8	10	12
		$P_{\text{мх.кр}}$					
115	40	2 (Н)	7,0	7,0	7,6	8,5	9,7
		8,5 (Н)	15,2	16,3	18,6	21,9	25,9
		15 (Н)	16,6	18,8	22,6	27,5	33,5
		21,5 (Н)	19,8	23,0	28,0	34,6	42,7
		28 (Н)	29,9	34,1	41,0	50,0	61,1

Продолжение таблицы 4.13

Исходные данные проектирования			Мощность потребляемая электромагнитом при его включении, Вт				
$\Theta_{\text{доп}}, ^\circ\text{C}$	$T_0, ^\circ\text{C}$	$\delta_{\text{кр}} \cdot 10^{-3}$ $P_{\text{мх.кр}}$	4	6	8	10	12
115	70	2 (Н)	5,5	5,6	6,2	7,1	8,1
		8,5 (Н)	11,2	12,5	14,7	17,6	21,2
		15 (Н)	11,8	14,0	17,3	21,7	27,0
		21,5 (Н)	13,8	16,8	21,3	27,1	34,2
		28 (Н)	21,2	25,3	31,5	39,5	49,3
155	40	2 (Н)	9,1	9,0	9,6	10,6	12,0
		8,5 (Н)	20,1	21,2	23,9	27,7	32,4
		15 (Н)	22,5	24,9	29,3	35,1	42,3
		21,5 (Н)	27,0	30,6	36,6	44,5	54,1
		28 (Н)	40,6	45,2	53,3	64,1	77,3
	70	2 (Н)	7,1	7,2	7,8	8,8	10,1
		8,5 (Н)	15,1	16,4	19,0	22,5	26,8
		15 (Н)	16,3	18,7	22,8	28,0	34,4
		21,5 (Н)	19,3	22,8	28,2	35,2	43,7
		28 (Н)	29,3	33,9	41,3	51,0	62,7

Таблица 4.14 – Зависимость потребляемой приводом мощности в режиме удержания при принятых  $P_{\text{мх}*} = 4,5$ ;  $K_{\text{мах}} = 1,70$ ;  $K = 0,45$ ;  $K_3 = 0,50$  в случае минимизации суммарной массы обмоточной меди и ферромагнитной стали, используемой в конструкции форсированного ВБЭМ

Исходные данные проектирования			Мощность потребляемая электромагнитом при его включении, Вт				
$\Theta_{\text{доп}}, ^\circ\text{C}$	$T_0, ^\circ\text{C}$	$\delta_{\text{кр}} \cdot 10^{-3}$ $P_{\text{мх.кр}}$	4	6	8	10	12
115	40	2 (Н)	7,9	7,8	8,4	9,3	10,5
		8,5 (Н)	17,4	7,8	20,8	24,2	28,3
		15 (Н)	19,3	21,5	25,4	30,6	36,9
		21,5 (Н)	23,2	26,4	31,7	38,7	47,2
		28 (Н)	34,9	39,0	46,2	55,7	67,4
	70	2 (Н)	6,2	6,2	6,8	7,7	8,8
		8,5 (Н)	13,0	14,2	16,5	19,6	23,4
		15 (Н)	13,9	16,1	19,7	24,3	29,9
		21,5 (Н)	16,4	19,6	24,3	30,5	38,1
		28 (Н)	25,1	29,2	35,7	44,2	54,6
155	40	2 (Н)	10,2	9,9	10,5	11,6	13,0
		8,5 (Н)	22,9	23,8	26,5	30,5	35,4
		15 (Н)	26,0	28,3	32,9	39,0	46,5
		21,5 (Н)	31,5	34,9	41,2	49,5	59,7
		28 (Н)	47,0	51,4	59,8	71,1	85,0

Продолжение таблицы 4.14

Исходные данные проектирования			Мощность потребляемая электромагнитом при его включении, Вт				
$\Theta_{\text{доп}}, ^\circ\text{C}$	$T_0, ^\circ\text{C}$	$\delta_{\text{кр}} \cdot 10^{-3}$ $P_{\text{мх.кр}}$	4	6	8	10	12
155	70	2 (Н)	8,0	8,0	8,6	9,7	11,0
		8,5 (Н)	17,3	18,5	21,2	24,9	29,3
		15 (Н)	19,0	21,5	25,7	31,2	38,0
		21,5 (Н)	22,7	26,3	32,0	39,4	48,5
		28 (Н)	34,3	39,0	46,7	56,9	69,4

Таблица 4.15 – Зависимость диаметра якоря при принятых  $P_{\text{мх}*} = 4,5$ ;  $K_{\text{max}} = 1,70$ ;  $K_3 = 0,50$  в случае минимизации суммарной массы обмоточной меди и ферромагнитной стали, используемой в конструкции форсированного ВБЭМ

Параметры		Диаметр якоря $d_{\text{як}} \cdot 10^{-3}$ м		
$T_0, ^\circ\text{C}$	$P_{\text{мх.кр}}$	$K$		
		0,35	0,45	0,55
40	2 (Н)	14,6	13,5	12,4
	8,5 (Н)	18,5	16,8	15,4
	15 (Н)	21,9	19,8	18,0
70	2 (Н)	15,6	14,3	13,2
	8,5 (Н)	19,8	18,0	16,4
	15 (Н)	23,6	21,3	19,3

Таблица 4.16 – Зависимость высоты обмотки при  $P_{\text{мх}*} = 4,5$ ;  $K_{\text{max}} = 1,70$ ;  $K_3 = 0,50$  в случае минимизации суммарной массы обмоточной меди и ферромагнитной стали, используемой в конструкции форсированного ВБЭМ

Параметры		Высота обмотки $H_0 \cdot 10^{-3}$ м		
$T_0, ^\circ\text{C}$	$P_{\text{мх.кр}}$	$K$		
		0,35	0,45	0,55
40	2 (Н)	58,2	52,2	47,0
	8,5 (Н)	73,5	65,2	58,1
	15 (Н)	87,3	76,9	68,0
70	2 (Н)	84,8	76,5	69,1
	8,5 (Н)	108	96,2	86,1
	15 (Н)	129	114	101,3

Аналогично изменяется оптимальная высота обмотки (таблица 4.16). При увеличении  $K$  от 0,35 до 0,55 оптимальная высота обмотки уменьшается в 1,24 раза при  $P_{\text{мх.кр}} = 2\text{Н}$ ,  $T_0 = 40^\circ\text{C}$  и в 1,28 раз при  $P_{\text{мх.кр}} = 15\text{Н}$ ,  $T_0 = 40^\circ\text{C}$ .

Таблица 4.17 – Зависимость потребляемой мощности при срабатывании в условиях  $P_{\text{мх}^*} = 4,5$ ;  $K_{\text{max}} = 1,70$ ;  $K_3 = 0,50$  в случае минимизации суммарной массы обмоточной меди и ферромагнитной стали, используемой в конструкции форсированного ВБЭМ

Параметры		Потребляемая мощность при срабатывании		
$T_0, \text{ }^\circ\text{C}$	$P_{\text{мх.кр}}$	$K$		
		0,35	0,45	0,55
40	2 (Н)	9,9	12,0	14,5
	8,5 (Н)	26,7	33,3	41,0
	15 (Н)	34,9	44,2	55,2
70	2 (Н)	7,3	9,0	11,0
	8,5 (Н)	19,1	24,2	30,3
	15 (Н)	24,7	31,4	40,0

Таблица 4.18 – Зависимость диаметра якоря при принятых  $P_{\text{мх}^*} = 4,5$ ;  $K_{\text{max}} = 1,70$ ;  $K = 0,45$  в случае минимизации суммарной массы обмоточной меди и ферромагнитной стали, используемой в конструкции форсированного ВБЭМ

Параметры		Диаметр якоря $d_{\text{як}} \cdot 10^{-3}$ м		
$\delta_{\text{кр}}, \text{ мм}$	$P_{\text{мх.кр}}$	$K_3$		
		0,30	0,50	0,70
4	2 (Н)	12,3	11,8	11,2
	8,5 (Н)	16,8	15,9	15,0
	15 (Н)	21,2	19,9	18,8
12	2 (Н)	15,3	14,8	14,4
	8,5 (Н)	18,5	17,9	17,3
	15 (Н)	21,3	20,6	19,8

С ростом  $K$  от 0,35 до 0,55 в 1,46 раза увеличивается потребляемая мощность (таблица 4.17 при  $P_{\text{мх.кр}} = 2\text{ Н}$  и  $T_0 = 40 \text{ }^\circ\text{C}$ , и в 1,58 раза – при  $P_{\text{мх.кр}} = 15\text{ Н}$ ,  $T_0 = 40 \text{ }^\circ\text{C}$ . Аналогичная картина наблюдается при  $T_0 = 70 \text{ }^\circ\text{C}$ :  $\frac{11,0}{7,3} = 1,51$  и  $\frac{40,0}{24,7} = 1,62$ .

Одним из важных коэффициентов, определяющих обмоточные данные катушки нефорсированного электромагнита [54, 88] является коэффициент ( $K_3$ ) заполнения обмоточного окна. Увеличение его приводит к уменьшению диаметра сердечника, необходимой толщины обмотки, потребляемой ею мощности [54, 88]. Проведенные расчеты, результаты которых отражены в таблицах 4.18, 4.19, 4.20, свидетельствуют, что этими свойствами обладают и форсировано управляемые электромагниты, включенные по схеме с балластным

резистором и спроектированные с минимизацией критерия массы активных материалов и частично также по другим частным критериям оптимальности.

Таблица 4.19 – Зависимость толщины обмотки при принятых  $P_{\text{мх}^*} = 4,5$ ;  $K_{\text{мах}} = 1,70$ ;  $K = 0,45$  в случае минимизации суммарной массы обмоточной меди и ферромагнитной стали, используемой в конструкции форсированного ВБЭМ

Параметры		Толщина обмотки $A_0 \cdot 10^{-3}$ м		
$\delta_{\text{кр}}$ , мм	$P_{\text{мх.кр}}$	$K_3$		
		0,30	0,50	0,70
4	2 (Н)	9,5	8,64	7,9
	8,5 (Н)	12,9	11,7	10,5
	15 (Н)	16,3	14,7	13,2
12	2 (Н)	11,8	10,9	10,1
	8,5 (Н)	14,3	13,2	12,2
	15 (Н)	16,4	15,1	13,9

Таблица 4.20 – Зависимость мощности, потребляемой обмоткой в продолжительном режиме в условиях  $P_{\text{мх}^*} = 4,5$ ;  $K_{\text{мах}} = 1,70$ ;  $K = 0,45$  в случае минимизации суммарной массы обмоточной меди и ферромагнитной стали, используемой в конструкции форсированного ВБЭМ

Параметры		Мощность, потребляемая обмоткой в продолжительном режиме		
$\delta_{\text{кр}}$ , мм	$P_{\text{мх.кр}}$	$K_3$		
		0,30	0,50	0,70
4	2 (Н)	4,66	4,2	3,73
	8,5 (Н)	10,9	9,6	8,4
	15 (Н)	12,9	11,2	9,63
12	2 (Н)	3,68	3,37	3,1
	8,5 (Н)	9,73	8,8	7,9
	15 (Н)	12,6	11,3	10,1

Таблица 4.21 – Минимизированная масса активных материалов, используемая в конструкции форсированного ВБЭМ, управляемого по схеме с балластным резистором при  $P_{\text{мх}^*} = 4,5$ ;  $K_{\text{мах}} = 1,30$ ;  $K = 0,45$ ;  $K_3 = 0,50$

Исходные данные проектирования			Масса активных материалов, кг				
$\Theta_{\text{доп}}, ^\circ\text{C}$	$T_0, ^\circ\text{C}$	$\frac{\delta_{\text{кр}} \cdot 10^{-3}}{P_{\text{мх.кр}}}$	4	6	8	10	12
115	40	2 (Н)	0,277	0,318	0,322	0,334	0,384
		8,5 (Н)	0,569	0,654	0,661	0,687	0,789
		15 (Н)	0,927	1,067	1,077	1,120	1,286
		21,5 (Н)	1,197	1,378	1,392	1,447	1,662
		28 (Н)	1,227	1,412	1,426	1,482	1,703
	70	2 (Н)	0,376	0,433	0,437	0,454	0,522
		8,5 (Н)	0,773	0,890	0,898	0,934	1,073
		15 (Н)	1,260	1,450	1,464	1,522	1,749
		21,5 (Н)	1,628	1,873	1,891	1,966	2,259
		28 (Н)	1,667	1,919	1,938	2,014	2,315
155	40	2 (Н)	0,227	0,261	0,263	0,274	0,315
		8,5 (Н)	0,466	0,536	0,541	0,563	0,646
		15 (Н)	0,759	0,873	0,882	0,917	1,053
		21,5 (Н)	0,981	1,128	1,139	1,184	1,361
		28 (Н)	1,004	1,156	1,167	1,213	1,394
	70	2 (Н)	0,308	0,354	0,358	0,372	0,427
		8,5 (Н)	0,633	0,728	0,736	0,765	0,879
		15 (Н)	1,031	1,187	1,199	1,246	1,432
		21,5 (Н)	1,333	1,534	1,549	1,610	1,850
		28 (Н)	1,365	1,571	1,587	1,649	1,895

## 4.2 Анализ результатов оптимизации форсированных электромагнитов, управляемых по двухобмоточным схемам

### 4.2.1 Минимизация стоимости активных материалов, используемых в конструкции электромагнита с пусковой и удерживающей обмотками

Анализ результатов оптимизации двухобмоточных форсированных ВБЭМ в схеме с пусковой и удерживающей обмотками по критерию оптимальности «стоимость активных материалов» представлен в виде графических зависимостей и табличной формы записи и выполнен на основе полиномиальных зависимостей, полученных в разделе 3.2.

Влияние на размеры ЭМ ( $d_{\text{як}}, H_0, A_0, A_{\text{п}}, H_{\text{в}}, H_{\text{ст}}$ ) условий проектирования приведено на рисунках 4.5 – 4.10.

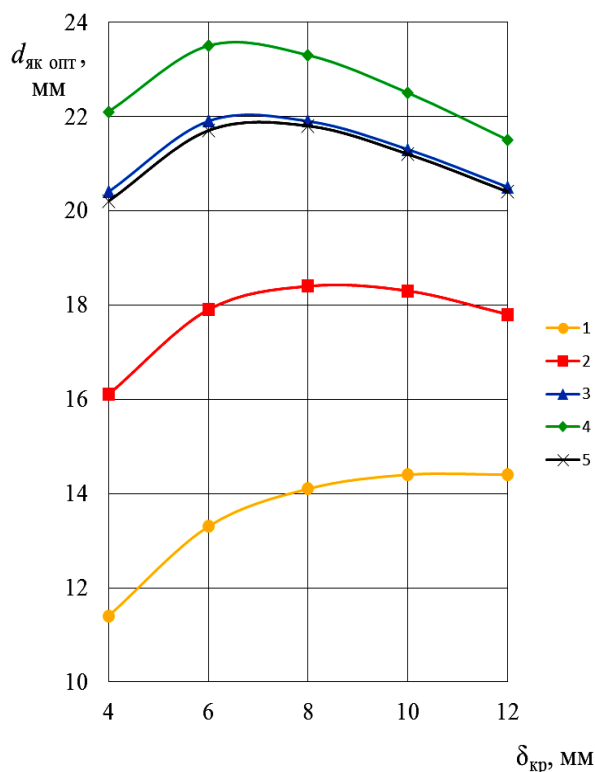


Рисунок 4.5 – Зависимости оптимальных диаметров якоря ЭМ от величины критического значения рабочего воздушного зазора при  $P_{мх.кр}$ : 2 Н (1); 8,5 Н (2); 15 Н (3); 21,5 Н (4); 28 Н (5); при  $\Theta_{доп} = 115$  °С;  $T_0 = 40$  °С;  $P_{мх}^* = 3,5$ ;  $K_{max} = 1,6$ ;  $K_{з.по} = 0,50$ ;  $K_{з.yo} = 0,37$ ;  $K = 0,35$

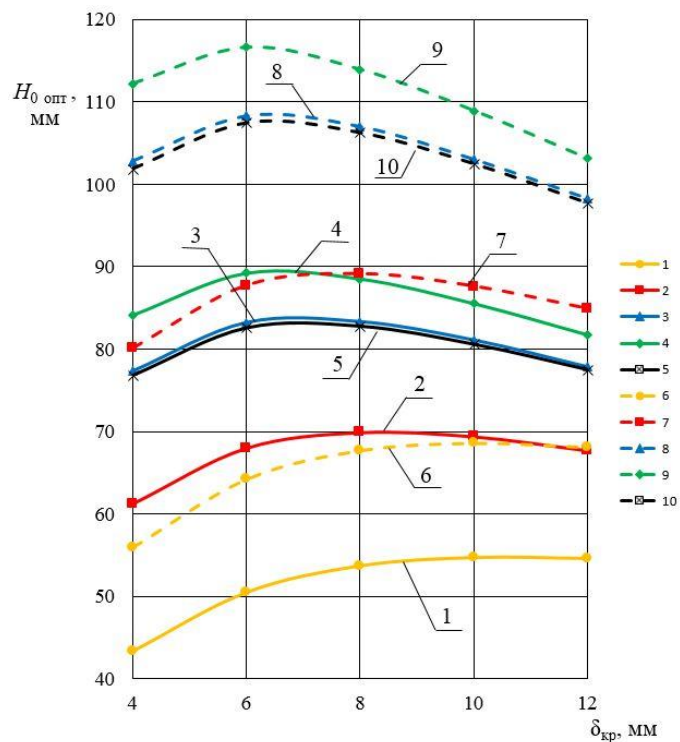


Рисунок 4.6 – Зависимости оптимальной высоты обмотки ЭМ от величины критического значения рабочего воздушного зазора при  $P_{мх.кр}$ : 2 Н (1,6); 8,5 Н (2,7); 15 Н (3,8); 21,5 Н (4,9); 28 Н (5,10); — (при  $T_0 = 40$  °С); --- (при  $T_0 = 70$  °С); при  $\Theta_{доп} = 115$  °С;  $P_{мх}^* = 3,5$ ;  $K_{max} = 1,6$ ;  $K_{з.по} = 0,50$ ;  $K_{з.yo} = 0,37$ ;  $K = 0,35$

Индукция при срабатывании и отпуске ЭМ, МДС отпущения не зависят от величины критического рабочего воздушного зазора, но возрастает при увеличении механической критической силы, температуры окружающей среды и допустимой температуры нагрева обмоток.

Среднеобъемные температуры пусковой и удерживающей обмоток остаются неизменными при изменении координаты критической точки механической характеристики.

Характер изменения МДС срабатывания, мощностей при пуске и удержании, кратности витков и стоимости активных материалов представлен в таблицах 4.22-4.26.



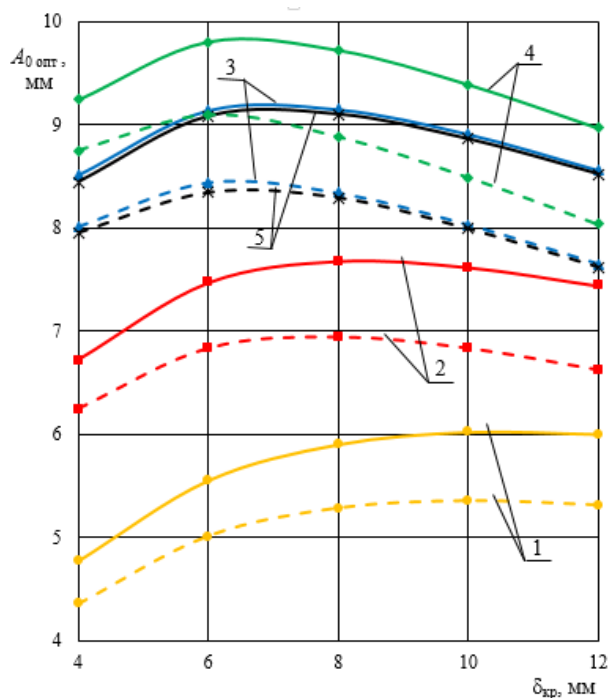


Рисунок 4.7 – Зависимости оптимальной суммарной ширины окна обмотки ЭМ от величины критического значения рабочего воздушного зазора при  $P_{\text{мх.кр}}$ : 2 Н (1); 8,5 Н (2); 15 Н (3); 21,5 Н (4); 28 Н (5);  
 — (при  $T_0 = 40 \text{ }^\circ\text{C}$ ); - - - (при  $T_0 = 70 \text{ }^\circ\text{C}$ );  
 при  $\Theta_{\text{доп}} = 115 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $P_{\text{мх}}^* = 3,5$ ;  $K_{\text{max}} = 1,6$ ;  
 $K_{\text{з.по}} = 0,50$ ;  $K_{\text{з.yo}} = 0,37$ ;  $K = 0,35$

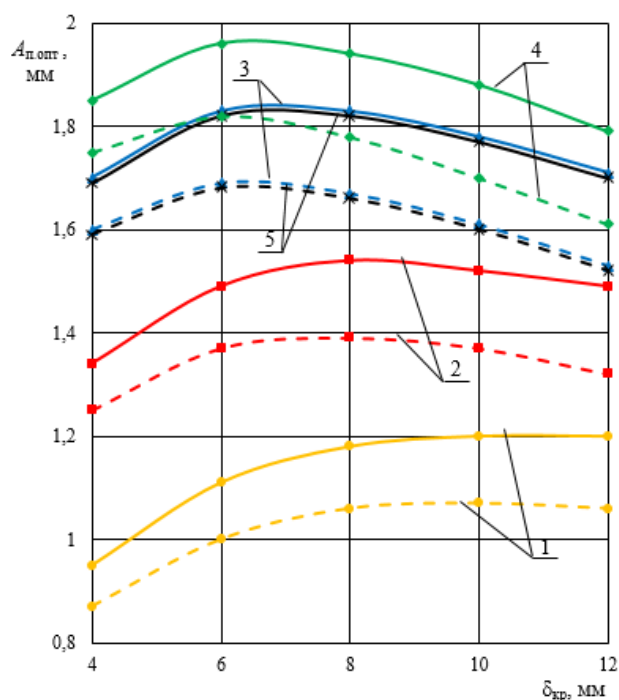


Рисунок 4.8 – Зависимости оптимальной ширины пусковой обмотки ЭМ от величины критического значения рабочего воздушного зазора при  $P_{\text{мх.кр}}$ : 2 Н (1); 8,5 Н (2); 15 Н (3); 21,5 Н (4); 28 Н (5);  
 — (при  $T_0 = 40 \text{ }^\circ\text{C}$ ); - - - (при  $T_0 = 70 \text{ }^\circ\text{C}$ );  
 при  $\Theta_{\text{доп}} = 115 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $P_{\text{мх}}^* = 3,5$ ;  $K_{\text{max}} = 1,6$ ;  
 $K_{\text{з.по}} = 0,50$ ;  $K_{\text{з.yo}} = 0,37$ ;  $K = 0,35$

Из данных таблиц 4.22, 4.23, 4.25 следует, что при возрастании критического рабочего воздушного зазора и механической критической силы МДС срабатывания, пусковая мощность и кратность числа витков возрастают, а при росте температур уменьшаются.

Мощность при удержании (таблица 4.24) имеет локальный максимум при  $\delta_{\text{кр}} = 8 \text{ мм}$  и при  $P_{\text{мх.кр}} = 21,5 \text{ Н}$ .

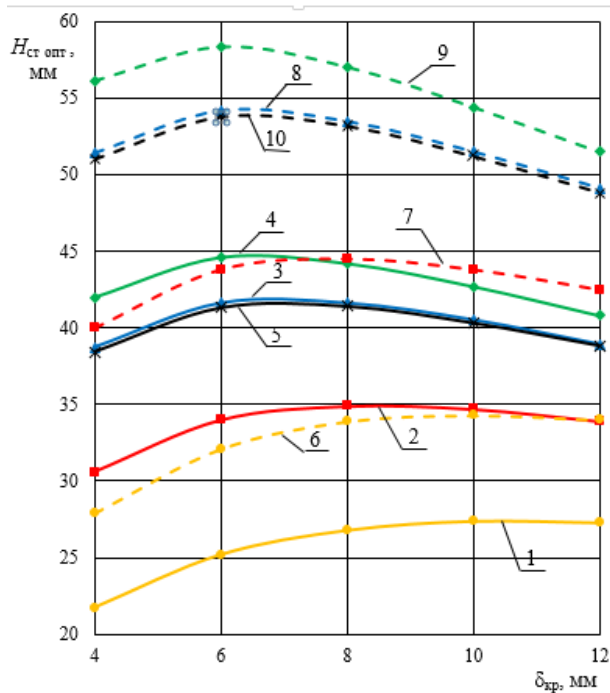


Рисунок 4.9 – Зависимости оптимальной высоты стопа ЭМ от величины критического значения рабочего воздушного зазора при  $P_{\text{мх.кр.}}$ : 2 Н (1, 6); 8,5 Н (2, 7); 15 Н (3, 8); 21,5 Н (4, 9); 28 Н (5, 10); — (при  $T_0 = 40 \text{ }^\circ\text{C}$ ); - - - (при  $T_0 = 70 \text{ }^\circ\text{C}$ ); при  $\Theta_{\text{доп}} = 115 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $P_{\text{мх}}^* = 3,5$ ;  $K_{\text{max}} = 1,6$ ;  $K_{\text{з.по}} = 0,50$ ;  $K_{\text{з.yo}} = 0,37$ ;  $K = 0,35$

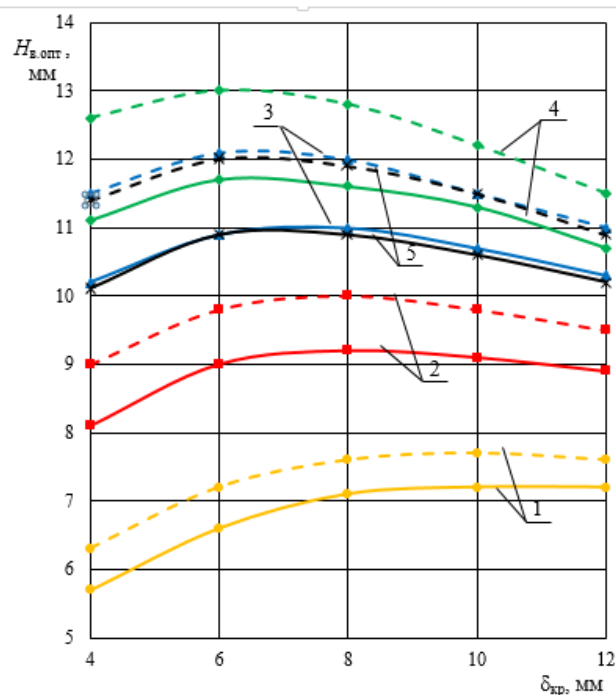


Рисунок 4.10 – Зависимости оптимальной высоты воротничка ЭМ от величины критического значения рабочего воздушного зазора при  $P_{\text{мх.кр.}}$ : 2 Н (1, 6); 8,5 Н (2, 7); 15 Н (3, 8); 21,5 Н (4, 9); 28 Н (5, 10); — (при  $T_0 = 40 \text{ }^\circ\text{C}$ ); - - - (при  $T_0 = 70 \text{ }^\circ\text{C}$ ); при  $\Theta_{\text{доп}} = 115 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $P_{\text{мх}}^* = 3,5$ ;  $K_{\text{max}} = 1,6$ ;  $K_{\text{з.по}} = 0,50$ ;  $K_{\text{з.yo}} = 0,37$ ;  $K = 0,35$

Таблица 4.22 – Минимизация стоимости активных материалов, используемых в конструкции броневое электромагнита с пусковой и удерживающей обмотками при  $P_{\text{мх}}^* = 3,5$ ;  $K_{\text{max}} = 1,6$ ;  $K_{\text{з.по}} = 0,37$ ;  $K_{\text{з.yo}} = 0,50$ ;  $K = 0,35$

Исходные данные проектирования			Магнитодвижущая сила срабатывания $F_{\text{ср}}$ , А				
$\Theta_{\text{доп}}$ , $^\circ\text{C}$	$T_0$ , $^\circ\text{C}$	$\delta_{\text{кр}} \cdot 10^{-3}$	4	6	8	10	12
		$P_{\text{мх.кр}}$					
115	40	2 (Н)	760	894	1039	1196	1363
		8,5 (Н)	1125	1361	1620	1902	2206
		15 (Н)	1213	1497	1811	2156	2530
		21,5 (Н)	1394	1728	2098	2504	2945
		28 (Н)	1826	2233	2680	3169	3699
	70	2 (Н)	722	853	996	1149	1312
		8,5 (Н)	1060	1289	1542	1817	2114
		15 (Н)	1135	1410	1716	2052	2417
		21,5 (Н)	1303	1626	1986	2381	2812
		28 (Н)	1714	2109	2545	3021	3539

