ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ «ЧУВАШСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ И.Н. УЛЬЯНОВА»

на правах рукописи

Архипова Елена Владимировна

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВТЯЖНЫХ БРОНЕВЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТОВ И РАЗРАБОТКА УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫХ МЕТОДИК ИХ ПРОЕКТНОГО РАСЧЕТА

Специальность 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

> Научный руководитель: доктор технических наук, доцент Свинцов Геннадий Петрович

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ7
ГЛАВА 1 ВТЯЖНЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТЫ. МЕТОДЫ
МОДЕЛИРОВАНИЯ, РАСЧЕТА И СИНТЕЗА14
1.1 Анализ конструкций втяжных электромагнитов
1.2 Обзор и анализ методов проектного расчета втяжных броневых
электромагнитов
1.2.1 Обзор методов расчета магнитных и температурных полей
электромагнитных систем
1.2.2 Обзор программ конечно-элементного анализа
1.2.3 Описание вычислительного пакета FEMM и оценка его
достоверности
1.2.4 Выбор способа представления статических характеристик
втяжного электромагнита постоянного напряжения
1.3 Анализ методов расчета и моделирования динамических
процессов втяжных электромагнитов
1.3.1 Методы расчета динамических процессов электромагнитов 39
1.3.2 Критерии подобия динамических процессов
электромагнитов
1.3.3 Учет влияния вихревых токов на динамические
характеристики электромагнитов
1.3.4 Критерии оптимизации, используемые при проектном
расчете электромагнитных систем
Выводы к главе 1
ГЛАВА 2 МОДЕЛИ СТАТИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ
ХАРАКТЕРИСТИК ВТЯЖНЫХ БРОНЕВЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТОВ
ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ И ИХ АНАЛИЗ57
2.1 Моделирование электромагнитных характеристик втяжного
электромагнита в статическом режиме

2.2 Моделирование статических электромагнитных характеристик
однообмоточного втяжного электромагнита67
2.3 Моделирование статических электромагнитных характеристик
двухобмоточного втяжного электромагнита
2.3.1 Математические модели характеристик двухобмоточного
электромагнита с аксиально расположенными обмотками74
2.3.2 Математические модели характеристик двухобмоточного
электромагнита с коаксиально расположенными обмотками79
2.4 Определение границы линейности магнитных систем
2.4.1 Однообмоточная магнитная система
2.4.2 Магнитная система с аксиально расположенными обмотками 86
2.4.3 Магнитная система с коаксиально расположенными
обмотками
2.5 Исследование основных электромагнитных характеристик
втяжного электромагнита91
Выводы к главе 2
ГЛАВА 3 МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТАНОВИВШИХСЯ ТЕПЛОВЫХ
ХАРАКТЕРИСТИК ВТЯЖНЫХ БРОНЕВЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТОВ
98
3.1 Математические модели характерных температур нагрева
обмотки втяжного электромагнита постоянного напряжения в
установившемся режиме
3.2 Моделирование нагрева обмоток двухобмоточного втяжного
электромагнита
3.2.1 Математические модели нагрева двухобмоточного
электромагнита с аксиально расположенными обмотками104
3.2.2 Математические модели нагрева двухобмоточного
электромагнита с коаксиально расположенными обмотками107
Выводы к главе 3

ГЛАВА 4 МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ	
ХАРАКТЕРИСТИК ВТЯЖНЫХ БРОНЕВЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТОВ	
ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ	.111
4.1 Оценка влияния вихревых токов на динамические	
характеристики электромагнита	.114
4.2 Описание алгоритма расчета динамики включения втяжного	
броневого электромагнита постоянного напряжения	. 115
4.3 Результаты моделирования динамики срабатывания	
однообмоточных броневых втяжных электромагнитов	. 120
Выводы к главе 4	. 122
ГЛАВА 5 ВОПРОСЫ ПРАКТИЧЕСКОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ	
РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ	. 124
5.1 Оценка достоверности полученных математических моделей	. 124
5.1.1 Сравнение расчетных и экспериментальных статических	
характеристик втяжного броневого электромагнита	. 124
5.1.2 Сравнительный анализ расчетных и экспериментальных	
динамических характеристик электромагнита	. 129
5.2 Методика синтеза втяжных броневых электромагнитов	. 132
5.2.1 Методика синтеза втяжного броневого электромагнита	
постоянного напряжения на основе полученных статических моделей	. 132
5.2.2 Синтез втяжного электромагнита с минимально	
потребляемой мощностью	. 137
5.2.3 Синтез втяжного электромагнита на заданную тяговую	
характеристику	. 137
5.3 Разработка методики синтеза оптимальных втяжных броневых	
электромагнитов электромагнита с учетом динамических характеристик	
срабатывания	. 138
5.4 Оценка динамических параметров максимального токового	
расцепителя модульного автоматического выключателя	. 139

5.5 Усовершенствование приводного электромагнита реле времени	
PB-1001	41
Выводы к главе 5 1-	48
ЗАКЛЮЧЕНИЕ1	50
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ1	53
ПРИЛОЖЕНИЕ А Дополнительные материалы по моделированию	
электромагнитных характеристик втяжного броневого электромагнита 1	74
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Дополнительные материалы по моделированию	
тепловых характеристик втяжного броневого электромагнита	80
Б.1 Матрицы экспериментов1	80
Б.2 Численное исследование статических тепловых характеристик	
втяжного броневого электромагнита1	88
ПРИЛОЖЕНИЕ В Дополнительные материалы по моделированию	
динамических параметров втяжного броневого электромагнита постоянного	
напряжения1	91
В.1 Матрица эксперимента1	91
В.2 Описание методики определения критериев подобия для	
моделирования динамических параметров втяжного броневого	
электромагнита постоянного напряжения1	93
В.2.1 Расчет мощности тепловыделения	93
В.2.2 Расчет электромагнитной постоянной времени1	96
В.2.3 Расчет начального противодействующего усилия2	00
В.3 Текст алгоритма расчета динамики срабатывания	
однообмоточного втяжного броневого электромагнита постоянного	
напряжения на языке Lua2	05
ПРИЛОЖЕНИЕ Г Дополнительные материалы к оценке статических	
электромагнитных характеристик втяжного броневого электромагнита2	12
ПРИЛОЖЕНИЕ Д Усовершенствованная инженерная методика	
проектного расчета короткоходового втяжного броневого электромагнита,	
базирующаяся на методах цепей2	14

	ПРИЛС	ЭЖЕНИЕ Е	Метод	цика с	синтеза	длинно	ходового	ЖКТВ	НОГО	
броне	вого	электромагн	нита,	базир	ующаяся	н на	обобще	нных	их	
характ	геристи	ках			•••••					. 222
	ПРИЛС	жение ж	Mar	гериалі	Ы О	внедр	ении р	езульт	атов	
диссер	этацион	ного исслед	ования		• • • • • • • • • • • • • • • • • • • •		• • • • • • • • • • • • • • • • • • • •	• • • • • • • • • • • • • • • • • • • •	• • • • • • • • • • •	. 226

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Втяжные броневые электромагниты постоянного напряжения (ВБЭМ) реализуют исполнительную функцию во многих областях приборо- и электроаппаратостроения. Они находят применение, в основном, как привода коммутационно-защитной аппаратуры и управляющие устройства пневмо- и гидромеханики, используются в системах радиоэлектроаппаратуры, автоматики и телемеханики [1, 51, 61, 78, 98, 171 и др.].

На сегодняшний день одной из основных проблем в области разработки низковольтной коммутационной аппаратуры является отсутствие современного метода автоматизированного решения задач по проектированию оптимальных электромагнитных систем, обеспечивающего не только экономию времени, способного ресурсов, энергии, но И заменить дорогостоящие экпериментальные исследования математическим моделированием [23, 72, 74, 103, 118, 172 др.]. Кроме этого, ДЛЯ создания универсального методологического аппарата проектирования приводов электрических аппаратов необходимо применение системообразующего принципа, характеризующегося исследованием всех основных систем электромагнитного привода: магнитной, тепловой, механической и т.д. [118, 172].

Разработка моделей характеристик и параметров исследуемых электромагнитных систем, отвечающих вышеприведенным требованиям, является одной из важнейших задач, а тема диссертационного исследования, посвященная разработке математических моделей ВБЭМ, актуальной.

В развитие методов расчета магнитных систем большой вклад внесли ученые: Афанасьев А.А., Буль Б. К., Буль О.Б., Витенберг М.И., Гордон А.В., Курбатова П.А., Лобов Б.Н., Лысов Н.Е., Любчик М.А., Нестерина В.А., Никитенко А.Г., Павленко А.В., Пеккер И.И., Пик Р., Сливинская А.Г., Шоффа В.Н. и многие другие. Развитие теории электромеханики и аппаратостроения отражено также в работах Бугаева Г.А., Иванова И.П., Михайлова Н.М., Руссовой Н.В., Федотова А.И. и др.

В настоящее время достаточно полно разработаны методы анализа ВБЭМ, основанные на цепевых и полевых методах, реализованных с применением специализированных САПР [118], позволяющие по заданной конструкции определить ее характеристики. В меньшей мере разработаны методики синтеза ВБЭМ [106, 134, 172], заключающиеся в получении геометрических размеров системы, которая при заданных условиях работы выполняла бы требуемую от нее функцию, в том числе в схемах форсированного управления.

Цель диссертационной работы — разработка эффективных усовершенствованных методик проектного расчета ВБЭМ на основе их обобщенных математических моделей, полученных в результате теоретических исследований, которые могут быть использованы и для синтеза форсированных оптимальных электромагнитных систем приводов аппаратов.

Достижение сформулированной цели базируется на решении следующих задач:

- 1. Анализ существующих методик проектирования втяжных электромагнитов (ЭМ), построенных на основе их статических и динамических характеристик, и обоснование необходимости усовершенствования известных и разработки эффективных методик их синтеза.
- 2. Разработка математических моделей статических электромагнитных характеристик и тепловых параметров одно- и двухобмоточных втяжных броневых магнитных систем постоянного напряжения с плоским стопом, функционально связывающих их параметры с характеристиками и позволяющих создать эффективные алгоритмы проектирования.
- 3. Оценка влияния параметров броневых магнитных систем на их характеристики и адекватности математических моделей.
- 4. Создание эффективной усовершенствованной инженерной методики проектного расчета ВБЭМ с плоским стопом, позволяющей учесть магнитное сопротивление ферромагнитных элементов магнитной системы (МС) и с достаточной для практики точностью определять ее размеры.

- 5. Разработка методики проектного расчета однообмоточного ВБЭМ на базе обобщенных его статических электромагнитных характеристик и установившихся тепловых параметров, минимизирующей количество произвольно выбираемых коэффициентов, которая составит основу методики синтеза оптимальных ВБЭМ.
- 6. Выбор формы представления критериев подобия динамических процессов срабатывания с учетом ядра магнитной системы и разработка методики планирования вычислительного эксперимента при моделировании динамических параметров срабатывания однообмоточного ВБЭМ с учетом теплового состояния обмотки и влияния вихревых токов.
- 7. Опробование разработанных методик при проектных работах и модернизации существующих конструкций.

Объект исследования — втяжные магнитные системы постоянного напряжения и приводные электромагниты на их основе.

Предмет исследования — математические модели характеристик и параметров втяжных броневых магнитных систем приводных электромагнитов постоянного напряжения.

Область исследования — разработка усовершенствованных методик синтеза втяжных броневых электромагнитных систем приводов аппаратов на основе адекватных их математических моделей.

Научная новизна работы:

- Впервые полученные математические модели статических электромагнитных характеристик одно- и двухобмоточных ВБЭМ с плоским стопом, обобщенные методами теории подобия, в отличие от известных, выражают непосредственно функциональную характеристик ИХ СВЯЗЬ MC. геометрическими соразмерностями магнитного состояния ee ферромагнитных элементов и размещения обмоток на катушке.
- 2. Предложенные математические модели тепловых параметров одно- и двухобмоточных магнитных систем ВБЭМ, в отличие от известных, характеризуются функциональной связью максимальной и среднеобъемной температур с геометрическими соразмерностями, температурой окружающей

среды, размещением обмоток внутри ферромагнитного корпуса и удобны для решения задач синтеза.

- 3. Разработанный алгоритм расчета динамики срабатывания ВБЭМ вихревых отличается учетом влияния токов, магнитной нагрузки на ферромагнитные элементы МС, теплового состояния обмотки, позволивший получить обобщенные математические модели динамических параметров срабатывания, что открывает возможность его использования случае форсированного управления.
- 4. Предложенная инженерная методика проектного расчета короткоходового ВБЭМ с плоским стопом позволяет достоверно определить его размеры с учетом магнитного сопротивления ферромагнитных элементов конструкции, характеризуется неограниченностью в применении по величине условно-полезной работы, допустимого превышения температуры обмотки, режима работы.
- 5. Разработанная методика синтеза длинноходовых ВБЭМ постоянного напряжения с плоским стопом на основе обобщенных их характеристик отличается минимальным количеством произвольно выбираемых коэффициентов, возможностью ее использования в качестве основы методики оптимизационного расчета.
- 6. Предложенная форма представления критериев подобия динамических процессов срабатывания, учитывающая геометрические размеры ядра МС и разработанная методика планирования вычислительного эксперимента с факторами в виде критериев подобия позволяют провести моделирование динамических параметров срабатывания однообмоточного ВБЭМ с учетом теплового состояния обмотки и вихревых короткозамкнутых контуров.

Практическая ценность:

1. Разработанные обобщенные математические модели МС ВБЭМ позволяют анализировать электромагнитные характеристики МС с учетом ее состояния, различного расположения обмоток на катушке, а также тепловые

параметры обмоток ЭМ, что обеспечивает возможность разрабатывать на их базе достоверные методики синтеза.

- 2. Предлагаемые методики и их компьютерная реализация позволят эффективно их использовать при разработке современных приводных ЭМ электрических аппаратов, а также проектировании конструкций, обеспечивающих экономию материальных, энергетических и финансовых ресурсов.
- 3. Разработан алгоритм расчета динамики срабатывания ВБЭМ с использованием метода конечных элементов, позволяющий проводить оценку влияния на динамические характеристики ЭМ, его параметров, геометрических соразмерностей с учетом магнитного состояния ферромагнитных элементов МС и теплового состояния обмотки.
- 4. По результатам теоретических и экспериментальных исследований усовершенствована МС приводного ВБЭМ реле времени РВ-100 производства ЗАО «ЧЭАЗ», в котором оказалось возможным достигнуть уменьшения потребляемой реле мощности в 1,6 раза; проведена оценка динамических параметров максимального токового расцепителя автоматического выключателя.
- 5. Полученные в работе результаты используются в учебном процессе на кафедре электрических и электронных аппаратов ЧГУ им. И.Н. Ульянова при подготовке бакалавров и магистров.
- 6. Проведенные исследования укладываются в рамки решения первоочередных задач электротехники, соответствуют:
- приоритетным направлениям развития науки, технологии и техники в Российской Федерации: энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика;
- приоритетным направлениям модернизации и технологического развития экономики России: энергосбережение и повышение энергоэффективности;
- критическим технологиям: технологии создания энергосберегающих систем транспортировки, распределения и потребления тепла и электроэнергии.
- и использовались при проведении НИР «Разработка и исследование ресурсо- и энергосберегающих приводов электрических аппаратов»,

выполненных в ФГБОУ ВПО «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова» в рамках государственного задания Министерства образования и науки Российской Федерации.

7. Результаты диссертационной работы используются при разработке коммутационной аппаратуры автономных систем спецтехники.

Методы исследования. При выполнении диссертационной работы использовались: основные положения теории цепей, метод конечных элементов, численные методы решения алгебраических и дифференциальных уравнений, метод подобия, метод построения многофакторной регрессионной модели, методы оптимизации. Экспериментальные результаты получены современными средствами сбора и обработки данных.

Основные положения диссертационной работы, выносимые на защиту:

- 1. Математические модели ВБЭМ с плоским стопом, позволяющие с достаточной для инженерной практики точностью исследовать статические и динамические характеристики ВБЭМ, а также тепловые его параметры.
- 2. Методики проектного расчета ВБЭМ с плоским стопом, позволяющие получить размеры его МС с учетом магнитного состояния элементов магнитной системы и максимальной температуры в толще обмотки.
- 3. Методика определения параметров магнитной и механической систем ВБЭМ при моделировании процесса его срабатывания с учетом влияния вихревых токов, температуры нагрева и магнитной нагрузки на ферромагнитные элементы конструкции.
- 4. Алгоритм расчета процесса срабатывания ВБЭМ с плоским стопом, позволяющий по заданным параметрам магнитной и механической систем с учетом теплового состояния обмотки эффективно исследовать динамический режим его включения.

Достоверность работы обусловлена результатов корректным использованием методов математического подтверждается анализа И 10 % совпадением погрешностью до результатов математического

моделирования и результатов эксперимента на промышленных образцах, а также исследованиями, изложенными в научной литературе.

Апробация работы.

Основные положения и результаты диссертационной работы обсуждались на следующих научно-технических конференциях:

- всероссийский смотр-конкурс научно-технического творчества студентов высших учебных заведений «Эврика-2008», Новочеркасск, 2008 г.;
- международная конференция «Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты» МКЭ-2008, г. Алушта, 2008 г.;
- VII всероссийская научно-техническая конференция «Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике», г. Чебоксары, 2010 г.;
- международная научно-практическая конференция «Электрические аппараты и электротехнические комплексы и системы», г. Ульяновск, 2011 г. и 2012 г.;
- всероссийская научно-практическая конференция «Энергосбережение в промышленности», г. Чебоксары, 2012 г.;
- на научно-методических семинарах кафедры электрических и электронных аппаратов ФГБОУ ВПО «ЧГУ имени И.Н. Ульянова», 2010÷2014 г.г.

Публикации. По теме диссертации опубликована 21 печатная работа, из них 5 статей в изданиях из перечня ВАК, 6 тезисов докладов на конференциях, 2 патента. Подготовлена к публикации в сборнике материалов IX Всероссийской конференции «Информационные научно-технической технологии электроэнергетике», Чебоксары, 2014 электротехнике Γ. Γ. статья «Усовершенствованная методика проектного расчета броневого электромагнита постоянного напряжения с втяжным якорем» авторов: Алексеевой О.Е., Архиповой Е.В., Иванова И.П., Никитиной О.А., Руссовой Н.В., Свинцова Г.П.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы (188 наименований), и приложений (55 страниц), включает 228 страниц машинописного текста, 71 рисунок и 32 таблицы.

ГЛАВА 1 ВТЯЖНЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТЫ. МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ, РАСЧЕТА И СИНТЕЗА

1.1 Анализ конструкций втяжных электромагнитов

Для того чтобы в достаточной степени адекватно описать уровень известных методик проектирования втяжных электромагнитов, необходимо описать наиболее характерные конфигурации МС исследуемого типа ЭМ, обобщить направления и аспекты их усовершенствования, выделить основные перспективные методы их расчета.

Втяжные ЭМ благодаря своей простоте и надежности конструкции являются наиболее широко применяемыми [38, 137, 172] исполнительными элементами. Области их применения очень широки: от современной аппаратуры управления [1, 95], средств автоматики, телемеханики, связи, сигнализации и контроля [33, 42, 82, 160] до систем гидро- и пневмоавтоматики [62, 128, 133, 171].

На рисунке 1.1 приведена классификация электромагнитов. По конструктивному исполнению, которое характеризуется прежде всего расположением якоря относительно остальных частей МС и характером воздействия на якорь магнитного потока, они подразделяются на три характерные группы [61, 78, 95, 98, 124, 157, 159, 171 и т.д.]:

- 1) МС с втягивающимся сердечником (якорем) подразумевают частичное или полное внедрение (втяжение) якоря во внутреннюю полость катушки и потому также называются внедряющимися. Для них характерно наличие неподвижного сердечника или стопа. Подвижный сердечник совершает поступательное движение, поэтому иногда электромагниты этой группы называют прямоходовыми [95, 100 и др.].
- 2) МС с внешним притягивающимся якорем объединяют обширный их тип, основным отличием которых является внешнее расположение подвижного якоря по отношению к внутренней полости катушки. При этом он может осуществлять

как прямое, так и поворотное движение. На рисунке 1.1 показан распространенный тип данной группы — электромагнит клапанного типа. Следует отметить, что в широком толковании термина «клапанные электромагниты» [61] — это электромагниты, рабочий воздушный зазор которых расположен вне катушки, а якорь совершает ограниченное вращательное перемещение по направлению линий магнитного потока.

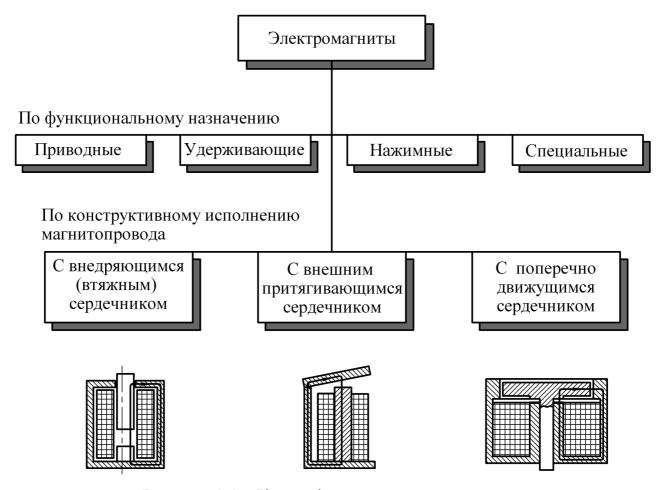


Рисунок 1.1 – Классификация электромагнитов

3) МС с поперечно движущимся сердечником совершают поперечное (перпендикулярное) движение относительно направления линий магнитного потока благодаря особым образом согласованным формам полюсных наконечников и боковой поверхности якоря. Возможны исполнения с внешним и частично внедряющимся якорем (при повороте якорь частично входит во внутреннюю полость катушки) (показан на рисунке 1.1).

Каждый из трех основных типов имеет ряд конструктивных разновидностей, определяемый конструкцией МС, а так же родом тока питания катушки. По форме магнитопровода ЭМ могут быть чрезвычайно разнообразны. Наиболее часто ярмо магнитопровода напоминает форму одной из букв: П, Ш, Е, Т, О и т.п.

По применяемости клапанные и прямоходовые электромагниты составляют друг другу конкуренцию. При этом прямоходовые предпочтительны там, где требуется больший раствор контактов [99]. Электромагниты с поперечно движущимся сердечником имеют меньшее распространение в силу худших технико-экономических показателей по сравнению с двумя другими (малого значения развиваемого крутящего момента, ограничения по возможности изготовления магнитопровода шихтованным и т.п.). Они отличаются возможностью реализации углового перемещения без дополнительных устройств.

Рассмотрим подробнее втяжные ЭМ броневого типа, которым и посвящено наше исследование. Они используются при питании постоянным и переменным током, причем при питании постоянным током магнитопроводы имеют практически исключительно цилиндрическую форму. Для случая питания переменным током магнитопровод выполняют шихтованным из тонких листов электротехнической стали (см. рисунок 1.2). Отметим, что по терминологии Э. Яссе такой тип ЭМ броневого типа называется «плоским» [173]. Кроме цилиндрической формы при питании постоянным током или напряжением часто используется магнитопровод, представляющий собой прямоугольную скобу [137], представленную в виде О или С-образного ярма (см. рисунок 1.2).

Следует отметить различие терминов «электромагнит с втяжным якорем» и «броневой электромагнит». Броневые электромагниты — это электромагниты, у которых катушка охвачена снаружи неподвижным ярмом магнитопровода, а рабочий зазор расположен внутри катушки [124]. Втяжные электромагниты — это электромагниты, для которых характерно частичное или полное внедрение (втяжение) якоря во внутреннюю полость катушки [61, 159 и др.]. Не все втяжные электромагниты можно назвать броневыми (электромагниты с втяжным якорем, у

которых катушка не охвачена снаружи неподвижным магнитопроводом, броневыми назвать нецелесообразно, например соленоиды), при этом броневые прямоходовые электромагниты могут быть выполнены и с внешним якорем [1, 78].

Основные конструктивные исполнения ВБЭМ показаны на рисунке 1.2 [61, 98, 124, 159, 173 и др.], которые подразделяются по типу корпуса магнитопровода, который в свою очередь определяется родом тока питания обмотки. При постоянном токе он может выполняться цилиндрическим или в виде прямоугольной скобы, на переменном токе применяется так называемый плоский магнитопровод, собранный из тонких листов электротехнической стали. Он применяется и при питании от источников постоянного, выпрямленного тока и напряжения быстродействующих ЭМ.

Самое разнообразное применение находят именно втяжные ЭМ с цилиндрическим магнитопроводом. Они в свою очередь подразделяются по виду МС и наличия (отсутствия) стопа на: броневые со стопом, броневые без стопа с замкнутой магнитной системой, броневые с незамкнутой магнитной системой. Непосредственно к ним близко подходят соленоиды или втяжные электромагниты без неподвижного магнитопровода со сквозным отверстием внутри катушки.