Продолжение таблицы 4.22

Исходные данные проектирования			Магнитодвижущая сила срабатывания $F_{cp}$ , А				
$\Theta_{доп}$ , °С	$T_0$ , °С	$\frac{\delta_{кр} \cdot 10^{-3}}{P_{мх.кр}}$	4	6	8	10	12
155	40	2 (Н)	848	990	1143	1306	1481
		8,5 (Н)	1280	1532	1806	2102	2421
		15 (Н)	1399	1704	2038	2403	2797
		21,5 (Н)	1613	1971	2365	2795	3261
		28 (Н)	2093	2527	3003	3519	4076
	70	2 (Н)	809	947	1097	1257	1428
		8,5 (Н)	1211	1456	1723	2013	2325
		15 (Н)	1316	1611	1937	2293	2678
		21,5 (Н)	1515	1863	2246	2665	3120
		28 (Н)	1973	2396	2859	3363	3908

Таблица 4.23 – Минимизация стоимости активных материалов, используемых в конструкции броневое электромагнита с пусковой и удерживающей обмотками при  $P_{мх*} = 3,5$ ;  $K_{пмх} = 1,6$ ;  $K_{зпо} = 0,37$ ;  $K_{зyo} = 0,50$ ;  $K = 0,35$

Исходные данные проектирования			Пусковая мощность электромагнита $P_{п}$ , Вт				
$\Theta_{доп}$ , °С	$T_0$ , °С	$\frac{\delta_{кр} \cdot 10^{-3}}{P_{мх.кр}}$	4	6	8	10	12
115	40	2 (Н)	61,53	88,28	117,3	142,9	160,4
		8,5 (Н)	109,9	176,2	251,6	322,1	373,3
		15 (Н)	107,2	186,9	281,7	373,6	443,2
		21,5 (Н)	123,1	221,9	341,6	459,3	549,7
		28 (Н)	194,4	340,4	514,5	683,5	811,7
	70	2 (Н)	47,13	69,9	94,8	117,3	132,9
		8,5 (Н)	80,7	135,0	198,2	258,4	303,1
		15 (Н)	76,11	140,0	217,7	294,9	354,7
		21,5 (Н)	86,3	164,4	262,1	360,3	437,5
		28 (Н)	137,8	254,3	397,2	539,1	649,2
155	40	2 (Н)	104,7	143,1	183,9	219,1	242,2
		8,5 (Н)	199,3	299,7	410,6	511,1	581,6
		15 (Н)	204,0	330,0	473,2	607,7	706,0
		21,5 (Н)	238,8	397,0	580,3	754,3	883
		28 (Н)	371,0	601,4	866	1113	1294
	70	2 (Н)	81,72	115,0	150,5	181,7	203
		8,5 (Н)	150,0	233,9	328	415	478
		15 (Н)	149,3	252,0	372,1	487	572,4
		21,5 (Н)	173,0	301,0	453,4	600,9	712,5
		28 (Н)	271,0	459,3	680	891,2	1049

Таблица 4.24 – Минимизация стоимости активных материалов, используемых в конструкции броневое электромагнита с пусковой и удерживающей обмотками при  $P_{\text{мх}^*} = 3,5$ ;  $K_{\text{пмах}} = 1,6$ ;  $K_{\text{зпо}} = 0,37$ ;  $K_{\text{зйо}} = 0,50$ ;  $K = 0,35$

Исходные данные проектирования			Мощность, потребляемая в режиме удержания $P_{\text{уд}}$ , Вт				
$\Theta_{\text{доп}}$ , °C	$T_0$ , °C	$\frac{\delta_{\text{кр}} \cdot 10^{-3}}{P_{\text{мх.кр}}}$	4	6	8	10	12
115	40	2 (Н)	2,83	3,04	3,09	2,91	2,48
		8,5 (Н)	9,40	10,29	10,61	10,02	8,57
		15 (Н)	12,84	14,35	15,0	14,23	12,19
		21,5 (Н)	14,09	16,1	17,02	16,29	14,0
		28 (Н)	13,9	16,2	17,42	16,79	14,41
	70	2 (Н)	3,21	3,41	3,46	3,24	2,77
		8,5 (Н)	10,73	11,62	11,9	11,21	9,58
		15 (Н)	14,74	16,28	16,88	15,99	13,68
		21,5 (Н)	16,3	18,36	19,3	18,38	15,75
		28 (Н)	16,12	18,62	19,83	19,04	16,33
155	40	2 (Н)	3,15	3,39	3,45	3,24	2,77
		8,5 (Н)	10,49	11,47	11,83	11,17	9,56
		15 (Н)	14,32	16,0	16,7	15,9	13,6
		21,5 (Н)	15,71	18,0	19,0	18,2	15,6
		28 (Н)	15,5	18,1	19,4	18,72	16,1
	70	2 (Н)	3,58	3,81	3,86	3,61	3,09
		8,5 (Н)	12,0	12,96	13,3	12,5	10,7
		15 (Н)	16,44	18,2	18,8	17,8	15,3
		21,5 (Н)	18,14	20,47	21,50	20,5	17,56
		28 (Н)	18,0	20,8	22,11	21,2	18,2

Таблица 4.25 – Минимизация стоимости активных материалов, используемых в конструкции броневое электромагнита с пусковой и удерживающей обмотками при  $P_{\text{мх}^*} = 3,5$ ;  $K_{\text{пмах}} = 1,6$ ;  $K_{\text{зпо}} = 0,37$ ;  $K_{\text{зйо}} = 0,50$ ;  $K = 0,35$

Исходные данные проектирования			Кратность числа витков электромагнита $n$				
$\Theta_{\text{доп}}$ , °C	$T_0$ , °C	$\frac{\delta_{\text{кр}} \cdot 10^{-3}}{P_{\text{мх.кр}}}$	4	6	8	10	12
115	40	2 (Н)	5,68	6,74	7,95	9,3	10,83
		8,5 (Н)	4,72	5,64	6,7	7,90	9,25
		15 (Н)	4,29	5,15	6,14	7,26	8,53
		21,5 (Н)	4,29	5,16	6,15	7,27	8,54
		28 (Н)	4,74	5,66	6,72	7,92	9,28
	70	2 (Н)	4,98	5,98	7,05	8,29	9,69
		8,5 (Н)	4,11	4,95	5,91	7,0	8,24
		15 (Н)	3,73	4,50	5,40	6,42	7,58

Продолжение таблицы 4.25

Исходные данные проектирования			Кратность числа витков электромагнита $n$				
$\Theta_{\text{доп}}, ^\circ\text{C}$	$T_0, ^\circ\text{C}$	$\delta_{\text{кр}} \cdot 10^{-3}$ $P_{\text{мх.кр}}$	4	6	8	10	12
115	70	21,5 (Н)	3,73	4,51	5,41	6,43	7,59
		28 (Н)	4,13	4,97	5,93	7,03	8,27
155	40	2 (Н)	5,68	6,74	7,95	9,3	10,83
		8,5 (Н)	4,72	5,64	6,70	7,9	9,25
		15 (Н)	4,29	5,15	6,14	7,26	8,53
		21,5 (Н)	4,29	5,16	6,15	7,27	8,54
		28 (Н)	4,74	5,66	6,72	7,92	9,28
	70	2 (Н)	4,98	5,95	7,05	8,29	9,69
		8,5 (Н)	4,11	4,95	5,91	7,0	8,24
		15 (Н)	3,73	4,50	5,40	6,42	7,58
		21,5 (Н)	3,73	4,51	5,41	6,43	7,59
		28 (Н)	4,13	4,97	5,93	7,03	8,27

Таблица 4.26 – Минимизация стоимости активных материалов, используемых в конструкции броневое электромагнита с пусковой и удерживающей обмотками при  $P_{\text{мх}^*} = 3,5$ ;  $K_{\text{пмх}} = 1,6$ ;  $K_{\text{зпо}} = 0,37$ ;  $K_{\text{зю}} = 0,50$ ;  $K = 0,35$

Исходные данные проектирования			Оптимальная стоимость активных материалов $C_a$ , руб				
$\Theta_{\text{доп}}, ^\circ\text{C}$	$T_0, ^\circ\text{C}$	$\delta_{\text{кр}} \cdot 10^{-3}$ $P_{\text{мх.кр}}$	4	6	8	10	12
115	40	2 (Н)	119,6	119,6	119,6	119,6	119,6
		8,5 (Н)	243,3	243,3	243,3	243,3	243,3
		15 (Н)	381,1	381,1	381,1	381,1	381,1
		21,5 (Н)	492,0	492,0	492,0	492,0	492,0
		28 (Н)	541,3	541,3	541,3	541,3	541,3
	70	2 (Н)	161,5	161,5	161,5	161,5	161,5
		8,5 (Н)	314,5	314,5	314,5	314,5	314,5
		15 (Н)	480	480	480	480	480
		21,5 (Н)	610,9	610,9	610,9	610,9	610,9
		28 (Н)	669,0	669,0	669,0	669,0	669,0
155	40	2 (Н)	69,5	69,5	69,5	69,5	69,5
		8,5 (Н)	156	156	156	156	156
		15 (Н)	257	257	257	257	257
		21,5 (Н)	340	340	340	340	340
		28 (Н)	377	377	377	377	377
	70	2 (Н)	98,3	98,3	98,3	98,3	98,3
		8,5 (Н)	207,5	207,5	207,5	207,5	207,5
		15 (Н)	331,0	331,0	331,0	331,0	331,0
		21,5 (Н)	431	431	431	431	431
		28 (Н)	475,4	475,4	475,4	475,4	475,4

### 4.3 Выводы

1. Наиболее существенное влияние на размеры (диаметр якоря, высоту и толщину обмотки) электромагнита оказывают координаты критической точки механической характеристики.

В диапазоне изменения  $P_{\text{мх.кр}}$  от 2 до 15 Н для однообмоточного ВБЭМ оптимальные диаметр якоря, высота, толщина обмотки увеличиваются в 1,68; 1,59; 1,68 раза соответственно при  $\delta_{\text{кр}} = 4 \cdot 10^{-3}$  (м) и в 1,39; 1,47; 1,66 раза соответственно при  $\delta_{\text{кр}} = 12 \cdot 10^{-3}$  (м).

В диапазоне изменения  $P_{\text{мх.кр}}$  от 2 до 15 Н для двухобмоточного ВБЭМ оптимальные диаметр якоря, высота, толщина обмотки увеличиваются в среднем на 1,78 при  $\delta_{\text{кр}} = 4 \cdot 10^{-3}$  (м) и в 1,43 при  $\delta_{\text{кр}} = 12 \cdot 10^{-3}$  (м).

2. С увеличением температуры окружающей среды растут необходимые диаметр якоря, высота обмотки и уменьшается толщина обмотки.

С увеличением допустимой температуры нагрева уменьшаются оптимальные диаметр якоря, высота и толщина обмотки.

3. Высота неподвижного сердечника (стопа) возрастает при увеличении  $P_{\text{мх.кр}}$  с 2 до 15 Н примерно в 1,46÷1,78 раза. При этом относительная высота стопа в долях высоты обмотки остается равной 0,48 для однообмоточного ВБЭМ и 0,5 для двухобмоточного.

Аналогичная ситуация имеет место с высотой внешнего воротничка. Высота воротничка в долях оптимального диаметра якоря в области выбранных исходных данных проектного расчета остается на уровне приблизительно равным 0,45 для однообмоточного ЭМ и 0,5 для двухобмоточного.

4. При срабатывании и отпуске магнитные индукции усредненные по поперечному сечению наиболее нагруженного участка магнитной системы мало отличаются от граничного значения, равного 1,1 Тл, не более, чем на  $\pm 10$  %.

5. Мощность потребляемая электромагнитом при его включении и в режиме удержания монотонно увеличивается с ростом критического значения рабочего воздушного зазора ( $\delta_{\text{кр}}$ ).

Мощность потребляемая обмоткой в режиме удержания в зависимости от  $\delta_{\text{кр}}$  изменяется незначительно, достигая слабовыраженного минимума при  $\delta_{\text{кр}} = 8 \cdot 10^{-3}$  м. Она существенно возрастает с увеличением критического усилия на механической характеристике при кратности  $P_{\text{мх}*} = 4$ .

6. Относительная величина ( $R_{д*} = R_{д} / R_{г}$ ) сопротивления ( $R_{д}$ ) балластного резистора в долях сопротивления ( $R_{г}$ ) обмотки зависит от произведения кратности МДС срабатывания в долях МДС отпускания, комплексов коэффициентов  $K_{\max}$ ,  $K$  за вычетом отношения удельных сопротивлений обмоточной меди в холодном и горячем их состоянии.

При расчете обмоточных данных и параметров балластного резистора при известных номинальном напряжении и размерах катушки рекомендуется следующая последовательность вычислений:

- а) по известным размерам  $\rho_{г}$ ,  $F_{ср}$ ,  $U_{ср}$  вычисляется диаметр ( $d_{м}$ ) обмоточной проволоки с последующим уточнением  $d_{м}$  и соответствующего  $K_{3}$ ;
- б) рассчитывается число витков:  $\rho_{х}$ ,  $R_{х}$ ,  $R_{д}$ ;
- в) рассчитывается мощность, выделяющаяся в балластном резисторе;
- г) по данным п.п. б), в) выбираются параметры резистора.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе усовершенствованы методики проектирования форсированных одно- и двухобмоточных ВБЭМ с различными схемами управления и получены следующие результаты:

1. Проведенный анализ существующих методик проектирования форсированных ВБЭМ подтвердил необходимость разработки и усовершенствования методик их синтеза, которые адекватно отражали бы особенности их конструкций и режимов работы, обеспечивая при этом высокую точность расчетов.

2. Предложен общий подход к синтезу форсированных ВБЭМ и разработаны методики оптимизационного проектирования одно- и двухобмоточных ВБЭМ по определенному критерию. Они учитывают условия срабатывания, возврата и нагрева, а также критические сочетания параметров цепи управления ЭМ.

3. Полиномиальные зависимости при различных критериях качества: активных объема, массы, стоимости материалов, габаритного объема, установочной площади и высоты оптимальных соизмерностей и параметров ЭМ получены путем вычислительного эксперимента на основе синтеза форсированных ВБЭМ однообмоточного в схеме с балластным резистором и двухобмоточных с переключением пусковой и удерживающей обмоток и параллельным соединением низкоомной и высокоомной обмоток.

4. Дана оценка степени влияния исходных данных проектирования на соизмерности и параметры ЭМ на основе полиномиальных зависимостей. Это позволяет заранее объективно выбрать оптимальный вариант конструкции:

– наиболее существенное влияние на основные размеры (диаметр якоря, высота и толщина обмоток), как и нефорсированных ЭМ, оказывают координаты критической точки механической характеристики;

– при всех рассмотренных критериях качества оптимальные относительные высота стопа и воротничка не зависят от условий проектирования и составляют для однообмоточного 0,48 высоты обмотки и 0,45 диаметра якоря соответственно, а для двухобмоточных ВБЭМ эти соизмерности составляют 0,5.

5. Практическую ценность для проектировщиков представляют полученные результаты оптимизации, представленные в полиномиальной, табличной и графической форме.

6. Представленные в диссертации результаты проектных расчетов, полученные с использованием усовершенствованных и разработанных методик, позволяют улучшить характеристики модернизируемых и вновь разрабатываемых изделий, что в итоге повышает их качество.



На основе разработанных алгоритмов и методик, построенных на базе статических характеристик, в дальнейшем открывается возможность создания улучшенных методик синтеза с учетом динамических параметров.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев, В. С. Реле защиты / В. С. Алексеев, Г. П. Варганов, Б. И. Панфилов и др. – М.: Энергия, 1976 – 464 с.
2. Андреева, Е. Г. Исследование моделей магнитных систем открытого типа в комплексах программ ELCUT и ANSYS / Е. Г. Андреева, А. А. Татевосян, И. А. Семина // Омский научный вестник. – 2013. – № 2(120). – С. 231-235.
3. Архипова, Е. В. Анализ статических тяговых характеристик броневой магнитной системы с втяжным конусообразным якорем / Е. В. Архипова, А. В. Михайлов, Ю. М. Зайцев, Н. В. Руссова, Г. П. Свинцов // Электротехника. – 2013. – № 12. – С. 11-14.
4. Архипова, Е. В. К моделированию статических электромагнитных характеристик броневого электромагнита постоянного тока методом конечных элементов / Е. В. Архипова, Г. П. Свинцов // Электрические и электронные аппараты: Сборник научных трудов. – Чебоксары: Изд-во Чувашского ун-та, 2008. – С. 44-58.
5. 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 Всерос. науч.-техн. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2010. – С. 268-270.
6. Архипова, Е. В. Моделирование статических нагрузочных характеристик броневого электромагнита постоянного тока с плоским стопом / Е. В. Архипова, Г. П. Свинцов // Труды Академии электротехнических наук Чувашской Республики. – 2009. – № 2. – С. 63-64.
7. Архипова, Е. В. Нагрузочные характеристики втяжных электромагнитов с круглыми полюсными наконечниками / Е. В. Архипова, И. П. Иванов, А. В. Приказчиков, Н. В. Руссова, Г. П. Свинцов // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2012. – № 4. – С. 26-30.
8. Архипова, Е. В. Обобщенные статические нагрузочные характеристики форсированного двухобмоточного броневого электромагнита постоянного напряжения с плоским стопом / Е. В. Архипова, Н. В. Руссова, Г. П. Свинцов // Электротехника. – 2012. – № 3. – С. 54-58.
9. Архипова, Е. В. Обобщенные статические электромагнитные характеристики втяжного броневого электромагнита с плоским стопом / Е. В. Архипова, Н. В. Руссова, Г. П. Свинцов // Электрические аппараты и электротехнические комплексы и системы: Международная научно-практическая конференция (Россия, г. Ульяновск, 22–25 мая 2012 года). В 2 т. Т.1. – Ульяновск. УлГТУ, 2011. – С. 25-27.

10. Архипова, Е. В. Расчет температуры нагрева форсированной двухобмоточной броневой магнитной системы постоянного напряжения / Е. В. Архипова, Н. В. Руссова, Г. П. Свинцов // Электротехника. – 2013. – № 12. – С. 3-5.

11. Архипова, Е. В. Расчет температуры обмотки броневой магнитной системы постоянного напряжения / Е. В. Архипова // Региональная энергетика и электротехника: проблемы и решения: сб. науч. тр. Вып. IX. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2013. – С. 202-209.

12. Архипова, Е. В. Синтез броневое форсированного двухобмоточного электромагнита с плоским стопом с минимальной потребляемой мощностью / Е. В. Архипова, И. П. Иванов, Н. В. Руссова, Г. П. Свинцов // Энергосбережение в промышленности: материалы Всерос. науч.-практ. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2012. – С. 20-22.

13. Архипова, Е. В. Безразмерные статические нагрузочные характеристики форсированного двухобмоточного броневое электромагнита постоянного напряжения с плоским стопом / Е. В. Архипова, Н. В. Руссова, Г. П. Свинцов // Труды Академии электротехнических наук Чувашской Республики. – 2010. – № 1. – С. 56-58.

14. Архипова, Е. В. Сравнительная оценка расчета силовых характеристик магнитной системы с втяжным якорем с коническим полюсом / Е. В. Архипова, 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.

15. Архипова, Е. В. Усовершенствованная методика проектного расчета броневых электромагнитов постоянного напряжения / Е. В. Архипова, Н. В. Руссова, Г. П. Свинцов // Труды XII МКЭЭЭ-2008. Крым. Алушта, 2008. – С. 294.

16. Архипова, Е. В. Усовершенствованная методика проектного расчета броневых электромагнитов постоянного напряжения с внедряющимися якорями / Е. В. Архипова, Н. В. Руссова, Г. П. Свинцов // Вестник Чувашского университета. – 2013. – № 3. – С. 156-161.

17. Архипова, Е. В. Моделирование втяжных броневых электромагнитов и разработка усовершенствованных методик их проектного расчета: дис. канд. техн. наук: 05.09.01 / Архипова Елена Владимировна. – Чебоксары, 2014. – 228 с.

18. Астахов, В. И. Математическое и компьютерное моделирование электромагнитного поля как основа для решения задач в электротехнике и электроэнергетике / В. И. Астахов // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2004. – № 6. – С. 4-6.

19. Афанасьев, А. А. Метод сопряжения конформных отображений в задачах электромеханики / А. А. Афанасьев. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2011. – 390 с.

20. Афанасьев, А. А. Физико-математические основы электродинамических систем: учебное пособие: в 2 книгах. Книга 1 Основы теории электромагнитного поля и аналитические

методы решения полевых задач / А. А. Афанасьев. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2014. – 380 с.

21. Афанасьев, А. А. Физико-математические основы электродинамических систем: учебное пособие: в 2 книгах. Книга 2 Распространение электромагнитных волн в средах. Численные методы для полевых задач. Сверхпроводность в электроэнергетике и электромеханике / А. А. Афанасьев. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2016. – 484 с.

22. Афанасьев, В. В. Обобщенные экспериментальные статические нагрузочные характеристики клапанных электромагнитов постоянного тока с круглыми полюсными наконечниками. Способ представления / В. В. Афанасьев, А. В. Приказчиков, Н. В. Руссова и др. // Электротехника. – 2011. – № 5. – С. 39-45.

23. Ахазов, И. З. Современные подходы к проектированию электромагнитных контакторов пускателей общепромышленного применения / И. З. Ахазов, В. Е. Мандравин, Г.П. Свинцов // Электротехника. – 1998. – № 1. – С. 46-50.

24. Байда, Е. И. Моделирование динамических характеристик электромагнитных механизмов постоянного тока с магнитной защелкой / Е. И. Байда // Электротехника і електромеханіка. – 2010. – № 2. – С. 3-5.

25. Байда, Е. И. Сравнительный анализ моделей конвективной теплоотдачи / Е. И. Байда // Электротехніка і електромеханіка. – 2011. – № 2. – С. 14-17.

26. Баскаев, В. И. Тяговая характеристика, обеспечивающая наименьшее время срабатывания электромагнитного механизма / В. И. Баскаев, А. В. Боголюбов, В. С. Садовский, Г. М. Староверов // Электричество. – 1973. – № 3. – 74-76.

27. Батищев, Д. И. Применение методов нелинейного программирования для определения оптимальных параметров электромагнитных реле / Д. И. Батищев // Автоматика и телемеханика. – 1965. – № 1. – Т. 26. – С. 140-148.

28. Бахвалов, Ю. А. Численное моделирование магнитного поля и силовых взаимодействий электромагнитного захвата корпусосборочных устройств комбинированным методом / Ю. А. Бахвалов, А. Г. Никитенко, Б. Н. Лобов и др. // Электротехника. – 1997. – № 10. – С. 37-40.

29. Бахвалов, Ю. А. Численное моделирование стационарных магнитных полей магнитоэлектрических систем методом конечных и граничных элементов / Ю. А. Бахвалов, А. Г. Никитенко, В. П. Гринченков и др. // Электротехника. – 1999. – № 1. – С. 29-32.

30. Бахвалов, Ю. А. Электромагнитные механизмы. Анализ и синтез. Под. ред. Никитенко А. Г. / Ю. А. Бахвалов, Н. И. Горбатенко, А. Г. Никитенко, Ю. А. Никитенко. – М.: Высш. шк., 1998. – 330 с.

31. Бахвалов, Ю. А. Проектирование электромеханического устройства минимального объема на основе решения обратной задачи / Ю. А. Бахвалов, В. В. Гречихин, А. Л. Юфанова // Теория операторов, комплексный анализ и математическое моделирование: тез. докл. междунар. научн. конф. – пос. Дивноморское, 2014. – С. 163-164.
32. Бахвалов, Ю. А. Параметрический синтез электромагнитов броневго типа минимальной массы / Ю. А. Бахвалов, В. В. Гречихин, А. Л. Юфанова // Автоматизация в электроэнергетике и электротехнике: материалы конф. – Пермь, 2016. – Т.1. – С. 180-183.
33. Бодякшин, А. И. Метод расчета магнитных полей / А. И. Бодякшин. – М.: Изд-во «Наука», 1968. – 56 с.
34. Бранспиз, Ю. А. Аналитический расчет тягового усилия броневго электромагнита с конусным якорем / Ю. А. Бранспиз, А. Н. Пшеничный // Электротехника и электромеханика. – 2005. – № 2. – С. 8-10.
35. Бранспиз, Ю. А. Учет магнитных свойств материала магнитопровода броневго электромагнита при расчете тяговой характеристики / Ю. А. Бранспиз, М. В. Загирняк, А. Н. Пшеничный // Электротехника и электромеханика. – 2006. – № 1. – С. 17-20.
36. Буль, Б. К. Основы теории и расчета магнитных цепей. / Б. К. Буль. – М.-Л.: Энергия, 1964. – 464 с.
37. Буль, Б. К. Основы теории электрических аппаратов / Б. К. Буль, Г. В. Буткевич, А. Г. Годжелло и др. – М.: Высш. шк., 1970. – 600 с.
38. Буль Б. К. Электромеханические аппараты автоматики / Б. К. Буль, О. Б. Буль, В. А. Азанов, В. Н. Шоффа. – М.: Высш. шк., 1988. – 303 с.
39. Буль, О. Б. Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов. Магнитные цепи, поля и программа FEMM / О. Б. Буль. – М.: Изд. центр «Академия», 2005. – 336 с.
40. Буль, О. Б. Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов. Программа ANSYS / О. Б. Буль. – М.: Изд. центр «Академия», 2006. – 288 с.
41. Буль, О. Б. Компьютерные программы расчета и анализа магнитных систем / О. Б. Буль // Электротехника. – 2006. – № 12. – С. 50-55.
42. Буль, О. Б. Расчет параметров процесса включения электромагнита постоянного тока / О. Б. Буль // Электричество. – 2001. – № 4. – С. 56-60.
43. Буль, О. Б. Сравнение инженерных методов расчета магнитных цепей и полей электромагнитов / О. Б. Буль // Электротехника. – 2007. – № 7. – С. 42а-48.
44. Бут, Д. А. Электромеханика сегодня и завтра / Д. А. Бут // Электричество. – 1995. – № 1. – С. 2-10.
45. Буткевич, Г. В. Задачник по электрическим аппаратам / Г. В. Буткевич, В. Г. Дегтярь, А.Г. Сливинская // М.: Высш.шк., 1987. – 231 с.

46. Веников, В. А. Теория подобия и моделирование / В. А. Веников. – М.: Высш. шк., 1976. – 479 с.
47. Витенберг, М. И. Расчет электромагнитных реле / М. И. Витенберг. – Л.: «Энергия», 1975. – 416 с.
48. Вознесенский, А. С. Компьютерные методы в научных исследованиях / А. С. Вознесенский. – М.: МГГУ, 2011. – 107 с.
49. Вундер, Я. Ю. Расчет максимальной и среднеобъемной температуры обмоток электрических аппаратов / Вундер Я. Ю. // Электричество. – 1976. – № 12. – С. 77-81.
50. Галбаев, Ж. Т. Переходные процессы в массивном магнитопроводе электромагнитного привода фрикционных механизмов / Ж. Т. Галбаев // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 314. – № 4. – С. 79-84.
51. Ганджа, С. А. Особенности построения системы автоматизированного проектирования вентильных машин с аксиальным зазором / С. А. Ганджа // Вестник ЮУрГУ. – 2007. – № 20. – С. 19-23.
52. Гаранин, А. Ю. Расчет втяжного электромагнита постоянного тока / А. Ю. Гаранин // Электротехника. – 2000. – № 10. – С. 54-58.
53. Глухов, В. П. Применение теории подобия и физического моделирования для анализа и расчета электрических цепей со сталью / В. П. Глухов // Электричество. – 1967. – № 2. – С. 49-54.
54. Гордон, А. В. Электромагниты постоянного тока / А. В. Гордон, А. Г. Сливинская. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1960. – 447 с.
55. Гревцов, В. Н. Расчет броневых электромагнитов переменного тока с массивным магнитопроводом / В. Н. Гревцов, Е. А. Дроздова, И. И. Пеккер и др. // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 1992. – № 2. – С. 78-83.
56. Гринченков, В. П. Исследование динамических процессов в электромагнитах подвеса / В. П. Гринченков, А. Г. Никитенко, А. В. Павленко // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 1982. – № 12. – С. 1432-1437.
57. Гринченков, В. П. Математическое моделирование переходных характеристик электромагнитов с массивными магнитопроводами / В. П. Гринченков, А. Г. Никитенко, В. Я. Палий и др. // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 1977. – № 2. – С. 50-54.
58. Гурницкий, В. Н. К теории приближенного подобия электромагнитов постоянного тока / В. Н. Гурницкий // Электричество. – 1968. – № 12. – С. 34-38.
59. 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.62-67.

60. Дергачев, П. А. Электромеханическое преобразование энергии в системе с объемным высокотемпературным сверхпроводником. Ч.2. Анализ работы устройства / П. А. Дергачев, Ю. В. Кулаев, П. А. Курбатов, Е. П. Курбатова // Электротехника. – 2016. – №7. – С.43-48.

61. Дергачев, П. А. Система интегральных уравнений с разреженной матрицей для расчета электромагнитного поля / П. А. Дергачев, Ю. В. Кулаев, П. А. Курбатов, Е. П. Курбатова, О. Н. Молоканов // Сб. Актуальные направления фундаментальных и прикладных исследований. Материалы V международной научно-практической конференции. – 2015. – С.143.

62. Дубровский, В. В. Резисторы: Справочник / Д. М. Иванов, Н. Я. Пратусевич и др. – М.: Радио и связь, 1991. – 528 с.