Наиболее часто используемые конструктивные исполнения плоских магнитопроводов ВБЭМ показаны на рисунке 1.2.

Втяжные электромагниты с различной формой стопа (см. рисунок 1.2) широко применяются в радиоэлектронной аппаратуре (в конструкциях датчиков, реле и т.д.), аппаратуре автоматического управления [51, 78, 82].

Конструктивно втяжные ЭМ относительно просты, для цилиндрических типов магнитопровод одновременно выполняет функцию оболочки (корпуса). Внутри корпуса расположена катушка, во внутреннюю часть которой происходит втягивание сердечника, т.е. рабочий воздушный зазор находится внутри обмотки. Эту особенность, как будет показано ниже, необходимо учитывать при расчетах магнитных и температурных полей.

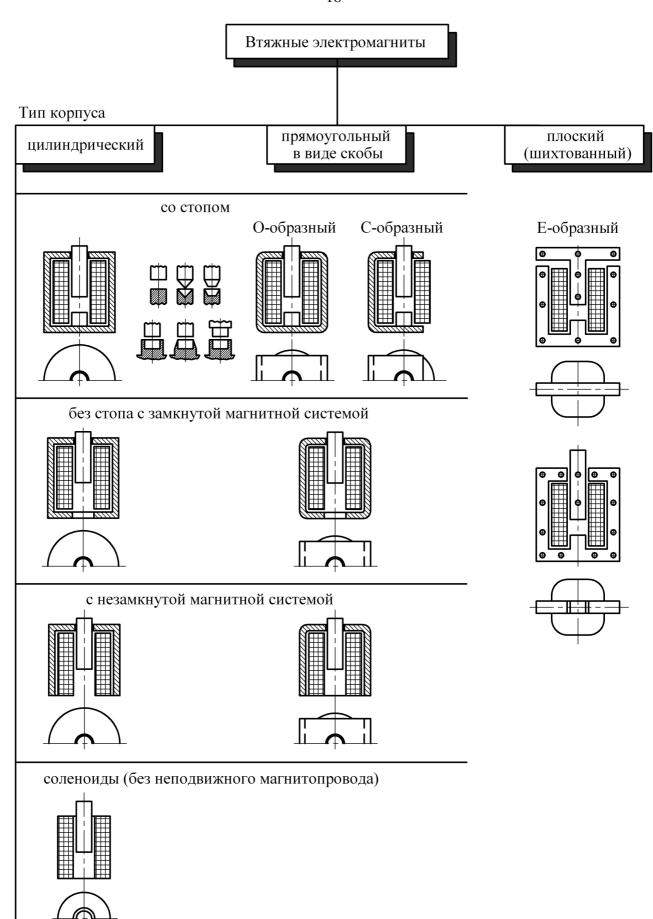


Рисунок 1.2 – Классификация втяжных электромагнитов

Особенностью конструкции магнитопроводов втяжных ЭМ является наличие развитого проходного фланца или воротничка. Магнитопровод может выполняться без воротничка (а), с внешним (б) или внутренним воротничком (в) (см. рисунок 1.3).

В качестве направляющей подвижного сердечника используются обычно втулки из немагнитного материала или воротничок из магнитомягкого материала.

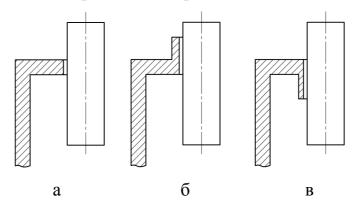


Рисунок 1.3 – Виды исполнений воротничков

В работе в основном исследованы ВБЭМ постоянного напряжения с цилиндрическим магнитопроводом и плоским стопом. Под ЭМ постоянного напряжения понимается питание обмотки от источника постоянного напряжения [61].

Характеристики электромагнитов, имеющих магнитопровод в виде прямоугольной скобы и цилиндрической формы, как правило, отличаются незначительно [135]. Поэтому все полученные математические модели могут быть применены и для электромагнитов с магнитопроводом в виде прямоугольной скобы.

1.2 Обзор и анализ методов проектного расчета втяжных броневых электромагнитов

Алгоритмы синтеза ЭМ и его МС строятся на методах расчета, в развитие которых большой вклад внесли ученые: Буль Б. К. [40÷42], Буль О.Б. [43÷47],

Любчик М.А. [96÷101], Пеккер И.И. [133÷138], Шоффа В.Н. [166, 167], Гордон А.В. [61], Сливинская А.Г. [61, 156, 157], Никитенко А.Г. [111÷124], Бранспиз Ю.А. [38, 39], Нейман В.Ю. [109], Сахаров П.В. [146], Лысов Н.Е. [95], Пик Р. [139], Витенберг М.И. [51] и многие другие [29, 34, 56, 109, 130 и др.]. Развитию электротехники и отечественного низковольтного аппаратостроения способствовали работы ученых Приволжского региона Федотова А.И., Ахазова И.З., Бугаева Г.А, Руссовой Н.В., Михайлова Н.М. и др.

Проектирование электромагнита сводится к определению геометрических размеров магнитной системы, которая при заданной противодействующей характеристике аппарата и при заданном режиме работы выполняла возложенную на нее функцию.

На основе анализа известных источников информации, посвященных методам расчета втяжных электромагнитов [51, 61, 99, 121, 146 и др.], можно выделить следующие подходы к их проектированию:

1. Традиционный подход заключается в последовательном решении задач синтеза-анализа [51, 61 и др.]. Обычно перед расчетом задаются рядом исходных величин (индукцией в рабочем зазоре, коэффициентами рассеяния и др.) и по ним вычисляют остальные характеристики и параметры ЭМ. При несовпадении полученных результатов с требуемыми проводят новый вариант расчета с измененными исходными значениями. В подобных методиках исчерпывающе представлена стадия анализа ЭМ, выбор же первоначальных геометрических размеров, т.е. синтез, развит слабее. Обычно для этого используют так называемый конструктивный фактор [61, 120, 146 и др.].

Недостатки традиционного подхода:

- упрощенный взгляд на распределение линий магнитного потока в системе для составления уравнений магнитной цепи, который в некоторых случаях, как будет показано ниже, может служить источником большой погрешности при расчете втяжных броневых систем;
- приближенный характер используемых формул для магнитных проводимостей, электромагнитной и магнитодвижущей силы (например, в [102]

отмечена неправомерность использования формулы Максвелла для расчета динамической электромагнитной силы броневых ЭМ в системах топливных форсунок);

- традиционное использование формулы Рихмана-Ньютона, что не оправдано для расчета теплопередачи в броневых осесимметричных магнитных системах [13];
- конструктивный фактор может быть использован для определенных значений условно-полезной работы $A_{\rm y\, II}=P_{_{\rm ЭМ.T}}\cdot \delta=11,\!5\kappa_{\it C}\cdot c_{\it M}$ и для превышения температуры нагрева обмотки $au_{_{{\rm доп}}}=70^{\circ}C$ в длительном режиме работы;
- составление схемы магнитной цепи и ее расчет с учетом сопротивления ферромагнитных участков МС и потоков рассеяния трудоемок и требует достаточных затрат времени.

Используются также эмпирические выражения для тягового усилия для конкретных типов электромагнитов, полученные на основе обработки опытных данных [51, 61, 157]. Но они приемлемы для предварительного расчета электромагнита определенной конструкции при ограниченном диапазоне варьирования размеров и при условии отсутствии насыщения магнитопровода.

2. Наиболее перспективен критериальный подход, при котором задаются относительными геометрическими размерами магнитопровода в долях определяющего размера и по ним определяются основные характеристики. Если рассчитанные характеристики далеки от требуемых значений, то конструкция подвергается существенной переработке и затем весь ход расчета повторяется до тех пор, пока не будет получен желаемый результат [100, 134, 135, 160]. Для задания размеров используют коэффициенты кратности [100, 160] или критерии подобия [134, 135], представляющие собой наиболее характерные отношения между основными размерами ЭМ.

К достоинству данного подхода можно отнести относительную простоту принятия начальных геометрических параметров системы за счет использования введенных коэффициентов кратности, диапазоны изменения которых для ряда

типовых конструкций ЭМ были получены на основе рекомендаций большого количества экспериментальных данных и приведены в [100].

Наиболее распространенной методикой является [100] методика, предложенная Любчиком М.А. Ей присущ ряд недостатков:

- применение упрощенной картины потокораспределения магнитного поля, заключающееся в предположении плоскопараллельности силовых линий поля внутри корпуса броневых магнитных систем, что неправомерно для длинноходовых ЭМ (см. рисунок 2.8);
- использование приближенной формулы для расчета электромагнитной тяговой силы;
- использование приближенной формулы для коэффициента теплоотдачи, предназначенного для открытой наружной поверхности обмотки, не применимой для броневых электромагнитных систем;
- падение магнитного напряжения в паразитных зазорах и ферромагнитных элементах магнитной системы выполняется за счет недостаточно обоснованного выбора коэффициента запаса;
- необоснованность использования результатов для расчета форсированного исполнения электромагнитов;
- использование большого количества таблиц, графиков и уточняющих коэффициентов, что повышает трудоемкость использования методики.
- 3. Численный подход основан на сведении задачи к математической, в ходе которой необходимо найти экстремум одного или нескольких критериев качества при заданных ограничениях: находит свою реализацию численными методами с помощью подготовки программы на компьютере.

Этот подход предложен первоначально в работах Батищева Д.И. [34] и получил свое развитие в работах Никитенко А.Г. [120]. Основным достоинством данного подхода можно считать возможность использования полевых методов расчета магнитных систем и упрощение их практического применения с помощью компьютеров. Недостатком следует считать необходимость написания программы

при проектировании новой конструкции, большие затраты времени при оптимизационных расчетах.

Данный подход становится основой многочисленных САПР [54, 103, 118 и др.] для расчета электромагнита и его основных узлов. Он наиболее нагляден при реализации, но требует наличия квалифицированного оператора-проектировщика.

Традиционный и критериальный подходы используют в своем решении формулы, структура которых позволяет наглядно оценить влияние конкретного параметра на выходную характеристику, поэтому анализ реализуется проще. Численные методы лишены данного свойства, но возможно его достижение при проведении совокупности численных расчетов [66].

На основе проведенного анализа можно выделить следующие признаки эффективной методики проектного расчета:

- 1) Простота проектного расчета, обеспечивающая обоснованность в соразмерностей MC принятии основных геометрических (реализуется определяющему ЭМ [100]). применением метода расчета по размеру Использование критериев геометрического подобия значительно упрощает процесс синтеза, распространяя данные исследования на ряд подобных конструкций ЭМ [100, 134, 138].
- 2) Для обеспечения качества расчета электромагнита необходимо обеспечить учет влияния каждого из конструктивных параметров на требуемые характеристики электромагнитов.

Выполнение данного условия довольно просто реализуется применением методологии теории постановки эксперимента [50, 73, 74, 75, 141 и др.] и получения моделей в виде полиномиальных зависимостей, реализующих функциональную связь между входными параметрами и выходными характеристиками ЭМ [74, 75, 141].

3) Представление моделей в виде полиномиальных зависимостей удобно при решении задач синтеза и анализа ЭМ [74]. Это относится также и к возможности подготовки оптимизационных расчетов ЭМ численными методами.

1.2.1 Обзор методов расчета магнитных и температурных полей электромагнитных систем

При проектировании ЭМ основной задачей является расчет его МС. При поверочном расчете необходимо провести анализ температурного поля ЭМ.

Многочисленные методы расчета физических полей ЭМ можно подразделить на две основные группы [37, 43, 47, 72, 141, 151, 164 и др.]:

1. Полевые методы реализуемые на основе теории электромагнитных и температурных полей.

Полевые методы подразделяются на аналитические и численные [43]. Аналитические методы позволяют проводить расчеты полей в некоторых частных случаях. При этом решения большинства практических задач получаются столь сложными, что оказываются мало пригодными для инженерных целей.

Численные методы, основанные на решении уравнений магнитного или температурного поля, сводимых предварительно к упрощенной форме с помощью различных допущений, находят сейчас самое широкое применение [66, 111]: метод конечных разностей (МКР) [94 и др.], метод конечных элементов (МКЭ) [63, 84, 88, 122, 128, 130, 132, 144, 169, 170, 185 и др.], метод вторичных источников (МВИ) [111, 124 и др.], метод граничных элементов (МГЭ) [111 и др.], метод конформных отображений [25 и др.], метод сопряжения конформных отображений [24], комбинированные методы [36, 37, 162 и др.] и др. [107].

Наибольшее применение нашли МКР и МКЭ [23, 43, 111, и др.], методы, основанные на интегральных уравнениях [23, 111], а также различные комбинированные методы [35, 36, 162]. Широко известны и имеют развитую теоретическую базу и хорошие примеры практической реализации два универсальных метода численного решения краевых задач МКР и МКЭ.

- МКР или метод сеток по своей идее прост и нагляден [43, 52, 105, 163]. Его суть заключается в замене производных в дифференциальных уравнениях поля конечно-разностными отношениями, для чего рассматриваемая область разбивается сеткой на достаточно большое количество ячеек. Обычно ячейки выбираются в виде квадратов. Погрешность метода заключается в самом методе

представления производных конечными разностями. Для увеличения точности применяют оптимальное построение сеток, применение вспомогательных сеток, но все это приводит только к усложнению метода.

- МКЭ основан на локальной аппроксимации решения кусочнополиномиальными функциями [43, 52 и др.]. Исследуемая область разбивается на сеть конечных элементов, для каждого из которых определяются коэффициенты полинома. Обычно для достижения этой цели используются методы вариационного анализа. МКЭ лучше аппроксимирует границы раздела сред, но он сложнее в алгоритмизации.

Кроме них следует отметить метод интегральных уравнений [23, 43, 111, 163] (вторичных источников), который сводит расчет поля в нелинейной неоднородной, анизотропной среде к расчету поля в однородной изотропной среде, созданному как первичными источниками — токами обмоток намагничивания, так и вторичными источниками — фиктивными объемными и поверхностными зарядами или токами.

Быстрота выполнения программы, построенной на каком-либо из численных методов, для одной и той же задачи может сильно отличаться для различных его реализаций.

2. Цепные методы сводят расчет поля к расчету магнитной или тепловой схемы замешения.

Суть введения схем замещения следует непосредственно из метода конечных разностей [163]. Уравнение Пуассона для грубой сетки с различными шагами приводится к магнитному закону Кирхгофа.

Цепные методы расчета МС можно подразделить по типу решения общего уравнения магнитной цепи ЭМ на: аналитические [43, 47, 61], численные (метод участков, в том числе с помощью коффициентов рассеяния, интервальный метод стрельбы и др.) [43, 61, 110, 175, 186]; графоаналитический [95, 160]; метод двойного графического интегрирования [61] и т.д.

Соответствие схемы замещения реальной магнитной системе зависит от того, насколько соответствует действительности априорная картина поля, на

основании которой строилась схема замещения. Имеет значение также, по каким формулам определяется проводимость трубки потока. Магнитные проводимости воздушных промежутков в общем случае определяются с помощью [43, 47, 61, 153] простых фигур (метод вероятных путей потока) [43, 47], модифицированным методом Ротерса [153], картин поля, построенных вручную или на проводящей бумаге [43, 47], или путем экспериментальных исследований, результаты которых обобщены применением теории подобия [43, 61, 153].

В методе эквивалентных тепловых схем, основанном на приближенном представлении распределения тепловых потоков в электромагнитном устройстве и составлении тепловой схемы с помощью тепловых сопротивлений [41, 68 и др.], основным недостатком является то, что он не дает полной картины распределения температурного поля, а только средние значения превышения температур.

Как частный случай этого метода можно рассмотреть метод одномерного температурного поля [41, 136], основанный на упрощении распределения тепловых потоков в обмотке только вдоль одной оси. Этому подходу присущи следующие недостатки: рассматривается одномерное температурное поле обмотки; не учитывается передача тепла магнитопроводом.

Следует отметить работу [158], в которой предлагается упрощенное решение уравнения Пуассона, основанный на принципе элементарной суперпозиции. По предлагаемому методу реальное двухмерное температурное поле катушки при заданной интенсивности внутренних источников тепла является совокупностью двух одномерных тепловых полей: радиального температурного поля при теплоизолированных торцах катушки и продольного температурного поля при теплоизолированных боковых поверхностях катушки.

Во многих случаях замена реального двухмерного температурного поля в катушках одномерным приводит к значительной погрешности [158].

Общим недостатком цепных методов является необходимость принять определенную схему потокораспределения в системе (составить ее электрическую схему замещения). Практически во всех названных методиках схемы замещения не зависят от соразмерностей в МС и положения якоря. Отмеченные

обстоятельства определяют повышенную погрешность получаемых электромагнитных характеристик.

Общим недостатком рассмотренных выше численных подходов является сложность и громоздкость, большие затраты вычислительного времени [72], трудоемкость математического описания и программной реализации. Они не носят систематизированного обобщенного характера, что затрудняет их использование для решения проектных задач.

Не следует обходить вниманием возможность использования современных программ конечно-элементного анализа, позволяющих провести расчет полей для различных типов MC.

1.2.2 Обзор программ конечно-элементного анализа

Рассмотрим наиболее известные конечно-элементные компьютерные программы.

ANSYS – это один из самых известных, универсальных пакетов моделирования и анализа процессов различных областей техники, построенный на основе МКЭ [174], содержащий для решения задач низкочастотного электромагнетизма (электродвигатели, реле, электромагниты и т.д.) продукты ANSYS Emag и ANSYS Multiphysics.

Для примера на рисунке 1.4 показаны картины трехмерной модели броневого электромагнита при его расчете в ANSYS Emag.

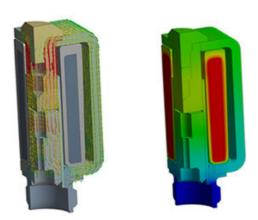


Рисунок 1.4 – Пример анализа броневого электромагнита в ANSYS Emag ANSYS Mechanical-Emag Coupled Electromagnetic-Thermal Analysis

ANSYS Multiphysics, включает в себя весь пакет ANSYS Emag, а также и другие пакеты для решения тепловых, прочностных и других физических задач, также позволяет проводить решения задач высокочастотного анализа.

Ansoft Maxwell 2D/3D — это программный пакет, предназначенный для решения двухмерных и трехмерных электромагнитных задач методом МКЭ с возможностью реализации статических, квазистатических при переменном токе и переходных процессов, дополнительно оснащенный инструментами теплового анализа, параметрического моделирования и оптимизации. Пример картины распределения магнитного потока в соленоиде, полученный в результате расчета в Maxwell 3D, показан на рисунке 1.5 [174]. Ansoft Maxwell проще в освоении вышеприведенного аналога ANSYS Emag.

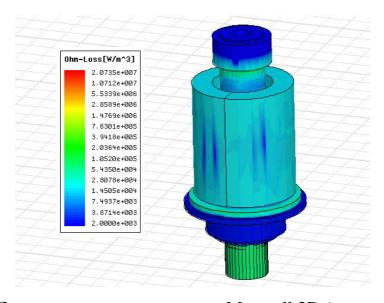


Рисунок 1.5 – Пример расчета соленоида в Maxwell 3D (рассчитаны вихревые токи и показаны диэлектрические потери)

После поглощения корпорации Ansoft компанией ANSYS произошло объединение программ Ansoft Maxwell и пакета ANSYS в бэта-версии ANSYS v.14. на платформе ANSYS Workbench, в которой возможно проведение связанного многодисциплинарного анализа.

COMSOL Multiphysics (Femlab) – это конечно-элементный пакет программ, позволяющий проводить анализ различных физических и инженерных задач, под

которые написаны специальные отдельные модули, взаимодействие между которыми обеспечивают также решения связанных задач [177]. Решение любой задачи в COMSOL основано на постановке и решении систем дифференциальных уравнений в частных производных, которые необходимо описать заранее.

Ha рисунке 1.6 показаны возможности оптимизации в COMSOL Multiphysics [181].

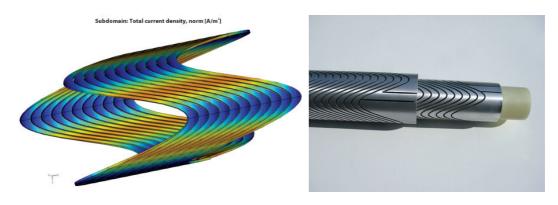


Рисунок 1.6 – Оптимизированная конструкция магнита в COMSOL Multiphysics лабораторией AML (США) с повышенной удельной мощностью и улучшенными характеристиками производимого электромагнитного поля

GMSH+GETDP позволяет решать различные полевые задачи, имеющий ручной и графический ввод геометрии, но требующий программирования процесса вычисления [176].

COSMOS представляет из себя модульную систему конечно-элементного анализа, которая позволяет рассчитывать прочностные, тепловые, электромагнитные задачи, а также проблемы гидромеханики [178].

Все вышеописанные программные пакеты трехмерного моделирования труднодоступны из-за своей дороговизны. Из двумерных пакетов можно отметить следующие:

ELCUT, QuickField, используемые для расчета плоскопараллельных и плоскомеридианных электромагнитных, тепловых и механических задач методом МКЭ [179, 180]:

- электростатики,

- линейной и нелинейной магнитостатики,
- протекания электрического тока,
- вихревых токов в синусоидальном магнитном поле,
- линейной и нелинейной теплопроводности,
- напряженно-деформированного состояния механических конструкций.

Программа обеспечивает решение и связанных задач посредством применения данных расчета одной задачи в исходных данный другой.

Программа QuickField представляет собой англоязычную версию ELCUT.

На рисунке 1.7 показан результат использования пакета при решении магнитостатической задачи [57].

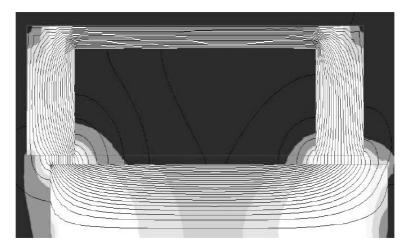


Рисунок 1.7 – Картина магнитного поля в ELCUT. Распределение магнитного потока

FEMM (Finite Element Method Magnetics), это пакет предназначенный для решения методом МКЭ задач магнитостатики и электростатики, а также квазиустановившегося переменного магнитного поля [183].

Расчет двухмерных магнитных полей в FEMM отличает, прежде всего, простой в использовании графический интерфейс, отсутствие ограничений по размерности решаемых задач, возможность автоматизации многократного анализа, с помощью lua-скриптов, а также ее доступность [43, 71].

Расчеты электромагнитных характеристик для втяжных электромагнитов с плоскомеридианным магнитным полем в программной среде FEMM спешно

могут служить заменой дорогостоящим экспериментальным исследованиям [151]. В силу указанных причин мы остановили наш выбор на программе FEMM.

Недостатком же является расчет только квазистационарных магнитных полей, что ограничивает возможность применения программы, например, для анализа переходных процессов в магнитной системе, в которой ток изменяется не по гармоническому закону. Указанный проблема решается с помощью lua-скрипта, выполняющегося программными средствами FEMM, который будет описан ниже.

1.2.3 Описание вычислительного пакета FEMM и оценка его достоверности

Для работы в FEMM необходимо запустить исполняемый файл (femm.exe). В открывшемся окне с помощью инструментов или операцией импорта dxf-файла строится эскиз исследуемой МС из точек и линий, определяются свойства материалов, задаются границы и токовые параметры. Затем запускается процессор (нажатием кнопки или специальным оператором в lua-скрипте), после окончания работы которого можно запустить постпроцессор, для которого открывается новое окно, где можно построить картины линий магнитного потока, определить необходимые характеристики и параметры.

Недооцененность и достоверность программы отмечена во многих работах [29, 33, 38, 39, 45, 53, 84, 104, 109, 184 и др.].

Чтобы оценить достоверность расчетов программы FEMM, нами был проведены опыты для сравнения результатов расчета электромагнита в программе FEMM с уже известными данными [78], полученными экспериментально для электромагнита, показанного на рисунке 1.8.

Результаты расчета электромагнитного тягового усилия $P_{_{\rm 9M.T}}$ при определенном значении воздушного рабочего зазора δ показаны в таблице 1.1 (значения округлены). Графическое представление данных таблицы 1.1 дано на рисунке 1.9.

Можно утверждать, что программа FEMM дает хорошее совпадение с экспериментальными данными, причем расхождения расчета в среднем не превышают 4,2 %.