63. Дьяконов, В. П. Справочник по алгоритмам и программам на языке бейсик для персональных ЭВМ: Справочник. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. – 240 с.

64. Зайцев, Ю. М. Методика синтеза форсированного клапанного электромагнита постоянного напряжения в схеме с балластным резистором / Ю. М. Зайцев, В. Н. Петров, Н. В. Руссова, Г. П. Свинцов // Вестник Чувашского университета. – 2017. – № 1. – С. 103-111.

65. Залесский, А. М. Тепловые расчеты электрических аппаратов / А. М. Залесский, Г. А. Кукеков. – Л.: Энергия, 1967. – 379 с.

66. Иванов, И. П. Оценка путей снижения энергопотребления электромеханических аппаратов коммутации и защиты / И. П. Иванов, А. В. Приказчиков, Г. П. Свинцов // Энергосбережение в промышленности: материалы Всерос. науч.-практ. конф. – Чебоксары, 2012. – С. 7-9.

67. Иванов-Смоленский, А. В. Применение конечно-элементных моделей при учебном проектировании синхронных машин / А. В. Иванов-Смоленский, В. И. Гончаров, Тейн Наинг Тун // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2010. – № 2. – С. 71-76.

68. Иванов-Смоленский, А. В. Универсальный численный метод моделирования электромеханических преобразователей и систем / А. В. Иванов-Смоленский, В. А. Кузнецов // Электричество. – 2000. – №. 7. – С. 24-33.

69. Ивоботенко, Б. А. Планирование эксперимента в электромеханике / Б. А. Ивоботенко, Н. Ф. Ильинский, И. П. Копылов. – М.: Энергия, 1975. – 184 с.

70. Ивоботенко, Б. А. Модели электромеханических устройств и систем в задачах синтеза / Н. Ф. Ильинский, Б. А. Ивоботенко, И. П. Копылов и др. // Электричество. – 1973. – № 3. – С. 36-40.

71. Ильинский, Н. Ф. Теория подобия в электромеханике (обзор) / Н. Ф. Ильинский, М. А. Попов // Электричество. – 1988. – № 5. – С. 1-7.

72. 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.

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

74. Казаков, Л. А. Электромагнитные устройства РЭА: Справочник / Л. А. Казаков. – М.: Радио и связь, 1991. – 352 с.

75. Карибов, С. И. Метод расчета переходных процессов в электрических цепях с машинами постоянного тока / С. И. Карибов, В. Д. Тулупов, А. П. Марченков и др. // Электротехника. – 1980. – № 3. – С. 23-27.

76. Квартин, М. И. Электромеханические и магнитные устройства автоматики: Учебник для учащихся электроприборостроительных техникумов / М. И. Квартин. – М.: Высшая школа, 1979. – 352 с.

77. Клименко, Б. В. Интегрирование уравнений динамики электромагнитов при наличии вторичных контуров / Б. В. Клименко // Электричество. – 1984. – № 11. – С. 52-55.

78. Клименко, Б. В. О проектировании броневых электромагнитов постоянного тока на базе расчета магнитного поля методом конечных элементов / Б. В. Клименко, Е. И. Байда // Электротехника и электромеханика. – 2003. – № 1. – С. 38-40.

79. Клименко, Б.В. Форсированные электромагнитные системы / Б. В. Клименко. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 160 с.

80. Ковалев, О. Ф. Проектирование электромагнитных механизмов с минимальной потребляемой мощностью / О. Ф. Ковалев, В. П. Гринченков, Э. Калленбах // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2001. – № 3. – С. 47-49.

81. Ковалев, О. Ф. Расчет нестационарного температурного поля электромагнитных захватов методом конечных элементов / О. Ф. Ковалев, Б. Н. Лобов, Е. Н. Краснов // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 1995. – № 1-2. – С. 24-29.

82. Коц, Б. Э. Электромагниты постоянного тока с форсировкой / Б. Э. Коц. – М.: Энергия, 1973. – 80 с.

83. Курбатов, П. А. Численный расчет электромагнитных полей / П. А. Курбатов, С.А. Аринчин. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 167 с.



84. Курбатов, П. А. Математическое моделирование электромеханических систем электрических аппаратов: учеб. пособие / П. А. Курбатов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – 110 с.
85. Курбатов, П. А. Основы теории электрических аппаратов / Под. ред. П. А. Курбатова. – 5-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Издательство «Лань», 2015. – 592 с.
86. Лобов, Б. Н. Расчет стационарного температурного поля электромагнита П-образного типа постоянного тока / Б. Н. Лобов // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 1979. – № 6. – С. 40-46.
87. Любчик М. А. Оптимальное проектирование силовых электромагнитных механизмов / М. А. Любчик. – М.: Энергия, 1974. – 392 с.
88. Любчик, М. А. Расчет и проектирование электромагнитов постоянного и переменного тока / М. А. Любчик; под общ. редакцией Б. Ф. Вашуры. – М.-Л.: Государственное энергетическое издательство, 1959. – 224 с.
89. Любчик, М. А. Силовые электромагниты аппаратов и устройств автоматики постоянного тока (Расчет и элементы проектирования) / М. А. Любчик. – М.: Энергия, 1968. – 158 с.
90. Макарычев, Ю. М. Проектирование электромагнитов: этапы, методы, модели / Ю. М. Макарычев, С. Ю. Рыжов, Т. П. Жидарева // Электричество. – 1994. – № 2. – С. 46-51.
91. Милых, В. И. Расчетно-экспериментальное тестирование программы FEMM и преодоление проблем ее использования для расчета магнитного поля электрических машин / В. И. Милых, И. В. Поляков, Н. В. Полякова и др. // Электротехника и электромеханика. – 2004. – № 3. – С. 38-43.
92. Михлин, С. Г. Приближенные методы решения дифференциальных и интегральных уравнений / С. Г. Михлин, Х. Л. Смолицкий. – М.: Наука.
93. Могилевский, Г. В. Применение теории подобия к проектированию электромагнитов / Г. В. Могилевский // Вестник электропромышленности. – 1959. – № 4. – С. 34-38.
94. Намитоков, К. К. К расчету нестационарного температурного поля катушки электромагнита / К. К. Намитоков, В. Г. Березинский, С. М. Юрченко // Электричество. – 1983. – № 3. – С. 49-52.
95. Наслян, Т. А. Расчет тепловых полей в электрических машинах и аппаратах методом исключения / Т. А. Наслян, Т. М. Нэмени // Электротехника. – 1986. – № 11. – С. 31-33.
96. Нейман, В. Ю. Моделирование в FEMM магнитного поля для расчета тяговых характеристик электромагнитных двигателей постоянного тока / В. Ю. Нейман, А. А. Петрова // Сборник научных трудов НГТУ. – 2008. – № 2(52). – 101-108.

97. Нейман, В. Ю. Бытовое компрессорное оборудование с линейным электромагнитным двигателем / В. Ю. Нейман, О. В. Рогова // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2012. – № 2. – С. 257-261.

98. Некрасов, С. А. Интервальные и двусторонние методы расчета магнитных систем / С. А. Некрасов // Электричество. – 2013. – № 8. – С. 55-59.

99. Никитенко, А. Г. Аналитический обзор методов расчета магнитных полей электрических аппаратов / А. Г. Никитенко, Ю. А. Бахвалов, В. Г. Щербаков // Электротехника. – 1997. – № 1. – С. 15-19.

100. Никитенко, А. Г. Информатика и компьютерное моделирование в электроаппаратостроении: Учеб. пособие для вузов по спец. «Электрические и электронные аппараты» / А. Г. Никитенко, И. И. Левченко, В. П. Гринченков, А. Н. Иванченков, О. Ф. Ковалев. – М.: Высш. шк., 1999. – 375 с.

101. Никитенко, А. Г. О выборе оптимальной тяговой динамической характеристики электромагнита постоянного тока / А. Г. Никитенко // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 1974. – № 10. – С. 1077-1081.

102. Никитенко, А. Г. О выборе расчетных значений индукции при проектировании электромагнитов постоянного тока / А. Г. Никитенко // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 1974. – № 3. – С. 278-284.

103. Никитенко, А. Г. Проблемы разработки системы автоматизированного проектирования электрических аппаратов / А. Г. Никитенко // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 1983. – № 3. – С. 73-79.

104. Никитенко, А. Г. Программирование и применение ЭВМ в расчетах электрических аппаратов / А. Г. Никитенко, В. П. Гринченков, А. Н. Иванченко. – М.: Высшая школа, 1990. – 232 с.

105. Никитенко, А. Г. К расчету оптимальных параметров электромагнитов постоянного тока с форсированным включением / А. Г. Никитенко, И. И. Пеккер, А. П. Алексеева // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 1971. – № 6. – С. 644-647.

106. Никитенко, А. Г. Проектирование оптимальных электромагнитных механизмов / А. Г. Никитенко. – М.: Энергия, 1974. – 136 с.

107. Никитенко, А. Г. Расчеты электромагнитных механизмов на вычислительных машинах / А. Г. Никитенко, И. И. Пеккер. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 275 с.

108. Никитенко, А. Г. Проектирование электромагнита с заданной тяговой характеристикой / А. Г. Никитенко, Б. Н. Лобов // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 1981. – № 8. – С. 899-903

109. Никитенко, А. Г. Расчет температурных полей электрических аппаратов методом конечных элементов / А. Г. Никитенко, В. П. Гринченков, О. Ф. Ковалев // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 1984. – № 5. – С. 86-92.

110. Никитенко, А. Г. Расчет стационарного температурного поля электромагнитного привода методом конечных элементов / А.Г. Никитенко, О. Ф. Ковалев, Б. Н. Лобов, С. Х. Щучинский // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 1993. – № 4. – С. 69-77.

111. Никитина, О. А. Влияние исходных данных проектирования на оптимальные соразмерности в симметричной двухкатушечной П-образной клапанной магнитной системе с цилиндрическими сердечниками и полюсными наконечниками / О. А. Никитина, О. А. Петров, Н. В. Руссова, М. Л. Савин, Г. П. Свинцов // Вестник Чувашского университета– 2015. – № 1. – С. 81-90.

112. Никитина, О. А. Выбор размеров форсированного П-образного двухкатушечного привода контактора / О. А. Никитина, О. А. Петров, Н. В. Руссова, Г. П. Свинцов // Вестник Чувашского университета. – 2015. – № 1. – С. 91-95.

113. Никитина, О. А. Методика синтеза форсированного броневое электромагнита постоянного напряжения с внедряющимся якорем в схеме с балластным резистором / О. А. Никитина, Ю. М. Зайцев, И. П. Иванов, Н. В. Руссова, Г. П. Свинцов // Вестник Чувашского университета. – 2015. – № 3. – С. 52-61.

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

115. Никитина, О. А. Синтез минимизированного по высоте форсированного броневое электромагнита постоянного напряжения с внедряющимся якорем в схеме управления с балластным резистором / О. А. Никитина // Вестник Чувашского университета. – 2016. – № 3. – С. 94-99.

116. Никитина, О. А. Расчет размеров форсированного броневое электромагнита постоянного напряжения с внедряющимся якорем в схеме с балластным резистором, минимизирующих массу его активных материалов // О. А. Никитина, В. В. Ашмарин, Н. В. Руссова, Г. П. Свинцов // Вестник Чувашского университета. – 2016. – № 3. – С. 13-20

117. Никитина, О. А. Расчет размеров, минимизирующих стоимость активных материалов, форсированного броневое электромагнита, управляемого по схеме с балластным резистором / О. А. Никитина, Н. В. Руссова, Г. П. Свинцов, В. А. Нестерин // Вестник Чувашского университета. – 2017. – № 1. – С. 156-161.

118. Никитина, О. А. Минимизация втяжных форсированных электромагнитов по массогабаритным показателям / О.А. Никитина, Е. В. Архипова // Труды Академии электротехнических наук Чувашской Республики. – 2014. – № 1. – С. 26-28.

119. Никитина, О. А. Усовершенствованная методика проектного расчета броневго электромагнита постоянного напряжения с втяжным якорем / О. А. Никитина, О. Е. Алексеева, Е. В. Архипова, И. П. Иванов, Н. В. Руссова, Г. П. Свинцов // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике. Материалы IX Всерос. научно-технической конференции. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та. – 2014. – С. 58-61.

120. Никитина, О. А. Расчеты и исследование тепловых процессов магнитного пускателя в оболочке / О. А. Никитина, О. Е. Алексеева, А. Г. Васильева, Э. В. Брильц., А. А. Коробкова, А. Г. Судаков, проф. Ю. В. Софронов // Человек. Гражданин. Ученый (ЧГУ-2011). Сборник трудов Регионального фестиваля студентов и молодежи. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та. – 2012. – С.10-11.

121. Никитина, О. А. Методика оптимизационных расчетов форсированного втяжного броневго электромагнита постоянного напряжения в схеме с балластным резистором / О. А. Никитина, Г. П. Свинцов // Победа в науке. Сборник трудов Всероссийской 49-й научной студенческой конференции. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та. – 2015. – С.38-39.

122. Никитина, О. А. Расчет форсированного броневго электромагнита в схеме с балластным резистором, минимизированного по стоимости активных материалов / О. А. Никитина, Г. П. Свинцов // Студент-Наука-Развитие: сб. тр. Всерос. 50-й научн. студ. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2016 – 368 с.

123. Никитина, О. А. Синтез минимизированного по массе активных материалов форсированного броневго электромагнита постоянного напряжения, питаемого по схеме с балластным резистором / О. А. Никитина, В. В. Афанасьев, Ю. М. Зайцев, Н. В. Руссова, Г. П. Свинцов // Электротехника. – 2017. – № 7. – С. 24-27.

124. Никитина, О. А. Проектирование двухобмоточных броневых электромагнитов с форсированным управлением на основе их обобщенных характеристик / О. А. Никитина, И. П. Иванов, Н. В. Руссова, Г. П. Свинцов // Известия высших учебных заведений «Электромеханика». – 2017. – № 4. – С. 26-33.

125. Осташевский, Н. А. Исследование теплового состояния асинхронного частотно-управляемого двигателя с помощью метода конечных элементов / Н. А. Осташевский, В. П. Шайда, А. Н. Петренко // Электротехника и электромеханика. – 2011. – № 5. – С. 39-42.

126. Павленко, А. В. К расчету динамических режимов нейтральных быстродействующих электромагнитов / А. В. Павленко, В. И. Пацеура // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 1988. – № 6. – С. 99-104.

127. 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.

128. Павленко, А. В. Математическое моделирование броневых электромагнитов переменного тока / А. В. Павленко, В. П. Гринченков, А. В. Шипулин // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 1998. – № 1. – С. 67-70.

129. Павленко, А. В. Обобщенная математическая модель для расчета нестационарных магнитных полей и динамических характеристик электромагнитных механизмов / А. В. Павленко // Электричество. – 2002. – № 7. – С. 49-53.

130. Павленко, А. В. Проектирование быстродействующих электромагнитов с заданными динамическими параметрами / А. В. Павленко, В. П. Гринченков, Н. П. Беляев, Э. Калленбах // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2002. – № 4. – С. 76-80.

131. Пеккер, И. И. Определение размеров броневых электромагнитов по заданным начальным параметрам с помощью безразмерных характеристик / И. И. Пеккер // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 1959. – № 5. – С. 44-52.

132. Пеккер, И. И. Опытные данные для выбора размеров броневых электромагнитов постоянного тока / И. И. Пеккер // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 1961. – № 12. – С. 56-65.

133. Пеккер, И. И. Расчет броневых электромагнитов на нагрев в длительном режиме работы с помощью ЭЦВМ / И. И. Пеккер, М. Е. Синельникова // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 1966. – № 1. – С. 80-86.

134. Пеккер И. И. Расчет силы тяги броневых электромагнитов с плоским торцом сердечника / И. И. Пеккер // Вестник электропромышленности. – 1962. – № 5. – С. 69-71.

135. Пеккер, И. И. Физическое моделирование электромагнитных механизмов / И. И. Пеккер. – М.: Энергия, 1969. – 64 с.

136. Пик Р., Уэйгар Г. Расчет коммутационных реле / Пер. с англ.; под ред. М. И. Витенберга и А. В. Гордона. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1961. – 584 с.

137. Попов, П. Г. Анализ электромагнитных устройств с индуктивными связями методом конечных элементов / П. Г. Попов, Ю. А. Шумилов // Электричество. – 1978. – № 11. – С. 43-48.

138. Приказчиков, А. В. Усовершенствованная методика проектного расчета форсированного клапанного электромагнита в схеме с балластным резистором / А. В. Приказчиков, Н. В. Руссова, Е. В. Сагарадзе, Г. П. Свинцов, Д. Г. Шоглев // Электротехника. – 2011. – № 1. – С. 57-62.

139. Ротерс, Г. Электромагнитные механизмы / Пер. с англ.; под ред. А. Я. Буйлова. – М.: Госэнергоиздат, 1949. – 522 с.

140. Руссова, Н. В. Моделирование и синтез П-образных электромагнитов постоянного тока и напряжения / Н. В. Руссова, Г. П. Свинцов: учеб. пособие. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2003. – 228 с.

141. Руссова, Н. В. Синтез оптимальных симметричных П-образных двухкатушечных электромагнитов с цилиндрическими сердечниками / Н. В. Руссова // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2002. – № 3. – С. 30–34.

142. Руссова, Н. В. Синтез симметричных П-образных двухкатушечных электромагнитов постоянного напряжения по интегральному критерию качества / Н. В. Руссова // Электротехника и электромеханика. – 2003. – № 4. – С. 69-71.

143. Руссова, Н. В. Экспериментальные обобщённые электромагнитные характеристики П-образных двухкатушечных электромагнитов постоянного тока с внешним прямоугольным якорем / Н. В. Руссова, Г. П. Свинцов // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 1998. – № 5. – С. 5-6.

144. Руссова, Н. В. Синтез оптимальных симметричных П-образных двухкатушечных электромагнитов постоянного напряжения с призматическими сердечниками при повторно-кратковременном режиме работы / Н. В. Руссова, Г. П. Свинцов, В.Н. Шоффа // Электротехника. – 2002. – № 2. – С. 55-60.

145. Рымша, В. В. Расчет двухмерного стационарного теплового поля вентильно-реактивного двигателя методом конечных элементов / В. В. Рымша, З. П. Процына, П. А. Кравченко // Электротехника и электромеханика. – 2010. – № 4. – С. 26-28.

146. Ряшенцев, Н. П. К вопросу экспериментального определения динамического тягового усилия и проводимости рабочего зазора электромагнита / Н. П. Ряшенцев, Е. М. Тимошенко // Известия Томского Ордена Трудового Красного знамени Политехнического института имени С. М. Кирова. – 1965. – Т. 129. – С. 207-212.

147. Сахаров, П. В. Проектирование электрических аппаратов / П. В. Сахаров. – М. : Энергия, 1971. – 560 с.

148. Свинцов, Г. П. Способ представления статических силовых характеристик электромагнитов постоянного тока и напряжения / Г. П. Свинцов // Технические науки: сегодня и завтра: тезисы докладов юбилейной конференции, Чебоксары, 26-28 октября 1997. – Чебоксары: Изд-во КЛИО, 1997. – С. 269-271.

149. Свинцов, Г. П. Электромагнитные контакторы и пускатели / Г. П. Свинцов: Учеб. пособие. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 1998. – 260 с.

150. Свинцов, Г. П. О критериях подобия динамических процессов при включении приводного электромагнита / Г. П. Свинцов, Ю. В. Софронов // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 1983. – № 6. – С. 73-77.

151. Сливинская, А. Г. Исследование динамических тяговых характеристик электромагнитов постоянного тока / А. Г. Сливинская // Известия вузов. Электромеханика. – 1965. – № 11. – С. 1273-1279.
152. Сливинская, А. Г. Электромагниты и постоянные магниты / А. Г. Сливинская. – М.: «Энергия», 1972. – 248 с.
153. Сливинская, А. Г. Электромагниты со встроенными выпрямителями / А. Г. Сливинская, А.В. Гордон. – М. : Энергия, 1970. – 64 с.
154. Смирнов, Ю. В. Обобщенные закономерности для оптимизации электромагнитных устройств малой мощности / Ю. В. Смирнов // Электричество. – 1974. – № 12. – С. 54-60.
155. Соболев, С. Н. Расчет и конструирование низковольтной электрической аппаратуры. Учебник для техникумов / С. Н. Соболев. – М.: «Высшая школа», 1972. – 264 с.
156. Сотсков, Б. С. Основы расчета и проектирования электромеханических элементов автоматических и телемеханических устройств / Б. С. Сотсков. – М.-Л.: Энергия, 1965. – 576 с.
157. Сотсков, Б. С. Расчет и проектирование электромеханических элементов электрических и телемеханических устройств / Б. С. Сотсков. – М.-Л.: Энергия, 1965. – 576 с.
158. Тихонов, Д. Ю. Комбинированный метод расчета нестационарных плоскопараллельных электромагнитных полей / Д. Ю. Тихонов, А. Н. Ткачѳв, Й. Центнер // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2002. – № 4. – С. 39-48.
159. Чабан, В. И. Принципы построения цепных математических моделей электротехнических устройств / В. И. Чабан // Электричество. – 1993. – № 8. – С. 64-66.
160. Черепашков, А. А. Компьютерные технологии, моделирование и автоматизированные системы в машиностроении / А. А. Черепашков, Н. В. Носов. – Волгоград: Издательский Дом «Ин-Фолио», 2009. – 640 с.
161. Шоффа, В. Н. Проектный метод расчета электромагнитов постоянного тока клапанного типа / В. Н. Шоффа // Электротехника. – 1968. – № 5. – С. 41-45.
162. Шоффа, В. Н. Методы расчета магнитных систем постоянного тока / В. Н. Шоффа. – М.: МЭИ, 1998. – 40 с.
163. Щучинский, С. Х. Электромагнитные приводы исполнительных механизмов / С. Х. Щучинский. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.
164. Яковенко, В. В. О задаче синтеза броневого электромагнита с максимальным тяговым усилием [Электронный ресурс] / В. В. Яковенко, М. Ю. Бранспиз // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля : наук. журнал. – Луганськ, 2007. – № 5 (111), ч. 1.
165. Яссе, Э. Электромагниты / Э. Яссе. – М. – Л.: Государственное энергетическое издательство, 1934. – 194 с.

166. PascalABC.NET современное программирование на языке Pascal [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://pascalabc.net>. – Загл. с экрана. – (Дата обращения: 25.07.2017).
167. Afshar, S. Optimal Configuration for Electromagnets and Coils in Magnetic Actuators / S. Afshar, M. Behrad Khamesee, A. Khajepour // IEEE Transactions on Magnetics, 2012. – Volume: 49, Issue: 4. – pp. 1372-1381.
168. Arkhipova, E. V. Generalized statistical load characteristics of a forced double-winding armored DC Electromagnet with a flat stop / E. V. Arkhipova, N. V. Russova, G. P. Svintsov // Russian Electrical Engineering. – 2012. – Vol. 83, No. 3. – pp. 171-175.
169. Brauer, J. R. Magnetic Actuators and Sensors, Wiley-IEEE Press, 2014. 400 p.
170. Dolan, A Optimization of DC electromagnet using design of experiments and FEM // A. Dolan // Applied and Theoretical Electricity (ICATE), 2016 International Conference. – pp. 1-6.
171. Garanin, A. Yu DC electromagnet traction force calculation / A. Yu. Garanin, E. V. Silaeva, O. A. Shlegel', V. N. Popenko // Russian Electrical Engineering. – 2003. – No. 2. – pp. 55-58.
172. 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. – pp. 106-114.
173. 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, no. 19. – pp. 3440-3451.
174. Plavec, E. Genetic algorithm based plunger shape optimization of DC solenoid electromagnetic actuator / E. Plavec, M. Vidovic // Telecommunications Forum (TELFOR), 2016 24th. – pp. 531-535.
175. 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, No. 8. – pp. 474-478.
176. Zhang, X. Research on electromagnetic actuators force characteristics force / X. Zhang, Y. Wang, Y. Wang, P. Xia, C. Zhu, S. Ma // Electronics, Computer and Applications, 2014 IEEE Workshop on. – pp. 622-625.

#### Патенты

177. Патент на полезную модель 149508 РФ, МПК H02K 33/02. Электромагнитный двигатель / Нейман В. Ю., Нейман Л. А., Рогова О. В.; патентообладатель ФГБОУ ВПО «Новосибирский государственный технический университет». – № 2014106191/07; завл. 19.02.14; опубл. 10.01.15. Бюл. №1. – 2 с.
178. Патент на изобретение 2624659 РФ, МПК H01F 7/18. Устройство форсированного управления двухкатушечным электромагнитным приводом / Афанасьева М.М., Васильев Е.Г., Иванов И.П., Митрофанов О.Н., Никитина О.А., Петров О.А., Романов В.В., Свинцов Г.П.;



патентообладатель ОАО «ВНИИР-Прогресс». – № 2015137344; заявл. 01.09.2015; опубл. 05.07.2017. Бюл. № 19. – 7 с.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