Таблица 1.1 – Сравнительные данные анализа достоверности программы FEMM

Экспериментальные	δ , mm	1	1,5	2	3	4	5	6
данные	$P_{\scriptscriptstyle{\mathrm{ЭМ.T}}}$, H	394	262	180	91	56,3	38	26,5
Данные, полученные	δ , mm	1	1,5	2	3	4	5	6
в программе FEMM	$P_{\scriptscriptstyle \mathrm{3M.T}},\mathrm{H}$	401,6	254,5	171,5	91,5	56,4	40	29,6
Относительное	Δ , %	1,9	2,9	4,7	0,5	0,2	5,3	11,7
расхождение	 , ~~	1,97	2,>	.,,	0, 2	· •,2	2,3	11,7

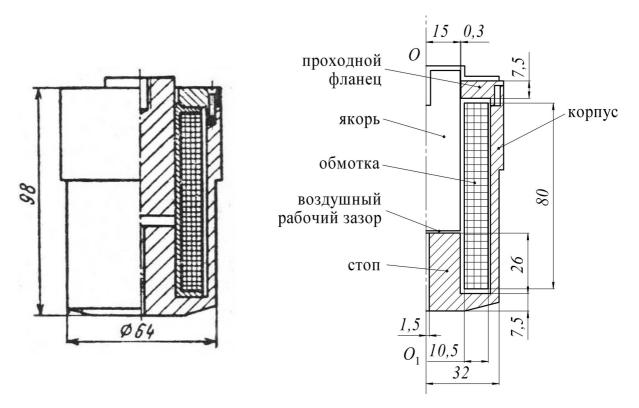


Рисунок 1.8 – Внешний вид электромагнита и его эскиз в программе FEMM с обозначенными основными размерами

Последняя версия 4.2 позволяет кроме магнитных и электростатических задач проводить расчет стационарных линейных температурных полей методом конечных элементов [183]. В [125] показано, что отличие экспериментальных данных от результатов теплового расчета двигателя при использовании программы FEMM не превышает 4,29 процента.

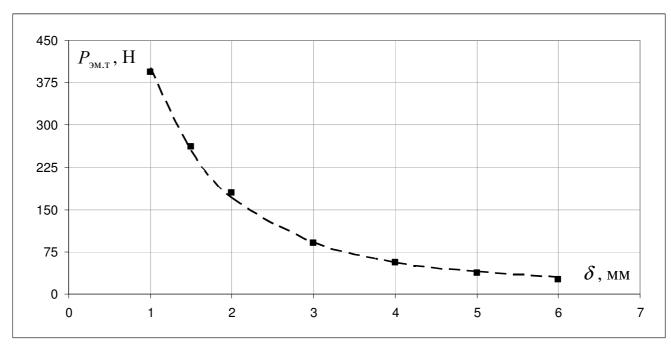


Рисунок 1.9 – Тяговые характеристики, полученные экспериментально (точки) и помощью программы FEMM (пунктирная линия)

В работе [184] был поставлен специальный эксперимент для оценки погрешности расчета температуры решателем FEMM, в результате которого показано, что она не превышает 5 процентов.

В программе нелинейное стационарное электромагнитное поле решается с помощью уравнения Пуассона [30, 130, 183]:

$$\operatorname{rot} \frac{1}{\mu} \operatorname{rot} \overline{A} = \mu_0 \overline{J} ,$$

с граничными условиями Неймана

$$\frac{\partial A}{\partial n} = 0$$

и асимптотическими граничными условиями Робина для моделирования бесконечно удаленной границы

$$\frac{\partial A}{\partial n} + cA = 0,$$

где \overline{A} , A — вектор-потенциал и его составляющая вдоль нормали n к поверхности;

 \overline{J} – вектор плотности тока;

с – коэффициент, зависящий от радиуса дуги окружности границы [43];

 μ – относительная магнитная проницаемость среды моделирования;

 μ_0 – магнитная постоянная.

Электромагнитная тяговая сила определяется как z-компонента силы, действующей на якорь, вычисляемой по выражению для средневзешенного тензора натяжения Максвелла в цилиндрической системе координат [29, 43]:

$$P = \iint_{S} \left(-0.5(H_r B_r + H_z B_z)\right) \cdot \mathbf{n}_z \cdot dS + \iint_{S} \left(\left(\mathbf{n}_r H_r + \mathbf{n}_z H_z\right) B_z\right) \cdot dS,$$

где ${\bf n}_r,\ {\bf n}_z$ — компоненты вектора внешней нормали к поверхности якоря S .

Тепловые задачи для электромагнитов в FEMM рассчитываются на основе общего дифференциального уравнения теплопроводности [88, 122, 170], которое для стационарного теплового поля превращается в уравнение Пуассона:

$$\operatorname{div}(\lambda \cdot \operatorname{grad} T) = -q,$$

с граничными условиями, учитывающими конвективный теплообмен,

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} + h(T - T_0) = 0,$$

где q — удельная объемная плотность мощности;

 λ – коэффициент теплопроводности в текущей точке расчетной области; T(x,y) – искомая функция распределения температуры;

h — коэффициент теплоотдачи конвекцией в окружающую среду с температурой T_0 ;

n — нормаль к внешней теплоотдающей поверхности.

1.2.4 Выбор способа представления статических характеристик втяжного электромагнита постоянного напряжения

На основе проведенного анализа сведений из источников информации, для получения математических моделей основных характеристик ЭМ рекомендуется использовать теорию подобия [50, 58, 61, 65, 73÷77, 85, 106, 134, 135, 138, 167, 168] и теорию планирования эксперимента [50, 73, 75, 141 и др.], позволяющих

получить конечные уравнения проектирования в максимально приспособленной форме к выполнению синтеза ЭМ.

Обработка результатов, полученных в программной среде FEMM, выполненная по стандартной процедуре [73, 141], позволяет получить уравнения в виде отрезков рядов:

$$Y = \left(a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i + \sum_{\substack{i=1\\j>i}}^n a_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^n a_{ii} x_i^2 + \dots\right)^k,$$

где a_0 , a_i , a_{ii} , a_{ii} – коэффициенты;

i, j – номера независимых факторов;

n — число независимых факторов;

 x_i , x_j – кодированное значение факторов эксперимента;

k — подбираемый показатель степени, используемый для повышения точности аппроксимации [73] экспериментальных данных.

Факторы эксперимента и исследуемые функции цели для их распространения на подобные МС представляются в виде безразмерных величин [50, 65, 73÷75, 106, 138, 141, 167, 168].

Исследования [65, 95, 106, 134] показывают, что в электромагнитах по различным причинам не могут быть одновременно достигнуты геометрическое и физическое (механическое, электромагнитное, тепловое) подобия. Главная из них – несоответствие между количеством выделяемого в обмотке тепла и величиной ее теплоотдающей поверхности при пропорциональном изменении всех геометрических размеров электромагнита.

Подобия теплового, означающего неизменность превышений температур обмотки в соответствующих точках пространства, достигать нецелесообразно, так как полученные безразмерные модели не смогут быть применены для расчета электромагнитов в разных режимах работы, а также в схемах форсированного управления.

Главным условием приближенного магнитного подобия МС будут одинаковость значений магнитной индукции в соответствующих точках пространства, а также идентичность относительных магнитных проницаемостей магнитопроводов, т.е. кривых намагничивания их материалов. Поэтому одним из факторов является значение магнитной индукции $B_{\rm m}$ в наиболее нагруженном сечении магнитопровода электромагнита [26, 77, 95].

В работах Пеккера И.И., Гурницкого В.Н., Шоффы В.Н. и других авторов [65, 99, 134, 167] предложены различные безразмерные выражения для электромагнитной силы. Все они содержат в себе в качестве составляющих численные комплексы, зависящие от теплового состояния обмотки электромагнита, поэтому не удовлетворяют выбранным условиям.

Представим исследуемые электромагнитные целевые функции, зависящие от безразмерных геометрических критериев подобия и размерного значения магнитной индукции $B_{\rm m}$, в виде безразмерной функции

$$Y_* = \frac{Y}{Y_{\text{6a3}}} = Y_*(x_1, x_2, x_3, \dots, B_m),$$

где $Y_{\rm баз}$ — выбранное базисное значение целевой функции, выражение для которого подбирается таким образом, чтобы соблюдалась размерность характеристик;

 $x_{\rm i}$ — критерии геометрического подобия, где за базисный размер принимается диаметр сердечника электромагнита $d_{\rm c}$ [100, 120, 134, 141, 167 и др.];

 $B_{
m m}$ — значение магнитной индукции в наиболее нагруженном сечении магнитопровода втяжного электромагнита.

Функции цели тепловых характеристик представлены в относительных единицах следующим образом:

$$Q_* = \frac{Q}{T_0} = Q_*(x_1, x_2, x_3, ..., T_0),$$

где $T_{\rm o}$ – температура окружающей среды.

1.3 Анализ методов расчета и моделирования динамических процессов втяжных электромагнитов

Методики характеристик расчета динамических электромагнитных механизмов предложены Сливинской А.Г. [156], Свинцовым Г.П. [147, 149, 150], Софроновым Ю.В. [149, 150], Коцем Б.Э. [90], Клименко Б.В. [83, 86], Булем О.Б. [45, 46], Байдой Е.И. [29, 30], Карасевым В.А. [79, 80], Гараниным А.Ю. [55], Гурницким В.Н. [65], Шаповаловым О.А. [59], Пеккером И.И. Лысовым Н.Е. [95], Никитенко А.Г. [119, 120], Лобовым Б.Н. [92], Павленко А.В. [126, 129, 130], Гринченковым В.П. [63, 64], Ершовым Ю.К. [67] и многими другими [139, 160, 173 и др.]. Они различаются принятыми методами решения дифференциальных уравнений динамических процессов, принимаемыми допущениями о магнитном поле электромагнита, возможным учетом влияния вихревых токов и гистерезиса материала магнитопровода на динамические характеристики электромагнита, полнотой учета препятствующих сил, перемещению якоря, разными путями для определения потокосцепления от тока при различных положениях якоря, учетом условий внешней среды и т.д.

Известная математическая модель, описывающая динамику приводных электромагнитов, представляет собой систему нелинейных дифференциальных уравнений [61]:

Уравнение электрической цепи обмотки ЭМ

$$U = iR + \frac{d\Psi}{dt} \; ; \tag{1.1}$$

Уравнение характеристики намагничивания ЭМ

$$\Psi = f_1(i, x); \tag{1.2}$$

Уравнение силы электромагнитного притяжения

$$P_{\text{\tiny 3M,T}} = f_2(i,x);$$
 (1.3)

Уравнение движения подвижной части ЭМ

$$m\frac{\mathrm{d}^2 x}{\mathrm{d}t^2} = P_{_{\mathrm{3M.T}}} - P_{_{\mathrm{IIp}}}(x) - P_{_{\mathrm{c}}}\left(\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}\right). \tag{1.4}$$

Здесь U — напряжение источника питания;

i, Ψ – мгновенное значение тока в обмотке и ее потокосцепления;

R – активное сопротивление в цепи обмотки;

x — координата положения якоря;

 $P_{_{_{_{2M}}}}$ — электромагнитное тяговое усилие;

m — масса подвижных частей, приведенная к якорю;

 $P_{\text{пр}}$ – противодействующая сила, являющаяся функцией положения якоря;

 $P_{\rm c}$ — противодействующая сила, являющаяся функцией скорости V движения якоря;

t – время.

Решение этой системы $(1.1) \div (1.4)$ позволяет получить искомые динамические характеристики (ДХ): зависимости тока i(t), потокосцепления $\Psi(t)$, силы притяжения $P_{_{\rm ЭМ.Т}}(t)$, перемещения x(t), скорости движения якоря V(t) и т.д. от времени.

При рассмотрении существующих подходов к определению ДХ можно выделить важную проблему расчета магнитного поля системы в данный момент времени, которая усложняется присутствием вихревых токов, нелинейной зависимостью намагничивания материала магнитопровода МС и т.д. Поэтому многие авторы, выдерживая необходимую точность при расчетах, используют приближенные методы расчета магнитного поля [55, 80, 81, 139, 161, 173 и др.], графоаналитические методы [95], проводят экспериментальные исследования [145, 156, 161], ставят вычислительный эксперимент [27, 147, 149], либо используют расчетные подходы описания ДХ, основывающиеся на методах численного анализа [29, 46, 60 и др.].

Некоторыми авторами [114, 116, 117, 120 и др.] метод расчета динамики скомбинирован алгоритмически с поиском экстремума определенного критерия оптимальности с помощью решения задачи методами нелинейного программирования.

Немаловажными при описании ДХ являются критерии подобия, которые позволяют распространить исследования на ряд подобных электромагнитов, обобщить результаты математического моделирования.

1.3.1 Методы расчета динамических процессов электромагнитов

Анализ литературы показал, что многими авторами приводится различные подходы к классификации методов анализа динамических процессов. В целом целесообразно выделить три характерных подхода к расчету динамических параметров работы электромагнитов:

1) Аналитические методы решения уравнений динамики.

Они основаны на приближенном решении дифференциальных уравнений МС, которое заключается в принятии различных допущений, упрощающих исходное уравнение и позволяющее его решить методами классической математики [160, 139, 173]: метод интегрируемой нелинейной аппроксимации [81], метод кусочно-линейной аппроксимации [55, 90], метод последовательных приближений, методы расчета с применением преобразований Тейлора, методы Галеркина и Ритца, метод последовательных интервалов, графоаналитический метод Лысова [95], метод, основанный на графическом подсчете определенного интеграла и т.д.

Коцом Б.Э. предложен метод для расчета насыщенных магнитных цепей электромагнитов постоянного тока [89] на основе использования дифференциального уравнения [61] общего уравнения магнитной цепи, которое представляет из себя закон изменения величины магнитного потока $\Phi_{\rm x}$ по длине магнитопровода x (для втяжного электромагнита она будет равна длине обмотки)

$$\frac{d^2\Phi_{x}}{dx^2} - \Phi_{x}R_{MX}g + fg = 0, \qquad (1.5)$$

где $R_{\rm mx}$ — суммарное магнитное сопротивление единицы длины сердечника и корпуса в рассматриваемом месте магнитной цепи;

g – полная удельная проводимость рассеяния магнитной цепи;

f — удельная магнитодвижущая сила обмотки, равномерно распределенной по длине сердечника.

Из (1.5) выводятся приближенные выражения для определения потока $\Phi_{\rm x}$ с помощью допущения о малом расхождении реальной и линеаризированной кривой намагничивания в рабочем диапазоне насыщенных магнитных систем, зависящие от величины рабочего зазора δ , геометрических размеров и характеристики намагничивания материала магнитопровода, что позволяет свести решение к аналитическому. При выводе выражений принимаются допущения о плоскопараллельности магнитного поля потоков рассеяния, о линейности кривой намагничивания в рабочем диапазоне насыщенных магнитных систем, т.е. на колене и за коленом кривой намагничивания.

В [55] предложена методика расчета динамических характеристик втяжного электромагнита постоянного тока цилиндрической формы с учетом магнитного сопротивления стали. Используя принятую в [56] математическую модель электромагнита и полученные на ее основе уравнения магнитного поля, выведенные при допущениях, что в области рабочего воздушного зазора учитывается только аксиальная слагающая магнитного потока, а в областях, занятых обмотками, – только слагающие потока, нормальные оси магнитной системы, область рабочего воздушного зазора рассматривается как участок якоря, отличающийся от него только магнитной проводимостью, а в пределах каждого из участков отрезок кривой намагничивания заменяется отрезком прямой, наклон которой определяется максимальным и минимальным значением индукции и напряженности на каждом из участков. Это позволяет получить аналитические выражения для потокосцепления и его производных по току и рабочему воздушному зазору в функции размеров и степени насыщения участков магнитной системы. Благодаря линеаризации кривой намагничивания магнитная система становится линейной и уравнение (1.1) можно выразить индуктивность обмотки [56]:

$$U = iR + L\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} + \frac{\mathrm{d}\Psi}{\mathrm{d}\delta}\frac{\mathrm{d}\delta}{\mathrm{d}t}.$$
 (1.6)

Алгоритм расчета ДХ [55] заключается в пошаговом определении $\mathrm{d}i$ из уравнения (1.6) при известных геометрических размерах и обмоточных данных ЭМ при заданном изменении времени $\mathrm{d}t$.

2) Методы численного расчета динамики.

Существующие численные методы расчета динамических процессов можно достаточно просто подразделить по виду расчета магнитного состояния системы на каждом временном шаге. Расчет магнитной системы проводится цепными [45, 64, 80, 92, 113, 131, 139, 173], полевыми [29, 30, 36, 67, 126, 127, 130, 140] методами или их комбинацией [57].

Подход с использованием методов теории магнитных цепей является самым распространенным на сегодняшний день способом расчета динамики ЭМ. Основной сложностью является расчет потокосцепления (1.2) [117]. Практически $\Psi = f_1(i,x)$ рассчитывают, сводя расчет к магнитной цепи с распределенными параметрами [33, 62, 64, 97, 116, 117] с различными уровнями допущений: с учетом или без вихревых токов, с учетом нелинейности стали или без, с учетом рассеяния или без. Система дифференциальных уравнений (1.1)÷(1.4) решается обычно численными методами интегрирования, такими как метод Эйлера, метод Рунге-Кутта и т.п.

В [116] вводится постоянная времени электромагнитной системы $T_{_{3}}$, которая является соотношением индуктивности, определяемой только проводимостью воздушного рабочего зазора и омического сопротивления. В результате чего система дифференциальных уравнений принимает следующий вид:

$$\begin{cases} I_{y} = i \left(1 + \frac{\mathrm{d}T_{9}}{\mathrm{d}t} \right) + T_{9} \cdot \frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}; \\ P_{\text{\tiny 9M}} = \frac{i^{2} \cdot U}{2 \cdot I_{y}} \cdot \frac{\partial T_{9}}{\partial x}; \\ \frac{\mathrm{d}T_{9}}{\mathrm{d}t} = \frac{\partial T_{9}}{\partial x} \cdot \frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}. \end{cases}$$

В [45, 46] предлагается методика расчета динамики включения электромагнита постоянного тока с использованием системы MathCAD с помощью встроенного в эту программу метода Рунге-Кутта. Учитываются сопротивление магнитопровода, потоки рассеяния и выпучивания, все немагнитные зазоры, вес якоря электромагнита, сухое трение и демпфирование, вибрация при ударе якоря о полюсный наконечник. Не учитываются вихревые токи в магнитопроводе, гистерезис его материала, вибрация контактов после их соударения.

Исходные дифференциальные уравнения:

$$\begin{cases} U = i(x, \Psi)R_{\Gamma} + \frac{d\Psi}{dt} ; \\ m\frac{d^{2}x}{dt^{2}} = P_{\text{\tiny 3M.T}}(x, \Psi) - P_{\text{m}}(x) - P_{\text{mh1}}(x) - P_{\text{mh2}}\left(x, \frac{dx}{dt}\right) - P_{\text{mh3}}\left(\frac{dx}{dt}\right), \end{cases}$$

где $R_{\scriptscriptstyle \Gamma}$ – сопротивление обмотки в нагретом состоянии;

 $P_{\rm m}(x)$ – функция зависимости силы веса якоря от x;

$$P_{
m mh1}(x)$$
, $P_{
m mh2}\!\!\left(x,rac{{
m d}x}{{
m d}t}
ight)$, $P_{
m mh3}\!\!\left(rac{{
m d}x}{{
m d}t}
ight)$ — функции зависимостей сил механизма,

противодействующих электромагнитной, от x и V .

Методы расчета с использованием уравнений теории поля [116], опирающиеся на математический аппарат теории электромагнитного поля и возможности современных ПЭВМ, являются наиболее перспективными. Следует отметить, что их реализация для электромагнитов возможна лишь для относительно простых случаев их конструкции при достаточно грубой дискретизации поля. Обычно система уравнений (1.1)÷(1.4) дополняется уравнениями, описывающими электромагнитное поле [63].

В [117] рекомендуется получать уравнения характеристики намагничивания электромагнита, реализующее наиболее полное влияние параметров ЭМ на его ДХ, численными методами расчета магнитного поля, например методами конечных элементов или комбинированным методом конечных и граничных элементов.

В [63, 126, 128, 130, 132, 140] динамика ЭМ описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений для расчета магнитного поля ЭМ, дополненных уравнениями движения якоря:

$$\int \operatorname{rot} \overline{H} = \overline{j}; \operatorname{div} \overline{B} = 0;$$

$$\overline{B} = \mu \overline{H}; \operatorname{rot} \overline{E} = -\frac{\partial \overline{B}}{\partial t} + \operatorname{rot} (\overline{v} \times \overline{B});$$

$$\overline{j} = \gamma \overline{E}; \overline{P_{\text{\tiny 9M}}} = \frac{1}{\mu_0} \oint_L \left(\overline{Bn} \right) B - \frac{1}{2} B^2 \overline{n} \right] dl;$$

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = P_{\text{\tiny 9M,T}}(t) - P_{\text{\tiny IIP}}(x) - P_{\text{\tiny C}} \left(\frac{dx}{dt} \right),$$
(1.7)

где \overline{H} – вектор напряженности магнитного поля;

 \bar{j} — вектор плотности тока, включающий в себя токи как в намагничивающих катушках, так и индукционного происхождения;

 \overline{B} – вектор индукции магнитного поля;

 \overline{E} – вектор напряженности электрического поля;

 γ , μ – электропроводность и магнитная проницаемость среды;

l, $\mathrm{d}l$ — контур, и элемент контура интегрирования, ограничивающий якорь;

 \overline{n} – внешняя нормаль.

Применяя к (1.7), после введения векторного потенциала $\overline{B} = \operatorname{rot} \overline{A}$, принцип Галеркина в сочетании с методом конечных элементов, имеем систему нелинейных дифференциальных уравнений первого порядка $[S]\{A\}+\{V_{\scriptscriptstyle B}\}+\{P\}=\{C\}$, где [S] — матрица коэффициентов, характеризующих геометрию и магнитные свойства среды расчетной области; $\{A\}$ — вектор магнитных векторных потенциалов узлов расчетной сетки; $\{C\}$ — вектор токов намагничивающих катушек; $\{V_{\scriptscriptstyle B}\}$ — вектор вихревых токов; $\{P\}$ — вектор токов, определяемых условиями нормировки.

Затем эта система уравнений после замены производной векторного потенциала конечной разностью $\frac{\mathrm{d}A}{\mathrm{d}t} = \frac{A^t - A^{t-\Delta t}}{\Delta t}$ сводится к системе нелинейных

алгебраических уравнений, решаемых любым численным методом, в результате чего определяются значения векторного потенциала в узлах выбранной сетки.

Общий алгоритм решения ОНЖОМ описать следующим образом. Определяются начальные условия, а именно значения векторного потенциала в узлах решетки, на которую разбивается расчетная область. По эти данным рассчитывается стационарное магнитное поле, соответствующее начальному (для данного шага интегрирования) значению тока в обмотках, и соответствующее ему электромагнитной которое сравнивается силы $P_{\rm \tiny 2M,T}$, противодействующей силой $P_{\text{пр}}$. При $P_{\text{эм.т}}(t) \ge P_{\text{пр}}(x,V)$ начинается процесс интегрирования уравнений движения системы. На каждом временном интервале определяются скорость движения V и перемещение якоря x. При движении якоря происходит уменьшение величины воздушного зазора и деформация конечно-элементной сетки этого участка расчетной области. Нелинейные свойства ферромагнитного материала учитываются его основной кривой намагничивания, которая аппроксимируется кубическим сплайном.

Значение тока в обмотке намагничивания для следующего шага определяется решением уравнения для ее электрической цепи при известном значении статической индуктивности. Формально безразлично, считать ли токи известными или определяемыми существующим распределением поля, т.е. включая в себя и вихревые токи [140].

На каждом шаге производится расчет характеристик электрического поля вихревых токов, дифференциальные характеристики нестационарного магнитного поля, на основе которых ОНЖОМ получить интегральные параметры, определяющие рабочие характеристики – магнитные потоки, потокосцепления обмоток, электромагнитные силы взаимодействия подвижных магнитной системы. Рассмотренный алгоритм автоматизирован с помощью известных языков программирования и реализован в виде пакета программ для ПЭВМ ІВМ РС.

В [29, 30] реализуется решение уравнений динамики через систему, объединяющую уравнения для электрической цепи и электромагнитного поля ЭМ, рассчитываемого методом конечных элементов:

$$\begin{cases}
\operatorname{rot}\left(\frac{1}{\mu}\cdot\operatorname{rot}\overline{A}\right) + \sigma \cdot \frac{\partial \overline{A}}{\partial t} = \overline{J}_{st}; \\
u = r \cdot i + L_{s} \cdot \frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} + \frac{w}{S} \cdot \int_{S} \int_{l}^{\Delta} \frac{\partial \overline{A}}{\partial t} \cdot \mathrm{d}\overline{l} \cdot \mathrm{d}S,
\end{cases} (1.8)$$

где $L_{\rm s}$ – индуктивность рассеяния катушки.

Система (1.8) дополняется начальными и граничными условиями.

3) Экспериментальные методы определения динамических характеристик и параметров описаны в [133, 145, 156, 161].

Отметим методы, использующие критериальные уравнения, полученные методами активного эксперимента [27, 147, 149]. В качестве факторов используются безразмерные критерии подобия динамических процессов срабатывания ЭМ [27, 147, 149]. За функции цели принимаются значения относительных скоростей и времен движения якоря, которые измерялись экспериментально.

В [103] показано, что применение программ на основе численных методов не всегда оправдано из-за сложности подготовки и задания исходных данных (необходимо указать границы областей, параметры источников поля и свойств материалов), что предполагает наличие высококвалифицированных специалистов-программистов. Другим недостатком точных, но громоздких и сложных численных методов расчета электромагнитов, использующих теорию поля, является относительно большое время расчета, даже при применении современных ПЭВМ. Это связано с тем, что при создании на их основе программ необходимо использовать итерационные операции. Учитывая, что при расчете большого количества вариантов конструкции электромагнита, которые нужны для проведения специалистом экспертной оценки полученных результатов и выбора оптимального варианта, время подготовки исходных данных и расчета каждого варианта приобретает существенное значение.

Решающим условием в таком случае становится использование методов теории подобия и активного эксперимента, применение которых вкупе с конечно-элементной программой, ориентированной на задачи анализа, позволит получить математические модели, обладающие свойствами простоты использования и легкости задания исходных данных при расчете динамических параметров ВБЭМ. Под динамическими параметрами ВБЭМ понимается значение ДХ, фиксируемое в характерных точках движения его подвижных частей.

1.3.2 Критерии подобия динамических процессов электромагнитов

Критерии подобия динамических процессов используются в качестве факторов регрессионного анализа, проводимого по теории планирования эксперимента. Это позволяет получить результаты в достаточно обобщенном виде, которые можно распространить на ряд подобных явлений, а также сократить число независимых переменных в опыте [59, 138].

Пеккером И.И., Глуховым В.П., Шаповаловым О.А., Свинцовым Г.П., Софроновым Ю.В. были предложены собственные комплексы критериев подобия для описания динамических процессов при включении приводного ЭМ.

Динамические процессы электромагнитного механизма переменного напряжения описываются критериями подобия, предложенными в [138]:

$$\frac{U}{N} \frac{1}{\omega \mu_0 K_3 \delta_{\text{H}}^3} = \text{idem}, \quad \frac{mx}{P_{\text{\tiny 3M.T}} t^2} = \text{idem}, \quad \frac{m}{qt} = \text{idem}, \quad \frac{m}{C_{\text{H}} t^2} = \text{idem}, \quad \frac{mx}{P_{\text{\tiny IID.H}} t^2} = \text{idem}.$$

Критерии подобия, предложенные в [59] записаны в виде:

$$\frac{\omega L_{\text{H}}}{R} = \text{idem}, \ \frac{\delta_{\text{H}}}{l} = \text{idem}, \ \frac{\omega l P_{\text{np.1}} R}{U^2} = \text{idem}, \ \frac{p}{l} = \text{idem}, \ \frac{\omega^2 m l}{P_{\text{np.1}}} = \text{idem},$$

$$\frac{P_{\text{пр.H}}}{P_{\text{пр.1}}} = \text{idem}, \ \frac{\omega q l}{P_{\text{пр.1}}} = \text{idem}, \ \frac{C_{\text{H}} l}{P_{\text{пр.1}}} = \text{idem}, \ \frac{C_{1} l}{P_{\text{пр.1}}} = \text{idem}, \ \frac{h_{\text{g}}}{l} = \text{idem}.$$

В вышеприведенных критериях подобия обозначено:

N — число витков обмотки;

l – линейный базисный размер магнитной системы;

p — перемещение якоря ЭМ, соответствующее замыканию контактов контактора (раствор);

 $P_{\rm пр. H}$ — начальное значение противодействующего усилия, приведенного к оси сердечника ЭМ;

 $P_{\rm пр.1}$ —значение противодействующего усилия после замыкания системы главных контактов аппарата, например контактора;

 $C_{_{\mathrm{H}}}$, $C_{_{1}}$ – соответственно жесткость противодействующей характеристики на начальном участке перемещения якоря p ЭМ и после замыкания контактов контактора;

q – коэффициент динамического сопротивления;

 ω – угловая частота источника питания;

j – плотность тока в обмотке;

 K_{3} – коэффициент заполнения обмоточного окна;

 $h_{\rm g}$ – величина внедрения якоря в катушку.

Рассматривая возможность применения вышеприведенных критериев подобия в качестве безразмерных факторов при проведении вычислительного эксперимента методами теории планирования эксперимента [151] можно отметить затруднение при физическом толковании критериев подобия из [59], например, непонятно значение противодействующего усилия $P_{\rm np.1}$ в записи

критериев
$$\frac{\omega^2 ml}{P_{\text{пр.1}}} = \text{idem}$$
, $\frac{\omega l P_{\text{пр.1}} R}{U^2} = \text{idem}$, $\frac{P_{\text{пр.1}}}{P_{\text{пр.1}}} = \text{idem}$, $\frac{\omega ql}{P_{\text{пр.1}}} = \text{idem}$, так как оно не

влияет на время срабатывания и скорость движения якоря до момента замыкания контактов коммутационного аппарата. Предложенные Пеккером И.И. в [138] критерии подобия трудны для контролирования, так как содержат величины, изменяющиеся во времени: x, $P_{\scriptscriptstyle 3M,T}$ и i.

В [150] предлагаются другие формы записей критериев подобия:

$$\pi_1 = \frac{\mathcal{S}_{_{\rm H}}}{l} , \ \pi_2 = \frac{\omega L_{_{\rm H}}}{R} , \ \pi_3 = \frac{p}{l} , \ \pi_4 = \frac{mR^4l^2}{U_0^2L_{_{\rm H}}^3} , \ \pi_5 = \frac{P_{_{\rm \Pi D,H}}R^2l}{U_0^2L_{_{\rm H}}} , \ \pi_6 = \frac{P_{_{\rm \Pi D,1}}R^2l}{U_0^2L_{_{\rm H}}} ,$$

$$\pi_7 = \frac{C_{\text{H}}R^2l^2}{U_0^2L_{\text{H}}}, \ \pi_8 = \frac{C_1R^2l}{U_0^2L_{\text{H}}}, \ \pi_9 = \frac{qR^3l^2}{U_0^2L_{\text{H}}^2}, \ \pi_{10} = \frac{tR}{L_{\text{H}}}, \ \pi_{11} = \frac{VL_{\text{H}}}{lR}, \ \pi_{12} = \frac{W_{\text{кин}}R^2}{U_0^2L_{\text{H}}}, \ (1.9)$$

где U_0 — характерное значение для определенной формы напряжения на обмотке, в качестве которого может быть принято: действующее значение синусоидального напряжения (при питании ЭМ переменным напряжением), постоянная составляющая несинусоидальной периодической функции напряжения (при питании ЭМ выпрямленным напряжением).

Функции цели: время срабатывания контактора t_{κ} и скорости перемещения якоря с момент соударения контактов V_{κ} могут быть представлены в виде:

$$t_{\kappa^*}, V_{\kappa^*} = f(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5, \pi_7, \pi_9).$$

Время срабатывания ЭМ $t_{\scriptscriptstyle \rm M}$ и кинетическая энергия $W_{\scriptscriptstyle \rm KИH}$, запасенная подвижными частями аппарата к моменту соударения якоря с магнитопроводом можно представить:

$$t_{\text{M*}}, W_{\text{KMH*}} = f(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5, \pi_6, \pi_7, \pi_8, \pi_9).$$

Следует отметить, что выбор диапазонов варьирования для критериев подобия (1.9) при планировании эксперимента может вызвать трудности, например, выбор достаточно большого диапазона изменения критерия $\pi_2 = \frac{\omega L_{\rm H}}{R}$ приводит к невозможности определения адекватного диапазона варьирования для критерия $\pi_4 = \frac{mR^4l^2}{U_0^2L_{\rm H}^3}$, поскольку не удается обеспечить приемлемые соотношения m, U_0^2/R , которые компенсировали бы изменение величины π_2^3 .

1.3.3 Учет влияния вихревых токов на динамические характеристики электромагнитов

Трудность расчета динамических процессов усугубляется учетом возникающих вихревых токов, что особенно касается электромагнитов с массивным сплошным магнитопроводом.

С учетом допущений о возможности замены контуров вихревых токов эквивалентным короткозамкнутым контуром и о полной магнитной связи

намагничивающей и вторичных обмоток система уравнений динамики (1.1)÷(1.4) принимает следующий вид [83, 86]:

$$U = iR + \frac{d\Psi}{dt};$$

$$0 = i_3 R_9 + \frac{N_9}{N} \frac{d\Psi}{dt};$$

$$\Psi = f_1(i, i_9, x);$$

$$P_{9M.T} = f_2(i, i_9, x);$$

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = P_{9M.T} - P_{\pi p}(x) - P_c\left(\frac{dx}{dt}\right).$$

Сопротивление короткозамкнутых контуров находится по формулам, выведенным в [83, 86]:

$$R_{_{9.K}}=\frac{8\rho_{\rm c}\pi}{l}\,,$$

где $R_{_{9.\mathrm{K}}}$ — эквивалентное сопротивление сердечников круглого сечения;

 $ho_{\rm c}$ – удельное сопротивление материала сердечника;

l – длина участка сердечника.

Если электромагнитная система содержит несколько вторичных контуров, то, делая предположение о том, что эти обмотки сцеплены с одним и тем же потоком, что и намагничивающая обмотка, вторичные контура можно заменить одним эквивалентным одновитковым сопротивлением

$$R_{9} = \left(\sum_{i=1}^{n} \frac{N_{i}^{2}}{R_{i}}\right)^{-1},\tag{1.10}$$

где N_i , $R_{\rm i}$ — число витков и сопротивление i -го короткозамкнутого контура;

n — число контуров.

Было проведено экспериментальное исследование [83] для подтверждения гипотезы о правомерности предположения о том, что эквивалентный вторичный контур сцеплен с тем же потоком, что и намагничивающая обмотка. Можно

утверждать, что для коаксиально-концетрических обмоток, которые наиболее часто применяются в электромагнитах, с достаточной для практики точностью такое допущение применимо.

На рисунке 1.10 показана эквивалентная схема соединения обмоток двухконтурной (намагничивающая обмотка, короткозамкнутый контур) электромагнитной системы.

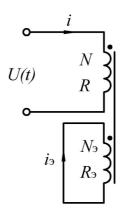


Рисунок 1.10 – Эквивалентная схема соединения обмоток

Выражение для магнитодвижущей силы (МДС) обмотки будет равно:

$$F = iN + i_2 N_2,$$

где i, N – ток и число витков намагничивающей обмотки;

 $i_{_{9}},\ N_{_{9}}$ – ток и число витков эквивалентного вторичного контура.

Формулы для определения эквивалентного сопротивления короткозамкнутых контуров вихревых токов по [166] должны учитывать то обстоятельство, что существует неравномерность распределения магнитного потока по сечению системы из-за явления поверхностного эффекта, а значит, сопротивления будут отличаться от приведенных в [83]. Например, выражение для расчета эквивалентного сопротивления вихревым токам в якоре с учетом поверхностного эффекта:

$$R_{\rm g} = R_0 \, \frac{d_{\rm gK} - Z_{\rm max}}{Z_{\rm max}},$$

где R_0 – сопротивление эквивалентного контура для якоря по [83, 86];

 $Z_{\rm max}$ — максимальная глубина проникновения электромагнитного поля в материал якоря [166].

В [182, 186] предложено выражения для эквивалентного сопротивления $R_{_{9.K}}$, полученное на основе закона Фарадея для контура вихревого тока в массивном круглом сердечнике втяжного электромагнита переменного тока, как

$$R_{_{3.K}} = \frac{\pi^3 d_{\rm c}^2 f_0^2 B_0^2}{8 p_{Fe} \mathcal{H}},$$

где f_0 – частота квазиустановившегося переменного магнитного поля;

 B_0 — максимальное значение магнитной индукции в объеме сердечника;

 $p_{\it Fe}\,$ – удельные потери энергии, взятые по паспорту материала сердечника;

 γ – плотность материала сердечника.

В [79, 80] решение уравнений для магнитного потока и тяжения во времени привело к схеме эквивалентного электромагнита, у которого вихревые токи заменены током в фиктивной одновитковой вторичной обмотке (рисунок 1.11).

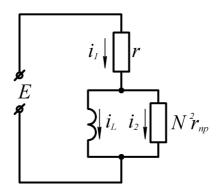


Рисунок 1.11 – Схема замещения ЭМ [80]

На рисунке 1.11 обозначено:

E – э.д.с. источника, В;

 $i_1 = i_L + i_2$ — втекающий ток;

 i_L , i_2 — ток в обмотке и ток, обусловленный вихревыми токами соответственно;

Эквивалентное приведенное сопротивление вторичной обмотки

$$r_{\rm np} = \frac{1,3 \cdot L}{\tau_1 N^2},$$

где $L = \frac{1,25\cdot 10^{-8}\cdot N^2\cdot Q}{\delta_0 + \lambda/\mu_{\rm cp}}$ — коэффициент самоиндукции без учета вихревых

токов, Гн;

 $Q\,$ – площадь, сквозь которую проходит поток в зазоре;

 $\delta_0 = \delta + \delta' + \frac{\lambda}{\mu_{\rm cp}}$ — приведенный зазор, δ и δ' — текущие значения рабочих

зазоров, λ – длина силовой линии в магнитопроводе, $\mu_{\rm cp}$ – средняя магнитная проницаемость;

 au_1 — постоянная времени, вычисляется по специальным формулам [80] для магнитопровода с плоским и круглым магнитопроводом. Если магнитопровод имеет разные участки с различным сечением или длиной, au_1 вычисляется отдельно для каждого участка и в схеме замещения участвует результирующая au_1 , равная сумме постоянных времени для отдельных участков магнитопровода

В [62] предлагается методика расчета переходных процессов броневых электромагнитов с массивным магнитопроводом, в которой вихревые токи учитываются путем введения эквивалентных контуров, электрическое сопротивление которых рассчитывается с учетом глубины проникновения магнитного потока в магнитопровод. Электромагнит заменяется эквивалентным трансформатором с тремя вторичными обмотками. Система уравнений для расчета строится на основе того, что на трех характерных участках магнитопровода: стоп, участок, свободный от втулок, участок воротничка, мгновенное значение МДС обмотки принимается равным сумме МДС витков обмотки, расположенных на данном участке магнитопровода и вихревых токов этого же участка. Недостатком данной методики следует считать большое количество уравнений для расчета электрической цепи и громоздкость получаемых выражений для расчета потоков рассеяния в соответствующем участке магнитопровода.

Следует отметить работу [53], в которой выведена упрощенная формула на основе анализа экспериментальных данных, исследующих проникновение электромагнитной волны в сплошной ферромагнитный сердечник, устанавливающая зависимость вихревого тока от времени при подключении обмотки к источнику постоянного тока. Размагничивающее действие вихревого тока учитывается путем суммирования его величины с магнитодвижущей силой обмотки.

1.3.4 Критерии оптимизации, используемые при проектном расчете электромагнитных систем

Большое количество работ посвящено проектированию ЭМ с учетом так называемых критериев оптимальности. Основным способом решения таких задач является применение численных методов для минимизации определенного функционала.

Наиболее распространенными критериями являются минимизация массы m [93, 120], массы активных материалов [39, 120, 142], стоимости [120], потребляемой мощности $P_{\scriptscriptstyle 3Л}$ [70, 87, 93, 120, 142, 172], минимальные значения габаритного объема $V_{\scriptscriptstyle \Gamma}$ [116, 120, 135, 142], времени трогания $t_{\scriptscriptstyle TP}$ [92, 120].

Проводится комплексная автоматизация с применением задач нелинейного программирования [34, 72, 120], в постановке которой требуемые динамические характеристики являются ограничениями, а в качестве минимизируемой функции используется габаритный объем [116, 117] или масса ЭМ [121]. Проводится проектирование ЭМ на заданную тяговую характеристику [32, 114, 121].

В [127, 131] сформулирована задача определения такого закона изменения скорости V(t), а следовательно и результирующей силы, обеспечивающий идеальный вариант движения якоря ЭМ на заданном интервале перемещения, времени движения и заданной конечной скорости, при котором реализуется ускорение якоря на начальном участке до максимальной скорости с последующим торможением на конечном участке.

В [32] ставится задача определения оптимальной тяговой характеристики, при которой время срабатывания ЭМ оказывается наименьшим. В [114] при этом конечная скорость якоря равна заданной величине.

В [158] была сделана попытка вывести общие закономерности для работающего оптимизации электромагнита, длительном режиме, был сформулирован критерий оптимизации, заключающийся в TOM, что электромагнитных оптимальных устройств произведение эквивалентных электрического сопротивлений быть магнитного, теплового должно минимальным.

В [96] предложен обобщенный критерий динамической эффективности для электромагнитных механизмов:

$$\Pi_1 = \frac{A_{\text{дин}}}{V \cdot P_{\text{an}}},$$

где $A_{\text{дин}} = \int\limits_{\delta_{\text{u}}}^{\delta_{\text{k}}} P_{\text{дин}}(\delta) \mathrm{d}\delta$ — динамическая работоспособность,

 $P_{\scriptscriptstyle exttt{ iny JUH}}(\delta)$ — динамическая тяговая электромагнитная сила, зависящая от координаты якоря δ ,

 $P_{\text{\tiny эл}}$ — потребляемая мощность в установившемся режиме нагрева.

В [143] предложен интегральный критерий качества для электромагнитов

$$KR = n \frac{M_{a^*}}{M_{a.oiit^*}} + (1 - n) \frac{P_*}{P_{oiit^*}},$$

где $M_{\rm a^*} = (m_{\rm cr} + m_{_{\rm M}}) / (\gamma_{\rm cr} \cdot \delta_{_{\rm KP}}^3)$ — критерий минимизации массы активных материалов;

$$P_* = \frac{P_{_{\mathfrak{IJ}}}}{\left(P_{_{\mathrm{MX.KP}}} \rho_0 / \delta_{_{\mathrm{KP}}} \mu_0 \right)} \; -$$
 критерий минимума потребляемой мощности;

 $M_{
m a.ont*}$ и $P_{
m ont*}$ – рассчитанные значения критериев для определенных параметров электромагнита;

n – весовой коэффициент значимости критерия массы.

Выводы к главе 1

- 1. В настоящее время находят применение самые разнообразные методы проектного расчета ЭМ, основой которых является применение полевых или цепных методов расчета магнитного и температурного поля электромагнитных систем. Цепные методы являются приближенными. Существующие методы, основанные на применении полевых методов, обладают рядом недостатков: громоздкость задания исходных данных, неприменимость для ряда конструкций. Альтернативой качественного расчета становится использование программ, построенных на методе конечных элементов.
- 2. Проведенный обзор основных численно-программных комплексов позволяет утверждать: существующие многочисленные программы требуют к себе осторожного подхода, иначе возможно, что времени будет затрачено неизмеримо больше в сравнении с точностью полученного результата. В нашей работе мы рекомендуем использовать достаточно распространенный и общедоступный современный программный комплекс FEMM для расчетов магнитных и температурных полей, прошедший апробацию в широком диапазоне исходных данных.
- 3. Моделирование основных характеристик следует проводить, используя методы регрессионного анализа, заменяя физическое моделирование математическим с применением пакета FEMM, позволяющего рассчитать магнитное поле и тяговое усилие электромагнита для различных значений тока и положения якоря методами теории поля. Для получения достаточно общего результата предлагается представлять исследуемые функции в обобщенной критериальной форме как функции от критериев подобия электромагнита.
- 4. Для разработки эффективного электромагнитного аппарата необходимо углубленное изучение динамических процессов, происходящих в электрической, магнитной и механической системах. Поскольку натурные экспериментальные исследования, во-первых, увеличивают финансовые затраты и сроки разработки, и, во-вторых, не позволяют провести всеобъемлющие исследования, а

традиционные методы проектирования и исследования, построенные на схемах цепей, эффективны, теории ряде случаев не наиболее замещения целесообразным представляется использование математического моделирования с обобщенных целью получения математических моделей динамических характеристик электромагнита на основе алгоритма, воспроизводящего динамику срабатывания электромагнита в программной среде FEMM.

5. Наиболее распространенными критериями оптимизации следует считать минимум габаритного объема, потребляемой мощности ЭМ, массы активных материалов.

ГЛАВА 2 МОДЕЛИ СТАТИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВТЯЖНЫХ БРОНЕВЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТОВ ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ И ИХ АНАЛИЗ

Цель настоящего исследования — получение математических моделей основных статических характеристик ВБЭМ на основе постановки численного эксперимента с использованием теории многофакторного регрессионного анализа и теории подобия [50, 73, 75 и др.]. Статические электромагнитные характеристики (СЭМХ) представляют из себя кривые намагничивания МС и нагрузочные характеристики ЭМ [51, 61, 141 и др.].

Исследуемые функции цели: электромагнитное тяговое усилие $P_{_{\rm ЭМ.Т}}$, магнитодвижущая сила F, потокосцепление Ψ ищутся в виде обобщенных полиномиальных зависимостей от выбранных факторов эксперимента, которые представляют собой относительные геометрические размеры МС ЭМ, значение магнитной индукции в наиболее нагруженном месте магнитопровода $B_{\rm m}$ [50]:

где A_{i*} – относительные геометрические размеры магнитной системы;

$$\delta_* = \frac{\delta}{d_{_{\mathrm{ЯК}}}}$$
 – относительный воздушный рабочий зазор.

$$P_{\text{баз}} = \frac{B_{ ext{m}}^2 S_c}{2\mu_0} = \frac{B_{ ext{m}}^2 \pi d_{ ext{як}}^2}{8\mu_0}, \quad F_{ ext{баз}} = \frac{B_{ ext{m}}}{\mu_0} d_{ ext{як}}, \quad \Psi_{ ext{баз}} = B_{ ext{m}} S_c N = \frac{B_{ ext{m}} \pi d_{ ext{як}}^2 N}{4} \quad - \quad \text{базисные}$$

значения электромагнитной силы, магнитодвижущей силы и потокосцепления, выбранные таким образом, чтобы соблюдалась размерность величин;

 $B_{\rm m}$ — значение магнитной индукции в в наиболее нагруженном месте магнитопровода, Тл;

 $S_{\rm c}$ – площадь поперечного сечения сердечника, м²;

 μ_0 – магнитная постоянная, Гн/м;

 $d_{\scriptscriptstyle \mathsf{ЯK}}$ – базисный размер, представляющий собой диаметр якоря, м;

N — число витков обмотки.

Были исключены коэффициент теплоотдачи, магнитная проницаемость, превышение температуры нагрева обмотки, что позволяет использовать полученные модели при различных режимах работы, также при использовании схем форсированного управления.

Существующие паразитные зазоры в МС оказывают малое влияние на тяговое усилие по сравнению с зазором у воротничка и рабочим зазором, поэтому они не вводятся в план эксперимента, что также уменьшит количество необходимых опытов. Используя второй закон Кирхгофа для магнитной цепи можно учесть их, контролируя в ходе эксперимента дополнительно усредненные значения магнитной индукции в местах паразитных зазоров (рисунок 2.1).

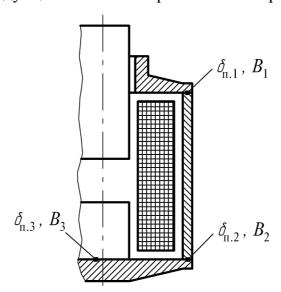


Рисунок 2.1 – Местоположение учитываемых паразитных зазоров МС ВБЭМ

На рисунке 2.1 изображены сечения, в которых фиксировались значения B_1 , B_2 и B_3 магнитной индукции в местах сопряжения деталей корпуса, стопа и фланцев магнитопровода ЭМ. Выражения для них также будут иметь вид:

$$\begin{cases} B_{1*} = B_{1}/B_{\rm m} = B_{1*}(A_{1*}, A_{2*}, A_{3*}, A_{4*}, A_{5*}, A_{6*}, B_{\rm m}, \delta_{*}); \\ B_{2*} = B_{2}/B_{\rm m} = B_{2*}(A_{1*}, A_{2*}, A_{3*}, A_{4*}, A_{5*}, A_{6*}, B_{\rm m}, \delta_{*}); \\ B_{3*} = B_{3}/B_{\rm m} = B_{3*}(A_{1*}, A_{2*}, A_{3*}, A_{4*}, A_{5*}, A_{6*}, B_{\rm m}, \delta_{*}). \end{cases}$$

На рисунке 2.2 показаны кривые B = f(H) и $\mu_r = f(H)$ для магнитомягких сталей. Значение B_1 характеризует так называемое колено кривой намагничивания стали, а B_s — индукцию технического насыщения. Пунктирными линиями со стрелками показан частный цикл магнитного гистерезиса, соответствующий выключению и повторному включению обмотки [61, 141]. Коэрцитивная сила H_c' характеризует такое значение напряженности поля обратного знака, которая должна быть приложена к элементам МС, чтобы снизить в них индукцию до нуля.

Кривая повторного намагничивания приблизительно соответствует [141] постоянной относительной проницаемости (на рисунке 2.2 показана пунктирной линией со стрелкой «вверх»), равной проницаемости $\mu_{\rm r.max}$, определяемой приблизительно для колена основной кривой намагничивания.