Матрица ортогонального центрально-композиционного плана второго порядка

Таблица А.1

$x_i$ $u$	$x_1(\delta_{кр})$ мм	$x_2(P_{мх.кр})$ Н	$x_3(P_{мх.к})$ Н	$x_4(T_0)$ °С	$x_5(\Theta_{дон})$ °С	$x_6(K_{max})$	$x_7(K)$	$x_8(K_3)$
1	(-1)6,04	(-1)8,64	(-1)28,2	(-1)40	(-1)125	(-1)1,402	(-1)0,401	(-1)0,40
2	(+1)9,96	(-1)8,64	(-1)28,2	(-1)40	(-1)125	(-1)1,402	(-1)0,401	(-1)0,40
3	(-1)6,04	(+1)21,36	(-1)69,8	(-1)40	(-1)125	(-1)1,402	(-1)0,401	(-1)0,40
4	(+1)9,96	(+1)21,36	(-1)69,8	(-1)40	(-1)125	(-1)1,402	(-1)0,401	(-1)0,40
5	(-1)6,04	(-1)8,64	(+1)40,9	(-1)40	(-1)125	(-1)1,402	(-1)0,401	(-1)0,40
6	(+1)9,96	(-1)8,64	(+1)40,9	(-1)40	(-1)125	(-1)1,402	(-1)0,401	(-1)0,40
7	(-1)6,04	(+1)21,36	(+1)101	(-1)40	(-1)125	(-1)1,402	(-1)0,401	(-1)0,40
8	(+1)9,96	(+1)21,36	(+1)101	(-1)40	(-1)125	(-1)1,402	(-1)0,401	(-1)0,40
9	(-1)6,04	(-1)8,64	(-1)28,2	(+1)70	(-1)125	(-1)1,402	(-1)0,401	(-1)0,40
10	(+1)9,96	(-1)8,64	(-1)28,2	(+1)70	(-1)125	(-1)1,402	(-1)0,401	(-1)0,40
11	(-1)6,04	(+1)21,36	(-1)69,8	(+1)70	(-1)125	(-1)1,402	(-1)0,401	(-1)0,40
12	(+1)9,96	(+1)21,36	(-1)69,8	(+1)70	(-1)125	(-1)1,402	(-1)0,401	(-1)0,40
13	(-1)6,04	(-1)8,64	(+1)40,9	(+1)70	(-1)125	(-1)1,402	(-1)0,401	(-1)0,40
14	(+1)9,96	(-1)8,64	(+1)40,9	(+1)70	(-1)125	(-1)1,402	(-1)0,401	(-1)0,40
15	(-1)6,04	(+1)21,36	(+1)101	(+1)70	(-1)125	(-1)1,402	(-1)0,401	(-1)0,40
16	(+1)9,96	(+1)21,36	(+1)101	(+1)70	(-1)125	(-1)1,402	(-1)0,401	(-1)0,40
17	(-1)6,04	(-1)8,64	(-1)28,2	(-1)40	(+1)165	(-1)1,402	(-1)0,401	(-1)0,40
18	(+1)9,96	(-1)8,64	(-1)28,2	(-1)40	(+1)165	(-1)1,402	(-1)0,401	(-1)0,40
19	(-1)6,04	(+1)21,36	(-1)69,8	(-1)40	(+1)165	(-1)1,402	(-1)0,401	(-1)0,40
20	(+1)9,96	(+1)21,36	(-1)69,8	(-1)40	(+1)165	(-1)1,402	(-1)0,401	(-1)0,40
21	(-1)6,04	(-1)8,64	(+1)40,9	(-1)40	(+1)165	(-1)1,402	(-1)0,401	(-1)0,40
22	(+1)9,96	(-1)8,64	(+1)40,9	(-1)40	(+1)165	(-1)1,402	(-1)0,401	(-1)0,40
23	(-1)6,04	(+1)21,36	(+1)101	(-1)40	(+1)165	(-1)1,402	(-1)0,401	(-1)0,40
24	(+1)9,96	(+1)21,36	(+1)101	(-1)40	(+1)165	(-1)1,402	(-1)0,401	(-1)0,40
25	(-1)6,04	(-1)8,64	(-1)28,2	(+1)70	(+1)165	(-1)1,402	(-1)0,401	(-1)0,40
26	(+1)9,96	(-1)8,64	(-1)28,2	(+1)70	(+1)165	(-1)1,402	(-1)0,401	(-1)0,40
27	(-1)6,04	(+1)21,36	(-1)69,8	(+1)70	(+1)165	(-1)1,402	(-1)0,401	(-1)0,40
28	(+1)9,96	(+1)21,36	(-1)69,8	(+1)70	(+1)165	(-1)1,402	(-1)0,401	(-1)0,40
29	(-1)6,04	(-1)8,64	(+1)40,9	(+1)70	(+1)165	(-1)1,402	(-1)0,401	(-1)0,40
30	(+1)9,96	(-1)8,64	(+1)40,9	(+1)70	(+1)165	(-1)1,402	(-1)0,401	(-1)0,40
31	(-1)6,04	(+1)21,36	(+1)101	(+1)70	(+1)165	(-1)1,402	(-1)0,401	(-1)0,40
32	(+1)9,96	(+1)21,36	(+1)101	(+1)70	(+1)165	(-1)1,402	(-1)0,401	(-1)0,40
33	(-1)6,04	(-1)8,64	(-1)28,2	(-1)40	(-1)125	(+1)1,598	(-1)0,401	(-1)0,40
34	(+1)9,96	(-1)8,64	(-1)28,2	(-1)40	(-1)125	(+1)1,598	(-1)0,401	(-1)0,40
35	(-1)6,04	(+1)21,36	(-1)69,8	(-1)40	(-1)125	(+1)1,598	(-1)0,401	(-1)0,40
36	(+1)9,96	(+1)21,36	(-1)69,8	(-1)40	(-1)125	(+1)1,598	(-1)0,401	(-1)0,40
37	(-1)6,04	(-1)8,64	(+1)40,9	(-1)40	(-1)125	(+1)1,598	(-1)0,401	(-1)0,40
38	(+1)9,96	(-1)8,64	(+1)40,9	(-1)40	(-1)125	(+1)1,598	(-1)0,401	(-1)0,40
39	(-1)6,04	(+1)21,36	(+1)101	(-1)40	(-1)125	(+1)1,598	(-1)0,401	(-1)0,40
40	(+1)9,96	(+1)21,36	(+1)101	(-1)40	(-1)125	(+1)1,598	(-1)0,401	(-1)0,40
41	(-1)6,04	(-1)8,64	(-1)28,2	(+1)70	(-1)125	(+1)1,598	(-1)0,401	(-1)0,40
42	(+1)9,96	(-1)8,64	(-1)28,2	(+1)70	(-1)125	(+1)1,598	(-1)0,401	(-1)0,40
43	(-1)6,04	(+1)21,36	(-1)69,8	(+1)70	(-1)125	(+1)1,598	(-1)0,401	(-1)0,40
44	(+1)9,96	(+1)21,36	(-1)69,8	(+1)70	(-1)125	(+1)1,598	(-1)0,401	(-1)0,40
45	(-1)6,04	(-1)8,64	(+1)40,9	(+1)70	(-1)125	(+1)1,598	(-1)0,401	(-1)0,40
46	(+1)9,96	(-1)8,64	(+1)40,9	(+1)70	(-1)125	(+1)1,598	(-1)0,401	(-1)0,40
47	(-1)6,04	(+1)21,36	(+1)101	(+1)70	(-1)125	(+1)1,598	(-1)0,401	(-1)0,40
48	(+1)9,96	(+1)21,36	(+1)101	(+1)70	(-1)125	(+1)1,598	(-1)0,401	(-1)0,40
49	(-1)6,04	(-1)8,64	(-1)28,2	(-1)40	(+1)165	(+1)1,598	(-1)0,401	(-1)0,40
50	(+1)9,96	(-1)8,64	(-1)28,2	(-1)40	(+1)165	(+1)1,598	(-1)0,401	(-1)0,40
51	(-1)6,04	(+1)21,36	(-1)69,8	(-1)40	(+1)165	(+1)1,598	(-1)0,401	(-1)0,40
52	(+1)9,96	(+1)21,36	(-1)69,8	(-1)40	(+1)165	(+1)1,598	(-1)0,401	(-1)0,40
53	(-1)6,04	(-1)8,64	(+1)40,9	(-1)40	(+1)165	(+1)1,598	(-1)0,401	(-1)0,40
54	(+1)9,96	(-1)8,64	(+1)40,9	(-1)40	(+1)165	(+1)1,598	(-1)0,401	(-1)0,40
55	(-1)6,04	(+1)21,36	(+1)101	(-1)40	(+1)165	(+1)1,598	(-1)0,401	(-1)0,40
56	(+1)9,96	(+1)21,36	(+1)101	(-1)40	(+1)165	(+1)1,598	(-1)0,401	(-1)0,40
57	(-1)6,04	(-1)8,64	(-1)28,2	(+1)70	(+1)165	(+1)1,598	(-1)0,401	(-1)0,40

Продолжение таблицы А.1

$x_i$ $u$	$x_1(\delta_{кр})$ мм	$x_2(P_{мх.кр})$ Н	$x_3(P_{мх.к})$ Н	$x_4(T_0)$ °С	$x_5(\Theta_{дон})$ °С	$x_6(K_{max})$	$x_7(K)$	$x_8(K_3)$
58	(+1)9,96	(-1)8,64	(-1)28,2	(+1)70	(+1)165	(+1)1,598	(-1)0,401	(-1)0,40
59	(-1)6,04	(+1)21,36	(-1)69,8	(+1)70	(+1)165	(+1)1,598	(-1)0,401	(-1)0,40
60	(+1)9,96	(+1)21,36	(-1)69,8	(+1)70	(+1)165	(+1)1,598	(-1)0,401	(-1)0,40
61	(-1)6,04	(-1)8,64	(+1)40,9	(+1)70	(+1)165	(+1)1,598	(-1)0,401	(-1)0,40
62	(+1)9,96	(-1)8,64	(+1)40,9	(+1)70	(+1)165	(+1)1,598	(-1)0,401	(-1)0,40
63	(-1)6,04	(+1)21,36	(+1)101	(+1)70	(+1)165	(+1)1,598	(-1)0,401	(-1)0,40
64	(+1)9,96	(+1)21,36	(+1)101	(+1)70	(+1)165	(+1)1,598	(-1)0,401	(-1)0,40
65	(-1)6,04	(-1)8,64	(-1)28,2	(-1)40	(-1)125	(-1)1,402	(+1)0,499	(-1)0,40
66	(+1)9,96	(-1)8,64	(-1)28,2	(-1)40	(-1)125	(-1)1,402	(+1)0,499	(-1)0,40
67	(-1)6,04	(+1)21,36	(-1)69,8	(-1)40	(-1)125	(-1)1,402	(+1)0,499	(-1)0,40
68	(+1)9,96	(+1)21,36	(-1)69,8	(-1)40	(-1)125	(-1)1,402	(+1)0,499	(-1)0,40
69	(-1)6,04	(-1)8,64	(+1)40,9	(-1)40	(-1)125	(-1)1,402	(+1)0,499	(-1)0,40
70	(+1)9,96	(-1)8,64	(+1)40,9	(-1)40	(-1)125	(-1)1,402	(+1)0,499	(-1)0,40
71	(-1)6,04	(+1)21,36	(+1)101	(-1)40	(-1)125	(-1)1,402	(+1)0,499	(-1)0,40
72	(+1)9,96	(+1)21,36	(+1)101	(-1)40	(-1)125	(-1)1,402	(+1)0,499	(-1)0,40
73	(-1)6,04	(-1)8,64	(-1)28,2	(+1)70	(-1)125	(-1)1,402	(+1)0,499	(-1)0,40
74	(+1)9,96	(-1)8,64	(-1)28,2	(+1)70	(-1)125	(-1)1,402	(+1)0,499	(-1)0,40
75	(-1)6,04	(+1)21,36	(-1)69,8	(+1)70	(-1)125	(-1)1,402	(+1)0,499	(-1)0,40
76	(+1)9,96	(+1)21,36	(-1)69,8	(+1)70	(-1)125	(-1)1,402	(+1)0,499	(-1)0,40
77	(-1)6,04	(-1)8,64	(+1)40,9	(+1)70	(-1)125	(-1)1,402	(+1)0,499	(-1)0,40
78	(+1)9,96	(-1)8,64	(+1)40,9	(+1)70	(-1)125	(-1)1,402	(+1)0,499	(-1)0,40
79	(-1)6,04	(+1)21,36	(+1)101	(+1)70	(-1)125	(-1)1,402	(+1)0,499	(-1)0,40
80	(+1)9,96	(+1)21,36	(+1)101	(+1)70	(-1)125	(-1)1,402	(+1)0,499	(-1)0,40
81	(-1)6,04	(-1)8,64	(-1)28,2	(-1)40	(+1)165	(-1)1,402	(+1)0,499	(-1)0,40
82	(+1)9,96	(-1)8,64	(-1)28,2	(-1)40	(+1)165	(-1)1,402	(+1)0,499	(-1)0,40
83	(-1)6,04	(+1)21,36	(-1)69,8	(-1)40	(+1)165	(-1)1,402	(+1)0,499	(-1)0,40
84	(+1)9,96	(+1)21,36	(-1)69,8	(-1)40	(+1)165	(-1)1,402	(+1)0,499	(-1)0,40
85	(-1)6,04	(-1)8,64	(+1)40,9	(-1)40	(+1)165	(-1)1,402	(+1)0,499	(-1)0,40
86	(+1)9,96	(-1)8,64	(+1)40,9	(-1)40	(+1)165	(-1)1,402	(+1)0,499	(-1)0,40
87	(-1)6,04	(+1)21,36	(+1)101	(-1)40	(+1)165	(-1)1,402	(+1)0,499	(-1)0,40
88	(+1)9,96	(+1)21,36	(+1)101	(-1)40	(+1)165	(-1)1,402	(+1)0,499	(-1)0,40
89	(-1)6,04	(-1)8,64	(-1)28,2	(+1)70	(+1)165	(-1)1,402	(+1)0,499	(-1)0,40
90	(+1)9,96	(-1)8,64	(-1)28,2	(+1)70	(+1)165	(-1)1,402	(+1)0,499	(-1)0,40
91	(-1)6,04	(+1)21,36	(-1)69,8	(+1)70	(+1)165	(-1)1,402	(+1)0,499	(-1)0,40
92	(+1)9,96	(+1)21,36	(-1)69,8	(+1)70	(+1)165	(-1)1,402	(+1)0,499	(-1)0,40
93	(-1)6,04	(-1)8,64	(+1)40,9	(+1)70	(+1)165	(-1)1,402	(+1)0,499	(-1)0,40
94	(+1)9,96	(-1)8,64	(+1)40,9	(+1)70	(+1)165	(-1)1,402	(+1)0,499	(-1)0,40
95	(-1)6,04	(+1)21,36	(+1)101	(+1)70	(+1)165	(-1)1,402	(+1)0,499	(-1)0,40
96	(+1)9,96	(+1)21,36	(+1)101	(+1)70	(+1)165	(-1)1,402	(+1)0,499	(-1)0,40
97	(-1)6,04	(-1)8,64	(-1)28,2	(-1)40	(-1)125	(+1)1,598	(+1)0,499	(-1)0,40
98	(+1)9,96	(-1)8,64	(-1)28,2	(-1)40	(-1)125	(+1)1,598	(+1)0,499	(-1)0,40
99	(-1)6,04	(+1)21,36	(-1)69,8	(-1)40	(-1)125	(+1)1,598	(+1)0,499	(-1)0,40
100	(+1)9,96	(+1)21,36	(-1)69,8	(-1)40	(-1)125	(+1)1,598	(+1)0,499	(-1)0,40
101	(-1)6,04	(-1)8,64	(+1)40,9	(-1)40	(-1)125	(+1)1,598	(+1)0,499	(-1)0,40
102	(+1)9,96	(-1)8,64	(+1)40,9	(-1)40	(-1)125	(+1)1,598	(+1)0,499	(-1)0,40
103	(-1)6,04	(+1)21,36	(+1)101	(-1)40	(-1)125	(+1)1,598	(+1)0,499	(-1)0,40
104	(+1)9,96	(+1)21,36	(+1)101	(-1)40	(-1)125	(+1)1,598	(+1)0,499	(-1)0,40
105	(-1)6,04	(-1)8,64	(-1)28,2	(+1)70	(-1)125	(+1)1,598	(+1)0,499	(-1)0,40
106	(+1)9,96	(-1)8,64	(-1)28,2	(+1)70	(-1)125	(+1)1,598	(+1)0,499	(-1)0,40
107	(-1)6,04	(+1)21,36	(-1)69,8	(+1)70	(-1)125	(+1)1,598	(+1)0,499	(-1)0,40
108	(+1)9,96	(+1)21,36	(-1)69,8	(+1)70	(-1)125	(+1)1,598	(+1)0,499	(-1)0,40
109	(-1)6,04	(-1)8,64	(+1)40,9	(+1)70	(-1)125	(+1)1,598	(+1)0,499	(-1)0,40
110	(+1)9,96	(-1)8,64	(+1)40,9	(+1)70	(-1)125	(+1)1,598	(+1)0,499	(-1)0,40
111	(-1)6,04	(+1)21,36	(+1)101	(+1)70	(-1)125	(+1)1,598	(+1)0,499	(-1)0,40
112	(+1)9,96	(+1)21,36	(+1)101	(+1)70	(-1)125	(+1)1,598	(+1)0,499	(-1)0,40
113	(-1)6,04	(-1)8,64	(-1)28,2	(-1)40	(+1)165	(+1)1,598	(+1)0,499	(-1)0,40
114	(+1)9,96	(-1)8,64	(-1)28,2	(-1)40	(+1)165	(+1)1,598	(+1)0,499	(-1)0,40
115	(-1)6,04	(+1)21,36	(-1)69,8	(-1)40	(+1)165	(+1)1,598	(+1)0,499	(-1)0,40
116	(+1)9,96	(+1)21,36	(-1)69,8	(-1)40	(+1)165	(+1)1,598	(+1)0,499	(-1)0,40
117	(-1)6,04	(-1)8,64	(+1)40,9	(-1)40	(+1)165	(+1)1,598	(+1)0,499	(-1)0,40
118	(+1)9,96	(-1)8,64	(+1)40,9	(-1)40	(+1)165	(+1)1,598	(+1)0,499	(-1)0,40

Продолжение таблицы А.1

$x_i$ $u$	$x_1(\delta_{кр}),$ мм	$x_2(P_{мх.кр}),$ Н	$x_3(P_{мх.к}),$ Н	$x_4(T_0),$ °С	$x_5(\Theta_{дон}),$ °С	$x_6(K_{max})$	$x_7(K)$	$x_8(K_3)$
119	(-1)6,04	(+1)21,36	(+1)101	(-1)40	(+1)165	(+1)1,598	(+1)0,499	(-1)0,40
120	(+1)9,96	(+1)21,36	(+1)101	(-1)40	(+1)165	(+1)1,598	(+1)0,499	(-1)0,40
121	(-1)6,04	(-1)8,64	(-1)28,2	(+1)70	(+1)165	(+1)1,598	(+1)0,499	(-1)0,40
122	(+1)9,96	(-1)8,64	(-1)28,2	(+1)70	(+1)165	(+1)1,598	(+1)0,499	(-1)0,40
123	(-1)6,04	(+1)21,36	(-1)69,8	(+1)70	(+1)165	(+1)1,598	(+1)0,499	(-1)0,40
124	(+1)9,96	(+1)21,36	(-1)69,8	(+1)70	(+1)165	(+1)1,598	(+1)0,499	(-1)0,40
125	(-1)6,04	(-1)8,64	(+1)40,9	(+1)70	(+1)165	(+1)1,598	(+1)0,499	(-1)0,40
126	(+1)9,96	(-1)8,64	(+1)40,9	(+1)70	(+1)165	(+1)1,598	(+1)0,499	(-1)0,40
127	(-1)6,04	(+1)21,36	(+1)101	(+1)70	(+1)165	(+1)1,598	(+1)0,499	(-1)0,40
128	(+1)9,96	(+1)21,36	(+1)101	(+1)70	(+1)165	(+1)1,598	(+1)0,499	(-1)0,40
129	(-1)6,04	(-1)8,64	(-1)28,2	(-1)40	(-1)125	(-1)1,402	(-1)0,401	(+1)0,60
130	(+1)9,96	(-1)8,64	(-1)28,2	(-1)40	(-1)125	(-1)1,402	(-1)0,401	(+1)0,60
131	(-1)6,04	(+1)21,36	(-1)69,8	(-1)40	(-1)125	(-1)1,402	(-1)0,401	(+1)0,60
132	(+1)9,96	(+1)21,36	(-1)69,8	(-1)40	(-1)125	(-1)1,402	(-1)0,401	(+1)0,60
133	(-1)6,04	(-1)8,64	(+1)40,9	(-1)40	(-1)125	(-1)1,402	(-1)0,401	(+1)0,60
134	(+1)9,96	(-1)8,64	(+1)40,9	(-1)40	(-1)125	(-1)1,402	(-1)0,401	(+1)0,60
135	(-1)6,04	(+1)21,36	(+1)101	(-1)40	(-1)125	(-1)1,402	(-1)0,401	(+1)0,60
136	(+1)9,96	(+1)21,36	(+1)101	(-1)40	(-1)125	(-1)1,402	(-1)0,401	(+1)0,60
137	(-1)6,04	(-1)8,64	(-1)28,2	(+1)70	(-1)125	(-1)1,402	(-1)0,401	(+1)0,60
138	(+1)9,96	(-1)8,64	(-1)28,2	(+1)70	(-1)125	(-1)1,402	(-1)0,401	(+1)0,60
139	(-1)6,04	(+1)21,36	(-1)69,8	(+1)70	(-1)125	(-1)1,402	(-1)0,401	(+1)0,60
140	(+1)9,96	(+1)21,36	(-1)69,8	(+1)70	(-1)125	(-1)1,402	(-1)0,401	(+1)0,60
141	(-1)6,04	(-1)8,64	(+1)40,9	(+1)70	(-1)125	(-1)1,402	(-1)0,401	(+1)0,60
142	(+1)9,96	(-1)8,64	(+1)40,9	(+1)70	(-1)125	(-1)1,402	(-1)0,401	(+1)0,60
143	(-1)6,04	(+1)21,36	(+1)101	(+1)70	(-1)125	(-1)1,402	(-1)0,401	(+1)0,60
144	(+1)9,96	(+1)21,36	(+1)101	(+1)70	(-1)125	(-1)1,402	(-1)0,401	(+1)0,60
145	(-1)6,04	(-1)8,64	(-1)28,2	(-1)40	(+1)165	(-1)1,402	(-1)0,401	(+1)0,60
146	(+1)9,96	(-1)8,64	(-1)28,2	(-1)40	(+1)165	(-1)1,402	(-1)0,401	(+1)0,60
147	(-1)6,04	(+1)21,36	(-1)69,8	(-1)40	(+1)165	(-1)1,402	(-1)0,401	(+1)0,60
148	(+1)9,96	(+1)21,36	(-1)69,8	(-1)40	(+1)165	(-1)1,402	(-1)0,401	(+1)0,60
149	(-1)6,04	(-1)8,64	(+1)40,9	(-1)40	(+1)165	(-1)1,402	(-1)0,401	(+1)0,60
150	(+1)9,96	(-1)8,64	(+1)40,9	(-1)40	(+1)165	(-1)1,402	(-1)0,401	(+1)0,60
151	(-1)6,04	(+1)21,36	(+1)101	(-1)40	(+1)165	(-1)1,402	(-1)0,401	(+1)0,60
152	(+1)9,96	(+1)21,36	(+1)101	(-1)40	(+1)165	(-1)1,402	(-1)0,401	(+1)0,60
153	(-1)6,04	(-1)8,64	(-1)28,2	(+1)70	(+1)165	(-1)1,402	(-1)0,401	(+1)0,60
154	(+1)9,96	(-1)8,64	(-1)28,2	(+1)70	(+1)165	(-1)1,402	(-1)0,401	(+1)0,60
155	(-1)6,04	(+1)21,36	(-1)69,8	(+1)70	(+1)165	(-1)1,402	(-1)0,401	(+1)0,60
156	(+1)9,96	(+1)21,36	(-1)69,8	(+1)70	(+1)165	(-1)1,402	(-1)0,401	(+1)0,60
157	(-1)6,04	(-1)8,64	(+1)40,9	(+1)70	(+1)165	(-1)1,402	(-1)0,401	(+1)0,60
158	(+1)9,96	(-1)8,64	(+1)40,9	(+1)70	(+1)165	(-1)1,402	(-1)0,401	(+1)0,60
159	(-1)6,04	(+1)21,36	(+1)101	(+1)70	(+1)165	(-1)1,402	(-1)0,401	(+1)0,60
160	(+1)9,96	(+1)21,36	(+1)101	(+1)70	(+1)165	(-1)1,402	(-1)0,401	(+1)0,60
161	(-1)6,04	(-1)8,64	(-1)28,2	(-1)40	(+1)125	(+1)1,598	(-1)0,401	(+1)0,60
162	(+1)9,96	(-1)8,64	(-1)28,2	(-1)40	(-1)125	(+1)1,598	(-1)0,401	(+1)0,60
163	(-1)6,04	(+1)21,36	(-1)69,8	(-1)40	(-1)125	(+1)1,598	(-1)0,401	(+1)0,60
164	(+1)9,96	(+1)21,36	(-1)69,8	(-1)40	(-1)125	(+1)1,598	(-1)0,401	(+1)0,60
165	(-1)6,04	(-1)8,64	(+1)40,9	(-1)40	(-1)125	(+1)1,598	(-1)0,401	(+1)0,60
166	(+1)9,96	(-1)8,64	(+1)40,9	(-1)40	(-1)125	(+1)1,598	(-1)0,401	(+1)0,60
167	(-1)6,04	(+1)21,36	(+1)101	(-1)40	(-1)125	(+1)1,598	(-1)0,401	(+1)0,60
168	(+1)9,96	(+1)21,36	(+1)101	(-1)40	(-1)125	(+1)1,598	(-1)0,401	(+1)0,60
169	(-1)6,04	(-1)8,64	(-1)28,2	(+1)70	(-1)125	(+1)1,598	(-1)0,401	(+1)0,60
170	(+1)9,96	(-1)8,64	(-1)28,2	(+1)70	(-1)125	(+1)1,598	(-1)0,401	(+1)0,60
171	(-1)6,04	(+1)21,36	(-1)69,8	(+1)70	(-1)125	(+1)1,598	(-1)0,401	(+1)0,60
172	(+1)9,96	(+1)21,36	(-1)69,8	(+1)70	(-1)125	(+1)1,598	(-1)0,401	(+1)0,60
173	(-1)6,04	(-1)8,64	(+1)40,9	(+1)70	(-1)125	(+1)1,598	(-1)0,401	(+1)0,60
174	(+1)9,96	(-1)8,64	(+1)40,9	(+1)70	(-1)125	(+1)1,598	(-1)0,401	(+1)0,60
175	(-1)6,04	(+1)21,36	(+1)101	(+1)70	(-1)125	(+1)1,598	(-1)0,401	(+1)0,60
176	(+1)9,96	(+1)21,36	(+1)101	(+1)70	(-1)125	(+1)1,598	(-1)0,401	(+1)0,60
177	(-1)6,04	(-1)8,64	(-1)28,2	(-1)40	(+1)165	(+1)1,598	(-1)0,401	(+1)0,60
178	(+1)9,96	(-1)8,64	(-1)28,2	(-1)40	(+1)165	(+1)1,598	(-1)0,401	(+1)0,60
179	(-1)6,04	(+1)21,36	(-1)69,8	(-1)40	(+1)165	(+1)1,598	(-1)0,401	(+1)0,60

Продолжение таблицы А.1

$x_i$ $u$	$x_1(\delta_{кр}),$ мм	$x_2(P_{мх.кр}),$ Н	$x_3(P_{мх.к}),$ Н	$x_4(T_0),$ °С	$x_5(\Theta_{дон}),$ °С	$x_6(K_{max})$	$x_7(K)$	$x_8(K_3)$
180	(+1)9,96	(+1)21,36	(-1)69,8	(-1)40	(+1)165	(+1)1,598	(-1)0,401	(+1)0,60
181	(-1)6,04	(-1)8,64	(+1)40,9	(-1)40	(+1)165	(+1)1,598	(-1)0,401	(+1)0,60
182	(+1)9,96	(-1)8,64	(+1)40,9	(-1)40	(+1)165	(+1)1,598	(-1)0,401	(+1)0,60
183	(-1)6,04	(+1)21,36	(+1)101	(-1)40	(+1)165	(+1)1,598	(-1)0,401	(+1)0,60
184	(+1)9,96	(+1)21,36	(+1)101	(-1)40	(+1)165	(+1)1,598	(-1)0,401	(+1)0,60
185	(-1)6,04	(-1)8,64	(-1)28,2	(+1)70	(+1)165	(+1)1,598	(-1)0,401	(+1)0,60
186	(+1)9,96	(-1)8,64	(-1)28,2	(+1)70	(+1)165	(+1)1,598	(-1)0,401	(+1)0,60
187	(-1)6,04	(+1)21,36	(-1)69,8	(+1)70	(+1)165	(+1)1,598	(-1)0,401	(+1)0,60
188	(+1)9,96	(+1)21,36	(-1)69,8	(+1)70	(+1)165	(+1)1,598	(-1)0,401	(+1)0,60
189	(-1)6,04	(-1)8,64	(+1)40,9	(+1)70	(+1)165	(+1)1,598	(-1)0,401	(+1)0,60
190	(+1)9,96	(-1)8,64	(+1)40,9	(+1)70	(+1)165	(+1)1,598	(-1)0,401	(+1)0,60
191	(-1)6,04	(+1)21,36	(+1)101	(+1)70	(+1)165	(+1)1,598	(-1)0,401	(+1)0,60
192	(+1)9,96	(+1)21,36	(+1)101	(+1)70	(+1)165	(+1)1,598	(-1)0,401	(+1)0,60
193	(-1)6,04	(-1)8,64	(-1)28,2	(-1)40	(-1)125	(-1)1,402	(+1)0,499	(+1)0,60
194	(+1)9,96	(-1)8,64	(-1)28,2	(-1)40	(-1)125	(-1)1,402	(+1)0,499	(+1)0,60
195	(-1)6,04	(+1)21,36	(-1)69,8	(-1)40	(-1)125	(-1)1,402	(+1)0,499	(+1)0,60
196	(+1)9,96	(+1)21,36	(-1)69,8	(-1)40	(-1)125	(-1)1,402	(+1)0,499	(+1)0,60
197	(-1)6,04	(-1)8,64	(+1)40,9	(-1)40	(-1)125	(-1)1,402	(+1)0,499	(+1)0,60
198	(+1)9,96	(-1)8,64	(+1)40,9	(-1)40	(-1)125	(-1)1,402	(+1)0,499	(+1)0,60
199	(-1)6,04	(+1)21,36	(+1)101	(-1)40	(-1)125	(-1)1,402	(+1)0,499	(+1)0,60
200	(+1)9,96	(+1)21,36	(+1)101	(-1)40	(-1)125	(-1)1,402	(+1)0,499	(+1)0,60
201	(-1)6,04	(-1)8,64	(-1)28,2	(+1)70	(-1)125	(-1)1,402	(+1)0,499	(+1)0,60
202	(+1)9,96	(-1)8,64	(-1)28,2	(+1)70	(-1)125	(-1)1,402	(+1)0,499	(+1)0,60
203	(-1)6,04	(+1)21,36	(-1)69,8	(+1)70	(-1)125	(-1)1,402	(+1)0,499	(+1)0,60
204	(+1)9,96	(+1)21,36	(-1)69,8	(+1)70	(-1)125	(-1)1,402	(+1)0,499	(+1)0,60
205	(-1)6,04	(-1)8,64	(+1)40,9	(+1)70	(-1)125	(-1)1,402	(+1)0,499	(+1)0,60
206	(+1)9,96	(-1)8,64	(+1)40,9	(+1)70	(-1)125	(-1)1,402	(+1)0,499	(+1)0,60
207	(-1)6,04	(+1)21,36	(+1)101	(+1)70	(-1)125	(-1)1,402	(+1)0,499	(+1)0,60
208	(+1)9,96	(+1)21,36	(+1)101	(+1)70	(-1)125	(-1)1,402	(+1)0,499	(+1)0,60
209	(-1)6,04	(-1)8,64	(-1)28,2	(-1)40	(+1)165	(-1)1,402	(+1)0,499	(+1)0,60
210	(+1)9,96	(-1)8,64	(-1)28,2	(-1)40	(+1)165	(-1)1,402	(+1)0,499	(+1)0,60
211	(-1)6,04	(+1)21,36	(-1)69,8	(-1)40	(+1)165	(-1)1,402	(+1)0,499	(+1)0,60
212	(+1)9,96	(+1)21,36	(-1)69,8	(-1)40	(+1)165	(-1)1,402	(+1)0,499	(+1)0,60
213	(-1)6,04	(-1)8,64	(+1)40,9	(-1)40	(+1)165	(-1)1,402	(+1)0,499	(+1)0,60
214	(+1)9,96	(-1)8,64	(+1)40,9	(-1)40	(+1)165	(-1)1,402	(+1)0,499	(+1)0,60
215	(-1)6,04	(+1)21,36	(+1)101	(-1)40	(+1)165	(-1)1,402	(+1)0,499	(+1)0,60
216	(+1)9,96	(+1)21,36	(+1)101	(-1)40	(+1)165	(-1)1,402	(+1)0,499	(+1)0,60
217	(-1)6,04	(-1)8,64	(-1)28,2	(+1)70	(+1)165	(-1)1,402	(+1)0,499	(+1)0,60
218	(+1)9,96	(-1)8,64	(-1)28,2	(+1)70	(+1)165	(-1)1,402	(+1)0,499	(+1)0,60
219	(-1)6,04	(+1)21,36	(-1)69,8	(+1)70	(+1)165	(-1)1,402	(+1)0,499	(+1)0,60
220	(+1)9,96	(+1)21,36	(-1)69,8	(+1)70	(+1)165	(-1)1,402	(+1)0,499	(+1)0,60
221	(-1)6,04	(-1)8,64	(+1)40,9	(+1)70	(+1)165	(-1)1,402	(+1)0,499	(+1)0,60
222	(+1)9,96	(-1)8,64	(+1)40,9	(+1)70	(+1)165	(-1)1,402	(+1)0,499	(+1)0,60
223	(-1)6,04	(+1)21,36	(+1)101	(+1)70	(+1)165	(-1)1,402	(+1)0,499	(+1)0,60
224	(+1)9,96	(+1)21,36	(+1)101	(+1)70	(+1)165	(-1)1,402	(+1)0,499	(+1)0,60
225	(-1)6,04	(-1)8,64	(-1)28,2	(-1)40	(-1)125	(+1)1,598	(+1)0,499	(+1)0,60
226	(+1)9,96	(-1)8,64	(-1)28,2	(-1)40	(-1)125	(+1)1,598	(+1)0,499	(+1)0,60
227	(-1)6,04	(+1)21,36	(-1)69,8	(-1)40	(-1)125	(+1)1,598	(+1)0,499	(+1)0,60
228	(+1)9,96	(+1)21,36	(-1)69,8	(-1)40	(-1)125	(+1)1,598	(+1)0,499	(+1)0,60
229	(-1)6,04	(-1)8,64	(+1)40,9	(-1)40	(-1)125	(+1)1,598	(+1)0,499	(+1)0,60
230	(+1)9,96	(-1)8,64	(+1)40,9	(-1)40	(-1)125	(+1)1,598	(+1)0,499	(+1)0,60
231	(-1)6,04	(+1)21,36	(+1)101	(-1)40	(-1)125	(+1)1,598	(+1)0,499	(+1)0,60
232	(+1)9,96	(+1)21,36	(+1)101	(-1)40	(-1)125	(+1)1,598	(+1)0,499	(+1)0,60
233	(-1)6,04	(-1)8,64	(-1)28,2	(+1)70	(-1)125	(+1)1,598	(+1)0,499	(+1)0,60
234	(+1)9,96	(-1)8,64	(-1)28,2	(+1)70	(-1)125	(+1)1,598	(+1)0,499	(+1)0,60
235	(-1)6,04	(+1)21,36	(-1)69,8	(+1)70	(-1)125	(+1)1,598	(+1)0,499	(+1)0,60
236	(+1)9,96	(+1)21,36	(-1)69,8	(+1)70	(-1)125	(+1)1,598	(+1)0,499	(+1)0,60
237	(-1)6,04	(-1)8,64	(+1)40,9	(+1)70	(-1)125	(+1)1,598	(+1)0,499	(+1)0,60
238	(+1)9,96	(-1)8,64	(+1)40,9	(+1)70	(-1)125	(+1)1,598	(+1)0,499	(+1)0,60
239	(-1)6,04	(+1)21,36	(+1)101	(+1)70	(-1)125	(+1)1,598	(+1)0,499	(+1)0,60
240	(+1)9,96	(+1)21,36	(+1)101	(+1)70	(-1)125	(+1)1,598	(+1)0,499	(+1)0,60

Продолжение таблицы А.1

$x_i$ $u$	$x_1(\delta_{кр}),$ мм	$x_2(P_{мх.кр}),$ Н	$x_3(P_{мх.к}),$ Н	$x_4(T_0),$ °С	$x_5(\Theta_{дон}),$ °С	$x_6(K_{max})$	$x_7(K)$	$x_8(K_3)$
241	<sup>(-1)</sup> 6,04	<sup>(-1)</sup> 8,64	<sup>(-1)</sup> 28,2	<sup>(-1)</sup> 40	<sup>(+1)</sup> 165	<sup>(+1)</sup> 1,598	<sup>(+1)</sup> 0,499	<sup>(+1)</sup> 0,60
242	<sup>(+1)</sup> 9,96	<sup>(-1)</sup> 8,64	<sup>(-1)</sup> 28,2	<sup>(-1)</sup> 40	<sup>(+1)</sup> 165	<sup>(+1)</sup> 1,598	<sup>(+1)</sup> 0,499	<sup>(+1)</sup> 0,60
243	<sup>(-1)</sup> 6,04	<sup>(+1)</sup> 21,36	<sup>(-1)</sup> 69,8	<sup>(-1)</sup> 40	<sup>(+1)</sup> 165	<sup>(+1)</sup> 1,598	<sup>(+1)</sup> 0,499	<sup>(+1)</sup> 0,60
244	<sup>(+1)</sup> 9,96	<sup>(+1)</sup> 21,36	<sup>(-1)</sup> 69,8	<sup>(-1)</sup> 40	<sup>(+1)</sup> 165	<sup>(+1)</sup> 1,598	<sup>(+1)</sup> 0,499	<sup>(+1)</sup> 0,60
245	<sup>(-1)</sup> 6,04	<sup>(-1)</sup> 8,64	<sup>(+1)</sup> 40,9	<sup>(-1)</sup> 40	<sup>(+1)</sup> 165	<sup>(+1)</sup> 1,598	<sup>(+1)</sup> 0,499	<sup>(+1)</sup> 0,60
246	<sup>(+1)</sup> 9,96	<sup>(-1)</sup> 8,64	<sup>(+1)</sup> 40,9	<sup>(-1)</sup> 40	<sup>(+1)</sup> 165	<sup>(+1)</sup> 1,598	<sup>(+1)</sup> 0,499	<sup>(+1)</sup> 0,60
247	<sup>(-1)</sup> 6,04	<sup>(+1)</sup> 21,36	<sup>(+1)</sup> 101	<sup>(-1)</sup> 40	<sup>(+1)</sup> 165	<sup>(+1)</sup> 1,598	<sup>(+1)</sup> 0,499	<sup>(+1)</sup> 0,60
248	<sup>(+1)</sup> 9,96	<sup>(+1)</sup> 21,36	<sup>(+1)</sup> 101	<sup>(-1)</sup> 40	<sup>(+1)</sup> 165	<sup>(+1)</sup> 1,598	<sup>(+1)</sup> 0,499	<sup>(+1)</sup> 0,60
249	<sup>(-1)</sup> 6,04	<sup>(-1)</sup> 8,64	<sup>(-1)</sup> 28,2	<sup>(+1)</sup> 70	<sup>(+1)</sup> 165	<sup>(+1)</sup> 1,598	<sup>(+1)</sup> 0,499	<sup>(+1)</sup> 0,60
250	<sup>(+1)</sup> 9,96	<sup>(-1)</sup> 8,64	<sup>(-1)</sup> 28,2	<sup>(+1)</sup> 70	<sup>(+1)</sup> 165	<sup>(+1)</sup> 1,598	<sup>(+1)</sup> 0,499	<sup>(+1)</sup> 0,60
251	<sup>(-1)</sup> 6,04	<sup>(+1)</sup> 21,36	<sup>(-1)</sup> 69,8	<sup>(+1)</sup> 70	<sup>(+1)</sup> 165	<sup>(+1)</sup> 1,598	<sup>(+1)</sup> 0,499	<sup>(+1)</sup> 0,60
252	<sup>(+1)</sup> 9,96	<sup>(+1)</sup> 21,36	<sup>(-1)</sup> 69,8	<sup>(+1)</sup> 70	<sup>(+1)</sup> 165	<sup>(+1)</sup> 1,598	<sup>(+1)</sup> 0,499	<sup>(+1)</sup> 0,60
253	<sup>(-1)</sup> 6,04	<sup>(-1)</sup> 8,64	<sup>(+1)</sup> 40,9	<sup>(+1)</sup> 70	<sup>(+1)</sup> 165	<sup>(+1)</sup> 1,598	<sup>(+1)</sup> 0,499	<sup>(+1)</sup> 0,60
254	<sup>(+1)</sup> 9,96	<sup>(-1)</sup> 8,64	<sup>(+1)</sup> 40,9	<sup>(+1)</sup> 70	<sup>(+1)</sup> 165	<sup>(+1)</sup> 1,598	<sup>(+1)</sup> 0,499	<sup>(+1)</sup> 0,60
255	<sup>(-1)</sup> 6,04	<sup>(+1)</sup> 21,36	<sup>(+1)</sup> 101	<sup>(+1)</sup> 70	<sup>(+1)</sup> 165	<sup>(+1)</sup> 1,598	<sup>(+1)</sup> 0,499	<sup>(+1)</sup> 0,60
256	<sup>(+1)</sup> 9,96	<sup>(+1)</sup> 21,36	<sup>(+1)</sup> 101	<sup>(+1)</sup> 70	<sup>(+1)</sup> 165	<sup>(+1)</sup> 1,598	<sup>(+1)</sup> 0,499	<sup>(+1)</sup> 0,60
257	<sup>(-2,045)</sup> 4	<sup>0</sup> 15	<sup>0</sup> 60	<sup>0</sup> 55	<sup>0</sup> 145	<sup>0</sup> 1,50	<sup>0</sup> 0,450	<sup>0</sup> 0,50
258	<sup>(+2,045)</sup> 12	<sup>0</sup> 15	<sup>0</sup> 60	<sup>0</sup> 55	<sup>0</sup> 145	<sup>0</sup> 1,50	<sup>0</sup> 0,450	<sup>0</sup> 0,50
259	<sup>0</sup> 8	<sup>(-2,045)</sup> 2	<sup>0</sup> 8	<sup>0</sup> 55	<sup>0</sup> 145	<sup>0</sup> 1,50	<sup>0</sup> 0,450	<sup>0</sup> 0,50
260	<sup>0</sup> 8	<sup>(+2,045)</sup> 28	<sup>0</sup> 112	<sup>0</sup> 55	<sup>0</sup> 145	<sup>0</sup> 1,50	<sup>0</sup> 0,450	<sup>0</sup> 0,50
261	<sup>0</sup> 8	<sup>0</sup> 15	<sup>(-2,045)</sup> 37,5	<sup>0</sup> 55	<sup>0</sup> 145	<sup>0</sup> 1,50	<sup>0</sup> 0,450	<sup>0</sup> 0,50
262	<sup>0</sup> 8	<sup>0</sup> 15	<sup>(+2,045)</sup> 82,5	<sup>0</sup> 55	<sup>0</sup> 145	<sup>0</sup> 1,50	<sup>0</sup> 0,450	<sup>0</sup> 0,50
263	<sup>0</sup> 8	<sup>0</sup> 15	<sup>0</sup> 60	<sup>(-2,045)</sup> 25	<sup>0</sup> 145	<sup>0</sup> 1,50	<sup>0</sup> 0,450	<sup>0</sup> 0,50
264	<sup>0</sup> 8	<sup>0</sup> 15	<sup>0</sup> 60	<sup>(+2,045)</sup> 85	<sup>0</sup> 145	<sup>0</sup> 1,50	<sup>0</sup> 0,450	<sup>0</sup> 0,50
265	<sup>0</sup> 8	<sup>0</sup> 15	<sup>0</sup> 60	<sup>0</sup> 55	<sup>(-2,045)</sup> 105	<sup>0</sup> 1,50	<sup>0</sup> 0,450	<sup>0</sup> 0,50
266	<sup>0</sup> 8	<sup>0</sup> 15	<sup>0</sup> 60	<sup>0</sup> 55	<sup>(+2,045)</sup> 185	<sup>0</sup> 1,50	<sup>0</sup> 0,450	<sup>0</sup> 0,50
267	<sup>0</sup> 8	<sup>0</sup> 15	<sup>0</sup> 60	<sup>0</sup> 55	<sup>0</sup> 145	<sup>(-2,045)</sup> 1,30	<sup>0</sup> 0,450	<sup>0</sup> 0,50
268	<sup>0</sup> 8	<sup>0</sup> 15	<sup>0</sup> 60	<sup>0</sup> 55	<sup>0</sup> 145	<sup>(+2,045)</sup> 1,70	<sup>0</sup> 0,450	<sup>0</sup> 0,50
269	<sup>0</sup> 8	<sup>0</sup> 15	<sup>0</sup> 60	<sup>0</sup> 55	<sup>0</sup> 145	<sup>0</sup> 1,50	<sup>(-2,045)</sup> 0,35	<sup>0</sup> 0,50
270	<sup>0</sup> 8	<sup>0</sup> 15	<sup>0</sup> 60	<sup>0</sup> 55	<sup>0</sup> 145	<sup>0</sup> 1,50	<sup>(+2,045)</sup> 0,55	<sup>0</sup> 0,50
271	<sup>0</sup> 8	<sup>0</sup> 15	<sup>0</sup> 60	<sup>0</sup> 55	<sup>0</sup> 145	<sup>0</sup> 1,50	<sup>0</sup> 0,450	<sup>(-2,045)</sup> 0,3
272	<sup>0</sup> 8	<sup>0</sup> 15	<sup>0</sup> 60	<sup>0</sup> 55	<sup>0</sup> 145	<sup>0</sup> 1,50	<sup>0</sup> 0,450	<sup>(+2,045)</sup> 0,7
273	<sup>0</sup> 8	<sup>0</sup> 15	<sup>0</sup> 60	<sup>0</sup> 55	<sup>0</sup> 145	<sup>0</sup> 1,50	<sup>0</sup> 0,450	<sup>0</sup> 0,50

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Результаты оптимизации форсированных однообмоточных втяжных броневых электромагнитов  
в схеме с балластным резистором, минимизированные по массе активных материалов

Таблица Б.1

$x_i$ $u$	$m_a^*$	$\delta_{кр.опт}^*$	$H_{0опт}^*$	$A_{0опт}^*$	$H_{стопт}^*$	$H_{вопт}^*$	$R_{dопт}^*$	$B_{м ср}$ Тл	$B_{м опт}$ Тл	$F_{кп ср}^*$	$F_{кп опт}^*$	$P_{п}^*$	$P_{уд}^*$	$P_{уд.о}^*$
1	358,6	0,367	4,040	0,762	0,480	0,437	0,864	1,05	1,22	0,535	0,1012	0,99	0,16	0,08
2	84,1	0,585	3,790	0,762	0,480	0,431	1,543	1,16	1,17	0,731	0,0978	3,13	0,38	0,14
3	721,3	0,288	3,873	0,768	0,480	0,445	0,734	1,20	1,29	0,442	0,0907	0,55	0,10	0,05
4	170,8	0,468	3,915	0,774	0,480	0,439	1,363	1,26	1,28	0,624	0,0905	1,75	0,23	0,09
5	458,1	0,339	4,082	0,762	0,480	0,439	0,540	0,95	1,26	0,502	0,0981	0,80	0,11	0,07
6	108,5	0,545	3,998	0,762	0,480	0,437	1,038	1,06	1,24	0,679	0,0964	2,39	0,25	0,12
7	930,8	0,265	3,873	0,768	0,480	0,450	0,414	1,09	1,33	0,410	0,0885	0,43	0,06	0,04
8	223,0	0,430	3,998	0,768	0,480	0,442	0,879	1,21	1,33	0,571	0,0889	1,33	0,15	0,07
9	498,5	0,346	5,458	0,652	0,480	0,434	0,276	0,96	1,32	0,447	0,1228	0,54	0,13	0,10
10	116,6	0,550	5,208	0,634	0,480	0,431	0,800	1,12	1,28	0,615	0,1154	1,73	0,29	0,16
11	1021	0,269	5,250	0,646	0,480	0,437	0,301	1,17	1,38	0,398	0,1069	0,35	0,08	0,06
12	236,7	0,439	5,291	0,652	0,480	0,437	0,593	1,22	1,38	0,501	0,1075	0,89	0,17	0,10
13	640,9	0,318	5,479	0,652	0,480	0,439	0,070	0,88	1,37	0,427	0,1190	0,45	0,09	0,08
14	150,1	0,511	5,333	0,646	0,480	0,434	0,394	0,98	1,34	0,553	0,1144	1,26	0,19	0,14
15	1337	0,246	5,250	0,646	0,480	0,442	0,076	1,07	1,43	0,377	0,1044	0,28	0,06	0,05
16	310,9	0,404	5,375	0,658	0,480	0,439	0,254	1,10	1,44	0,460	0,1070	0,67	0,11	0,08
17	296,2	0,396	4,040	0,798	0,480	0,437	0,934	1,14	1,25	0,564	0,1046	1,15	0,18	0,09
18	70,1	0,627	3,790	0,792	0,480	0,431	1,676	1,23	1,22	0,785	0,1009	3,77	0,43	0,15
19	596,4	0,310	3,831	0,804	0,480	0,442	0,838	1,25	1,32	0,475	0,0933	0,67	0,11	0,06
20	141,9	0,499	3,831	0,804	0,480	0,442	1,496	1,31	1,31	0,666	0,0924	2,12	0,26	0,10
21	376,6	0,367	4,082	0,804	0,48	0,439	0,605	1,04	1,29	0,530	0,1016	0,93	0,12	0,07
22	89,9	0,584	3,915	0,798	0,480	0,434	1,146	1,15	1,27	0,722	0,0986	2,85	0,28	0,13
23	930,8	0,265	3,873	0,768	0,480	0,450	0,414	1,09	1,33	0,410	0,0885	0,51	0,07	0,05
24	184,5	0,461	3,915	0,810	0,480	0,445	0,994	1,25	1,36	0,612	0,0910	1,61	0,17	0,08
25	398,9	0,369	5,083	0,688	0,480	0,434	0,486	1,04	1,30	0,487	0,1161	0,70	0,14	0,10
26	94,1	0,582	4,707	0,676	0,480	0,429	1,183	1,20	1,25	0,692	0,1077	2,44	0,34	0,15
27	813,6	0,288	4,874	0,688	0,480	0,439	0,486	1,22	1,37	0,428	0,1019	0,44	0,09	0,06
28	191,2	0,464	4,791	0,688	0,480	0,439	0,988	1,27	1,35	0,580	0,0998	1,32	0,20	0,10
29	510,4	0,342	5,166	0,688	0,480	0,442	0,223	0,95	1,36	0,459	0,1139	0,57	0,10	0,08
30	120,9	0,542	4,916	0,676	0,480	0,434	0,677	1,07	1,31	0,623	0,1076	1,76	0,22	0,13
31	1056	0,264	4,874	0,688	0,480	0,445	0,218	1,13	1,42	0,399	0,0996	0,35	0,06	0,05
32	248,8	0,430	4,999	0,688	0,480	0,439	0,479	1,20	1,43	0,508	0,1013	0,90	0,13	0,08
33	366,7	0,363	3,998	0,762	0,480	0,434	1,100	1,03	1,24	0,533	0,1004	1,28	0,19	0,09
34	85,5	0,580	3,790	0,755	0,480	0,431	1,862	1,15	1,16	0,727	0,0975	4,02	0,43	0,14
35	738,6	0,286	3,873	0,768	0,480	0,442	0,939	1,20	1,29	0,439	0,0904	0,70	0,11	0,05
36	173,8	0,463	3,873	0,768	0,480	0,439	1,666	1,26	1,28	0,620	0,0898	2,26	0,26	0,09
37	470,5	0,335	3,998	0,768	0,480	0,437	0,736	0,93	1,25	0,499	0,0969	1,03	0,13	0,07
38	110,7	0,541	3,957	0,768	0,480	0,437	1,298	1,04	1,24	0,676	0,0958	3,08	0,28	0,12
39	958,2	0,263	3,873	0,774	0,480	0,450	0,575	1,08	1,33	0,407	0,0883	0,55	0,07	0,04
40	228,0	0,426	3,957	0,774	0,480	0,445	1,114	1,20	1,33	0,568	0,0883	1,70	0,17	0,08
41	509,7	0,341	5,333	0,652	0,480	0,434	0,488	0,96	1,30	0,451	0,1190	0,72	0,15	0,10
42	118,5	0,546	5,166	0,634	0,480	0,431	1,043	1,11	1,27	0,612	0,1142	2,23	0,33	0,17
43	1044	0,266	5,208	0,646	0,480	0,437	0,474	1,16	1,37	0,397	0,1057	0,45	0,09	0,06
44	240,8	0,436	5,250	0,652	0,480	0,434	0,809	1,21	1,37	0,500	0,1063	1,14	0,19	0,10
45	658,3	0,315	5,417	0,658	0,480	0,437	0,220	0,87	1,35	0,428	0,1169	0,58	0,10	0,08
46	153,2	0,506	5,291	0,640	0,480	0,431	0,580	0,97	1,33	0,551	0,1130	1,62	0,22	0,1

Продолжение таблицы Б.1

$x_i$ $u$	$m_a^*$	$\delta_{кр.опт}^*$	$H_{0\text{опт}}^*$	$A_{0\text{опт}}^*$	$H_{ст\text{опт}}^*$	$H_{в\text{опт}}^*$	$R_{d\text{опт}}^*$	$B_{м\text{ср}}$ Гл	$B_{м\text{опт}}$ Гл	$F_{кп\text{ср}}^*$	$F_{кп\text{опт}}^*$	$P_{п}^*$	$P_{уд}^*$	$P_{уд.о}^*$
47	1372	0,243	5,208	0,646	0,480	0,445	0,214	1,05	1,42	0,375	0,1031	0,36	0,06	0,05
48	318,0	0,399	5,333	0,652	0,480	0,439	0,427	1,09	1,43	0,460	0,1056	0,87	0,13	0,09
49	303,6	0,391	3,998	0,798	0,480	0,437	1,174	1,13	1,24	0,561	0,1037	1,47	0,21	0,09
50	71,4	0,623	3,790	0,792	0,480	0,431	2,002	1,22	1,22	0,779	0,1006	4,79	0,49	0,16
51	611,9	0,307	3,831	0,804	0,480	0,445	1,049	1,24	1,32	0,470	0,0930	0,84	0,13	0,06
52	144,7	0,496	3,831	0,804	0,480	0,439	1,801	1,32	1,31	0,662	0,0922	2,70	0,29	0,10
53	388,0	0,362	4,040	0,798	0,480	0,439	0,798	1,02	1,28	0,527	0,1005	1,19	0,14	0,07
54	91,9	0,580	3,915	0,798	0,480	0,434	1,402	1,14	1,26	0,717	0,0983	3,63	0,32	0,13
55	788,4	0,283	3,873	0,810	0,480	0,450	0,653	1,18	1,37	0,433	0,0912	0,65	0,08	0,05
56	189,0	0,456	3,873	0,810	0,480	0,445	1,238	1,24	1,36	0,608	0,0903	2,06	0,19	0,08
57	408,5	0,365	4,999	0,688	0,480	0,434	0,702	1,03	1,29	0,488	0,1139	0,92	0,17	0,10
58	95,6	0,579	4,707	0,676	0,480	0,431	1,450	1,20	1,25	0,687	0,1074	3,11	0,39	0,16
59	832,7	0,284	4,791	0,688	0,480	0,442	0,684	1,21	1,35	0,424	0,1001	0,56	0,10	0,06
60	194,6	0,460	4,749	0,688	0,480	0,439	1,249	1,26	1,34	0,576	0,0989	1,70	0,23	0,10
61	525,3	0,338	5,083	0,694	0,480	0,439	0,395	0,94	1,34	0,460	0,1117	0,74	0,11	0,08
62	123,5	0,538	4,874	0,682	0,480	0,431	0,896	1,06	1,30	0,620	0,1066	2,26	0,25	0,13
63	1087	0,261	4,833	0,694	0,480	0,445	0,369	1,11	1,41	0,397	0,0985	0,45	0,07	0,05
64	254,7	0,427	4,958	0,694	0,480	0,439	0,674	1,19	1,42	0,507	0,1002	1,17	0,15	0,08
65	265,4	0,405	3,998	0,762	0,480	0,437	1,350	1,18	1,25	0,578	0,1050	1,29	0,17	0,07
66	61,8	0,647	3,790	0,755	0,480	0,431	2,325	1,25	1,23	0,819	0,1020	4,37	0,40	0,12
67	537,8	0,316	3,831	0,762	0,480	0,442	1,228	1,27	1,33	0,488	0,0940	0,75	0,10	0,04
68	125,5	0,513	3,790	0,768	0,480	0,437	2,075	1,33	1,32	0,687	0,0931	2,42	0,24	0,08
69	342,3	0,371	3,998	0,755	0,480	0,437	0,941	1,06	1,29	0,542	0,1011	1,04	0,11	0,06
70	80,1	0,598	3,873	0,762	0,480	0,434	1,627	1,20	1,27	0,743	0,0992	3,24	0,26	0,10
71	700,4	0,290	3,831	0,768	0,480	0,447	0,781	1,21	1,38	0,446	0,0917	0,57	0,07	0,04
72	165,4	0,469	3,831	0,768	0,480	0,442	1,445	1,27	1,37	0,630	0,0910	1,84	0,16	0,06
73	361,8	0,383	5,375	0,652	0,480	0,431	0,631	1,09	1,35	0,479	0,1246	0,69	0,13	0,08
74	84,8	0,607	5,083	0,634	0,480	0,426	1,638	1,26	1,30	0,750	0,1164	2,91	0,34	0,12
75	747,3	0,297	5,166	0,646	0,480	0,434	0,696	1,25	1,42	0,437	0,1089	0,47	0,08	0,05
76	173,0	0,482	5,125	0,646	0,480	0,434	1,300	1,32	1,41	0,599	0,1074	1,44	0,19	0,08
77	469,7	0,352	5,417	0,652	0,480	0,437	0,345	0,98	1,41	0,454	0,1213	0,57	0,09	0,07
78	109,7	0,561	5,208	0,634	0,480	0,431	0,908	1,16	1,36	0,632	0,1151	1,86	0,21	0,11
79	984,9	0,271	5,208	0,646	0,480	0,437	0,347	1,18	1,48	0,402	0,1073	0,36	0,06	0,04
80	228,2	0,442	5,208	0,646	0,480	0,434	0,697	1,23	1,47	0,516	0,1068	0,96	0,12	0,07
81	221,6	0,431	3,915	0,792	0,480	0,434	1,470	1,23	1,27	0,615	0,1076	1,54	0,19	0,07
82	52,0	0,686	3,706	0,780	0,480	0,429	2,536	1,29	1,25	0,884	0,1043	5,39	0,47	0,12
83	448,7	0,339	3,790	0,798	0,480	0,439	1,351	1,31	1,36	0,524	0,0968	0,90	0,12	0,05
84	105,1	0,549	3,790	0,798	0,480	0,437	2,212	1,38	1,35	0,734	0,0961	2,87	0,27	0,08
85	284,1	0,399	3,998	0,792	0,480	0,439	1,005	1,16	1,32	0,570	0,1047	1,20	0,13	0,06
86	67,1	0,636	3,790	0,792	0,480	0,431	1,786	1,24	1,29	0,799	0,1015	3,96	0,30	0,10
87	581,3	0,311	3,790	0,804	0,480	0,445	0,882	1,25	1,41	0,478	0,0945	0,69	0,08	0,04
88	138,0	0,503	3,790	0,804	0,480	0,439	1,563	1,31	1,40	0,672	0,0937	2,19	0,18	0,07
89	293,4	0,406	4,999	0,682	0,480	0,434	0,890	1,18	1,33	0,523	0,1187	0,91	0,15	0,08
90	69,0	0,639	4,582	0,670	0,480	0,426	2,069	1,28	1,27	0,817	0,1096	3,86	0,39	0,12
91	603,3	0,315	4,749	0,682	0,480	0,437	0,954	1,28	1,40	0,474	0,1036	0,61	0,10	0,05
92	140,4	0,509	4,666	0,682	0,480	0,434	1,716	1,35	1,38	0,665	0,1016	1,98	0,22	0,08
93	379,1	0,376	5,083	0,688	0,480	0,434	0,540	1,06	1,39	0,492	0,1164	0,73	0,10	0,06
94	89,4	0,590	4,666	0,670	0,480	0,431	1,317	1,21	1,32	0,711	0,1071	2,64	0,24	0,10
95	789,3	0,289	4,791	0,682	0,480	0,442	0,544	1,22	1,46	0,432	0,1019	0,46	0,06	0,04
96	185,1	0,467	4,749	0,682	0,480	0,439	1,067	1,28	1,44	0,589	0,1005	1,39	0,14	0,07
97	270,0	0,400	3,957	0,755	0,480	0,434	1,660	1,17	1,24	0,576	0,1042	1,67	0,19	0,07
98	62,6	0,644	3,790	0,755	0,480	0,429	2,746	1,25	1,23	0,814	0,1018	5,59	0,46	0,12