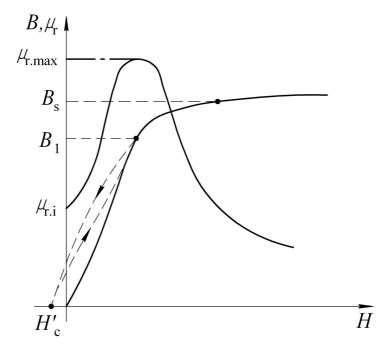


Рисунок 2.2 – К анализу перемагничивания ферромагнитных элементов МС

Для магнитомягких сталей коэрцитивная сила обычно не превышает 100А/м [61 и др.]. Учитывая, что паразитные зазоры и зазоры отлипания для ВБЭМ относительно велики, можно пренебречь величиной остаточного магнитного

потока. Это показано штрихпунктирной линией на кривой намагничивания МС $\Psi = \Psi(F)$ на рисунке 2.3, а.

Относительная магнитная проницаемость в области максимальной своей величины изменяется слабо [41, 61]. Тогда контролирование значения индукции в наиболее нагруженном месте MC позволяет при ее значениях от 0 до $B_{\rm m.r.}$ принять магнитные сопротивления ферромагнитных элементов МС постоянными.

Точка Г характеризует границу линейности МС, ниже которой зависимость между потокосцеплением Ψ и магнитодвижущей силой F обмотки можно считать прямолинейной.

Для математического описания КНМС задается, как и в [107] в параметрической форме в виде безразмерных зависимостей:

$$\left(\Psi_* = \Psi/\Psi_{\text{6a3}}\right); \tag{2.1}$$

$$\begin{cases} \Psi_* = \Psi/\Psi_{6a3} ; \\ F_* = F/F_{6a3} . \end{cases}$$
 (2.1)

Способ представления СЭМХ для текущего зазора $\delta_{\rm i}$ проиллюстрирован на рисунке 2.3.

Граница линейности кривой намагничивания МС (точка Г, рисунок 2.3, а) может быть определена следующим образом:

$$\frac{d\Psi}{dF} = \frac{\Psi_{\Gamma}}{F_{\Gamma}},\tag{2.3}$$

где в соответствии с (2.1) и (2.1) $\Psi = \Psi_* \cdot \Psi_{\text{баз}}$, $F = F_* \cdot F_{\text{баз}}$.

Решение уравнения (2.3) относительно B_{m} позволяет определить граничное значение магнитной индукции $B_{\mathrm{m.r}}$. Таким образом, этому значению индукции на рисунке 2.3 соответствует точка Γ с координатами ($F_{\Gamma}, \Psi_{\Gamma}$).

Следовательно, при изменении индукции B_{m} в диапазоне от 0 до $B_{\mathrm{m.r}}$ КНМС в параметрической форме может быть записана в виде:

$$\begin{cases}
\Psi = \Psi_*(B_{m.\Gamma})\Psi_{6a3}; \\
F = F_*(B_{m.\Gamma})F_{6a3}.
\end{cases} (2.4)$$

$$F = F_*(B_{\mathrm{m.r}})F_{\mathrm{6a3}}.$$
 (2.5)

В традиционной форме представления КНМС может быть записана в виде:

$$\Psi = \frac{\Psi_{\Gamma}}{F_{\Gamma}} F.$$

По аналогии с (2.1) и (2.2) электромагнитная тяговая сила $P_{_{\rm ЭМ.T}}$ в безразмерной форме может быть записана в виде:

$$P_* = P_{_{\rm 3M,T}}/P_{\rm 6a3} \,. \tag{2.6}$$

Таким образом, выражения (2.2) и (2.6) совместно определяют нагрузочную характеристику (рисунок 2.3, б).

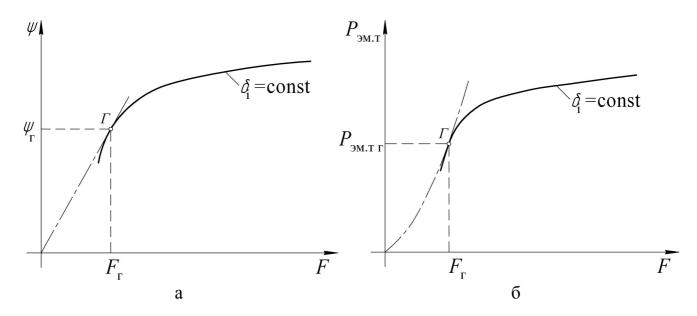


Рисунок 2.3 – К представлению статических характеристик МС

Известно [61 и др.], что при линейной МС нагрузочные характеристики ЭМ в традиционной форме представления описываются (рисунок 2.3, б) квадратичной параболой. Поэтому при $B_{\rm m} \leq B_{\rm m.r.}$ можно записать

$$P_{\scriptscriptstyle \mathsf{9M.T}} = P_{\scriptscriptstyle \mathsf{9M.T.\Gamma}} \cdot \left(\frac{F}{F_{\scriptscriptstyle \Gamma}}\right)^2, \tag{2.7}$$

где
$$P_{_{\scriptscriptstyle \mathrm{9M,T,\Gamma}}} = P_* \big(B_{_{\scriptscriptstyle \mathrm{m,\Gamma}}} \big) \cdot B_{_{\scriptscriptstyle \mathrm{m,\Gamma}}}^2 \cdot \frac{\pi \cdot d_{_{\scriptscriptstyle \mathrm{SK}}}^2}{8 \mu_0} \, ; \, \, F_{_{\scriptscriptstyle \Gamma}} = F_* \big(B_{_{\scriptscriptstyle \mathrm{m,\Gamma}}} \big) \cdot B_{_{\scriptscriptstyle \mathrm{m,\Gamma}}} \cdot \frac{d_{_{\scriptscriptstyle \mathrm{SK}}}}{\mu_0} \, .$$

Параметрическая форма представления нагрузочной характеристики ЭМ при линейной его МС ($B_{\rm m} \leq B_{\rm m.r}$) имеет вид:

$$\begin{cases} P_{_{9\text{M.T}}} = P_*(B_{\text{m.r}}) \cdot P_{6a3}; \\ F = F_*(B_{\text{m.r}}) \cdot F_{6a3}. \end{cases}$$
 (2.8)

При определении функций Ψ_* , F_* , P_* целесообразно не включать в перечень аргументов [141] координату, характеризующую положение якоря (δ – величина рабочего зазора), а проводить исследования для ряда фиксированных положений δ_{i*} . Связано это с тем, что СЭМХ в существенной степени зависят [61 и др.] от положения якоря.

2.1 Моделирование электромагнитных характеристик втяжного электромагнита в статическом режиме

С целью отсеивания незначимых факторов, а также исследования влияния геометрических соразмерностей в МС на СЭМХ проведен ряд предварительных опытов. Эскиз исследуемой МС ВБЭМ с обозначенными размерами и элементами показан на рисунке 2.4. Исследовался ЭМ без развитого проходного фланца.

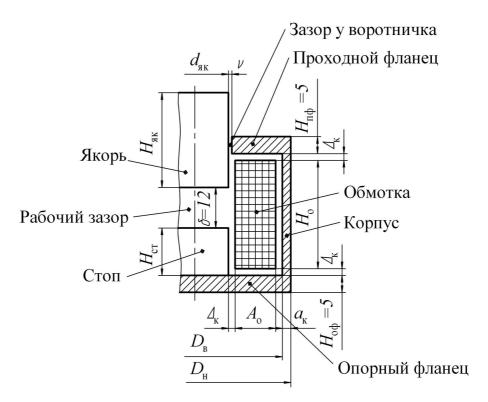


Рисунок 2.4 – МС ВБЭМ для предварительных испытаний

Обобщенные данные по оптимальным геометрическим соразмерностям МС ВБЭМ приведены в [100, 157] и представлены здесь в виде таблицы 2.1.

	$\delta_* < 0.4$	$\delta_* > 0.4$		
Соразмерности	Короткоходовые	Длинноходовые	Средние значения	
	ЭМ	ЭМ		
$A_{o^*} = A_o/d_{_{\mathit{MK}}}$	0,4÷0,5	0,3÷0,4	0,4	
$H_{o^*} = H_o/d_{\text{MK}}$	1,2÷2,5	1,8÷3,2	2÷2,4	
$H_{\scriptscriptstyle\rm B^*} = H_{\scriptscriptstyle\rm B}/d_{\scriptscriptstyle\rm MK}$	0,3÷0,4	0,3÷0,4	0,35	
$H_{\rm cr^*} = H_{\rm cr}/H_{\rm o}$	0,3÷0,5	0,0÷0,2	0,2÷0,3	
$v_* = v/d_{_{\mathfrak{K}}}$	$(1,25\div5)\cdot10^{-2}$	$(1,25\div5)\cdot10^{-2}$	3·10 ⁻²	
$\Delta_{\scriptscriptstyle{\mathrm{K}}^*} = \Delta_{\scriptscriptstyle{\mathrm{K}}}/d_{\scriptscriptstyle{\mathrm{MK}}}$	0,10÷0,20	0,10÷0,2	0,2	
$a_{\scriptscriptstyle\rm B^*} = a_{\scriptscriptstyle\rm B}/d_{\scriptscriptstyle\rm SK}$	0,1÷0,2	0,1÷0,2	0,15	

Таблица 2.1 – Геометрические соразмерности МС ВБЭМ

Выбранные параметры $A_{\rm o}$, $H_{\rm o}$, $H_{\rm cr}$, $\Delta_{\rm K}$, ν исследуемого ВБЭМ варьировались в определенных пределах (таблица 2.2). Постоянными оставались: диаметр якоря $d_{\rm яK}=20\cdot 10^{-3}\, M$ — базисный размер, марка стали 10895 ГОСТ 11036-75, высоты проходного и опорного фланцев $H_{\rm пф}=H_{\rm oф}=d_{\rm яK}/4=5 MM$ (из условия равномерности сечения магнитопровода), диаметр провода $d_{\rm пp}=0.15\cdot 10^{-3}\, M$, магнитодвижущая сила обмотки F=4500A, воздушный рабочий зазор $\delta=12 MM$.

Толщина корпуса a_{κ} (см. рисунок 2.4) вычислялась по формуле:

$$a_{\scriptscriptstyle\rm K}=0.5(D_{\scriptscriptstyle\rm H}-D_{\scriptscriptstyle\rm B}),$$

где $D_{\rm H} = \sqrt{D_{\rm B}^2 + d_{\rm як}^2}$ — наружный диаметр корпуса, определяется из условия равномерности поперечных сечений корпуса и якоря;

$$D_{_{\rm B}}=d_{_{\rm SK}}+4\Delta_{_{\rm K}}+2A_{_{\rm O}}$$
 – внутренний диаметр корпуса.

Высота якоря определялась по формуле:

$$H_{\scriptscriptstyle{\mathrm{HK}}} = H_{\scriptscriptstyle{\mathrm{H}}\varphi} + H_{\scriptscriptstyle{\mathrm{O}}} + 2\Delta_{\scriptscriptstyle{\mathrm{K}}} - H_{\scriptscriptstyle{\mathrm{CT}}}.$$

Таблица 2.2 – Относительные размеры и диапазоны их изменения для предварительного исследования

			Диапазон	
Параметр	Относительное	Диапазон	изменения	
	значение	изменения, мм	относительной	
			величины	
Толщина обмотки	$A_{\mathrm{o}^*} = A_{\mathrm{o}}/d_{\mathrm{gk}}$	6÷12	0,3÷0,6	
Высота обмотки	$H_{o^*} = H_o/d_{HK}$	20÷60	1÷3	
Высота стопа	$H_{\rm cr^*} = H_{\rm cr}/H_{\rm o}$	0÷16	0÷0,5	
Толщина каркаса	Λ - Λ / Δ	2.4	0.1.0.2	
катушки	$\Delta_{_{\mathrm{K}^*}} = \Delta_{_{\mathrm{K}}}/d_{_{\mathrm{9K}}}$	2÷4	0,1÷0,2	
Длина зазора у	11 - 11/d	0.4.1	0.02.0.05	
воротничка	$v_* = v/d_{_{ m HK}}$	0,4÷1	0,02÷0,05	

Для выявления влияния высоты обмотки на силу тяги относительно других параметров, целесообразным будет поддерживать высоту стопа неизменной [137].

При изменении высоты стопа $H_{\rm cr}$ другие параметры оставались равными: $A_{\rm o^*}=6/20=0,3,\; H_{\rm o^*}=32/20=1,6,\; \Delta_{\rm K^*}=2/20=0,1,\; \nu_*=0,4/20=0,02\,.$

При изменении толщины обмотки $A_{\rm o}$, толщины каркаса катушки $\Delta_{\rm k}$, величины зазора у воротничка ν высота обмотки и высота стопа не изменялись и принимались равными $H_{\rm o*}=32/20=1,6\,,\;\;H_{\rm cr*}=5/32=0,156\,.$ Результаты расчета представлены в виде кривых на рисунках 2.5, 2.6.

Из рисунка 2.5 видно, что толщина каркаса катушки $\Delta_{\rm K}$ практически не влияет на тяговую силу. При увеличении высоты стопа $H_{\rm cr}$ тяговая сила уменьшается, как и было показано в [137]. Зависимость тяговой силы от относительной высоты обмотки $H_{\rm o}$ имеет явно выраженный максимум.

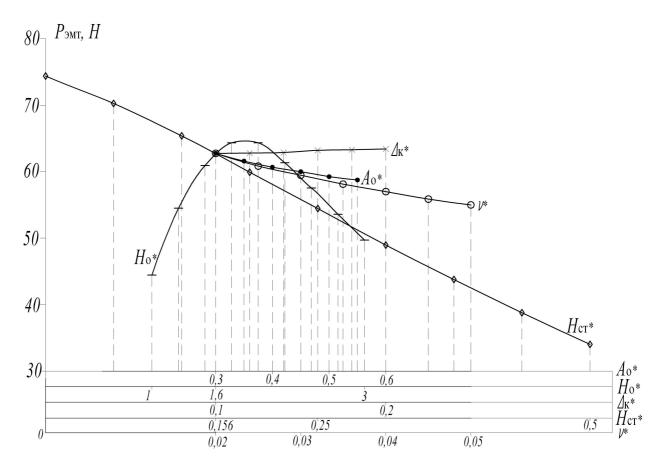


Рисунок 2.5 — Зависимость тяговой силы $P_{_{\scriptscriptstyle{9\mathrm{M.T}}}}$ от относительных размеров

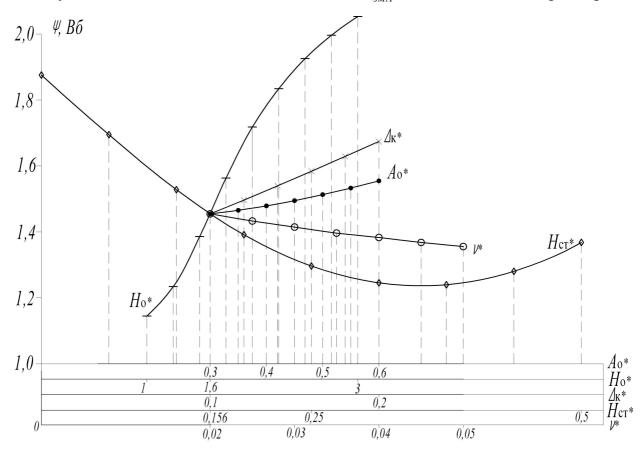


Рисунок 2.6 – Зависимость потокосцепления Ψ от относительных размеров

При увеличении высоты обмотки тяговая сила растет, т.к. потокосцепление увеличивается (см. рисунок 2.6), но при дальнейшем увеличении высоты обмотки потоки рассеяния с якоря на корпус становятся все больше, вследствие чего тяговая сила начинает уменьшаться. Увеличение потоков рассеяния на корпус при увеличении высоты обмотки наглядно видно на рисунке 2.7. При увеличении толщины обмотки $A_{\rm o}$ тяговая сила немного падает, вследствие увеличения потоков рассеяния с фланцев на корпус.

Также, можно отметить следующее: расположение линий магнитного потока рассеяния очень сильно отличается от того, какое обычно принимают при расчете втяжного ЭМ цепными методами в случае малой высоты обмотки (рисунок 2.7), что необходимо учитывать при расчетах.

На основе полученных данных влиянием толщины каркаса катушки Δ_{κ} можно пренебречь при построении плана эксперимента. За постоянные параметры принимались:

- диаметр сердечника $d_{\text{як}} = 2 \cdot 10^{-2} \,\text{м}$;
- кривая намагничивания стали марки 10895 ГОСТ 11036-75;
- диаметр провода $d_{\rm np} = 0.1 \cdot 10^{-3} \, M$, число витков N = 1000;
- толщина каркаса катушки $\Delta_{\kappa} = 2 \cdot 10^{-3} \, M$;
- ширина воротничка $a_{\rm B} = 4 \cdot 10^{-3} \, M$.

В ряде конструкций на стопе и якоре предусматриваются [78] отверстия (для размещения толкателя, возвратной пружины) диаметром $d_{\text{отв}} \leq d_{\text{як}}/3$. Такое конструктивное отверстие в центре якоря не учитывалось, так как магнитный поток в центре сердечника практически отсутствует, вытесняясь к его краям (рисунок 2.7). При указанных значениях $d_{\text{отв}}$ в нелинейной МС уменьшение $P_{\text{эм.т}}$ не превышает 6%, при линейной МС – 1%.

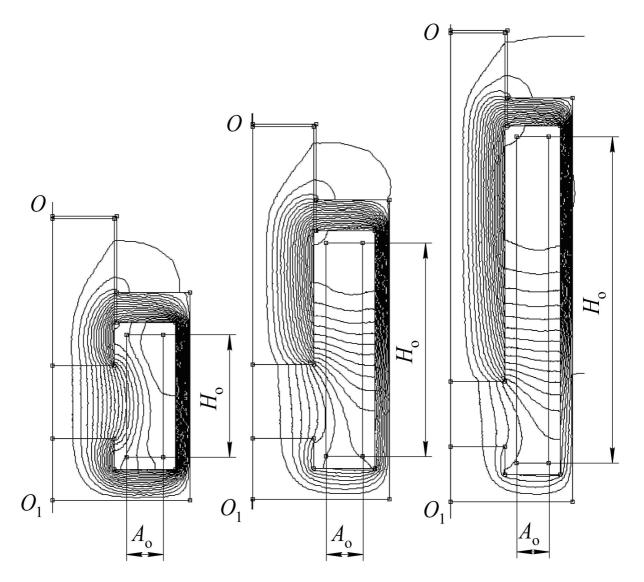


Рисунок 2.7 – К оценке влияния высоты электромагнита на распределение магнитного потока (OO_1 – ось симметрии)

2.2 Моделирование статических электромагнитных характеристик однообмоточного втяжного электромагнита

Был поставлен численный эксперимент для однообмоточного ЭМ. Исследуемая МС с обозначенными основными размерами и элементами показана на рисунке 2.8. Факторы, варьируемые в ходе эксперимента:

- относительная высота обмоточного окна $X_1 = H_{o^*} = H_o/d_{\scriptscriptstyle \mathrm{ЯК}}$;
- относительная высота стопа $X_2 = H_{\rm cr}^* = H_{\rm cr}^* / H_{\rm o}$;
- относительная высота воротничка $X_{3} = H_{_{\mathrm{B}^{*}}} = H_{_{\mathrm{B}}}/d_{_{\mathrm{ЯК}}}$;

- относительная толщина обмоточного окна $X_4 = A_{o^*} = A_o/d_{gK}$;
- относительная величина зазора у воротничка $X_5 = v_* = v/d_{\mathfrak{g}_{\mathsf{K}}}$;
- значение магнитной индукции в максимально нагруженном сечении магнитопровода $X_6 = B_{\mathrm{m}}$.

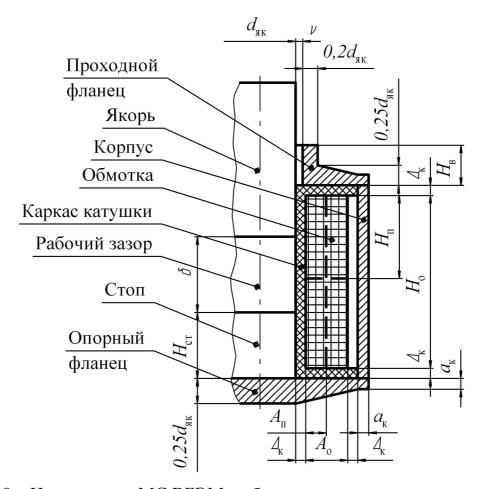


Рисунок 2.8 – Исследуемая МС ВБЭМ с обозначенными основными размерами и элементами (штриховой линией показано возможное расположение обмоток в катушке: аксиальное и коаксиальное)

Выбранные интервалы варьирования для каждого фактора [73] приведены в таблице 2.3. Здесь X_i — фактор, а x_i — характерные его уровни в кодированном виде. Была составлена матрица ортогонального центрально-композиционного плана второго порядка для n=6 факторов (см. таблицу A.1 приложения A). Всего количество опытов составило $n_{\Sigma 1} = (2^n + 2 \cdot n + 1) \cdot 15 = 1155$.

Таблица	2.3	_	Факторы	И	факторные	пространства	вычислительного
эксперимента для однообмоточного электромагнита							

X_i	-1,761	-1	0	+1	+1,761
$X_1=H_{0*}$	1,116	1,714	2,500	3,286	3,884
$X_2=H_{\text{ct}^*}$	0,019	0,119	0,25	0,381	0,481
$X_3=H_{\mathrm{B}^*}$	0,2116	0,2714	0,35	0,4286	0,488
$X_4=A_0*$	0,2772	0,4167	0,600	0,7833	0,9228
$X_5 = v_* \cdot 10^{-2}$	1,1545	1,952	3,00	4,048	4,8455
$X_6=B_{\mathrm{m}}$	0,8844	1,064	1,30	1,536	1,7156

Для нахождения коэффициентов линейной регрессии использовался метод наименьших квадратов. Вычислительный эксперимент проводился для фиксированных 15 значений относительного зазора δ_* в диапазоне от 0,05 до 0,75 с шагом 0,05, поэтому для коэффициентов дополнительно была проведена аппроксимация в зависимости от δ_* .