Продолжение таблицы Б.1

$X_i$ $u$	$m_a^*$	$\delta_{кр.опт}^*$	$H_{0\text{опт}}^*$	$A_{0\text{опт}}^*$	$H_{ст\text{опт}}^*$	$H_{в\text{опт}}^*$	$R_{d\text{опт}}^*$	$B_{м\text{ср}}^*$ Тл	$B_{м\text{опт}}^*$ Тл	$F_{кп\text{ср}}^*$	$F_{кп\text{опт}}^*$	$P_{п}^*$	$P_{уд}^*$	$P_{уд.о}^*$
99	547,7	0,314	3,831	0,762	0,480	0,439	1,502	1,26	1,32	0,486	0,0938	0,95	0,12	0,04
100	127,2	0,509	3,790	0,762	0,480	0,437	2,466	1,32	1,31	0,684	0,0928	3,10	0,27	0,08
101	349,6	0,368	3,957	0,762	0,480	0,434	1,188	1,05	1,28	0,540	0,1005	1,34	0,13	0,06
102	81,4	0,595	3,873	0,762	0,480	0,431	1,956	1,19	1,27	0,739	0,0990	4,14	0,30	0,10
103	716,4	0,288	3,831	0,768	0,480	0,445	0,993	1,20	1,37	0,443	0,0914	0,72	0,08	0,04
104	168,2	0,466	3,831	0,768	0,480	0,439	1,749	1,26	1,36	0,627	0,0908	2,35	0,18	0,06
105	368,1	0,379	5,333	0,646	0,480	0,434	0,861	1,08	1,34	0,479	0,1232	0,91	0,15	0,08
106	85,7	0,605	5,083	0,634	0,480	0,429	1,971	1,26	1,30	0,745	0,1162	3,71	0,38	0,12
107	759,5	0,295	5,166	0,646	0,480	0,434	0,907	1,24	1,42	0,435	0,1086	0,60	0,10	0,05
108	175,0	0,480	5,125	0,646	0,480	0,434	1,590	1,31	1,40	0,595	0,1073	1,84	0,22	0,08
109	479,5	0,348	5,375	0,646	0,480	0,431	0,533	0,98	1,39	0,455	0,1199	0,74	0,10	0,07
110	111,3	0,559	5,208	0,634	0,480	0,431	1,145	1,15	1,36	0,628	0,1149	2,38	0,23	0,11
111	1005	0,269	5,166	0,646	0,480	0,437	0,528	1,17	1,47	0,401	0,1060	0,46	0,06	0,04
112	231,9	0,439	5,208	0,646	0,480	0,434	0,904	1,23	1,47	0,512	0,1066	1,23	0,14	0,07
113	225,8	0,427	3,873	0,792	0,480	0,431	1,784	1,23	1,27	0,612	0,1068	1,98	0,22	0,08
114	52,7	0,684	3,706	0,786	0,480	0,426	2,981	1,29	1,24	0,880	0,1042	6,89	0,53	0,13
115	457,7	0,336	3,790	0,798	0,480	0,437	1,635	1,31	1,35	0,521	0,0965	1,15	0,13	0,05
116	106,7	0,545	3,748	0,798	0,480	0,437	2,622	1,37	1,34	0,729	0,0955	3,69	0,31	0,08
117	290,9	0,395	3,957	0,792	0,480	0,437	1,258	1,14	1,32	0,568	0,1039	1,54	0,14	0,06
118	68,2	0,631	3,748	0,792	0,480	0,429	2,130	1,23	1,29	0,791	0,1009	5,06	0,34	0,10
119	595,8	0,309	3,790	0,804	0,480	0,445	1,100	1,25	1,41	0,474	0,0942	0,87	0,09	0,04
120	140,5	0,500	3,790	0,804	0,480	0,442	1,877	1,31	1,40	0,668	0,0934	2,79	0,21	0,07
121	298,8	0,403	4,958	0,682	0,480	0,429	1,151	1,17	1,32	0,524	0,1175	1,19	0,17	0,08
122	69,8	0,637	4,582	0,670	0,480	0,429	2,458	1,28	1,27	0,812	0,1094	4,93	0,44	0,12
123	613,9	0,312	4,707	0,682	0,480	0,437	1,207	1,28	1,39	0,471	0,1026	0,78	0,11	0,05
124	142,2	0,506	4,624	0,682	0,480	0,437	2,076	1,35	1,37	0,661	0,1007	2,54	0,25	0,08
125	387,7	0,370	4,999	0,682	0,480	0,434	0,766	1,05	1,37	0,493	0,1141	0,96	0,11	0,06
126	90,7	0,588	4,666	0,676	0,480	0,431	1,603	1,21	1,32	0,706	0,1069	3,36	0,27	0,10
127	806,8	0,286	4,749	0,682	0,480	0,442	0,740	1,22	1,45	0,429	0,1009	0,59	0,07	0,04
128	188,2	0,464	4,707	0,688	0,480	0,437	1,339	1,37	1,43	0,586	0,0996	1,79	0,16	0,07
129	338,2	0,384	3,998	0,731	0,480	0,437	0,911	1,11	1,23	0,558	0,1026	0,93	0,15	0,08
130	79,4	0,614	3,831	0,731	0,480	0,431	1,616	1,22	1,21	0,771	0,1001	2,97	0,35	0,13
131	682,3	0,300	3,831	0,731	0,480	0,445	0,790	1,23	1,30	0,464	0,0919	0,53	0,09	0,05
132	161,1	0,485	3,831	0,731	0,480	0,439	1,448	1,29	1,29	0,654	0,0911	1,69	0,21	0,08
133	432,8	0,354	4,040	0,731	0,480	0,439	0,578	1,01	1,27	0,523	0,0994	0,75	0,10	0,06
134	102,3	0,568	3,915	0,731	0,480	0,437	1,104	1,12	1,25	0,710	0,0972	2,28	0,23	0,10
135	880,9	0,277	3,873	0,737	0,480	0,450	0,446	1,16	1,36	0,428	0,0902	0,41	0,06	0,04
136	210,9	0,447	3,915	0,737	0,480	0,445	0,951	1,24	1,35	0,601	0,0897	1,28	0,14	0,07
137	462,2	0,363	5,417	0,627	0,480	0,431	0,309	1,04	1,34	0,464	0,1238	0,50	0,12	0,09
138	108,7	0,574	5,083	0,609	0,480	0,426	0,966	1,21	1,28	0,670	0,1144	1,80	0,28	0,14
139	950,6	0,282	5,208	0,621	0,480	0,437	0,345	1,22	1,40	0,417	0,1080	0,33	0,08	0,06
140	221,4	0,457	5,166	0,621	0,480	0,437	0,761	1,27	1,39	0,554	0,1065	0,95	0,17	0,09
141	595,4	0,335	5,458	0,627	0,480	0,437	0,088	0,94	1,39	0,441	0,1206	0,42	0,08	0,07
142	139,9	0,534	5,250	0,615	0,480	0,431	0,479	1,08	1,35	0,591	0,1143	1,25	0,18	0,12
143	1245	0,258	5,208	0,621	0,480	0,442	0,100	1,13	1,45	0,390	0,1055	0,26	0,05	0,05
144	289,4	0,423	5,333	0,627	0,480	0,437	0,286	1,19	1,47	0,478	0,1081	0,63	0,10	0,08
145	281,0	0,410	3,957	0,755	0,480	0,434	0,992	1,20	1,25	0,588	0,1053	1,09	0,17	0,08
146	66,6	0,653	3,748	0,755	0,480	0,429	1,780	1,26	1,23	0,829	0,1022	3,64	0,40	0,14
147	567,4	0,320	3,748	0,762	0,480	0,445	0,897	1,27	1,33	0,496	0,0940	0,64	0,10	0,05
148	134,6	0,520	3,790	0,768	0,480	0,439	1,570	1,34	1,32	0,697	0,0937	2,01	0,24	0,09
149	357,9	0,382	4,040	0,762	0,480	0,442	0,641	1,10	1,31	0,551	0,1028	0,87	0,11	0,07
150	85,4	0,605	3,831	0,755	0,480	0,431	1,218	1,21	1,27	0,755	0,0994	2,74	0,26	0,11

Продолжение таблицы Б.1

$X_i$ $u$	$m_a^*$	$\delta_{кр.опт}^*$	$H_{0\text{опт}}^*$	$A_{0\text{опт}}^*$	$H_{ст\text{опт}}^*$	$H_{в\text{опт}}^*$	$R_{d\text{опт}}^*$	$B_{м\text{ср}}^*$ Тл	$B_{м\text{опт}}^*$ Тл	$F_{кп\text{ср}}^*$	$F_{кп\text{опт}}^*$	$P_{п}^*$	$P_{уд}^*$	$P_{уд.о}^*$
151	727,7	0,297	3,790	0,768	0,480	0,447	0,533	1,22	1,39	0,457	0,0924	0,49	0,07	0,04
152	175,4	0,478	3,831	0,768	0,480	0,442	1,062	1,28	1,37	0,641	0,0917	1,54	0,16	0,07
153	373,0	0,387	5,041	0,658	0,480	0,437	0,523	1,12	1,32	0,505	0,1173	0,66	0,13	0,08
154	88,4	0,605	4,582	0,646	0,480	0,429	1,353	1,24	1,25	0,749	0,1074	2,51	0,33	0,14
155	764,3	0,299	4,749	0,658	0,480	0,442	0,564	1,25	1,37	0,451	0,1016	0,43	0,08	0,05
156	179,7	0,481	4,666	0,652	0,480	0,437	1,132	1,31	1,35	0,624	0,0994	1,35	0,19	0,09
157	478,0	0,359	5,125	0,66	0,480	0,439	0,251	1,02	1,38	0,476	0,1153	0,53	0,09	0,07
158	113,5	0,565	4,833	0,646	0,480	0,434	0,767	1,17	1,32	0,662	0,1080	1,74	0,21	0,11
159	990,7	0,276	4,874	0,658	0,480	0,439	0,238	1,20	1,44	0,415	0,1016	0,33	0,06	0,04
160	234,7	0,447	4,833	0,664	0,480	0,439	0,612	1,25	1,43	0,553	0,1001	0,94	0,12	0,07
161	345,6	0,379	3,957	0,725	0,480	0,437	1,154	1,10	1,22	0,555	0,1017	1,20	0,17	0,08
162	80,6	0,610	3,831	0,725	0,480	0,431	1,939	1,21	1,21	0,765	0,0997	3,80	0,40	0,13
163	698,0	0,298	3,831	0,737	0,480	0,445	1,002	1,23	1,30	0,461	0,0917	0,67	0,10	0,05
164	163,9	0,484	3,831	0,737	0,480	0,442	1,753	1,29	1,29	0,651	0,0910	2,16	0,24	0,08
165	444,2	0,349	3,957	0,731	0,480	0,442	0,778	0,99	1,26	0,520	0,0981	0,97	0,11	0,06
166	104,4	0,564	3,915	0,731	0,480	0,434	1,362	1,11	1,25	0,706	0,0970	2,91	0,26	0,10
167	906,1	0,274	3,831	0,737	0,480	0,447	0,616	1,14	1,35	0,424	0,0894	0,52	0,07	0,04
168	215,3	0,444	3,873	0,743	0,480	0,445	1,195	1,23	1,34	0,598	0,0891	1,64	0,16	0,07
169	472,3	0,359	5,333	0,627	0,480	0,431	0,509	1,03	1,32	0,467	0,1212	0,66	0,13	0,09
170	110,2	0,571	5,083	0,609	0,480	0,429	1,205	1,21	1,28	0,664	0,1142	2,29	0,32	0,14
171	970,4	0,280	5,166	0,627	0,480	0,439	0,520	1,22	1,39	0,415	0,1068	0,42	0,08	0,06
172	224,9	0,454	5,125	0,621	0,480	0,437	0,998	1,27	1,38	0,551	0,1053	1,23	0,19	0,09
173	611,0	0,330	5,375	0,627	0,480	0,437	0,249	0,93	1,37	0,443	0,1179	0,55	0,09	0,07
174	142,5	0,531	5,250	0,615	0,480	0,431	0,658	1,07	1,34	0,586	0,1140	1,59	0,20	0,12
175	1277	0,255	5,166	0,621	0,480	0,439	0,243	1,12	1,44	0,389	0,1042	0,34	0,06	0,05
176	295,7	0,418	5,250	0,627	0,480	0,439	0,485	1,18	1,45	0,481	0,1057	0,84	0,12	0,08
177	287,8	0,408	3,957	0,762	0,480	0,437	1,226	1,20	1,25	0,584	0,1051	1,38	0,19	0,08
178	67,7	0,649	3,748	0,755	0,480	0,431	2,121	1,25	1,23	0,823	0,1019	4,64	0,46	0,14
179	581,7	0,319	3,790	0,762	0,480	0,442	1,114	1,27	1,33	0,493	0,0941	0,81	0,12	0,05
180	137,1	0,515	3,748	0,768	0,480	0,437	1,891	1,33	1,32	0,692	0,0931	2,57	0,27	0,09
181	368,4	0,377	3,957	0,768	0,480	0,439	0,848	1,08	1,29	0,549	0,1015	1,12	0,13	0,07
182	87,2	0,601	3,831	0,755	0,480	0,434	1,482	1,20	1,27	0,749	0,0991	3,47	0,30	0,11
183	750,3	0,293	3,790	0,762	0,480	0,447	0,703	1,21	1,38	0,451	0,0919	0,62	0,08	0,04
184	179,5	0,474	3,831	0,768	0,480	0,442	1,307	1,27	1,37	0,636	0,0914	1,96	0,18	0,08
185	381,7	0,382	4,958	0,658	0,480	0,434	0,745	1,11	1,30	0,507	0,1152	0,86	0,15	0,08
186	89,7	0,602	4,582	0,646	0,480	0,429	1,641	1,24	1,25	0,743	0,1072	3,20	0,37	0,14
187	781,3	0,296	4,707	0,658	0,480	0,442	0,761	1,24	1,37	0,448	0,1006	0,55	0,10	0,05
188	182,6	0,480	4,666	0,658	0,480	0,437	1,395	1,31	1,35	0,620	0,0993	1,72	0,22	0,09
189	491,6	0,353	5,041	0,658	0,480	0,439	0,428	1,00	1,36	0,477	0,1129	0,69	0,10	0,07
190	115,7	0,561	4,791	0,652	0,480	0,431	0,996	1,15	1,31	0,659	0,1070	2,23	0,24	0,11
191	1019	0,273	4,833	0,658	0,480	0,442	0,391	1,19	1,43	0,412	0,1004	0,42	0,06	0,04
192	239,7	0,442	4,791	0,658	0,480	0,442	0,818	1,24	1,42	0,550	0,0990	1,21	0,14	0,07
193	251,0	0,419	3,915	0,719	0,480	0,431	1,435	1,22	1,26	0,606	0,1059	1,24	0,16	0,06
194	58,4	0,673	3,748	0,719	0,480	0,429	2,460	1,28	1,24	0,866	0,1034	4,25	0,38	0,10
195	509,2	0,329	3,748	0,731	0,480	0,442	1,304	1,29	1,34	0,512	0,0950	0,72	0,10	0,04
196	118,5	0,534	3,748	0,731	0,480	0,439	2,161	1,36	1,33	0,718	0,0944	2,29	0,22	0,07
197	323,9	0,388	3,998	0,725	0,480	0,439	0,974	1,13	1,31	0,563	0,1032	0,97	0,10	0,05
198	75,8	0,621	3,790	0,725	0,480	0,431	1,728	1,23	1,28	0,782	0,1001	3,14	0,24	0,09
199	664,0	0,302	3,790	0,731	0,480	0,445	0,835	1,24	1,39	0,468	0,0930	0,54	0,06	0,03
200	156,4	0,489	3,790	0,731	0,480	0,442	1,515	1,30	1,38	0,659	0,0923	1,75	0,15	0,05
201	336,8	0,401	5,333	0,621	0,480	0,429	0,674	1,17	1,37	0,498	0,1260	0,65	0,12	0,07
202	79,3	0,633	4,999	0,603	0,480	0,429	1,893	1,31	1,31	0,828	0,1166	3,11	0,33	0,11

Продолжение таблицы Б.1

$X_i$ $u$	$m_a^*$	$\delta_{кр.опт}^*$	$H_{0\text{опт}}^*$	$A_{0\text{опт}}^*$	$H_{ст\text{опт}}^*$	$H_{в\text{опт}}^*$	$R_{d\text{опт}}^*$	$B_{m\text{ср}}$ Тл	$B_{m\text{опт}}$ Тл	$F_{кп\text{ср}}^*$	$F_{кп\text{опт}}^*$	$P_{п}^*$	$P_{уд}^*$	$P_{уд.о}^*$
203	699,0	0,311	5,125	0,621	0,480	0,439	0,773	1,29	1,44	0,464	0,1101	0,46	0,08	0,04
204	161,9	0,503	5,041	0,615	0,480	0,434	1,497	1,37	1,42	0,655	0,1077	1,51	0,19	0,07
205	437,9	0,369	5,375	0,627	0,480	0,434	0,376	1,06	1,42	0,470	0,1228	0,53	0,08	0,06
206	102,9	0,583	5,083	0,603	0,480	0,429	1,098	1,23	1,37	0,695	0,1144	1,98	0,20	0,09
207	921,8	0,283	5,125	0,621	0,480	0,437	0,404	1,23	1,50	0,422	0,1077	0,35	0,05	0,03
208	214,3	0,460	5,083	0,621	0,480	0,434	0,859	1,28	1,48	0,566	0,1061	1,02	0,12	0,06
209	210,8	0,447	3,831	0,749	0,480	0,429	1,554	1,26	1,28	0,644	0,1085	1,48	0,18	0,07
210	49,4	0,713	3,665	0,746	0,480	0,431	2,687	1,32	1,26	0,937	0,1058	5,25	0,44	0,11
211	427,0	0,351	3,706	0,762	0,480	0,439	1,424	1,34	1,37	0,548	0,0978	0,86	0,11	0,04
212	99,8	0,570	3,706	0,762	0,480	0,437	2,301	1,40	1,36	0,764	0,0971	2,72	0,25	0,07
213	270,4	0,414	3,915	0,755	0,480	0,437	1,064	1,21	1,33	0,595	0,1058	1,14	0,12	0,05
214	63,9	0,659	3,706	0,749	0,480	0,431	1,888	1,26	1,30	0,839	0,1025	3,82	0,28	0,09
215	554,0	0,323	3,748	0,762	0,480	0,445	0,936	1,28	1,43	0,501	0,0958	0,65	0,07	0,04
216	131,2	0,522	3,748	0,762	0,480	0,437	1,630	1,34	1,42	0,701	0,0949	2,07	0,17	0,06
217	276,1	0,422	4,874	0,652	0,480	0,431	1,021	1,23	1,34	0,562	0,1184	0,92	0,14	0,07
218	64,9	0,666	4,499	0,640	0,480	0,431	2,268	1,32	1,28	0,879	0,1103	3,90	0,37	0,11
219	567,9	0,327	4,666	0,646	0,480	0,437	1,049	1,32	1,41	0,503	0,1042	0,60	0,09	0,04
220	132,0	0,529	4,541	0,652	0,480	0,437	1,881	1,39	1,39	0,709	0,1016	1,97	0,21	0,07
221	356,0	0,392	5,041	0,652	0,480	0,431	0,576	1,14	1,41	0,511	0,1179	0,68	0,09	0,05
222	84,2	0,613	4,582	0,640	0,480	0,429	1,472	1,25	1,33	0,767	0,1078	2,69	0,23	0,09
223	744,0	0,300	4,666	0,652	0,480	0,442	0,620	1,25	1,47	0,455	0,1019	0,45	0,06	0,03
224	174,5	0,485	4,624	0,652	0,480	0,437	1,205	1,32	1,45	0,631	0,1004	1,41	0,14	0,06
225	255,2	0,416	3,873	0,719	0,480	0,431	1,749	1,22	1,25	0,603	0,1052	1,60	0,18	0,06
226	59,1	0,671	3,748	0,719	0,480	0,429	2,901	1,28	1,24	0,861	0,1032	5,44	0,43	0,11
227	518,2	0,327	3,748	0,731	0,480	0,439	1,588	1,29	1,34	0,509	0,0948	0,92	0,11	0,04
228	120,1	0,532	3,748	0,731	0,480	0,437	2,565	1,36	1,33	0,715	0,0943	2,94	0,25	0,07
229	330,5	0,385	3,957	0,725	0,480	0,437	1,228	1,12	1,30	0,561	0,1024	1,25	0,12	0,05
230	76,9	0,618	3,790	0,725	0,480	0,434	2,070	1,22	1,28	0,777	0,0999	4,01	0,28	0,09
231	678,6	0,299	3,748	0,731	0,480	0,447	1,056	1,23	1,39	0,463	0,0923	0,69	0,07	0,03
232	159,0	0,486	3,790	0,731	0,480	0,439	1,830	1,29	1,38	0,656	0,0921	2,24	0,17	0,06
233	342,5	0,398	5,291	0,621	0,480	0,431	0,910	1,17	1,36	0,499	0,1246	0,85	0,14	0,07
234	80,0	0,633	4,999	0,609	0,480	0,429	2,268	1,31	1,31	0,825	0,1165	3,98	0,37	0,12
235	709,7	0,308	5,083	0,615	0,480	0,437	1,012	1,28	1,43	0,462	0,1090	0,59	0,09	0,04
236	163,6	0,500	4,999	0,615	0,480	0,431	1,833	1,36	1,41	0,651	0,1067	1,94	0,21	0,07
237	446,8	0,364	5,291	0,621	0,480	0,434	0,587	1,05	1,41	0,473	0,1201	0,70	0,09	0,06
238	104,2	0,582	5,083	0,609	0,480	0,429	1,359	1,23	1,36	0,691	0,1142	2,52	0,23	0,09
239	939,6	0,280	5,083	0,615	0,480	0,439	0,588	1,22	1,48	0,419	0,1064	0,44	0,06	0,04
240	217,4	0,458	5,083	0,621	0,480	0,437	1,089	1,28	1,48	0,562	0,1059	1,30	0,13	0,06
241	214,6	0,444	3,831	0,749	0,480	0,434	1,867	1,26	1,28	0,640	0,1082	1,89	0,20	0,07
242	50,1	0,712	3,665	0,749	0,480	0,429	3,155	1,32	1,26	0,934	0,1057	6,73	0,50	0,11
243	435,3	0,348	3,706	0,755	0,480	0,439	1,717	1,33	1,37	0,544	0,0974	1,10	0,12	0,04
244	101,2	0,567	3,706	0,762	0,480	0,434	2,717	1,40	1,36	0,760	0,0969	3,48	0,29	0,07
245	276,6	0,410	3,873	0,755	0,480	0,434	1,320	1,20	1,33	0,591	0,1049	1,46	0,13	0,06
246	64,9	0,655	3,706	0,749	0,480	0,429	2,243	1,26	1,30	0,833	0,1022	4,87	0,32	0,09
247	567,4	0,320	3,748	0,762	0,480	0,445	1,162	1,27	1,43	0,496	0,0954	0,83	0,08	0,04
248	133,5	0,518	3,706	0,768	0,480	0,439	1,961	1,33	1,41	0,696	0,0944	2,65	0,19	0,06
249	280,8	0,420	4,874	0,652	0,480	0,431	1,268	1,23	1,33	0,558	0,1181	1,18	0,16	0,06
250	65,5	0,663	4,499	0,640	0,480	0,429	2,682	1,31	1,28	0,874	0,1102	4,99	0,42	0,11
251	577,4	0,325	4,624	0,652	0,480	0,434	1,315	1,31	1,40	0,500	0,1033	0,77	0,10	0,04
252	133,6	0,527	4,541	0,652	0,480	0,434	2,247	1,39	1,39	0,705	0,1014	2,53	0,24	0,07
253	363,9	0,387	4,958	0,652	0,480	0,431	0,807	1,13	1,39	0,513	0,1157	0,90	0,11	0,06
254	85,3	0,612	4,582	0,646	0,480	0,431	1,782	1,25	1,33	0,763	0,1076	3,43	0,26	0,09

Продолжение таблицы Б.1

$X_i$ $u$	$m_a^*$	$\delta_{кр.опт}^*$	$H_{0опт}^*$	$A_{0опт}^*$	$H_{стопт}^*$	$H_{вопт}^*$	$R_{dопт}^*$	$B_{м ср}$ Тл	$B_{м опт}$ Тл	$F_{кп ср}^*$	$F_{кп опт}^*$	$P_{п}^*$	$P_{уд}^*$	$P_{уд.о}^*$
255	759,7	0,298	4,666	0,652	0,480	0,439	0,815	1,25	1,46	0,452	0,1015	0,57	0,07	0,03
256	177,1	0,481	4,852	0,652	0,480	0,437	1,494	1,31	1,44	0,627	0,0995	1,81	0,15	0,06
257	1884	0,212	4,123	0,694	0,480	0,439	0,449	1,07	1,32	0,357	0,0964	0,27	0,05	0,03
258	78,6	0,609	4,082	0,694	0,480	0,437	1,900	1,27	1,29	0,755	0,0943	3,49	0,30	0,10
259	55,9	0,667	3,873	0,676	0,467	0,421	1,714	0,83	0,87	0,865	0,1160	5,38	0,50	0,18
260	426,9	0,348	4,123	0,701	0,480	0,445	1,098	1,26	1,37	0,510	0,0906	0,90	0,11	0,05
261	182,6	0,462	4,165	0,694	0,480	0,434	1,914	1,29	1,26	0,635	0,0999	1,84	0,25	0,08
262	322,1	0,390	4,415	0,701	0,480	0,439	0,763	1,13	1,37	0,526	0,0968	1,00	0,10	0,06
263	155,9	0,497	3,790	0,835	0,480	0,439	1,556	1,33	1,38	0,685	0,1013	2,24	0,22	0,08
264	310,5	0,409	5,479	0,627	0,480	0,431	0,473	1,18	1,45	0,470	0,1180	0,73	0,12	0,08
265	324,2	0,390	4,749	0,646	0,480	0,439	0,865	1,15	1,33	0,509	0,1008	0,92	0,12	0,06
266	213,2	0,442	4,040	0,737	0,480	0,437	1,339	1,25	1,33	0,607	0,0974	1,58	0,17	0,07
267	250,3	0,422	4,332	0,701	0,480	0,439	0,889	1,22	1,33	0,568	0,0983	0,96	0,13	0,06
268	260,1	0,413	4,249	0,694	0,480	0,439	1,423	1,21	1,31	0,562	0,0966	1,62	0,17	0,06
269	362,6	0,376	4,457	0,701	0,480	0,445	0,603	1,08	1,29	0,510	0,0954	0,90	0,14	0,08
270	193,4	0,453	4,165	0,694	0,480	0,437	1,776	1,28	1,35	0,623	0,0997	1,73	0,16	0,05
271	276,4	0,398	4,374	0,737	0,480	0,439	1,064	1,15	1,31	0,533	0,0964	1,32	0,16	0,07
272	243,1	0,432	4,207	0,670	0,480	0,437	1,245	1,25	1,33	0,594	0,0981	1,24	0,14	0,06
273	255,7	0,418	4,290	0,701	0,480	0,439	1,154	1,22	1,32	0,564	0,0974	1,27	0,15	0,06

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

Результаты оптимизации форсированных двухобмоточных броневых электромагнитов в схеме с переключением с пусковой обмотки на удерживающую, минимизированные по стоимости активных материалов

Таблица В.1

$x_i$ $u$	$C_a$	$\delta_{кр.опт}^*$	$H_{0опт}^*$	$A_{0опт}^*$	$A_{попт}^*$	$H_{стопт}^*$	$H_{вопт}^*$	$B_{м ср},$ Тл	$B_{м опт},$ Тл	$\Theta_{вп опт}^*$	$\Theta_{вы опт}^*$	$F_{ср}^*$	$F_{опт}^*$	$P_{п}^*$	$P_{уд}^*$	$n$
1	215,1	0,360	5,190	0,437	0,200	0,500	0,500	0,66	0,62	0,944	0,950	0,560	0,0807	5,52	0,1004	5,62
2	215,1	0,590	5,095	0,437	0,200	0,500	0,500	0,66	0,62	0,943	0,950	0,763	0,0800	17,14	0,1649	7,72
3	423,7	0,287	5,095	0,443	0,200	0,500	0,500	0,81	0,78	0,942	0,949	0,462	0,0716	3,01	0,0636	5,20
4	423,7	0,473	5,095	0,443	0,200	0,500	0,500	0,84	0,78	0,942	0,949	0,640	0,0716	9,53	0,1049	7,21
5	265,3	0,333	5,143	0,430	0,200	0,500	0,500	0,61	0,67	0,944	0,950	0,526	0,0772	4,62	0,0867	4,81
6	265,3	0,552	5,143	0,437	0,200	0,500	0,500	0,61	0,67	0,944	0,950	0,719	0,0774	14,12	0,1432	6,53
7	525,3	0,267	5,095	0,443	0,200	0,500	0,500	0,74	0,84	0,942	0,949	0,433	0,0693	2,46	0,0554	4,38
8	525,2	0,440	5,095	0,443	0,200	0,500	0,500	0,78	0,84	0,942	0,949	0,610	0,0693	8,05	0,0913	6,17
9	272,4	0,331	6,000	0,370	0,200	0,500	0,500	0,55	0,56	0,988	0,986	0,527	0,0812	4,23	0,1111	4,99
10	272,4	0,546	6,000	0,370	0,200	0,500	0,500	0,53	0,56	0,988	0,986	0,744	0,0812	13,90	0,1832	7,04
11	543,8	0,263	6,000	0,370	0,200	0,500	0,500	0,68	0,70	0,988	0,986	0,431	0,0730	2,25	0,0712	4,54
12	543,8	0,434	6,000	0,370	0,200	0,500	0,500	0,67	0,70	0,988	0,986	0,611	0,0730	7,45	0,1174	6,43
13	337,3	0,308	6,000	0,370	0,200	0,500	0,500	0,51	0,60	0,988	0,986	0,497	0,0785	3,50	0,0965	4,22
14	337,4	0,509	6,000	0,370	0,200	0,500	0,500	0,49	0,60	0,988	0,986	0,694	0,0785	11,28	0,1592	5,90
15	677,1	0,244	6,000	0,370	0,200	0,500	0,500	0,62	0,75	0,988	0,986	0,403	0,0708	1,82	0,0622	3,80
16	677,2	0,403	6,000	0,370	0,200	0,500	0,500	0,63	0,75	0,988	0,986	0,579	0,0708	6,22	0,1026	5,46
17	177,3	0,382	4,905	0,457	0,200	0,500	0,500	0,73	0,67	0,935	0,943	0,585	0,0824	6,80	0,1028	5,97
18	177,3	0,630	4,905	0,457	0,200	0,500	0,500	0,71	0,67	0,935	0,943	0,810	0,0824	21,48	0,1695	8,27
19	347,1	0,306	4,857	0,463	0,200	0,500	0,500	0,88	0,84	0,934	0,942	0,489	0,0732	3,78	0,0651	5,59
20	347,1	0,505	4,857	0,463	0,200	0,500	0,500	0,91	0,84	0,934	0,942	0,667	0,0732	11,62	0,1073	7,63
21	218,3	0,356	4,857	0,457	0,200	0,500	0,500	0,67	0,72	0,934	0,943	0,553	0,0790	5,71	0,0889	5,11
22	218,3	0,586	4,857	0,457	0,200	0,500	0,500	0,67	0,72	0,934	0,943	0,750	0,0790	17,28	0,1465	6,93
23	429,3	0,286	4,905	0,463	0,200	0,500	0,500	0,81	0,90	0,934	0,943	0,461	0,0710	3,11	0,0566	4,72
24	429,3	0,470	4,857	0,463	0,200	0,500	0,500	0,85	0,90	0,934	0,942	0,636	0,0707	9,84	0,0933	6,54
25	226,3	0,358	6,000	0,390	0,200	0,500	0,500	0,59	0,61	0,976	0,973	0,561	0,0849	5,16	0,1137	5,28
26	226,3	0,587	6,000	0,383	0,200	0,500	0,500	0,56	0,60	0,977	0,974	0,809	0,0845	17,89	0,1873	7,67

Продолжение таблицы В.1

$x_i$ $u$	$C_a$	$\delta_{кр.опт}^*$	$H_{0опт}^*$	$A_{0опт}^*$	$A_{попт}^*$	$H_{стопт}^*$	$H_{вопт}^*$	$B_{мсп},$ Тл	$B_{мопт},$ Тл	$\Theta_{впopt}^*$	$\Theta_{vyopt}^*$	$F_{сп}^*$	$F_{опт}^*$	$P_{п}^*$	$P_{уд}^*$	$n$
27	449,1	0,285	6,000	0,390	0,200	0,500	0,500	0,74	0,76	0,976	0,973	0,463	0,0760	2,79	0,0726	4,86
28	449,1	0,467	6,000	0,383	0,200	0,500	0,500	0,72	0,75	0,977	0,974	0,648	0,0757	9,12	0,1196	6,86
29	279,7	0,332	6,000	0,383	0,200	0,500	0,500	0,55	0,65	0,977	0,974	0,528	0,0816	4,30	0,0986	4,50
30	279,8	0,547	6,000	0,383	0,200	0,500	0,500	0,52	0,65	0,977	0,974	0,746	0,0816	14,16	0,1626	6,36
31	558,2	0,263	6,000	0,383	0,200	0,500	0,500	0,67	0,81	0,977	0,974	0,431	0,0733	2,28	0,0633	4,10
32	558,2	0,434	6,000	0,383	0,200	0,500	0,500	0,67	0,81	0,977	0,974	0,613	0,0733	7,59	0,1043	5,82
33	215,1	0,360	5,190	0,437	0,200	0,500	0,500	0,66	0,62	0,944	0,950	0,560	0,0807	7,18	0,1004	6,40
34	215,1	0,590	5,095	0,437	0,200	0,500	0,500	0,66	0,62	0,943	0,950	0,763	0,0800	22,26	0,1649	8,80
35	423,7	0,287	5,095	0,443	0,200	0,500	0,500	0,81	0,78	0,942	0,949	0,462	0,0716	3,92	0,0636	5,93
36	423,7	0,473	5,095	0,443	0,200	0,500	0,500	0,84	0,78	0,942	0,949	0,640	0,0716	12,38	0,1049	8,21
37	265,3	0,333	5,143	0,430	0,200	0,500	0,500	0,61	0,67	0,944	0,950	0,526	0,0772	6,00	0,0867	5,48
38	265,3	0,552	5,143	0,437	0,200	0,500	0,500	0,61	0,67	0,944	0,950	0,719	0,0774	18,34	0,1432	7,44
39	525,3	0,267	5,095	0,443	0,200	0,500	0,500	0,74	0,84	0,942	0,949	0,433	0,0693	3,20	0,0554	4,99
40	525,2	0,440	5,095	0,443	0,200	0,500	0,500	0,78	0,84	0,942	0,949	0,610	0,0693	10,46	0,0913	7,03
41	272,4	0,331	6,000	0,370	0,200	0,500	0,500	0,55	0,56	0,988	0,986	0,527	0,0812	5,50	0,1111	5,69
42	272,4	0,546	6,000	0,370	0,200	0,500	0,500	0,53	0,56	0,988	0,986	0,744	0,0812	18,05	0,1832	8,02
43	543,8	0,263	6,000	0,370	0,200	0,500	0,500	0,68	0,70	0,988	0,986	0,431	0,0730	2,92	0,0712	5,17
44	543,8	0,434	6,000	0,370	0,200	0,500	0,500	0,67	0,70	0,988	0,986	0,611	0,0730	9,68	0,1174	7,33
45	337,3	0,308	6,000	0,370	0,200	0,500	0,500	0,51	0,60	0,988	0,986	0,497	0,0785	4,55	0,0965	4,81
46	337,4	0,509	6,000	0,370	0,200	0,500	0,500	0,49	0,60	0,988	0,986	0,694	0,0785	14,65	0,1592	6,73
47	677,1	0,244	6,000	0,370	0,200	0,500	0,500	0,62	0,75	0,988	0,986	0,403	0,0708	2,37	0,0622	4,33
48	677,2	0,403	6,000	0,370	0,200	0,500	0,500	0,63	0,75	0,988	0,986	0,579	0,0708	8,07	0,1026	6,23
49	177,3	0,382	4,905	0,457	0,200	0,500	0,500	0,73	0,67	0,935	0,943	0,585	0,0824	8,83	0,1028	6,81
50	177,3	0,630	4,905	0,457	0,200	0,500	0,500	0,71	0,67	0,935	0,943	0,810	0,0824	27,90	0,1695	9,43
51	347,1	0,306	4,857	0,463	0,200	0,500	0,500	0,88	0,84	0,934	0,942	0,489	0,0732	4,91	0,0651	6,37
52	347,1	0,505	4,857	0,463	0,200	0,500	0,500	0,91	0,84	0,934	0,942	0,667	0,0732	15,10	0,1073	8,70
53	218,3	0,356	4,857	0,457	0,200	0,500	0,500	0,67	0,72	0,934	0,943	0,553	0,0790	7,41	0,0889	5,83
54	218,3	0,586	4,857	0,457	0,200	0,500	0,500	0,67	0,72	0,934	0,943	0,750	0,0790	22,44	0,1465	7,89
55	429,3	0,286	4,905	0,463	0,200	0,500	0,500	0,81	0,90	0,934	0,943	0,461	0,0710	4,04	0,0566	5,38
56	429,3	0,470	4,857	0,463	0,200	0,500	0,500	0,85	0,90	0,934	0,942	0,636	0,0707	12,79	0,0933	7,46
57	226,3	0,358	6,000	0,390	0,200	0,500	0,500	0,59	0,61	0,976	0,973	0,561	0,0849	6,70	0,1137	6,02
58	226,3	0,587	6,000	0,383	0,200	0,500	0,500	0,56	0,60	0,977	0,974	0,809	0,0845	23,24	0,1873	8,75

Продолжение таблицы В.1

$x_i$ $u$	$C_a$	$\delta_{кр.опт}^*$	$H_{0опт}^*$	$A_{0опт}^*$	$A_{попт}^*$	$H_{стопт}^*$	$H_{вопт}^*$	$B_{мсп},$ Тл	$B_{мопт},$ Тл	$\Theta_{впopt}^*$	$\Theta_{vyopt}^*$	$F_{сп}^*$	$F_{опт}^*$	$P_{п}^*$	$P_{уд}^*$	$n$
59	449,1	0,285	6,000	0,390	0,200	0,500	0,500	0,74	0,76	0,976	0,973	0,463	0,0760	3,63	0,0726	5,54
60	449,1	0,467	6,000	0,383	0,200	0,500	0,500	0,72	0,75	0,977	0,974	0,648	0,0757	11,84	0,1196	7,81
61	279,7	0,332	6,000	0,383	0,200	0,500	0,500	0,55	0,65	0,977	0,974	0,528	0,0816	5,59	0,0986	5,13
62	279,8	0,547	6,000	0,383	0,200	0,500	0,500	0,52	0,65	0,977	0,974	0,746	0,0816	18,39	0,1626	7,25
63	558,2	0,263	6,000	0,383	0,200	0,500	0,500	0,67	0,81	0,977	0,974	0,431	0,0733	2,97	0,0633	4,67
64	558,2	0,434	6,000	0,383	0,200	0,500	0,500	0,67	0,81	0,977	0,974	0,613	0,0733	9,86	0,1043	6,63
65	209,7	0,368	5,143	0,410	0,200	0,500	0,500	0,69	0,64	0,946	0,952	0,569	0,0811	6,25	0,0910	6,93
66	209,7	0,610	5,143	0,417	0,200	0,500	0,500	0,68	0,64	0,945	0,951	0,792	0,0814	19,79	0,1502	9,58
67	411,5	0,297	5,143	0,423	0,200	0,500	0,500	0,84	0,81	0,945	0,951	0,477	0,0728	3,44	0,0578	6,43
68	411,5	0,490	5,143	0,423	0,200	0,500	0,500	0,86	0,81	0,945	0,951	0,655	0,0728	10,71	0,0954	8,83
69	258,3	0,344	5,190	0,410	0,200	0,500	0,500	0,64	0,69	0,946	0,952	0,540	0,0784	5,23	0,0789	5,91
70	258,3	0,569	5,143	0,417	0,200	0,500	0,500	0,63	0,69	0,945	0,951	0,738	0,0784	16,02	0,1301	8,04
71	509,6	0,276	5,095	0,423	0,200	0,500	0,500	0,77	0,87	0,944	0,951	0,446	0,0700	2,82	0,0502	5,43
72	509,5	0,455	5,095	0,423	0,200	0,500	0,500	0,81	0,87	0,944	0,951	0,622	0,0700	9,04	0,0828	7,57
73	263,4	0,341	6,000	0,350	0,200	0,500	0,500	0,57	0,58	0,990	0,987	0,540	0,0820	4,83	0,1010	6,16
74	263,4	0,566	6,000	0,357	0,200	0,500	0,500	0,55	0,58	0,989	0,987	0,772	0,0824	16,09	0,1668	8,73
75	523,7	0,273	6,000	0,357	0,200	0,500	0,500	0,71	0,73	0,989	0,987	0,446	0,0739	2,59	0,0647	5,62
76	523,7	0,450	6,000	0,357	0,200	0,500	0,500	0,70	0,73	0,989	0,987	0,627	0,0739	8,45	0,1066	7,91
77	325,8	0,320	6,000	0,357	0,200	0,500	0,500	0,53	0,62	0,989	0,987	0,512	0,0796	3,99	0,0878	5,21
78	325,7	0,524	6,000	0,350	0,200	0,500	0,500	0,51	0,62	0,990	0,987	0,712	0,0792	12,92	0,1447	7,31
79	651,2	0,252	6,000	0,350	0,200	0,500	0,500	0,65	0,77	0,990	0,987	0,415	0,0713	2,11	0,0564	4,74
80	651,1	0,418	6,000	0,357	0,200	0,500	0,500	0,66	0,78	0,989	0,987	0,594	0,0716	7,05	0,0930	6,72
81	173,3	0,394	4,905	0,437	0,200	0,500	0,500	0,75	0,69	0,936	0,944	0,598	0,0835	7,64	0,0935	7,32
82	173,3	0,645	4,857	0,430	0,200	0,500	0,500	0,74	0,69	0,936	0,944	0,827	0,0829	24,52	0,1538	10,25
83	338,0	0,315	4,905	0,437	0,200	0,500	0,500	0,92	0,87	0,936	0,944	0,502	0,0742	4,30	0,0590	6,92
84	338,0	0,520	4,905	0,437	0,200	0,500	0,500	0,94	0,87	0,936	0,944	0,681	0,0742	13,06	0,0973	9,38
85	213,1	0,368	4,905	0,437	0,200	0,500	0,500	0,70	0,74	0,936	0,944	0,568	0,0804	6,43	0,0809	6,27
86	213,1	0,605	4,857	0,437	0,200	0,500	0,500	0,69	0,74	0,936	0,944	0,771	0,0801	19,66	0,1332	8,54
87	417,7	0,294	4,905	0,437	0,200	0,500	0,500	0,84	0,93	0,936	0,944	0,472	0,0716	3,55	0,0513	5,85
88	417,7	0,487	4,905	0,443	0,200	0,500	0,500	0,88	0,93	0,936	0,944	0,651	0,0719	11,02	0,0847	8,01
89	219,4	0,369	6,000	0,370	0,200	0,500	0,500	0,61	0,63	0,978	0,975	0,575	0,0858	5,87	0,1034	6,51
90	219,4	0,605	6,000	0,363	0,200	0,500	0,500	0,59	0,62	0,979	0,975	0,841	0,0854	20,99	0,1702	9,61

Продолжение таблицы В.1

$x_i$ $u$	$C_a$	$\delta_{кр.опт}^*$	$H_{0опт}^*$	$A_{0опт}^*$	$A_{попт}^*$	$H_{стопт}^*$	$H_{вопт}^*$	$B_{мсп},$ Тл	$B_{мопт},$ Тл	$\Theta_{впopt}^*$	$\Theta_{vyopt}^*$	$F_{сп}^*$	$F_{опт}^*$	$P_{п}^*$	$P_{уд}^*$	$n$
91	433,7	0,294	6,000	0,370	0,200	0,500	0,500	0,77	0,78	0,978	0,975	0,476	0,0767	3,21	0,0658	6,03
92	433,7	0,484	6,000	0,370	0,200	0,500	0,500	0,74	0,78	0,978	0,975	0,666	0,0767	10,35	0,1086	8,44
93	270,9	0,344	6,000	0,370	0,200	0,500	0,500	0,57	0,67	0,978	0,975	0,543	0,0828	4,89	0,0897	5,54
94	270,9	0,564	6,000	0,363	0,200	0,500	0,500	0,54	0,67	0,979	0,975	0,769	0,0824	16,36	0,1477	7,91
95	538,3	0,273	6,000	0,370	0,200	0,500	0,500	0,71	0,84	0,978	0,975	0,447	0,0742	2,63	0,0574	5,08
96	538,3	0,451	6,000	0,370	0,200	0,500	0,500	0,70	0,84	0,978	0,975	0,629	0,0742	8,60	0,0946	7,15
97	209,7	0,368	5,143	0,410	0,200	0,500	0,500	0,69	0,64	0,946	0,952	0,569	0,0811	8,12	0,0910	7,90
98	209,7	0,610	5,143	0,417	0,200	0,500	0,500	0,68	0,64	0,945	0,951	0,792	0,0814	25,71	0,1502	10,92
99	411,5	0,297	5,143	0,423	0,200	0,500	0,500	0,84	0,81	0,945	0,951	0,477	0,0728	4,47	0,0578	7,33
100	411,5	0,490	5,143	0,423	0,200	0,500	0,500	0,86	0,81	0,945	0,951	0,655	0,0728	13,92	0,0954	10,07
101	258,3	0,344	5,190	0,410	0,200	0,500	0,500	0,64	0,69	0,946	0,952	0,540	0,0784	6,80	0,0789	6,74
102	258,3	0,569	5,143	0,417	0,200	0,500	0,500	0,63	0,69	0,945	0,951	0,738	0,0784	20,81	0,1301	9,17
103	509,6	0,276	5,095	0,423	0,200	0,500	0,500	0,77	0,87	0,944	0,951	0,446	0,0700	3,67	0,0502	6,19
104	509,5	0,455	5,095	0,423	0,200	0,500	0,500	0,81	0,87	0,944	0,951	0,622	0,0700	11,75	0,0828	8,62
105	263,4	0,341	6,000	0,350	0,200	0,500	0,500	0,57	0,58	0,990	0,987	0,540	0,0820	6,28	0,1010	7,02
106	263,4	0,566	6,000	0,357	0,200	0,500	0,500	0,55	0,58	0,989	0,987	0,772	0,0824	20,90	0,1668	9,95
107	523,7	0,273	6,000	0,357	0,200	0,500	0,500	0,71	0,73	0,989	0,987	0,446	0,0739	3,36	0,0647	6,41
108	523,7	0,450	6,000	0,357	0,200	0,500	0,500	0,70	0,73	0,989	0,987	0,627	0,0739	10,97	0,1066	9,02
109	325,8	0,320	6,000	0,357	0,200	0,500	0,500	0,53	0,62	0,989	0,987	0,512	0,0796	5,19	0,0878	5,93
110	325,7	0,524	6,000	0,350	0,200	0,500	0,500	0,51	0,62	0,990	0,987	0,712	0,0792	16,79	0,1447	8,33
111	651,2	0,252	6,000	0,350	0,200	0,500	0,500	0,65	0,77	0,990	0,987	0,415	0,0713	2,75	0,0564	5,40
112	651,1	0,418	6,000	0,357	0,200	0,500	0,500	0,66	0,78	0,989	0,987	0,594	0,0716	9,16	0,0930	7,66
113	173,3	0,394	4,905	0,437	0,200	0,500	0,500	0,75	0,69	0,936	0,944	0,598	0,0835	9,92	0,0935	8,34
114	173,3	0,645	4,857	0,430	0,200	0,500	0,500	0,74	0,69	0,936	0,944	0,827	0,0829	31,86	0,1538	11,68
115	338,0	0,315	4,905	0,437	0,200	0,500	0,500	0,92	0,87	0,936	0,944	0,502	0,0742	5,59	0,0590	7,88
116	338,0	0,520	4,905	0,437	0,200	0,500	0,500	0,94	0,87	0,936	0,944	0,681	0,0742	16,97	0,0973	10,69
117	213,1	0,368	4,905	0,437	0,200	0,500	0,500	0,70	0,74	0,936	0,944	0,568	0,0804	8,36	0,0809	7,15
118	213,1	0,605	4,857	0,437	0,200	0,500	0,500	0,69	0,74	0,936	0,944	0,771	0,0801	25,54	0,1332	9,73
119	417,7	0,294	4,905	0,437	0,200	0,500	0,500	0,84	0,93	0,936	0,944	0,472	0,0716	4,61	0,0513	6,67
120	417,7	0,487	4,905	0,443	0,200	0,500	0,500	0,88	0,93	0,936	0,944	0,651	0,0719	14,32	0,0847	9,13
121	219,4	0,369	6,000	0,370	0,200	0,500	0,500	0,61	0,63	0,978	0,975	0,575	0,0858	7,62	0,1034	7,42
122	219,4	0,605	6,000	0,363	0,200	0,500	0,500	0,59	0,62	0,979	0,975	0,841	0,0854	27,27	0,1702	10,95



Продолжение таблицы В.1

123	433,7	0,294	6,000	0,370	0,200	0,500	0,500	0,77	0,78	0,978	0,975	0,476	0,0767	4,17	0,0658	6,88
124	433,7	0,484	6,000	0,370	0,200	0,500	0,500	0,74	0,78	0,978	0,975	0,666	0,0767	13,45	0,1086	9,62
125	270,9	0,344	6,000	0,370	0,200	0,500	0,500	0,57	0,67	0,978	0,975	0,543	0,0828	6,35	0,0897	6,31
126	270,9	0,564	6,000	0,363	0,200	0,500	0,500	0,54	0,67	0,979	0,975	0,769	0,0824	21,26	0,1477	9,02
127	538,3	0,273	6,000	0,370	0,200	0,500	0,500	0,71	0,84	0,978	0,975	0,447	0,0742	3,41	0,0574	5,79
128	538,3	0,451	6,000	0,370	0,200	0,500	0,500	0,70	0,84	0,978	0,975	0,629	0,0742	11,17	0,0946	8,15
129	222,0	0,358	5,190	0,430	0,200	0,500	0,500	0,66	0,62	0,945	0,951	0,558	0,0804	4,54	0,1003	4,62
130	222,0	0,590	5,095	0,437	0,200	0,500	0,500	0,66	0,62	0,943	0,950	0,763	0,0800	14,05	0,1649	6,33
131	437,3	0,286	5,143	0,437	0,200	0,500	0,500	0,80	0,78	0,944	0,950	0,462	0,0717	2,47	0,0637	4,28
132	437,2	0,470	5,095	0,437	0,200	0,500	0,500	0,84	0,78	0,943	0,950	0,638	0,0714	7,83	0,1047	5,93
133	273,8	0,333	5,143	0,430	0,200	0,500	0,500	0,61	0,67	0,944	0,950	0,526	0,0772	3,79	0,0867	3,94
134	273,8	0,549	5,143	0,430	0,200	0,500	0,500	0,61	0,67	0,944	0,950	0,716	0,0772	11,58	0,1430	5,37
135	542,1	0,266	5,095	0,437	0,200	0,500	0,500	0,73	0,83	0,943	0,950	0,431	0,0690	2,02	0,0553	3,60
136	542,0	0,440	5,095	0,443	0,200	0,500	0,500	0,78	0,84	0,942	0,949	0,610	0,0693	6,60	0,0913	5,06
137	280,9	0,329	6,000	0,363	0,200	0,500	0,500	0,55	0,56	0,988	0,986	0,525	0,0809	3,49	0,1110	4,11
138	281,0	0,543	6,000	0,363	0,200	0,500	0,500	0,52	0,56	0,988	0,986	0,739	0,0809	11,40	0,1830	5,78
139	560,9	0,263	6,000	0,370	0,200	0,500	0,500	0,68	0,70	0,988	0,986	0,431	0,0730	1,84	0,0712	3,72
140	560,9	0,434	6,000	0,370	0,200	0,500	0,500	0,67	0,70	0,988	0,986	0,611	0,0730	6,11	0,1174	5,28
141	347,9	0,307	6,000	0,363	0,200	0,500	0,500	0,51	0,60	0,988	0,986	0,494	0,0781	2,88	0,0965	3,48
142	347,9	0,506	6,000	0,363	0,200	0,500	0,500	0,49	0,60	0,988	0,986	0,691	0,0781	9,27	0,1591	4,86
143	698,4	0,244	6,000	0,370	0,200	0,500	0,500	0,62	0,75	0,988	0,986	0,403	0,0708	1,50	0,0622	3,12
144	698,4	0,403	6,000	0,370	0,200	0,500	0,500	0,63	0,75	0,988	0,986	0,579	0,0708	5,10	0,1026	4,48
145	183,0	0,382	4,905	0,457	0,200	0,500	0,500	0,73	0,67	0,935	0,943	0,585	0,0824	5,57	0,1028	4,90
146	183,0	0,625	4,857	0,450	0,200	0,500	0,500	0,71	0,66	0,935	0,943	0,800	0,0817	17,44	0,1690	6,77
147	358,2	0,306	4,857	0,463	0,200	0,500	0,500	0,88	0,84	0,934	0,942	0,489	0,0732	3,10	0,0651	4,58
148	358,2	0,504	4,905	0,457	0,200	0,500	0,500	0,91	0,84	0,935	0,943	0,667	0,0733	9,55	0,1072	6,28
149	225,3	0,356	4,857	0,457	0,200	0,500	0,500	0,67	0,72	0,934	0,943	0,553	0,0790	4,68	0,0889	4,19
150	225,3	0,586	4,857	0,457	0,200	0,500	0,500	0,67	0,72	0,934	0,943	0,750	0,0790	14,17	0,1465	5,68
151	443,1	0,285	4,857	0,463	0,200	0,500	0,500	0,81	0,90	0,934	0,942	0,459	0,0707	2,55	0,0566	3,87
152	443,1	0,470	4,857	0,463	0,200	0,500	0,500	0,85	0,90	0,934	0,942	0,636	0,0707	8,07	0,0933	5,37
153	233,5	0,354	6,000	0,377	0,200	0,500	0,500	0,59	0,60	0,978	0,974	0,557	0,0842	4,26	0,1134	4,37
154	233,5	0,587	6,000	0,383	0,200	0,500	0,500	0,56	0,60	0,977	0,974	0,809	0,0845	14,67	0,1873	6,29
155	463,4	0,282	6,000	0,377	0,200	0,500	0,500	0,73	0,75	0,978	0,974	0,459	0,0754	2,30	0,0724	4,02
156	463,3	0,467	6,000	0,383	0,200	0,500	0,500	0,72	0,75	0,977	0,974	0,648	0,0757	7,48	0,1196	5,62
157	288,6	0,332	6,000	0,383	0,200	0,500	0,500	0,55	0,65	0,977	0,974	0,528	0,0816	3,53	0,0986	3,69

Продолжение таблицы В.1

158	288,6	0,547	6,000	0,383	0,200	0,500	0,500	0,52	0,65	0,977	0,974	0,746	0,0816	11,61	0,1626	5,22
159	575,8	0,263	6,000	0,383	0,200	0,500	0,500	0,67	0,81	0,977	0,974	0,431	0,0733	1,87	0,0633	3,36
160	575,8	0,434	6,000	0,383	0,200	0,500	0,500	0,67	0,81	0,977	0,974	0,613	0,0733	6,22	0,1043	4,77
161	222,0	0,358	5,190	0,430	0,200	0,500	0,500	0,66	0,62	0,945	0,951	0,558	0,0804	5,90	0,1003	5,27
162	222,0	0,590	5,095	0,437	0,200	0,500	0,500	0,66	0,62	0,943	0,950	0,763	0,0800	18,26	0,1649	7,22
163	437,3	0,286	5,143	0,437	0,200	0,500	0,500	0,80	0,78	0,944	0,950	0,462	0,0717	3,22	0,0637	4,87
164	437,2	0,470	5,095	0,437	0,200	0,500	0,500	0,84	0,78	0,943	0,950	0,638	0,0714	10,17	0,1047	6,76
165	273,8	0,333	5,143	0,430	0,200	0,500	0,500	0,61	0,67	0,944	0,950	0,526	0,0772	4,92	0,0867	4,49
166	273,8	0,549	5,143	0,430	0,200	0,500	0,500	0,61	0,67	0,944	0,950	0,716	0,0772	15,04	0,1430	6,12
167	542,1	0,266	5,095	0,437	0,200	0,500	0,500	0,73	0,83	0,943	0,950	0,431	0,0690	2,63	0,0553	4,11
168	542,0	0,440	5,095	0,443	0,200	0,500	0,500	0,78	0,84	0,942	0,949	0,610	0,0693	8,58	0,0913	5,76
169	280,9	0,329	6,000	0,363	0,200	0,500	0,500	0,55	0,56	0,988	0,986	0,525	0,0809	4,53	0,1110	4,68
170	281,0	0,543	6,000	0,363	0,200	0,500	0,500	0,52	0,56	0,988	0,986	0,739	0,0809	14,81	0,1830	6,59
171	560,9	0,263	6,000	0,370	0,200	0,500	0,500	0,68	0,70	0,988	0,986	0,431	0,0730	2,40	0,0712	4,24
172	560,9	0,434	6,000	0,370	0,200	0,500	0,500	0,67	0,70	0,988	0,986	0,611	0,0730	7,94	0,1174	6,01
173	347,9	0,307	6,000	0,363	0,200	0,500	0,500	0,51	0,60	0,988	0,986	0,494	0,0781	3,74	0,0965	3,96
174	347,9	0,506	6,000	0,363	0,200	0,500	0,500	0,49	0,60	0,988	0,986	0,691	0,0781	12,04	0,1591	5,53
175	698,4	0,244	6,000	0,370	0,200	0,500	0,500	0,62	0,75	0,988	0,986	0,403	0,0708	1,94	0,0622	3,55
176	698,4	0,403	6,000	0,370	0,200	0,500	0,500	0,63	0,75	0,988	0,986	0,579	0,0708	6,62	0,1026	5,11
177	183,0	0,382	4,905	0,457	0,200	0,500	0,500	0,73	0,67	0,935	0,943	0,585	0,0824	7,24	0,1028	5,58
178	183,0	0,625	4,857	0,450	0,200	0,500	0,500	0,71	0,66	0,935	0,943	0,800	0,0817	22,65	0,1690	7,72
179	358,2	0,306	4,857	0,463	0,200	0,500	0,500	0,88	0,84	0,934	0,942	0,489	0,0732	4,03	0,0651	5,23
180	358,2	0,504	4,905	0,457	0,200	0,500	0,500	0,91	0,84	0,935	0,943	0,667	0,0733	12,40	0,1072	7,16
181	225,3	0,356	4,857	0,457	0,200	0,500	0,500	0,67	0,72	0,934	0,943	0,553	0,0790	6,08	0,0889	4,78
182	225,3	0,586	4,857	0,457	0,200	0,500	0,500	0,67	0,72	0,934	0,943	0,750	0,0790	18,40	0,1465	6,47
183	443,1	0,285	4,857	0,463	0,200	0,500	0,500	0,81	0,90	0,934	0,942	0,459	0,0707	3,31	0,0566	4,41
184	443,1	0,470	4,857	0,463	0,200	0,500	0,500	0,85	0,90	0,934	0,942	0,636	0,0707	10,48	0,0933	6,12
185	233,5	0,354	6,000	0,377	0,200	0,500	0,500	0,59	0,60	0,978	0,974	0,557	0,0842	5,54	0,1134	4,98
186	233,5	0,587	6,000	0,383	0,200	0,500	0,500	0,56	0,60	0,977	0,974	0,809	0,0845	19,06	0,1873	7,17
187	463,4	0,282	6,000	0,377	0,200	0,500	0,500	0,73	0,75	0,978	0,974	0,459	0,0754	2,99	0,0724	4,58
188	463,3	0,467	6,000	0,383	0,200	0,500	0,500	0,72	0,75	0,977	0,974	0,648	0,0757	9,71	0,1196	6,41
189	288,6	0,332	6,000	0,383	0,200	0,500	0,500	0,55	0,65	0,977	0,974	0,528	0,0816	4,58	0,0986	4,21
190	288,6	0,547	6,000	0,383	0,200	0,500	0,500	0,52	0,65	0,977	0,974	0,746	0,0816	15,08	0,1626	5,95
191	575,8	0,263	6,000	0,383	0,200	0,500	0,500	0,67	0,81	0,977	0,974	0,431	0,0733	2,43	0,0633	3,83
192	575,8	0,434	6,000	0,383	0,200	0,500	0,500	0,67	0,81	0,977	0,974	0,613	0,0733	8,08	0,1043	5,44