Полученные электромагнитные характеристики P_* , F_* , Ψ_* , B_{1*} , B_{2*} , B_{3*} представлены в виде полиномиальных зависимостей:

$$\begin{split} P_* &= 10^{-6} \left(a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_4 x_4 + a_5 x_5 + a_6 x_6 + a_{11} x_1^2 + a_{22} x_2^2 + a_{33} x_3^2 + a_{44} x_4^2 + \right. \\ &+ a_{55} x_5^2 + a_{66} x_6^2 + a_{12} x_1 x_2 + a_{14} x_1 x_4 + a_{16} x_1 x_6 + a_{23} x_2 x_3 + a_{25} x_2 x_5 + a_{26} x_2 x_6 + \\ &+ a_{46} x_4 x_6 + a_{126} x_1 x_2 x_6 + a_{146} x_1 x_4 x_6 + a_{235} x_2 x_3 x_5 + a_{246} x_2 x_4 x_6 \right)^2, \end{split} \tag{2.10}$$

$$\text{ГДе } a_0 = 796,6 - 2121,6 \delta_* + 3876,1 \delta_*^2 - 2268,1 \delta_*^3; \\ a_1 &= -5,6 - 247,4 \delta_* + 370,7 \delta_*^2 - 164 \delta_*^3; \\ a_2 &= -17,5 + 297,6 \delta_* - 590,2 \delta_*^2 + 271,6 \delta_*^3; a_4 = 0,3 + 61,7 \delta_* - 179,4 \delta_*^2 + 133,6 \delta_*^3; \\ a_5 &= -0,2 + 85,8 \delta_* - 218,5 \delta_*^2 + 154,1 \delta_*^3; \\ a_6 &= 148,9 - 961,8 \delta_* + 3211,6 \delta_*^2 - 4519,7 \delta_*^3 + 2273,1 \delta_*^4; \\ a_{11} &= -12,1 + 78,3 \delta_* - 65,5 \delta_*^2 - 48,1 \delta_*^3; a_{22} &= -36,5 + 56,8 \delta_* - 90,2 \delta_*^2 - 1,8 \delta_*^3; \\ a_{33} &= -9,8 + 78,9 \delta_* - 179,7 \delta_*^2 + 124,6 \delta_*^3; a_{44} &= -7,5 + 5,4 \delta_* - 6,8 \delta_*^2; \end{split}$$

$$a_{55} = -3.5 - 0.5\delta_* + 1.4\delta_*^2; \ a_{66} = -47 + 218.3\delta_* - 380.3\delta_*^2 + 213.6\delta_*^3; \ a_{12} = -9.3 + 157.1\delta_* - 402.8\delta_*^2 + 368.3\delta_*^3; \ a_{14} = 3.7 + 19.8\delta_* - 16.3\delta_*^2; \ a_{16} = -23.9 + 221.5\delta_* - 928.9\delta_*^2 + 1461.7\delta_*^3 - 761.4\delta_*^4; \ a_{23} = 5.9 - 19.8\delta_* + 42.3\delta_*^2 - 25.7\delta_*^3; \ a_{25} = -2.8 + 4.9\delta_* - 10.5\delta_*^2; \ a_{26} = 43.3 - 22.1\delta_* + 14.5\delta_*^2; \ a_{46} = 2.5 - 40.6\delta_* + 75.3\delta_*^2 - 47.4\delta_*^3; \ a_{235} = 1.9 + 2.5\delta_* - 0.2\delta_*^2; \ a_{246} = 2 + 10.3\delta_* - 10.5\delta_*^2; \ a_{235} = 1.9 + 2.5\delta_* - 0.2\delta_*^2; \ a_{246} = -2.6 - 2.2\delta_*, \ F_* = 10^{-6}(b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_5x_5 + b_6x_6 + b_{22}x_2^2 + b_{44}x_4^2 + b_{66}x_6^2 + b_{12}x_1x_2 + b_{14}x_1x_4 + b_{26}x_2x_6)^2, \ (2.11)$$

$$b_0 = 193.6 + 868.7\delta_* - 1363.9\delta_*^2 + 932.7\delta_*^3; \ b_1 = 2.8 - 71.2\delta_* + 12.2\delta_*^2 + 17.1\delta_*^3; \ b_2 = -7.8 + 77.7\delta_* - 16.4\delta_*^2 - 63.6\delta_*^3; \ b_3 = -3.9 + 0.8\delta_* + \delta_*^2 + 1.2.\delta_*^3; \ b_5 = 7.2 + 14.9\delta_* - 33.5\delta_*^2 + 19.7\delta_*^3; \ b_6 = 23 - 41.3\delta_* + 135.1\delta_*^2 - 92.9\delta_*^3; \ b_{22} = -4.1 - 42.2\delta_* + 79.3\delta_*^2 - 84.8\delta_*^3; \ b_{12} = -3.5 + 50.6\delta_* - 125.5\delta_*^2 + 123.8\delta_*^3; \ b_{14} = 0.2 + 12.8\delta_* - 10.2\delta_*^2 + 5\delta_*^3; \ b_{26} = 5.4 + 50.4\delta_* - 76.4\delta_*^2 + 53.8\delta_*^3; \ b_{14} = 0.2 + 12.8\delta_* - 10.2\delta_*^2 + 5\delta_*^3; \ b_{26} = 5.4 + 50.4\delta_* - 76.4\delta_*^2 + 53.3\delta_*^3; \ c_{11} = -13.6 + 65.3\delta_* + 76.9\delta_*^2 - 184\delta_*^2; \ c_{44} = -8.8 + 110.28\delta_* - 117.8\delta_*^2 + 57.5\delta_*^3; \ c_{22} = -53.8 + 79.9\delta_* + 76.9\delta_*^2 - 184\delta_*^3; \ c_{41} = -1.1 + 102.8\delta_* - 117.8\delta_*^2 + 57.5\delta_*^3; \ c_{23} = -9.7 + 45.9\delta_* - 52.4\delta_*^2; \ c_{44} = -8.8 + 11\delta_* - 21.8\delta_*^2; \ c_{12} = -20.3 + 19.9\delta_* - 52.0\delta_*^2 + 435.7\delta_*^3; \ c_{12} = -20.3 + 19.9\delta_* - 52.0\delta_*^2 + 435.7\delta_*^3; \ c_{12} = -20.3 + 19.9\delta_* - 52.0\delta_*^2 + 435.7\delta_*^3; \ c_{12} = -20.3 + 19.9\delta_* - 52.0\delta_*^2 + 435.7\delta_*^3; \ c_{12} = -20.3 + 19.9\delta_* - 52.0\delta_*^2 + 435.7\delta_*^3; \ c_{12} = -20.3 + 19.9\delta_* - 52.0\delta_*^2 + 435.7\delta_*^3; \ c_{12} = -20.3 + 19.9\delta_* - 52.0\delta_*^2 + 435.7\delta_*^3; \ c_{12} = -20.3 + 19.9\delta_* - 52.0\delta_*^2 + 435.7\delta_*^3; \ c_{12} = -20.3 + 19.9$$

$$c_{16} = -21.4 + 129.3\delta_* - 366.7\delta_*^2 + 310.3\delta_*^3; c_{26} = 52.3 + 38.4\delta_* - 34.7\delta_*^2;$$

$$B_{1*} = 10^{-6} (d_0 + d_1x_1 + d_2x_2 + d_4x_4 + d_5x_5 + d_6x_6 + d_{11}x_1^2 + d_{22}x_2^2 + d_{66}x_6^2 + d_{12}x_1x_2 + d_{24}x_2x_4 + d_{26}x_2x_6)^2;$$

$$(2.13)$$

$$d_0 = 937.6 + 698.7\delta_* - 2603.8\delta_*^2 + 3912\delta_*^3 - 2023.9\delta_*^4;$$

$$d_1 = -3.4 + 9.1\delta_* - 25\delta_*^2 + 60\delta_*^3; d_2 = -37.2 - 3.8\delta_* + 73.7\delta_*^2 - 170.9\delta_*^3;$$

$$d_4 = 5.7 + 15.8\delta_* - 33.5\delta_*^2 + 45.2\delta_*^3; d_5 = -14.1 + 96.9\delta_* - 213.3\delta_*^2 + 141.3\delta_*^3;$$

$$d_6 = 87.7 - 311.3\delta_* + 719.5\delta_*^2 - 493.9\delta_*^3; d_{11} = -6.7 + 15.7\delta_* - 1.8\delta_*^2 - 33.8\delta_*^3;$$

$$d_{22} = -15.9 - 76.4\delta_* + 129\delta_*^2 - 133\delta_*^3; d_{66} = -39.8 + 120\delta_* - 159.9\delta_*^2 + 55\delta_*^3;$$

$$d_{12} = -13.7 + 110.1\delta_* - 247.9\delta_*^2 + 215.8\delta_*^3; d_{24} = 3.3 - 16.3\delta_* + 32\delta_*^2 + 4.8\delta_*^3;$$

$$d_{26} = 14.3 + 327.7\delta_* - 1462.8\delta_*^2 + 2556.5\delta_*^3 - 1503.3\delta_*^4,$$

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

$$e_0 = 971.1 - 790.3\delta_* + 931.4\delta_*^2 - 194\delta_*^3 - 68.3\delta_*^4;$$

$$e_1 = -1 - 229.4\delta_* + 336.6\delta_*^2 - 189.2\delta_*^3; e_2 = -19.8 + 372.1\delta_* - 309\delta_*^2 + 69.8\delta_*^3;$$

$$e_4 = 2.4 + 203.8\delta_* - 368.2\delta_*^2 + 222.4\delta_*^3; e_5 = 1 + 84.7\delta_* - 195.8\delta_*^2 + 130.8\delta_*^3;$$

$$e_6 = 88.1 - 317.4\delta_* + 719.4\delta_*^2 - 480.9\delta_*^3; e_{11} = -7.6 + 63.3\delta_* - 32.1\delta_*^2 - 26.3\delta_*^3;$$

$$e_{12} = -16 + 62.5\delta_* - 56.9\delta_*^2 - 46.2\delta_*^3; e_{66} = -38.4 + 149.2\delta_* - 230.7\delta_*^2 + 109.8\delta_*^3;$$

$$e_{12} = -4.9 + 230.7\delta_* - 496.9\delta_*^2 + 389.8\delta_*^3; e_{24} = -1.3 - 95\delta_* + 127.9\delta_*^2 - 60.4\delta_*^3;$$

$$e_{12} = -4.9 + 230.7\delta_* - 496.9\delta_*^2 + 389.8\delta_*^3; e_{24} = -1.3 - 95\delta_* + 127.9\delta_*^2 - 60.4\delta_*^3;$$

$$e_{26} = 16.8 + 286.4\delta_* - 1303.7\delta_*^2 + 2324.8\delta_*^3 - 1376\delta_*^4,$$

$$B_{3*} = 10^{-6} (f_0 + f_1x_1 + f_2x_2 + f_4x_4 + f_5x_5 + f_6x_6 + f_{22}x_2^2 + f_{66}x_6^2 + f_{12}x_1x_2 + f_{14}x_1x_4 + f_{24}x_2x_4 + f_{26}x_2x_6)^2,$$

$$f_0 = 967.1 - 1043.8\delta_* + 1664.9\delta_*^2 - 1162.2\delta_*^3 + 403.4\delta_*^4;$$

$$f_1 = 3.6 - 102.1\delta_* + 118.2\delta_*^2 - 52.7\delta_*^3;$$

 $f_4 = -0.9 + 84.2\delta_* - 182.9\delta_*^2 + 117.3\delta_*^3$; $f_5 = 1.3 + 79.8\delta_* - 182.6\delta_*^2 + 121.5\delta_*^3$;

$$\begin{split} f_6 &= 88,4 - 322\delta_* + 725,4\delta_*^2 - 484,1\delta_*^3; \ f_{22} = -25,1 - 31,2\delta_* + 143,1\delta_*^2 - 173,7\delta_*^3; \\ f_{66} &= -34,8 + 156\delta_* - 244,8\delta_*^2 + 118,8\delta_*^3; f_{12} = -7,2 + 169,9\delta_* - 387,5\delta_*^2 + 317,6\delta_*^3; \\ f_{14} &= 1,8 + 30\delta_* - 51,7\delta_*^2 + 32,1\delta_*^3; \ f_{24} = 0,5 - 35,3\delta_* + 33,5\delta_*^2 - 5,6\delta_*^3; \\ f_{26} &= 18,4 + 273,5\delta_* - 1257,5\delta_*^2 + 2256,5\delta_*^3 - 1340,6\delta_*^4. \end{split}$$

Кодированные факторы: $x_1 = 1,272 H_{o^*} - 3,181$, $x_2 = 7,634 H_{cr^*} - 1,908$, $x_3 = 12,723 H_{B^*} - 4,453$, $x_4 = 5,456 A_{o^*} - 3,273$, $x_5 = 95,42 \nu_* - 2,862$, $x_6 = 4,237 B_{m} - 5,508$.

Средняя погрешность аппроксимации $\frac{1}{n_{\Sigma 1}}\sum_{i=1}^{i=n_{\Sigma 1}}\frac{\left(Y-Y_i\right)}{Y}$ между полученными значениями в эксперименте Y и предсказанными значениями Y_i для $(2.10)\div(2.15)$ составляет: $P_*-5,7\%$; $F_*-4,4\%$; $\Psi_*-2,7\%$; $B_{1^*}-3,9\%$, $B_{2^*}-4,9\%$, $B_{3^*}-3,8\%$.

На основании выражений (2.10), (2.11), (2.12) рассчитаны (рисунки 2.9, 2.10) статические нагрузочные характеристики и кривые намагничивания по (2.1), (2.2) и (2.6) в центре факторного пространства для трех значений воздушного рабочего зазора δ при $H_{\rm o*}=2.5$, $H_{\rm n*}=0.60$, $H_{\rm cr*}=0.25$, $H_{\rm B*}=0.35$, $H_{\rm o*}=0.60$, $V_*=0.03$, $H_{\rm gk}=0.02$ Диапазон изменения индукции $H_{\rm o*}=0.08$ до 1,72 Тл.

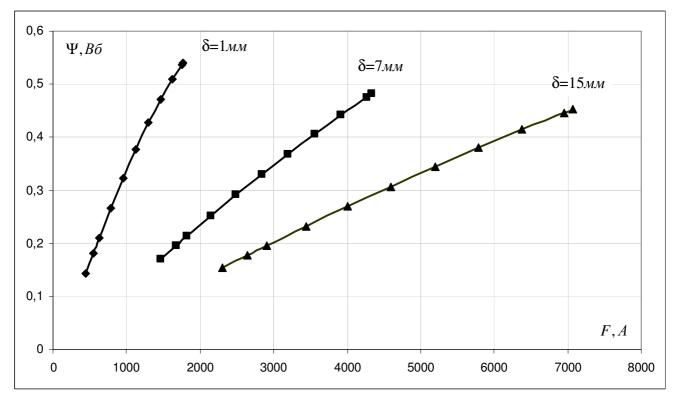


Рисунок 2.9 – Кривые намагничивания для однообмоточного ВБЭМ

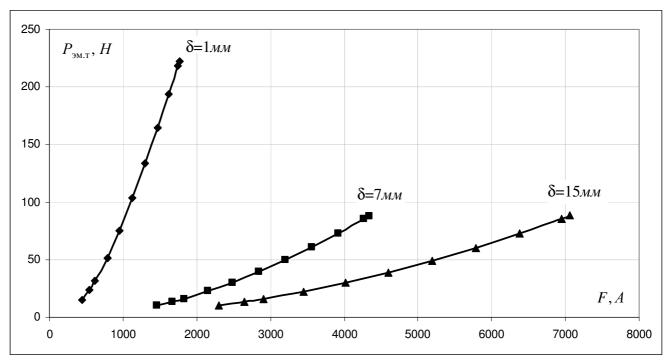


Рисунок 2.10 – Статические нагрузочные характеристики однообмоточного ВБЭМ

2.3 Моделирование статических электромагнитных характеристик двухобмоточного втяжного электромагнита

Объектом исследования является форсированно управляемый ВБЭМ постоянного напряжения с двумя вариантами размещения пусковой (ПО) и удерживающей (УО) обмотки: аксиальным, когда ПО находится ближе к проходному фланцу МС (рисунок 2.11, а), коаксиальным, когда ПО, находится ближе к якорю МС (рисунок 2.11, б).

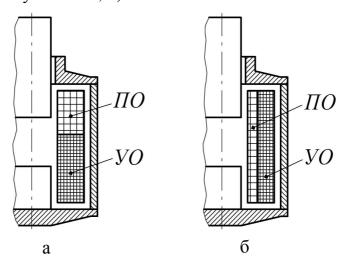


Рисунок 2.11 – Исследуемая двухобмоточная МС ВБЭМ

2.3.1 Математические модели характеристик двухобмоточного электромагнита с аксиально расположенными обмотками

Для МС с аксиально расположенными обмотками по предварительным расчетам [8] было выявлено, что $P_{_{\rm 3M.T}}$ в существенной мере зависит при фиксированной МДС от расположения ПО по оси движения якоря, увеличиваясь (в данном случае до 3,3 раза) с приближением торца ПО к проходному фланцу. На основе данных результатов было выбрано верхнее расположение ПО в катушке (см. рисунки 2.8, 2.11).

К факторам, варьируемым в ходе эксперимента для однообмоточной МС, добавлена относительная высота ΠO $X_2 = H_{\pi^*} = H_{\pi}/H_{o}$. Интервалы варьирования для каждого фактора [73] показаны в таблице 2.4.

Была составлена матрица ортогонального центрально-композиционного плана второго порядка для n=7 факторов (см. таблицу A.2 приложения A). Всего количество опытов составило $n_{\Sigma 2} = \left(2^n + 2n + 1\right) \cdot 15 = 2145$.

Таблица 2.4 – Факторы и факторные пространства вычислительного эксперимента для электромагнита с аксиальным расположением обмоток

X_i	-1,909	-1	0	+1	+1,909
$X_1 = H_{o^*} = H_o/d_{\text{MK}}$	1	1,714	2,5	3,286	4
$X_{2} H_{\pi^{*}} = H_{\pi}/H_{o} $ $(A_{\pi^{*}} = A_{\pi}/A_{o})$	0,20	0,39	0,60	0,81	1
$X_3 = H_{\text{cr}^*} = H_{\text{cr}}/H_{\text{o}}$	0	0,12	0,25	0,381	0,50
$X_4 = H_{\scriptscriptstyle \rm B^*} = H_{\scriptscriptstyle \rm B}/d_{\scriptscriptstyle \rm SK}$	0,20	0,2714	0,35	0,4286	0,50
$X_5 = A_{\mathrm{o}^*} = A_{\mathrm{o}}/d_{\mathrm{gk}}$	0,25	0,4167	0,60	0,7833	0,95
$X_6 = v_* = v/d_{\text{nk}}$	0,01	0,01952	0,03	0,0405	0,05
$X_7 = B_{\rm m}$	0,85	1,064	1,30	1,576	1,75

Полученные электромагнитные характеристики P_* , F_* , Ψ_* , B_{1*} , B_{2*} , B_{3*} представлены в виде полиномиальных зависимостей:

$$\begin{split} P_* &= 10^{-6} (a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 + a_5 x_5 + a_6 x_6 + a_{11} x_1^2 + a_{22} x_2^2 + a_{33} x_3^2 + a_{44} x_4^2 + \\ &+ a_{55} x_5^2 + a_{77} x_7^2 + a_{12} x_1 x_2 + a_{13} x_1 x_3 + a_{15} x_1 x_5 + a_{23} x_2 x_3 + a_{35} x_3 x_5 + a_{123} x_1 x_2 x_3 + \\ &+ a_{135} x_1 x_3 x_5)^2, \end{split} \tag{2.16}$$

$$\mathsf{FRe} \ a_0 = 732.3 - 2588.66 \delta_e + 5333.46 \delta_e^2 - 3394.56 \delta_e^3; \ a_1 = -40.5 - 87 \delta_e + 32.86 \delta_e^2; \\ a_2 &= 59.1 - 10.96 \delta_e - 23.46 \delta_e^2; \ a_3 = 53.8 + 18.26 \delta_e - 88.8 \delta_e^2; \\ a_5 &= 13.1 - 12.36 \delta_e - 31.76 \delta_e^2; \ a_6 = 4.1 - \delta_e + 2.16 \delta_e^2; \ a_{11} = -2.3 + 68.26 \delta_e - 89.36 \delta_e^2; \\ a_{22} &= 0.1 + 216 \delta_e - 107.86 \delta_e^2 + 92.56 \delta_e^3; \ a_{33} = -0.6 + 69.36 \delta_e - 172.26 \delta_e^2 + 124.86 \delta_e^3; \\ a_{44} &= 1.6 - 9.86 \delta_e + 13.56 \delta_e^2 + 73.36 \delta_e^3; \ a_{12} = 13.1 - 73.56 \delta_e + 141.96 \delta_e^2 - 74.56 \delta_e^3; \\ a_{23} &= 3.3 + 56.76 \delta_e - 196.26 \delta_e^2 + 134.56 \delta_e^3; \ a_{135} = 9 - 18.56 \delta_e + 56.66 \delta_e^2 - 12.66 \delta_e^3; \\ a_{23} &= 3.3 + 56.76 \delta_e - 196.26 \delta_e^2; \ a_{135} = 0.2 + 8.36 \delta_e + 6.56 \delta_e^2, \\ F_* &= 10^{-3} (b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_4 x_4 + b_5 x_5 + b_6 x_6 + b_7 x_7 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 + b_{33} x_3^2 + b_{155} x_1^2 x_2 x_5 + b_{135} x_1 x_3 x_5 + b_{235} x_2 x_3 x_5), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b_{15} &= 0.2 + 7.8\delta_* - 15.3\delta_*^2 + 26.5\delta_*^3; \ b_{23} &= -0.3 + 12.9\delta_*; \\ b_{25} &= 0.05 - 3.2\delta_* + 3.8\delta_*^2 - 7.4\delta_*^3; \ b_{35} &= -0.06 - 5.2\delta_* + 10.6\delta_*^2 - 19.5\delta_*^3; \\ b_{125} &= -0.2 + 4.1\delta_* - 5.9\delta_*^2 + 9\delta_*^3; \ b_{135} &= -0.2 + 3.6\delta_* - 6.2\delta_*^2 + 15.6\delta_*^3; \\ b_{235} &= 0.07 - 3.1\delta_* + 3.6\delta_*^2 - 5.1\delta_*^3, \\ \Psi_* &= 10^{-3}(c_0 + c_1x_1 + c_2x_2 + c_3x_3 + c_6x_6 + c_{22}x_2^2 + c_{33}x_3^2 + c_{12}x_1x_2 + c_{13}x_1x_3 + \\ &+ c_{15}x_1x_5 + c_{23}x_2x_3 + c_{25}x_2x_5 + c_{123}x_1x_2x_3), \end{aligned} \tag{2.18}$$

$$\mathsf{TRe} \ c_0 &= 983.6 - 323.8\delta_* + 128\delta_*^2; \ c_1 &= -3.8 - 43.9\delta_* + 105.7\delta_*^2 - 80.6\delta_*^3; \\ c_2 &= -0.08 - 236.8\delta_* + 290.8\delta_*^2 - 114\delta_*^3; \ c_3 &= 3.7 - 95.5\delta_* + 119.8\delta_*^2 - 38.3\delta_*^3; \\ c_6 &= 1.3 + 56.9\delta_* - 187.2\delta_*^2 + 278.6\delta_*^3 - 148.2\delta_*^4; \ c_{22} &= 0.9 - 11.9\delta_* + 38.4\delta_*^2; \\ c_{33} &= 2.2 - 17.1\delta_* + 40.4\delta_*^2; \ c_{12} &= -3.7 - 42.5\delta_* + 65.9\delta_*^2 - 68.5\delta_*^3; \\ c_{13} &= 1.5 - 34.8\delta_* + 53.1\delta_*^2 - 44.1\delta_*^3; \ c_{15} &= 5 + 1.9\delta_* - 9.4\delta_*^2 + 24.3\delta_*^3; \\ c_{23} &= 3.6 - 30.5\delta_* + 72.9\delta_*^2; \ c_{25} &= 3.4 + 28.7\delta_* - 25.8\delta_*^2; \\ c_{123} &= 1 - 16.4\delta_* - 7.9\delta_*^2, \\ B_{1^9} &= 10^{-3}(d_0 + d_1x_1); \end{aligned} \tag{2.19}$$

$$\mathsf{TRe} \ d_0 &= 985.1 + 60.3\delta_* - 140.8\delta_*^2 + 98.7\delta_*^3; \\ d_1 &= -11.5 + 42.4\delta_* - 104\delta_*^2 + 74.6\delta_*^3, \\ B_{2^9} &= 10^{-4}(e_0 + e_1x_1 + e_2x_2 + e_3x_3 + e_5x_5 + e_{11}x_1^2 + e_{22}x_2^2 + e_{33}x_3^2 + e_{53}x_2x_3x_3^2)^2, (2.20) \\ \mathsf{TRe} \ e_0 &= 93.3 - 161.5\delta_* + 237.4\delta_*^2 - 136.6\delta_*^3; \ e_1 &= -2.4 - 25.8\delta_* + 44.4\delta_*^2 - 31.1\delta_*^3; \\ e_2 &= 3.4 + 19.5\delta_* - 28.9\delta_*^2 + 22.7\delta_*^3; \ e_3 &= 2.2 + 13.7\delta_* - 16.4\delta_*^2 + 14.2\delta_*^3; \\ e_5 &= -1.1 + 8.6\delta_* - 29.2\delta_*^2 + 15.7\delta_*^3; \ e_{11} &= 0.1 + 4.8\delta_* - 2.1\delta_*^2; \\ e_{22} &= 0.02 + 3.1\delta_* + 0.2\delta_*^2; \ e_{33} &= 0.4 + 9.1\delta_* - 13.7\delta_*^2 + 9.8\delta_*^3; \\ e_{13} &= 0.9 + 2.6\delta_* - 8.8\delta_*^2 + 5.5\delta_*^3; \ e_{12} &= 0.9 - 1.3\delta_* - 0.9\delta_*^2; \\ e_{13} &= 0.9 + 2.6\delta_* - 8.8\delta_*^2 + 5.5\delta_*^3; \ e_{12} &= 0.9 - 1.3\delta_* - 0.9\delta_*^2; \\ e_{13} &= 0.9 + 2.6\delta_* - 8.8\delta_*^2 + 5.5\delta_*^3; \ e_{12} &= 0.9 - 1.3\delta_* - 0.9\delta_$$

$$\begin{split} &e_{35} = -0.5 - 3.1\delta_* + 5.1\delta_*^2 - 4.5\delta_*^3 \ ; \ e_{123} = 0.1 + 2.9\delta_* - 6\delta_*^2 + 4.6\delta_*^3 \ ; \\ &e_{135} = -0.1 + 0.9\delta_* - 0.8\delta_*^2 + 1.5\delta_*^3 \ ; \ e_{235} = -0.1 - 0.8\delta_* - 0.6\delta_*^2 \ , \\ &B_{3*} = 10^{-4} \left(f_0 + f_1 x_1 + f_2 x_2 + f_3 x_3 + f_5 x_5 + f_6 x_6 + f_{11} x_1^2 + f_{22} x_2^2 + f_{33} x_3^2 + f_{55} x_5^2 + f_{12} x_1 x_2 + f_{13} x_1 x_3 + f_{15} x_1 x_5 + f_{23} x_2 x_3 + f_{25} x_2 x_5 + f_{35} x_3 x_5 + f_{123} x_1 x_2 x_3 + f_{125} x_1 x_2 x_5 + f_{135} x_1 x_3 x_5 + f_{235} x_2 x_3 x_5 \right)^2 \ , \end{split}$$
 (2.21)
где $f_0 = 92.2 - 173.5\delta_* + 264.9\delta_*^2 - 154.1\delta_*^3 \ ; \ f_1 = -1.9 - 14.8\delta_* + 24.6\delta_*^2 - 18.5\delta_*^3 \ ; \ f_2 = 3.4 + 16.9\delta_* - 25.3\delta_*^2 + 20.2\delta_*^3 \ ; \ f_3 = 3.4 + 28.4\delta_* - 46.5\delta_*^2 + 33\delta_*^3 \ ; \ f_5 = 0.8 + 8.7\delta_* - 13.4\delta_*^2 + 6.5\delta_*^3 \ ; \ f_6 = 0.5 \ ; \ f_{11} = 0.04 + 1.8\delta_* \ ; \ f_{22} = 0.3 + 3.1\delta_* \ ; \ f_{33} = -0.9 + 2\delta_* + 2\delta_*^2 \ ; \ f_{55} = -0.2 - 1.4\delta_* + 1.1\delta_*^2 \ ; \ f_{12} = 0.9 - 0.7\delta_* - 1.1\delta_*^2 \ ; \ f_{13} = 0.6 - 2.1\delta_* \ ; \ f_{15} = 0.7 - 0.2\delta_* + 1.2\delta_*^2 \ ; \ f_{23} = 0.4 + 6.4\delta_* \ ; \ f_{25} = -0.4 + 0.3\delta_* - 1.4\delta_*^2 \ ; \ f_{35} = -0.3 + 1.7\delta_* - 2.7\delta_*^2 \ ; \ f_{123} = 0.1 + 2.6\delta_* - 5.7\delta_*^2 + 4.2\delta_*^3 \ ; \ f_{125} = -0.1 + 1.6\delta_* - 2.9\delta_*^2 + 2.6\delta_*^3 \ ; \ f_{135} = -0.06 + 0.8\delta_* - 1.4\delta_*^2 + 2\delta_*^3 \ ; \ f_{235} = -0.09 - 0.5\delta_* - 0.7\delta_*^2 \ . \$ Кодированные факторы: $x_1 = 1.272H_{0^*} - 3.181, \quad x_2 = 4.762H_{\pi^*} - 2.857, \ \end{cases}$

Кодированные факторы: $x_1 = 1,272H_{o^*} - 3,181$, $x_2 = 4,762H_{\pi^*} - 2,857$, $x_3 = 7,634H_{cr^*} - 1,908$, $x_4 = 12,723H_{B^*} - 4,453$, $x_5 = 5,456A_{o^*} - 3,273$, $x_6 = 95,42v_* - 2,862$, $x_7 = 4,237B_{m} - 5,508$.