Продолжение таблицы В.1

$x_i$ $u$	$C_a$	$\delta_{кр.опт}^*$	$H_{0опт}^*$	$A_{0опт}^*$	$A_{попт}^*$	$H_{стопт}^*$	$H_{вопт}^*$	$B_{мсп},$ Тл	$B_{мопт},$ Тл	$\Theta_{впopt}^*$	$\Theta_{vyopt}^*$	$F_{сп}^*$	$F_{опт}^*$	$P_{п}^*$	$P_{уд}^*$	$n$
193	215,7	0,368	5,143	0,410	0,200	0,500	0,500	0,69	0,64	0,946	0,952	0,569	0,0811	5,13	0,0910	5,69
194	215,7	0,610	5,143	0,417	0,200	0,500	0,500	0,68	0,64	0,945	0,951	0,792	0,0814	16,23	0,1502	7,86
195	423,3	0,295	5,143	0,417	0,200	0,500	0,500	0,84	0,81	0,945	0,951	0,475	0,0725	2,83	0,0577	5,29
196	423,3	0,488	5,095	0,423	0,200	0,500	0,500	0,87	0,81	0,944	0,951	0,653	0,0725	8,78	0,0951	7,25
197	265,7	0,344	5,190	0,410	0,200	0,500	0,500	0,64	0,69	0,946	0,952	0,540	0,0784	4,29	0,0789	4,85
198	265,7	0,569	5,143	0,417	0,200	0,500	0,500	0,63	0,69	0,945	0,951	0,738	0,0784	13,13	0,1301	6,59
199	524,1	0,276	5,095	0,423	0,200	0,500	0,500	0,77	0,87	0,944	0,951	0,446	0,0700	2,32	0,0502	4,45
200	524,1	0,455	5,095	0,423	0,200	0,500	0,500	0,81	0,87	0,944	0,951	0,622	0,0700	7,42	0,0828	6,20
201	270,8	0,341	6,000	0,350	0,200	0,500	0,500	0,57	0,58	0,990	0,987	0,540	0,0820	3,96	0,1010	5,05
202	270,8	0,563	6,000	0,350	0,200	0,500	0,500	0,54	0,58	0,990	0,987	0,767	0,0820	13,18	0,1666	7,17
203	538,4	0,271	6,000	0,350	0,200	0,500	0,500	0,70	0,72	0,990	0,987	0,444	0,0736	2,13	0,0646	4,63
204	538,3	0,447	6,000	0,350	0,200	0,500	0,500	0,70	0,72	0,990	0,987	0,624	0,0736	6,95	0,1065	6,51
205	334,9	0,318	6,000	0,350	0,200	0,500	0,500	0,53	0,62	0,990	0,987	0,510	0,0792	3,29	0,0877	4,29
206	334,9	0,524	6,000	0,350	0,200	0,500	0,500	0,51	0,62	0,990	0,987	0,712	0,0792	10,60	0,1447	5,99
207	669,4	0,252	6,000	0,350	0,200	0,500	0,500	0,65	0,77	0,990	0,987	0,415	0,0713	1,73	0,0564	3,88
208	669,4	0,418	6,000	0,357	0,200	0,500	0,500	0,66	0,78	0,989	0,987	0,594	0,0716	5,78	0,0930	5,51
209	178,3	0,392	4,905	0,430	0,200	0,500	0,500	0,75	0,69	0,937	0,944	0,595	0,0832	6,27	0,0933	6,02
210	178,2	0,645	4,857	0,430	0,200	0,500	0,500	0,74	0,69	0,936	0,944	0,827	0,0829	20,11	0,1538	8,40
211	347,7	0,315	4,905	0,437	0,200	0,500	0,500	0,92	0,87	0,936	0,944	0,502	0,0742	3,53	0,0590	5,67
212	347,7	0,520	4,905	0,437	0,200	0,500	0,500	0,94	0,87	0,936	0,944	0,681	0,0742	10,71	0,0973	7,69
213	219,2	0,365	4,857	0,430	0,200	0,500	0,500	0,70	0,74	0,936	0,944	0,564	0,0798	5,29	0,0807	5,16
214	219,2	0,605	4,857	0,437	0,200	0,500	0,500	0,69	0,74	0,936	0,944	0,771	0,0801	16,12	0,1332	7,00
215	429,6	0,294	4,905	0,437	0,200	0,500	0,500	0,84	0,93	0,936	0,944	0,472	0,0716	2,91	0,0513	4,80
216	429,6	0,487	4,905	0,443	0,200	0,500	0,500	0,88	0,93	0,936	0,944	0,651	0,0719	9,04	0,0847	6,57
217	225,6	0,369	6,000	0,370	0,200	0,500	0,500	0,61	0,63	0,978	0,975	0,575	0,0858	4,81	0,1034	5,34
218	225,6	0,605	6,000	0,363	0,200	0,500	0,500	0,59	0,62	0,979	0,975	0,841	0,0854	17,21	0,1702	7,88
219	445,9	0,294	6,000	0,370	0,200	0,500	0,500	0,77	0,78	0,978	0,975	0,476	0,0767	2,63	0,0658	4,95
220	446,0	0,482	6,000	0,363	0,200	0,500	0,500	0,74	0,78	0,979	0,975	0,663	0,0764	8,51	0,1084	6,94
221	278,5	0,344	6,000	0,370	0,200	0,500	0,500	0,57	0,67	0,978	0,975	0,543	0,0828	4,01	0,0897	4,54
222	278,5	0,564	6,000	0,363	0,200	0,500	0,500	0,54	0,67	0,979	0,975	0,769	0,0824	13,42	0,1477	6,49
223	553,5	0,272	6,000	0,363	0,200	0,500	0,500	0,70	0,83	0,979	0,975	0,444	0,0739	2,16	0,0573	4,18
224	553,5	0,448	6,000	0,363	0,200	0,500	0,500	0,70	0,83	0,979	0,975	0,626	0,0739	7,07	0,0945	5,89

Продолжение таблицы В.1

225	215,7	0,368	5,143	0,410	0,200	0,500	0,500	0,69	0,64	0,946	0,952	0,569	0,0811	6,66	0,0910	6,48
226	215,7	0,610	5,143	0,417	0,200	0,500	0,500	0,68	0,64	0,945	0,951	0,792	0,0814	21,09	0,1502	8,96
227	423,3	0,295	5,143	0,417	0,200	0,500	0,500	0,84	0,81	0,945	0,951	0,475	0,0725	3,67	0,0577	6,03
228	423,3	0,488	5,095	0,423	0,200	0,500	0,500	0,87	0,81	0,944	0,951	0,653	0,0725	11,40	0,0951	8,26
229	265,7	0,344	5,190	0,410	0,200	0,500	0,500	0,64	0,69	0,946	0,952	0,540	0,0784	5,57	0,0789	5,52
230	265,7	0,569	5,143	0,417	0,200	0,500	0,500	0,63	0,69	0,945	0,951	0,738	0,0784	17,06	0,1301	7,52
231	524,1	0,276	5,095	0,423	0,200	0,500	0,500	0,77	0,87	0,944	0,951	0,446	0,0700	3,01	0,0502	5,07
232	524,1	0,455	5,095	0,423	0,200	0,500	0,500	0,81	0,87	0,944	0,951	0,622	0,0700	9,63	0,0828	7,07
233	270,8	0,341	6,000	0,350	0,200	0,500	0,500	0,57	0,58	0,990	0,987	0,540	0,0820	5,15	0,1010	5,76
234	270,8	0,563	6,000	0,350	0,200	0,500	0,500	0,54	0,58	0,990	0,987	0,767	0,0820	17,12	0,1666	8,18
235	538,4	0,271	6,000	0,350	0,200	0,500	0,500	0,70	0,72	0,990	0,987	0,444	0,0736	2,77	0,0646	5,28
236	538,3	0,447	6,000	0,350	0,200	0,500	0,500	0,70	0,72	0,990	0,987	0,624	0,0736	9,03	0,1065	7,42
237	334,9	0,318	6,000	0,350	0,200	0,500	0,500	0,53	0,62	0,990	0,987	0,510	0,0792	4,27	0,0877	4,88
238	334,9	0,524	6,000	0,350	0,200	0,500	0,500	0,51	0,62	0,990	0,987	0,712	0,0792	13,77	0,1447	6,83
239	669,4	0,252	6,000	0,350	0,200	0,500	0,500	0,65	0,77	0,990	0,987	0,415	0,0713	2,25	0,0564	4,43
240	669,4	0,418	6,000	0,357	0,200	0,500	0,500	0,66	0,78	0,989	0,987	0,594	0,0716	7,51	0,0930	6,28
241	178,3	0,392	4,905	0,430	0,200	0,500	0,500	0,75	0,69	0,937	0,944	0,595	0,0832	8,15	0,0933	6,86
242	178,2	0,645	4,857	0,430	0,200	0,500	0,500	0,74	0,69	0,936	0,944	0,827	0,0829	26,12	0,1538	9,58
243	347,7	0,315	4,905	0,437	0,200	0,500	0,500	0,92	0,87	0,936	0,944	0,502	0,0742	4,59	0,0590	6,46
244	347,7	0,520	4,905	0,437	0,200	0,500	0,500	0,94	0,87	0,936	0,944	0,681	0,0742	13,91	0,0973	8,77
245	219,2	0,365	4,857	0,430	0,200	0,500	0,500	0,70	0,74	0,936	0,944	0,564	0,0798	6,87	0,0807	5,88
246	219,2	0,605	4,857	0,437	0,200	0,500	0,500	0,69	0,74	0,936	0,944	0,771	0,0801	20,94	0,1332	7,98
247	429,6	0,294	4,905	0,437	0,200	0,500	0,500	0,84	0,93	0,936	0,944	0,472	0,0716	3,78	0,0513	5,47
248	429,6	0,487	4,905	0,443	0,200	0,500	0,500	0,88	0,93	0,936	0,944	0,651	0,0719	11,74	0,0847	7,49
249	225,6	0,369	6,000	0,370	0,200	0,500	0,500	0,61	0,63	0,978	0,975	0,575	0,0858	6,25	0,1034	6,08
250	225,6	0,605	6,000	0,363	0,200	0,500	0,500	0,59	0,62	0,979	0,975	0,841	0,0854	22,36	0,1702	8,98
251	445,9	0,294	6,000	0,370	0,200	0,500	0,500	0,77	0,78	0,978	0,975	0,476	0,0767	3,42	0,0658	5,64
252	446,0	0,482	6,000	0,363	0,200	0,500	0,500	0,74	0,78	0,979	0,975	0,663	0,0764	11,05	0,1084	7,91
253	278,5	0,344	6,000	0,370	0,200	0,500	0,500	0,57	0,67	0,978	0,975	0,543	0,0828	5,21	0,0897	5,18
254	278,5	0,564	6,000	0,363	0,200	0,500	0,500	0,54	0,67	0,979	0,975	0,769	0,0824	17,43	0,1477	7,39
255	553,5	0,272	6,000	0,363	0,200	0,500	0,500	0,70	0,83	0,979	0,975	0,444	0,0739	2,81	0,0573	4,76
256	553,5	0,448	6,000	0,363	0,200	0,500	0,500	0,70	0,83	0,979	0,975	0,626	0,0739	9,18	0,0945	6,71
257	386,1	0,199	5,667	0,390	0,200	0,500	0,500	0,62	0,73	0,962	0,963	0,347	0,0756	1,22	0,0462	3,69
258	386,1	0,601	5,667	0,397	0,200	0,500	0,500	0,67	0,74	0,962	0,963	0,795	0,0759	18,98	0,1388	8,37
259	87,8	0,663	5,952	0,390	0,200	0,500	0,500	0,40	0,44	0,967	0,966	1,008	0,1020	32,68	0,2662	7,94

Продолжение таблицы В.1

$x_i$ $u$	$C_a$	$\delta_{кр.опт}^*$	$H_{0опт}^*$	$A_{0опт}^*$	$A_{попт}^*$	$H_{стопт}^*$	$H_{вопт}^*$	$B_{мсп},$ ТЛ	$B_{мопт},$ ТЛ	$\Theta_{впopt}^*$	$\Theta_{выopt}^*$	$F_{сп}^*$	$F_{опт}^*$	$P_{п}^*$	$P_{уд}^*$	$n$
260	622,5	0,340	5,571	0,397	0,200	0,500	0,500	0,82	0,85	0,960	0,962	0,519	0,0698	4,64	0,0675	5,93
261	299,6	0,436	5,667	0,397	0,200	0,500	0,500	0,75	0,68	0,962	0,963	0,625	0,0791	8,52	0,1094	7,47
262	467,4	0,375	5,619	0,397	0,200	0,500	0,500	0,66	0,78	0,961	0,962	0,559	0,0733	5,91	0,0814	5,38
263	240,7	0,471	4,571	0,497	0,200	0,500	0,500	0,91	0,89	0,922	0,934	0,652	0,0785	10,90	0,1000	6,92
264	386,0	0,221	1,000	0,250	0,286	0,000	0,500	0,38	0,48	0,872	0,968	0,283	0,0572	4,68	0,3226	2,37
265	473,5	0,375	6,000	0,377	0,200	0,500	0,500	0,62	0,68	0,978	0,977	0,562	0,0756	5,62	0,0936	5,72
266	321,9	0,421	5,286	0,410	0,200	0,500	0,500	0,77	0,78	0,949	0,953	0,606	0,0757	8,34	0,0916	6,65
267	386,1	0,401	5,667	0,397	0,200	0,500	0,500	0,69	0,74	0,962	0,963	0,588	0,0759	5,20	0,0925	5,36
268	386,1	0,401	5,667	0,397	0,200	0,500	0,500	0,69	0,74	0,962	0,963	0,588	0,0759	8,89	0,0925	7,01
269	402,9	0,383	5,619	0,410	0,200	0,500	0,500	0,67	0,70	0,959	0,961	0,568	0,0742	6,03	0,1027	4,92
270	375,4	0,412	5,667	0,377	0,200	0,500	0,500	0,72	0,76	0,964	0,964	0,599	0,0766	7,77	0,0844	7,52
271	374,5	0,401	5,667	0,397	0,200	0,500	0,500	0,69	0,74	0,962	0,963	0,588	0,0759	8,65	0,0925	7,73
272	397,6	0,401	5,667	0,397	0,200	0,500	0,500	0,69	0,74	0,962	0,963	0,588	0,0759	5,77	0,0925	5,16
273	386,1	0,401	5,667	0,397	0,200	0,500	0,500	0,69	0,74	0,962	0,963	0,588	0,0759	6,92	0,0925	6,19

## ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Сравнение результатов расчета втяжного броневое электромагнита по методике Б.Э. Коца и по разработанной методике оптимизации

Исходные данные для проектирования:

$$\delta_{\text{кр}} = 10 \text{ мм};$$

$$P_{\text{мх.кр}} = 20 \text{ Н};$$

$$P_{\text{мх.к}} = 80 \text{ Н};$$

$$T_0 = 40 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$\Theta_{\text{доп}} = 130 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$K_{\text{max}} = 1,4;$$

$$K = 0,3;$$

$$K_3 = 0,5.$$

Втяжной броневой электромагнит, рассчитанный по методике, предложенной Б.Э. Коцем [82]:

- 1) Определяется сечение стопа, якоря и корпуса:

$$S_c = \frac{2 \cdot \mu_0 \cdot P_{\text{мх.кр}}}{B_\delta^2} = \frac{2 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 20}{0,4^2} = 314,2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2,$$

где величина  $B_\delta$  выбирается без обоснования.

- 2) По известному найденному сечению определяется радиус стопа, якоря и корпуса:

$$r_c = \sqrt{\frac{S_c}{\pi}} = \sqrt{\frac{314,2 \cdot 10^{-6}}{\pi}} = 10 \text{ мм}.$$

- 3) Уточняется сечение сердечника:

$$S_c = \pi r_c^2 = \pi \cdot 10^2 \cdot 10^{-6} = 314 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

- 4) Падение напряжения в рабочем воздушном зазоре:

$$F_\delta = \frac{B_\delta \delta_{\text{кр}}}{\mu_0} = \frac{0,4 \cdot 10 \cdot 10^{-3}}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} = 3183 \text{ А}.$$

- 5) МДС в режиме пуска:

$$F_{\text{п}} = k_{\text{ст}} F_\delta = 1,25 \cdot 3183 = 3980 \text{ А},$$

здесь автором не уточняется, как выбрано значение  $k_{\text{ст}}$ .

- 6) МДС в режиме удержания:

$$F_y = F_n / K_F = 3980 / 1,6 = 2488 \text{ А},$$

где  $K_F$  у Коца Б.Э. задан в исходных данных. Здесь  $K_F = 1,6$  взят из результатов расчета по разработанной методике синтеза.

7) Ширина обмотки:

$$A_0 = \sqrt[3]{\frac{\rho F_y^2}{2k_t K_3 \Theta_{\text{доп}} (H_0 / A_0)^2}} = \sqrt[3]{\frac{2,34 \cdot 10^{-8} \cdot 1861^2}{2 \cdot 16 \cdot 0,5 \cdot 130 \cdot 5,4^2}} = 13,4 \text{ мм},$$

где: – коэффициент теплоотдачи  $k_t$  выбирается, исходя из величины допустимой температуры  $\Theta_{\text{доп}}$  [54];

– отношение  $H_0 / A_0$  автором задается в начале расчета, здесь принято из расчетов, полученных по разработанной методике синтеза.

8) Высота катушки:

$$H_0 = \frac{H_0}{A_0} \cdot A_0 = 5,4 \cdot 11 = 72,4 \text{ мм}.$$

9) Внутренний радиус корпуса:

$$r_b = r_c + A_0 = 10 + 11 = 21 \text{ мм}.$$

10) Наружный радиус корпуса:

$$r_n = \sqrt{r_c^2 + r_b^2} = \sqrt{10^2 + 21^2} = 23,3 \text{ мм}.$$

11) Сечение провода:

$$q = (\rho \pi (r_c + r_b) \cdot F_n) / U = (2,34 \cdot 10^{-8} \pi (10 + 21) \cdot 10^{-3} \cdot 3980) / 110 = 0,082 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

12) Диаметр провода:

$$d = 1,13 \sqrt{q} = 1,13 \sqrt{0,082 \cdot 10^{-6}} = 0,324 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2..$$

13) Принимается по ГОСТ провод марки ПЭТ  $d = 0,335$  мм,  $d_n = 0,393$  мм,

$$q = 0,093 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^2.$$

14) Число рядов обмотки:

$$N_1 = (A_0 - \Delta_1) / d_n = (13,4 - 0,2) / 0,393 = 34,$$

где  $\Delta_1$  толщина латунной трубки, толщина изоляции и допуск на укладку.

15) Число витков в одном ряду:

$$N_2 = \frac{H_0 - \Delta_{\text{ш}}}{d_n} \cdot 0,95 - 1 = \frac{72,4 - 2}{0,393} \cdot 0,95 - 1 = 169.$$

16) Общее число витков:

$$N = N_1 N_2 = 34 \cdot 169 = 5746.$$

17) Масса стали без учета выступающего воротничка:

$$m_{\text{ст}} = [r_{\text{н}}^2(H_0 + 2h_0) - H_0(r_{\text{в}}^2 - r_{\text{с}}^2)]\pi\rho_{\text{ст}} = [2,33^2(7,24 + 2 \cdot 0,5) - 7,24(2,1^2 - 0,1^2)]\pi \cdot 7,8 = 0,316 \text{ кг},$$

где  $h_0 = r_{\text{с}} / 2 = 5 \text{ мм}$ .

18) Масса меди:

$$m_{\text{м}} = qN\pi(r_{\text{с}} + r_{\text{в}})\rho_{\text{ст}} = 0,093 \cdot 10^{-2} \cdot 5746 \cdot \pi(1 + 2,1) \cdot 8,9 = 0,463 \text{ кг}.$$

19) Общая масса стали и меди:

$$m_{\text{а}} = m_{\text{ст}} + m_{\text{м}} = 0,316 + 0,463 = 0,779 \text{ кг}.$$

В таблице Г.1 представлены результаты расчетов по методике Б.Э. Коца и разработанной методике оптимизации.

Таблица Г.1

Характеристика	Методика Б.Э. Коца	Разработанная методика оптимизации
$d_{\text{як}}$ , мм	20	23
$H_0$ , мм	72,4	94,8
$A_0$ , мм	13,4	17,4
$F_{\text{п}}$ , А	3980	2263
$F_{\text{у}}$ , А	2488	715
$m_{\text{а}}$ , кг	0,779	1,9

Отличие основных геометрических размеров  $d_{\text{як}}$ ,  $H_0$ ,  $A_0$ , полученных по методике Коца Б.Э., связаны с допущениями:

- для расчета тягового усилия использована упрощенная формула Максвелла, которая дает большие погрешности при больших рабочих воздушных зазорах;
- без обоснования принимается величина индукции в рабочем воздушном зазоре;
- принимается отношение высоты обмотки к толщине намотки;
- при расчете сечения провода не учитывается коэффициент заполнения обмоточного окна;
- коэффициент теплоотдачи принят без обоснования;

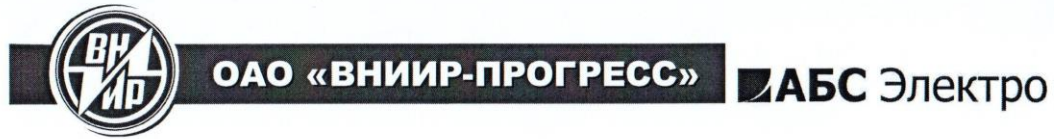


– коэффициент форсировки по МДС принимается без необходимости учета отношения механической силы к силе удержания в конечном (притяннутом) положении якоря.

Таким образом заниженное значение геометрических размеров могут привести к перегреву обмотки, к отсутствию оценки превышения механической характеристики над электромагнитной силой удержания.

## ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Материалы об использовании и практической полезности результатов диссертационного исследования



## СПРАВКА

об использовании и практической ценности результатов диссертационной работы инженера-конструктора отдела № 2 ОАО «ВНИИР-Прогресс»

Никитиной Олеси Алексеевны «Усовершенствование методик синтеза форсированных втяжных броневого электромагнитов постоянного напряжения», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты

Основные подходы и методы разработанных методик использованы при проектировании и расчете основных параметров электромагнитных контакторов серии КЭ16П. Основы методики синтеза применены при разработке конструктивных решений макетов расцепителей автоматических выключателей серии ВМ16. Результаты работы в части форсированного управления с переключением в двухобмоточной схеме нашли применение при проработке принципа построения электромагнитного привода перспективных вакуумных контакторов.

Практическая ценность результатов диссертационной работы заключается в получении более точных результатов расчетов параметров электромагнитных приводов постоянного напряжения и сокращении времени на проработку новых технических решений по созданию изделий на основе втяжных электромагнитов.

Главный конструктор  
ОАО «ВНИИР-Прогресс»



Е. В. Сагардзе

ОАО «ВНИИР-Прогресс»

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное  
бюджетное образовательное  
учреждение  
высшего образования  
«Чувашский государственный  
университет имени И.Н. Ульянова»  
(ФГБОУ ВО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова»)

Московский пр., 15, г. Чебоксары, 428015  
тел.: (8352) 583-036; факс: (8352) 450-279  
E-mail: oper@chuvsu.ru; office@chuvsu.ru  
ОГРН 1022101274315 ИНН 2129009412

*н. 09* 2017 г. № *4392*

РАССЕЙ ФЕДЕРАЦИЙЁН  
ВЁРЕНҮПЕ АСЛАЛАХ  
МИНИСТЕРСТВИ

Федерациян асла пёлу паракан  
«И.Н. Ульянов ячёллэ  
Чăваш патшалăх университетчĕ»  
патшалăх вĕрену бюджет  
учрежденийĕ

428015 Шупашкар хули, Мускав пр., 15

## СПРАВКА

об использовании и практической ценности результатов диссертационной работы  
Никитиной Олеси Алексеевны «Усовершенствование методик синтеза форсированных втяжных  
броневых электромагнитов постоянного напряжения», представленной на соискание ученой  
степени кандидата технических наук  
по специальности 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты  
на кафедре электрических и электронных аппаратов  
ФГБОУ ВО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова»

Результаты диссертационной работы используются в учебном процессе при чтении дисциплин «Основы теории электрических аппаратов», «Электрические и электронные аппараты», «Синтез оптимальных конструкций приводных электромагнитных устройств», «Форсированные электромагнитные системы», при выполнении курсовых проектов, выпускных квалификационных работ бакалавров и магистров по направлению подготовки «Электроэнергетика и электротехника».

Полученные результаты исследования использовались при выполнении НИР кафедрой электрических и электронных аппаратов в рамках государственного задания Министерства образования и науки Российской Федерации:

– «Разработка и исследование ресурсо- и энергосберегающих приводов электрических аппаратов»;

– «Синтез оптимальных ресурсо- и энергосберегающих приводов электрических аппаратов» (проект №1690), выполненный в рамках базовой части государственного задания №2014/256 от 19.03.2014 г.

В диссертации отражены методики синтеза форсированных одно- и двухобмоточных втяжных броневых электромагнитов с перспективными схемами форсированного управления. Представлены результаты в виде полиномиальных зависимостей оптимальных соизмерностей электромагнитов.

Ректор

А.Ю. Александров

Исп.:  
Тел.:

Егоров Е.Г.  
тел. 58-36-02 (доб. 26-02)





ЗАКРЫТОЕ  
АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО

«ЧЕБОКСАРСКИЙ  
ЭЛЕКТРОАППАРАТНЫЙ  
ЗАВОД»



«ШУПАШКАРТИ  
ЭЛЕКТРОАППАРАТ  
ЗАВОЧЁ»

Х У П Ё  
АКЦИОНЕР ОБЩЕСТВИ

428000, г. Чебоксары, пр. Яковлева, 5. Тел. (8352) 39-51-51 (дирекция по продажам),  
39-56-09 (справ. завода), 62-04-61 (приемная ген. директора), 39-57-43 (канцелярия).  
E-mail: Cheaz@cheaz.ru, cheaz@chtt.ru, http://www.cheaz.ru.  
Факс: (8352) 62-72-31



### СПРАВКА

о практической ценности результатов диссертационной работы Никитиной Олеси Алексеевны «Усовершенствование методик синтеза форсированных втяжных броневых электромагнитов постоянного напряжения», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты

Результаты, полученные в диссертационной работе:

- усовершенствованная методика проектного расчета для форсированных одно- и двухобмоточных втяжных броневых электромагнитов;
  - разработанная методика оптимизации форсированных одно- и двухобмоточных втяжных броневых электромагнитов;
  - математическое описание основных оптимальных соразмерностей и параметров электромагнита в виде полиномиальных зависимостей
- представляют собой практическую ценность для разработчиков электромагнитной аппаратуры.

Директор управления проектирования  
и конструирования ИПК Реконструкция



А.В. Михайлов