Средняя погрешность аппроксимации для $(2.16) \div (2.21)$ составляет: $P_* - 6,0\%$; $F_* - 1,8\%$; $\Psi_* - 1,0\%$; $B_{1*} - 1,0\%$, $B_{2*} - 2,5\%$, $B_{3*} - 3,2\%$.

По выражениям (2.16), (2.17), (2.18) рассчитаны (рисунки 2.12, 2.13) статические нагрузочные характеристики и кривые намагничивания по (2.1), (2.2) и (2.6) в центре факторного пространства для трех значений δ при $H_{\rm o*}=2.5$, $H_{\rm ii*}=0.60$, $H_{\rm cr*}=0.25$, $H_{\rm ii*}=0.35$, $H_{\rm ii*}=0.60$, $H_{\rm ii*}=0.02$ диапазон изменения индукции $H_{\rm ii*}=0.08$ до 1.75 Тл.

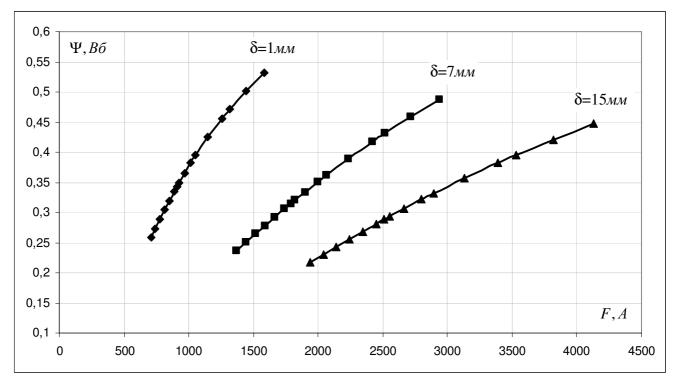


Рисунок 2.12 – Кривые намагничивания МС с аксиальным расположением обмоток

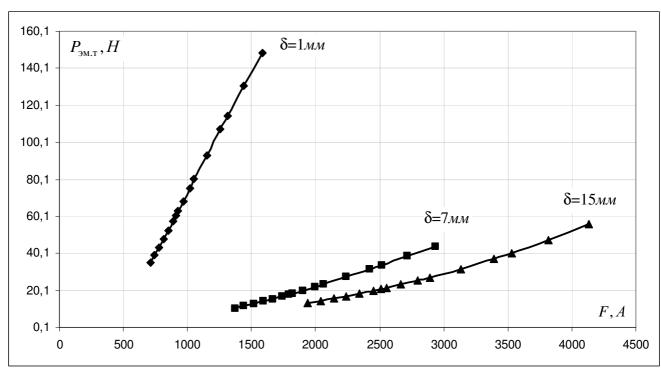


Рисунок 2.13 – Статические нагрузочные характеристики MC с аксиальным расположением обмоток

2.3.2 Математические модели характеристик двухобмоточного электромагнита с коаксиально расположенными обмотками

Факторы и диапазоны их варьирования взяты те же самые, что и в таблице 2.4, но вместо высоты ПО H_{Π^*} изменяется ее толщина $A_{\Pi^*} = A_\Pi/A_0$ (см. рисунок 2.8).

Получены следующие выражения для P_* , F_* , Ψ_* , B_{1*} , B_{2*} , B_{3*} : $P_* = 10^{-6} \left(a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 + a_4 x_4 + a_5 x_5 + a_6 x_6 + a_{11} x_1^2 + a_{22} x_2^2 + a_{33} x_3^2 + a_{13} x_1^2 + a_{24} x_2 + a_{13} x_3^2 + a_{14} x_1 + a_{14} x_2 + a_{15} x_3 + a_{15} x_3 + a_{15} x_4 + a_{15} x_5 + a$ $+a_{44}x_4^2+a_{66}x_6^2a_{77}x_7^2+a_{12}x_1x_2+a_{13}x_1x_3+a_{15}x_1x_5+a_{35}x_3x_5$)², (2.22)где $a_0 = 834 - 2466,3\delta_* + 4636,7\delta_*^2 - 2795,1\delta_*^3$; $a_1 = -18,6 - 233,3\delta_* + 222,7\delta_*^2$; $a_2 = -0.3 - 7.6\delta_* - 7.1\delta_*^2 + 11.6\delta_*^3$; $a_3 = 45.1 + 134.6\delta_* - 209.2\delta_*^2$; $a_4 = -3.5 - 21.6\delta_* + 67.8\delta_*^2 - 47.7\delta_*^3$; $a_5 = 4.1 + 55.5\delta_* - 166.7\delta_*^2 + 129.8\delta_*^3$; $a_6 = 7.2 + 29.7\delta_* - 101.6\delta_*^2 + 73.9\delta_*^3$; $a_{11} = 3.8 + 11.3\delta_* + 168.2\delta_*^2 - 244.5\delta_*^3$; $a_{22} = 2.5 - 9.8\delta_* + 49.3\delta_*^2 - 41.7\delta_*^3$; $a_{33} = -17.4 + 97.5\delta_* - 229.8\delta_*^2 + 112.4\delta_*^3$; $a_{44} = 2.9 - 2.7\delta_* + 34\delta_*^2 - 30.6\delta_*^3$; $a_{66} = -0.06 + 1.8\delta_* + 29.3\delta_*^2 - 29.6\delta_*^3$; $a_{77} = 4 - 4.4\delta_* + 33.5\delta_*^2 - 29.4\delta_*^3$; $a_{12} = 0.3 + 7.6\delta_* + 8.2\delta_*^2 - 13.9\delta_*^3$; $a_{13} = 8.1 + 13.1\delta_* - 198\delta_*^2 + 310.9\delta_*^3$; $a_{15} = 3.3 + 9\delta_* + 10\delta_*^2 - 21.4\delta_*^3$; $a_{25} = -5.4 + 8.4\delta_* - 36.7\delta_*^2 + 43.9\delta_*^3$ $F_* = 10^{-3} (b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_4 x_4 + b_5 x_5 + b_6 x_6 + b_7 x_7 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 + b_{33} x_3^2 + b_{13} x_1^2 + b_{22} x_2^2 + b_{23} x_3^2 + b_{13} x_1^2 + b_{23} x_2^2 + b_{23} x_3^2 + b_{$ $+b_{44}x_4^2+b_{66}x_6^2+b_{77}x_7^2+b_{12}x_1x_2+b_{13}x_1x_3+b_{15}x_1x_5+b_{25}x_2x_5+b_{35}x_3x_5+b_{125}x_1x_2x_5+$ $+b_{135}x_1x_3x_5+b_{136}x_1x_3x_6$), (2.23)где $b_0 = 35.6 + 429.9\delta_* - 595.6\delta_*^2 + 452.4\delta_*^3$; $b_1 = 0.4 - 27.3\delta_* - 129.7\delta_*^2 + 122.8\delta_*^3$; $b_2 = 0.04 - 0.05\delta_* - 9.5\delta_*^2 + 6.6\delta_*^3$; $b_3 = 0.2 + 50.8\delta_* + 92.5\delta_*^2 - 124.8\delta_*^3$; $b_4 = -2.2 - 10.3\delta_* + 18.7\delta_*^2 - 9.7\delta_*^3$; $b_5 = -0.5 + 18.3\delta_* - 32\delta_*^2 + 22.7\delta_*^3$; $b_6 = 3.5 + 18.5\delta_* - 34.7\delta_*^2 + 19.6\delta_*^3$; $b_7 = 1,7 - 7,5\delta_* + 31,4\delta_*^2 - 50,4\delta_*^3 + 28,2\delta_*^4$; $b_{11} = 1 - 16,3\delta_* + 122,5\delta_*^2 - 107,2\delta_*^3$;

$$\begin{aligned} b_{22} &= 0,2 - 2,4\delta_{\circ} + 21,5\delta_{\circ}^{2} - 20,3\delta_{\circ}^{3}; \ b_{33} = -0.8 - 5,5\delta_{\circ} + 20,3\delta_{\circ}^{2} - 44,4\delta_{\circ}^{3}; \\ b_{44} &= 0,4 + 1,4\delta_{\circ} + 13,6\delta_{\circ}^{2} - 14,1\delta_{\circ}^{3}; \ b_{66} = -0.3 - 2,3\delta_{\circ} + 20,8\delta_{\circ}^{2} - 19,7\delta_{\circ}^{3}; \\ b_{77} &= 1,4 - 2,1\delta_{\circ} + 19,8\delta_{\circ}^{2} - 17,9\delta_{\circ}^{3}; \ b_{12} = -0,004 - 0,2\delta_{\circ} + 11,9\delta_{\circ}^{2} - 9,2\delta_{\circ}^{3}; \\ b_{13} &= -1,1 + 34,5\delta_{\circ} - 163\delta_{\circ}^{2} + 183\delta_{\circ}^{3}; \ b_{15} = 0,2 + 1,3\delta_{\circ} + 16,1\delta_{\circ}^{2} - 15,6\delta_{\circ}^{3}; \\ b_{25} &= 0,06 - 0,8\delta_{\circ} - 7,2\delta_{\circ}^{2} + 5,8\delta_{\circ}^{3}; \ b_{35} = -0,4 + 1,8\delta_{\circ} - 24,9\delta_{\circ}^{2} + 25,7\delta_{\circ}^{3}; \\ b_{136} &= 0,6 - 9,1\delta_{\circ} + 30,9\delta_{\circ}^{2} - 21,4\delta_{\circ}^{3}, \\ W_{\circ} &= 10^{-3}(c_{0} + c_{1}x_{1} + c_{2}x_{2} + c_{3}x_{3} + c_{5}x_{5} + c_{6}x_{6} + c_{11}x_{1}^{2} + c_{22}x_{2}^{2} + c_{33}x_{3}^{2} + c_{44}x_{4}^{2} + \\ + c_{77}x_{7}^{2} + c_{13}x_{1}x_{3}, \end{aligned} \tag{2.24}$$

$$\text{True} \ c_{0} &= 989,5 - 988,2\delta_{\circ} + 1126\delta_{\circ}^{2} - 467,8\delta_{\circ}^{3}; \\ c_{1} &= -9,8 - 90,1\delta_{\circ} - 2\delta_{\circ}^{2} + 146,7\delta_{\circ}^{3}; \ c_{2} &= 3,2 + 35\delta_{\circ} - 46,5\delta_{\circ}^{2} + 36,9\delta_{\circ}^{3}; \\ c_{3} &= 14,1 + 32,3\delta_{\circ} + 184,7\delta_{\circ}^{2} - 239,1\delta_{\circ}^{3}; \ c_{5} &= 3,5 + 91\delta_{\circ} - 172\delta_{\circ}^{2} + 125,1\delta_{\circ}^{3}; \\ c_{22} &= 2,4 - 6,9\delta_{\circ} + 70,8\delta_{\circ}^{2} - 75,7\delta_{\circ}^{3}; \ c_{33} &= -2,8 + 84,8\delta_{\circ} - 110\delta_{\circ}^{2}; \\ c_{44} &= 1,7 + 5,6\delta_{\circ} + 47,1\delta_{\circ}^{2} - 60,4\delta_{\circ}^{3}; \ c_{77} &= 3,8 - 14,3\delta_{\circ} + 147,9\delta_{\circ}^{2} - 256,5\delta_{\circ}^{3} + 125,2\delta_{\circ}^{4}; \\ c_{13} &= 3,1 + 33,2\delta_{\circ} - 301,5\delta_{\circ}^{2} + 387,2\delta_{\circ}^{3}, \\ B_{1^{\circ}} &= 10^{-3}(e_{0} + e_{1}x_{1} + e_{2}x_{2} + e_{3}x_{3} + e_{4}x_{4} + e_{5}x_{5} + e_{6}x_{6} + e_{11}x_{1}^{2} + e_{33}x_{3}^{2} + e_{12}x_{1}x_{2} + \\ e_{13}x_{1}x_{3} + e_{35}x_{3}x_{5}), \end{aligned}$$

$$B_{2*} = 10^{-6} \left(u_0 + u_1 x_1 + u_2 x_2 + u_3 x_3 + u_5 x_5 + u_6 x_6 + u_{11} x_1^2 + u_{33} x_3^2 + u_{13} x_1 x_3 + u_{14} x_1 +$$

 $x_4 = 12,723H_{R^*} - 4,453$, $x_5 = 5,456A_{Q^*} - 3,273$, $x_3 = 7,634H_{cr*} - 1,908,$ $x_6 = 95,42v_* - 2,862$, $x_7 = 4,237B_{\rm m} - 5,508$.

Средняя погрешность аппроксимации для $(2.22)\div(2.27)$ составляет: P_* 5,0%; $F_* - 1,9\%$; $\Psi - 1,6\%$; $B_1 - 3,5\%$, $B_2 - 3,9\%$, $B_3 - 3,5\%$.

Аналогично рассчитаны (рисунок 2.14, 2.15), используя $(2.22) \div (2.24)$ статические кривые намагничивания и нагрузочные характеристики по (2.1), (2.2) и (2.6) в центре факторного пространства: $H_{o^*} = 2.5$, $A_{\pi^*} = 0.60$, $H_{cr^*} = 0.25$, $H_{_{\mathrm{B}^*}} = 0.35\,, \ A_{_{\mathrm{O}^*}} = 0.60\,, \ \nu_* = 0.03\,$ для трех значений δ .

В процессе выполнения эксперимента для местоположения сечения магнитопровода с максимальной магнитной индукцией для МС с коаксиальным расположением обмоток характерны сечения в якоре и в стопе, реже – в корпусе. Для аксиальной системы – чаще в корпусе, чем в якоре; в стопе – не наблюдалось.

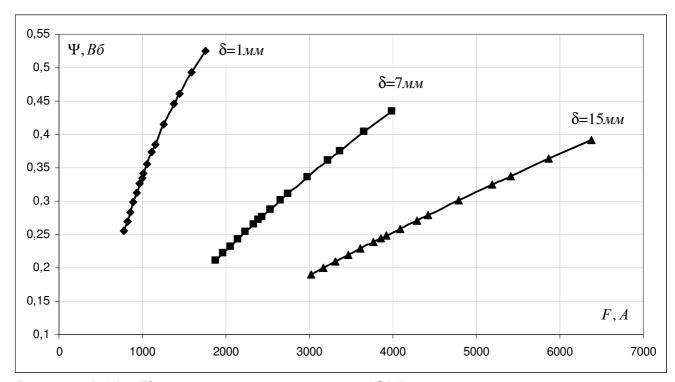


Рисунок 2.14 – Кривые намагничивания для ЭМ с коаксиальным расположением обмоток

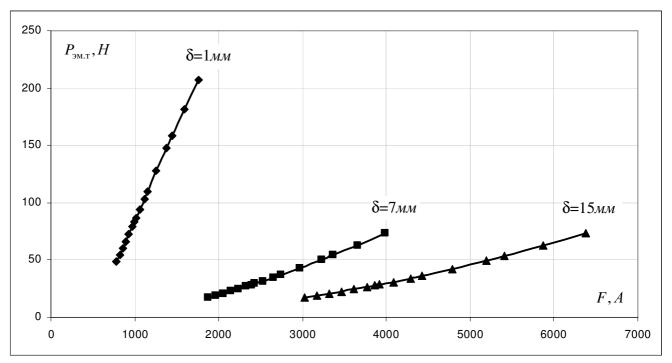


Рисунок 2.15 – Статические нагрузочные характеристики для ЭМ с коаксиальным расположением обмоток

2.4 Определение границы линейности магнитных систем

2.4.1 Однообмоточная магнитная система

Определим значение индукции $B_{\text{m.г}}$ для однообмоточной МС. Преобразуем уравнение (2.3):

$$\frac{d\Psi}{dF} = \frac{d\Psi/dB_{\rm m}}{dF/dB_{\rm m}} = \frac{\frac{d\Psi_{*}}{dB_{\rm m}}\bigg|_{B_{\rm m.r}} \cdot \Psi_{\rm 6a3} + \Psi_{*} \cdot \frac{d\Psi_{\rm 6a3}}{dB_{\rm m}}\bigg|_{B_{\rm m.r}}}{\frac{dF_{*}}{dB_{\rm m}}\bigg|_{B_{\rm m.r}} \cdot F_{\rm 6a3} + F_{*} \cdot \frac{dF_{\rm 6a3}}{dB_{\rm m}}\bigg|_{B_{\rm m.r}}} = \frac{\Psi_{*}(B_{\rm m.r}) \cdot B_{\rm m.r}}{F_{*}(B_{\rm m.r}) \cdot B_{\rm m.r}} \frac{\pi d_{\rm gK}^{2}}{4} N. \quad (2.28)$$

Представим (2.12) и (2.11) в виде:

$$\Psi_* = 10^{-3} C$$
.

где $C = c_0 + c_1 x_1 + c_2 x_2 + c_4 x_4 + c_5 x_5 + c_6 x_6 + c_{11} x_1^2 + c_{22} x_2^2 + c_{33} x_3^2 + c_{44} x_4^2 + c_{55} x_5^2 + c_{66} x_6^2 + c_{12} x_1 x_2 + c_{16} x_1 x_6 + c_{26} x_2 x_6.$

$$F = 10^{-6} E^2$$

где $E = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_5 x_5 + b_6 x_6 + b_{22} x_2^2 + b_{44} x_4^2 + b_{66} x_6^2 + b_{12} x_1 x_2 + b_{14} x_1 x_4 + b_{26} x_2 x_6.$

Тогда, учитывая $x_6 = 4,237 \cdot B_{\text{m.r}} - 5,508$ и подставляя введенные обозначения в [2.28] получим:

$$\frac{10^{-3}(4,237 \cdot M_{c} + 2 \cdot c_{66} \cdot x_{6} \cdot 4,237) \cdot B_{m.\Gamma} \cdot \frac{\pi d_{gK}^{2}}{4} N + 10^{-3} C \cdot \frac{\pi d_{gK}^{2}}{4} N}{10^{-6} \cdot 2 \cdot E(4,237 \cdot M_{c} + 2 \cdot b_{66} \cdot x_{6} \cdot 4,237) \cdot B_{m.\Gamma} \cdot \frac{d_{gK}}{\mu_{0}} + 10^{-6} E^{2} \cdot \frac{d_{gK}}{\mu_{0}}} = \frac{10^{-3} (4,237 \cdot M_{c} + 2 \cdot b_{66} \cdot x_{6} \cdot 4,237) \cdot B_{m.\Gamma} \cdot \frac{d_{gK}}{\mu_{0}} + 10^{-6} E^{2} \cdot \frac{d_{gK}}{\mu_{0}}}{10^{-6} E^{2} \cdot \frac{d_{gK}}{\mu_{0}}} = \frac{10^{-3} (4,237 \cdot M_{c} + 2 \cdot b_{66} \cdot x_{6} \cdot 4,237) \cdot B_{m.\Gamma} \cdot \frac{d_{gK}}{\mu_{0}} + 10^{-6} E^{2} \cdot \frac{d_{gK}}{\mu_{0}}}{10^{-6} E^{2} \cdot \frac{d_{gK}}{\mu_{0}}} = \frac{10^{-3} (4,237 \cdot M_{c} + 2 \cdot b_{66} \cdot x_{6} \cdot 4,237) \cdot B_{m.\Gamma} \cdot \frac{d_{gK}}{\mu_{0}} + 10^{-6} E^{2} \cdot \frac{d_{gK}}{\mu_{0}}}{10^{-6} E^{2} \cdot \frac{d_{gK}}{\mu_{0}}} = \frac{10^{-6} (4,237 \cdot M_{c} + 2 \cdot b_{66} \cdot x_{6} \cdot 4,237) \cdot B_{m.\Gamma} \cdot \frac{d_{gK}}{\mu_{0}}}{10^{-6} E^{2} \cdot \frac{d_{gK}}{\mu_{0}}} = \frac{10^{-6} (4,237 \cdot M_{c} + 2 \cdot b_{66} \cdot x_{6} \cdot 4,237) \cdot B_{m.\Gamma}}{10^{-6} E^{2} \cdot \frac{d_{gK}}{\mu_{0}}} = \frac{10^{-6} (4,237 \cdot M_{c} + 2 \cdot b_{66} \cdot x_{6} \cdot 4,237) \cdot B_{m.\Gamma}}{10^{-6} E^{2} \cdot \frac{d_{gK}}{\mu_{0}}} = \frac{10^{-6} (4,237 \cdot M_{c} + 2 \cdot b_{66} \cdot x_{6} \cdot 4,237) \cdot B_{m.\Gamma}}{10^{-6} E^{2} \cdot \frac{d_{gK}}{\mu_{0}}} = \frac{10^{-6} (4,237 \cdot M_{c} + 2 \cdot b_{66} \cdot x_{6} \cdot 4,237) \cdot B_{m.\Gamma}}{10^{-6} E^{2} \cdot \frac{d_{gK}}{\mu_{0}}} = \frac{10^{-6} (4,237 \cdot M_{c} + 2 \cdot b_{66} \cdot x_{6} \cdot 4,237) \cdot B_{m.\Gamma}}{10^{-6} E^{2} \cdot \frac{d_{gK}}{\mu_{0}}} = \frac{10^{-6} (4,237 \cdot M_{c} + 2 \cdot b_{66} \cdot x_{6} \cdot 4,237) \cdot B_{m.\Gamma}}{10^{-6} E^{2} \cdot \frac{d_{gK}}{\mu_{0}}} = \frac{10^{-6} (4,237 \cdot M_{c} + 2 \cdot b_{66} \cdot x_{6} \cdot 4,237) \cdot B_{m.\Gamma}}{10^{-6} E^{2} \cdot \frac{d_{gK}}{\mu_{0}}} = \frac{10^{-6} (4,237 \cdot M_{c} + 2 \cdot b_{66} \cdot x_{6} \cdot 4,237) \cdot B_{m.\Gamma}}{10^{-6} E^{2} \cdot \frac{d_{gK}}{\mu_{0}}} = \frac{10^{-6} (4,237 \cdot M_{c} + 2 \cdot b_{66} \cdot x_{6} \cdot 4,237) \cdot B_{m.\Gamma}}{10^{-6} E^{2} \cdot \frac{d_{gK}}{\mu_{0}}} = \frac{10^{-6} (4,237 \cdot M_{c} + 2 \cdot b_{66} \cdot x_{6} \cdot 4,237) \cdot B_{m.\Gamma}}{10^{-6} E^{2} \cdot \frac{d_{gK}}{\mu_{0}}} = \frac{10^{-6} (4,237 \cdot M_{c} + 2 \cdot b_{66} \cdot x_{6} \cdot 4,237) \cdot B_{m.\Gamma}}{10^{-6} E^{2} \cdot \frac{d_{gK}}{\mu_{0}}} = \frac{10^{-6} (4,237 \cdot M_{c} + 2 \cdot b_{66} \cdot x_{6} \cdot 4,237) \cdot B_{m.\Gamma}}{10^{-6} E^{2} \cdot \frac$$

$$= \frac{10^{-3} C \cdot B_{\text{m.r}} \cdot \frac{\pi d_{\text{як}}^2}{4} N}{10^{-6} E^2 \cdot B_{\text{m.r}} \cdot \frac{d_{\text{як}}}{\mu_0}},$$

где
$$M_c = c_6 + c_{16}x_1 + c_{26}x_2$$
;

$$M_{\rm e} = b_6 + b_{26} x_2$$
.

Получим

$$\frac{4,237(M_{c} + 2 \cdot c_{66} \cdot x_{6}) \cdot B_{m.r} + C}{2 \cdot 4,237(M_{e} + 2 \cdot b_{66} \cdot x_{6}) \cdot B_{m.r} + E} = \frac{C}{E},$$

$$(M_{c} + 2 \cdot c_{66} \cdot x_{6})E - 2 \cdot C(M_{e} + 2 \cdot b_{66} \cdot x_{6}) = 0.$$

В результате, перемножив слагаемые и введя обозначения:

$$\begin{split} N_{\rm c} &= c_0 + c_1 x_1 + c_2 x_2 + c_4 x_4 + c_5 x_5 + c_{11} x_1^2 + c_{22} x_2^2 + c_{33} x_3^2 + c_{44} x_4^2 + c_{55} x_5^2 + c_{12} x_1 x_2 \,, \\ N_{\rm e} &= b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_5 x_5 + b_{22} x_2^2 + b_{44} x_4^2 + b_{12} x_1 x_2 + b_{14} x_1 x_4 \,, \end{split}$$

получим кубическое уравнение:

$$x_6^3 + x_6^2 \frac{3M_c}{2c_{66}} + x_6 \frac{4b_{66}N_c + M_eM_c - 2c_{66}N_e}{2b_{66}c_{66}} + \frac{2M_eN_c - M_cN_e}{2b_{66}c_{66}} = 0. \quad (2.29)$$

В общем случае уравнение (2.29) можно решить методом Виета-Кардано.

Вычисленные значения $B_{\text{m.г}} = (x_6 + 5,508)/4,237$ для центра факторного пространства при $x_{\text{i}} = 0$ для 15 величин зазоров показаны в таблице 2.5.

Таблица 2.5 — Значения граничной индукции $B_{\rm m.r.}$ для условий центра факторного пространства

δ , mm	1	2	3	4	5	6	7	8
$B_{\mathrm{m.r}}$, Тл	1,105	1,143	1,148	1,13	1,103	1,077	1,064	1,067
δ , mm	9	10	11	12	13	14	15	
$B_{\mathrm{m.r}}$, Тл	1,086	1,113	1,139	1,154	1,151	1,121	1,049	

Достроим полученные кривые намагничивания и статические нагрузочные характеристики при $0 < B < B_{\rm m.r.}$ для размеров МС, которые соответствуют центру факторного пространства, используя (2.4), (2.5), (2.8) и (2.9) (рисунки 2.16, 2,17).

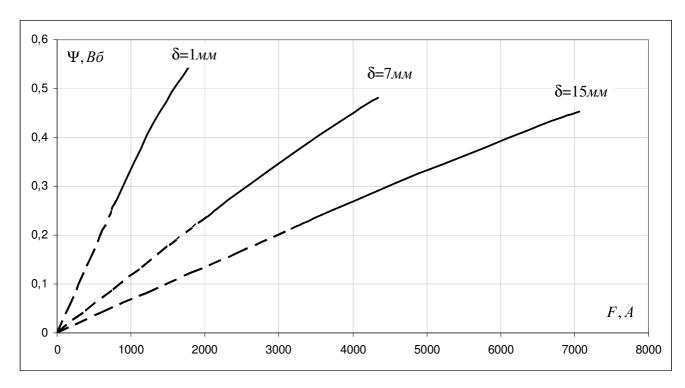


Рисунок 2.16 — Кривые намагничивания в диапазоне $0 < B_{\rm m} < 1,72~T\pi$ однообмоточной МС для центра факторного пространства ($x_i = 0$)

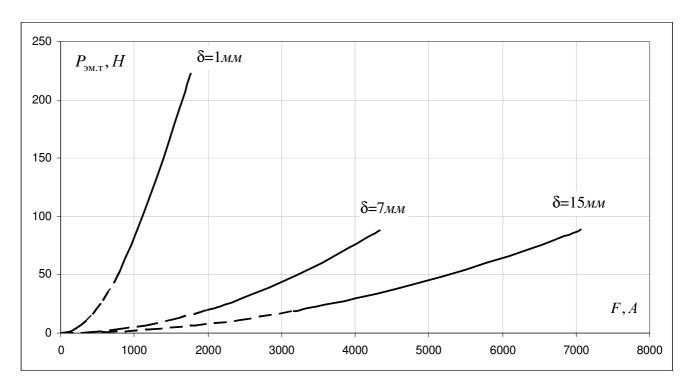


Рисунок 2.17 — Статические нагрузочные характеристики однообмоточной МС в диапазоне $0 < B_{\rm m} < 1{,}72~Tn~$ для центра факторного пространства ($x_i = 0$)

2.4.2 Магнитная система с аксиально расположенными обмотками

Определим значение индукции $B_{\rm m.r.}$ для MC с аксиальным расположением обмоток, учитывая (2.17, 2.18), решив уравнение (2.28).

Аналогично, представим (2.18) и (2.17) в виде:

$$\Psi_* = 10^{-3} C,$$
 где $C = c_0 + c_1 x_1 + c_2 x_2 + c_3 x_3 + c_6 x_6 + c_{22} x_2^2 + c_{33} x_3^2 + c_{12} x_1 x_2 + c_{13} x_1 x_3 + c_{15} x_1 x_5 + c_{23} x_2 x_3 + c_{25} x_2 x_5 + c_{123} x_1 x_2 x_3.$
$$F_* = 10^{-3} F_*.$$

где
$$E = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_4 x_4 + b_5 x_5 + b_6 x_6 + b_7 x_7 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 + b_{33} x_3^2 + b_{55} x_5^2 + b_{77} x_7^2 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{15} x_1 x_5 + b_{23} x_2 x_3 + b_{25} x_2 x_5 + b_{35} x_3 x_5 + b_{125} x_1 x_2 x_5 + b_{135} x_1 x_3 x_5 + b_{235} x_2 x_3 x_5.$$

Тогда:

$$\frac{10^{-3}C \cdot \frac{\pi d_{_{9K}}^{2}}{4}N}{10^{-3}(4,237 \cdot b_{7} + 2 \cdot b_{77} \cdot x_{7} \cdot 4,237) \cdot B_{_{m.\Gamma}} \frac{d_{_{9K}}}{\mu_{0}} + 10^{-3}E \cdot \frac{d_{_{9K}}}{\mu_{0}}} =$$

$$= \frac{10^{-3}C \cdot B_{_{m.\Gamma}} \frac{\pi d_{_{9K}}^{2}}{4}N}{10^{-3}E \cdot B_{_{m.\Gamma}} \frac{d_{_{9K}}}{\mu_{0}}},$$

$$\frac{1}{4,237(b_{7} + 2b_{77}x_{7}) \cdot B_{_{m.\Gamma}} + E} = \frac{1}{E}.$$

Окончательно, получим

$$x_7 = \frac{-b_7}{2b_{77}}. (2.30)$$

Рассчитанные значения индукции $B_{\text{m.r}} = (x_6 + 5{,}508)/4{,}237\,$ по (2.30) при 15 значениях δ показаны в таблице 2.6.

Таблица 2.6 — Расчетные значения индукции $B_{\rm m.r.}$ для МС с аксиальным расположением обмоток

δ , mm	1	2	3	4	5	6	7	8
$B_{\mathrm{m.r}}$, Тл	1,167	1,172	1,174	1,174	1,173	1,171	1,169	1,168
δ , mm	9	10	11	12	13	14	15	
$B_{\mathrm{m.r}}$, Тл	1,168	1,170	1,175	1,182	1,190	1,200	1,210	

Аналогично, достроим кривые намагничивания и статические нагрузочные характеристики при $0 < B < B_{\rm m.r}$ для размеров МС, которые соответствуют центру факторного пространства, используя выражения (2.4), (2.5), (2.8),и (2.9) (рисунки 2.18, 2,19).

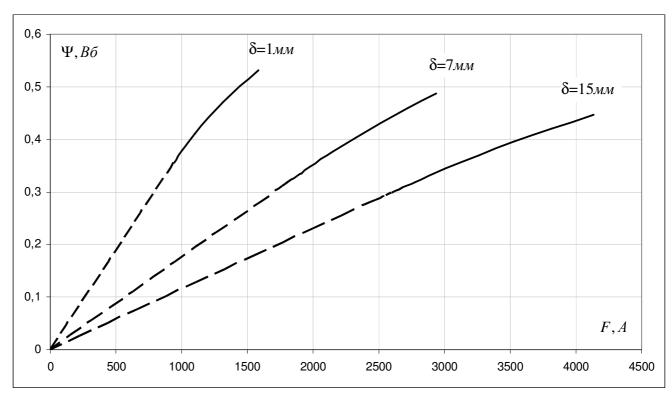


Рисунок 2.18 — Кривые намагничивания в диапазоне $0 < B_{\rm m} < 1,75~T_{\rm Л}$ для МС с аксиальным расположением обмоток для центра факторного пространства ($x_i = 0$)

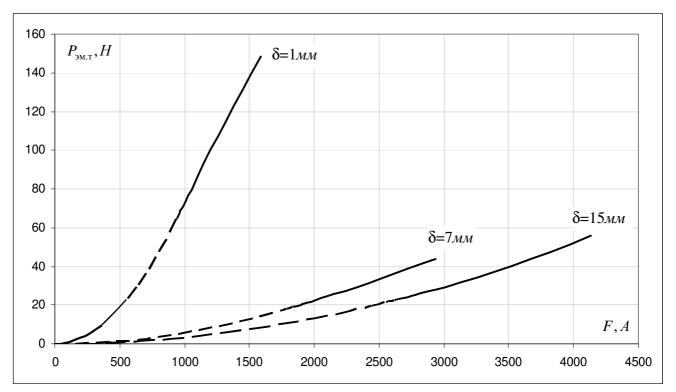


Рисунок 2.19 — Статические нагрузочные характеристики в диапазоне $0 < B_{\rm m} < 1,75~T\pi$ для МС с аксиальным расположением обмоток для центра факторного пространства ($x_i = 0$)

2.4.3 Магнитная система с коаксиально расположенными обмотками Определим значение индукции $B_{m.r}$ для МС с коаксиальным расположением обмоток, учитывая (2.23), (2.24), (2.28).

Аналогично представим (2.24) и (2.23) в виде:

$$\Psi_{*} = 10^{-3} C$$
.

где $C = c_0 + c_1 x_1 + c_2 x_2 + c_3 x_3 + c_5 x_5 + c_6 x_6 + c_{11} x_1^2 + c_{22} x_2^2 + c_{33} x_3^2 + c_{44} x_4^2 + c_{77} x_7^2 + c_{13} x_1 x_3$.

$$F_* = 10^{-3} E$$

где
$$E = b_0 + b_1 x_1 + b_3 x_3 + b_4 x_4 + b_5 x_5 + b_6 x_6 + b_7 x_7 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 + b_{33} x_3^2 + b_{44} x_4^2 + b_{66} x_6^2 + b_{77} x_7^2 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{15} x_1 x_5 + b_{25} x_2 x_5 + b_{35} x_3 x_5 + b_{125} x_1 x_2 x_5 + b_{135} x_1 x_3 x_5 + b_{136} x_1 x_3 x_6.$$

Тогда имеем:

$$\frac{10^{-3}(2 \cdot c_{77} \cdot x_7 \cdot 4,237) \cdot B_{\text{m.r}} \frac{\pi d_{\text{MK}}^2}{4} N + 10^{-3} C \cdot \frac{\pi d_{\text{MK}}^2}{4} N}{10^{-4}(4,237 \cdot b_7 + 2 \cdot b_{77} \cdot x_7 \cdot 4,237) \cdot B_{\text{m.r}} \frac{d_{\text{MK}}}{\mu_0} + 10^{-3} E \cdot \frac{d_{\text{MK}}}{\mu_0}}{\mu_0} = \frac{10^{-3} C \cdot B_{\text{m.r}} \frac{\pi d_{\text{MK}}^2}{4} N}{10^{-3} E \cdot B_{\text{m.r}} \frac{d_{\text{MK}}}{\mu_0}}, \frac{(2 \cdot c_{77} \cdot x_7 \cdot 4,237) \cdot B_{\text{m.r}} + C}{(4,237 \cdot b_7 + 2 \cdot b_{77} \cdot x_7 \cdot 4,237) \cdot B_{\text{m.r}} + E} = \frac{C}{E},$$

$$(2 \cdot c_{77} \cdot x_7 \cdot 4,237) \cdot E - (4,237 \cdot b_7 + 2 \cdot b_{77} \cdot x_7 \cdot 4,237) \cdot C = 0.$$

Раскрывая скобки и введя обозначения

$$\begin{split} N_{\mathrm{c}} &= c_0 + c_1 x_1 + c_2 x_2 + c_3 x_3 + c_5 x_5 + c_6 x_6 + c_{11} x_1^2 + c_{22} x_2^2 + c_{33} x_3^2 + c_{44} x_4^2 + c_{13} x_1 x_3 \,, \\ N_{\mathrm{e}} &= b_0 + b_1 x_1 + b_3 x_3 + b_4 x_4 + b_5 x_5 + b_6 x_6 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 + b_{33} x_3^2 + b_{44} x_4^2 + b_{66} x_6^2 + \\ &+ b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{15} x_1 x_5 + b_{25} x_2 x_5 + b_{35} x_3 x_5 + b_{125} x_1 x_2 x_5 + b_{135} x_1 x_3 x_5 + b_{136} x_1 x_3 x_6 \,, \\ \text{получим квадратное уравнение:} \end{split}$$

$$x_7^2 + x_7 \frac{2c_{77}N_e - 2b_{77}N_c}{b_7c_{77}} - \frac{N_c}{c_{77}} = 0.$$
 (2.31)

Решением уравнения (2.31) будет

$$x_7 = \frac{2N_c b_{77} - 2N_e c_{77}}{2b_7 c_{77}} - \frac{\sqrt{N_c^2 b_{77}^2 - 2N_c N_e b_{77} c_{77} + N_c b_7^2 c_{77} + N_e^2 c_{77}^2}}{b_7 c_{77}}.$$
 (2.32)

Из выражения (2.32) можно определить $B_{\text{m.r}} = \frac{x_7 + 5,508}{4,237}$. Рассчитанные значения $B_{\text{m.r}}$ при 15 значениях δ для условий центра факторного пространства при $x_i = 0$ показаны в таблице 2.7.

Таблица 2.7 — Расчетные значения индукции $B_{\rm m.r.}$ для МС с коаксиальным расположением обмоток

δ , mm	1	2	3	4	5	6	7	8
$B_{\mathrm{m.r}}$, Тл	1,156	1,168	1,181	1,212	1,257	1,282	1,292	1,296

Продолжение таблицы 2.7

δ , mm	9	10	11	12	13	14	15
В _{т.г} , Тл	1,297	1,298	1,299	1,299	1,299	1,299	1,299

Аналогично, достроим кривые намагничивания и статические нагрузочные характеристики при $0 < B < B_{\rm m.r.}$ для размеров МС, соответствующим центру факторного пространства, используя выражения (2.4), (2.5), (2.8),и (2.9) (рисунки 2.20, 2,21).

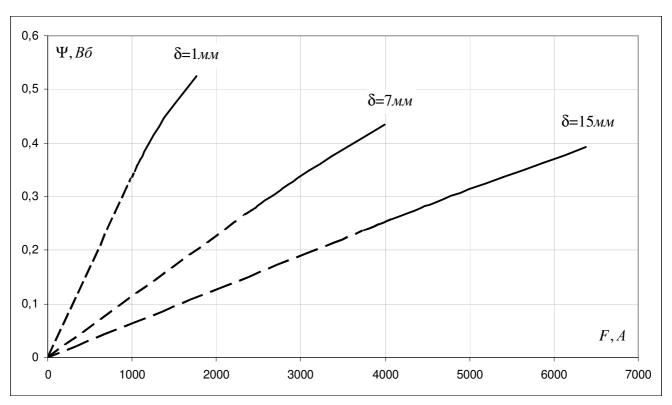


Рисунок 2.20 — Кривые намагничивания в диапазоне $0 < B_{\rm m} < 1,75\ Tл$ для МС с коаксиальным расположением обмоток для центра факторного пространства ($x_i = 0$)

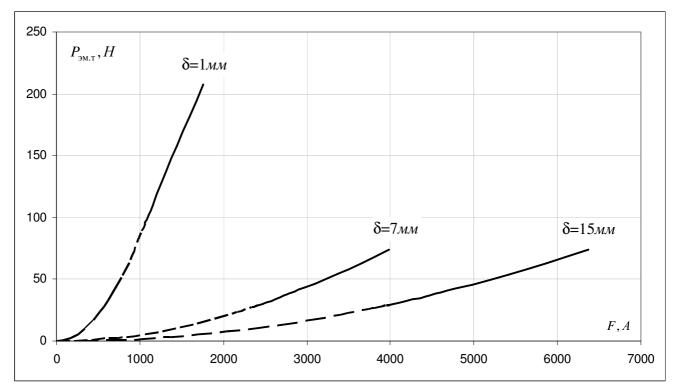


Рисунок 2.21 — Статические нагрузочные характеристики в диапазоне $0 < B_{\rm m} < 1,75~T_{\rm \pi}$ для МС с коаксиальным расположением обмоток для центра факторного пространства ($x_i = 0$)

2.5 Исследование основных электромагнитных характеристик втяжного электромагнита

Оценим влияние различных факторов на электромагнитные характеристики ВБЭМ, построив их зависимости от значения факторов в кодированном виде при двух значениях воздушного зазора $\delta = 1$ мм и $\delta = 15$ мм. При изменении каждого из факторов, другие были зафиксированы на средних своих уровнях, соответствующим центру факторного пространства.

Полученные зависимости для однообмоточного ВБЭМ показаны на рисунках 2.22÷2.24.

Как можно видеть по рисункам 2.22 и 2.24 при значениях индукции, превышающих верхнее граничное значение (+1) диапазона варьирования, значения электромагнитных характеристик P_* , Ψ_* при $\delta = 1$ *мм* уменьшаются, что обусловлено погрешностью аппроксимации.

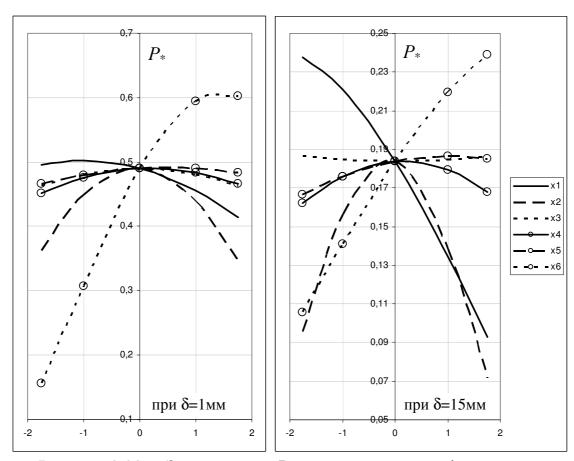


Рисунок 2.22 — Зависимости P_* от кодированных факторов $x_{\rm i}$

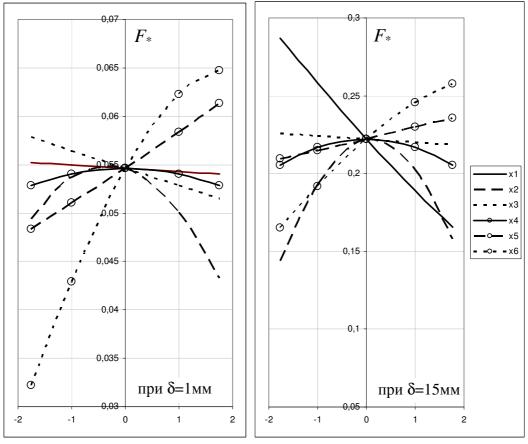


Рисунок 2.23 – Зависимости F_* от кодированных факторов $x_{\rm i}$

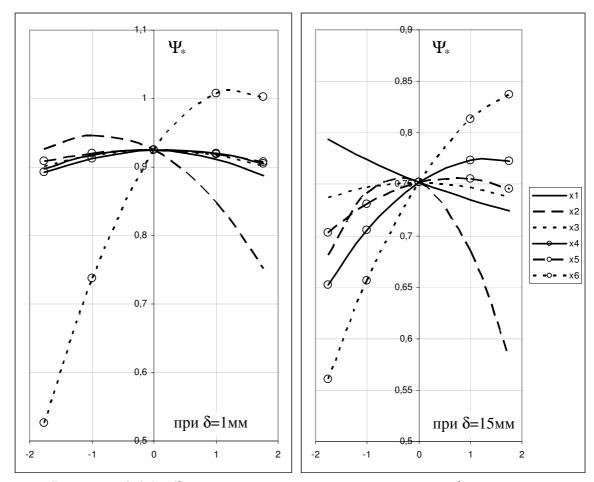


Рисунок 2.24 – Зависимости Ψ_* от кодированных факторов $x_{\rm i}$

Рекомендуется при значениях индукции, превышающих 1,72 Тл использовать линейную аппроксимацию значений $P_{_{9\mathrm{M.T}}},\ F$ и Ψ , которым соответствует касательная, проведенная к кривой намагничивания (см. рисунок 2.25) в точке Γ_{s} со значением индукции $B_{\mathrm{m.r_{s}}}=1,72T_{\mathrm{J}}$. При $B_{\mathrm{m}}>B_{\mathrm{m.r_{s}}}$ электромагнитные характеристики будут определяться следующими выражениями:

$$\begin{cases} P_{\scriptscriptstyle 3M.T} = P_* \left(B_{\scriptscriptstyle m.\Gamma_s} \right) \cdot B_{\scriptscriptstyle m}^2 \cdot \frac{\pi \cdot d_{\scriptscriptstyle 9K}^2}{8\mu_0}; \\ F = F_* \left(B_{\scriptscriptstyle m.\Gamma_s} \right) \cdot B_{\scriptscriptstyle m} \cdot \frac{d_{\scriptscriptstyle 9K}}{\mu_0}; \\ \Psi = \Psi_* \left(B_{\scriptscriptstyle m.\Gamma_s} \right) \cdot B_{\scriptscriptstyle m} \cdot \frac{\pi \cdot d_{\scriptscriptstyle 9K}^2 \cdot N}{4}. \end{cases}$$

$$(2.33)$$

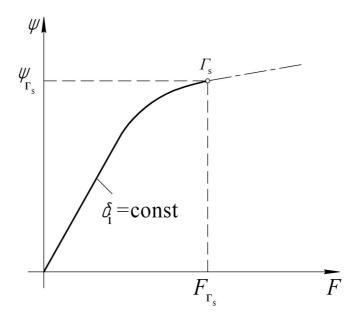


Рисунок 2.25 — К линейной аппроксимации кривой намагничивания при значениях магнитной индукции $B_{\rm m} > B_{\rm m.r_s}$

Рассмотрим влияние фактора x_2 , представляющего собой высоту стопа $H_{\rm cr}$ на тяговые характеристики при двух разных высотах обмотки $H_{\rm o}$ (рисунок 2.26), соответствующим значениям кодированного фактора $x_1=\pm 1$. Значения остальных кодированных факторов x_3 , x_4 , x_5 принимались на среднем уровне. Магнитодвижущая сила обмотки принималась равной F=1000A.

Из рисунка 2.26 видно, что тяговая сила уменьшается при увеличении высоты стопа. Причем с уменьшением высоты магнитопровода, эта зависимость становится более выраженной. Также по рисунку 2.22 и 2.26 можно сделать вывод о том, что существует оптимальное значение высоты стопа $H_{\rm cr}$, при которой тяговое усилие будет наибольшем при заданном значении высоты обмотки $H_{\rm o}$.

Из рисунков 2.24 и 2.26 можно сделать заключение о том, что при увеличении высоты обмотки потокосцепление обмотки уменьшается, вследствие чего тяговая сила также уменьшается.

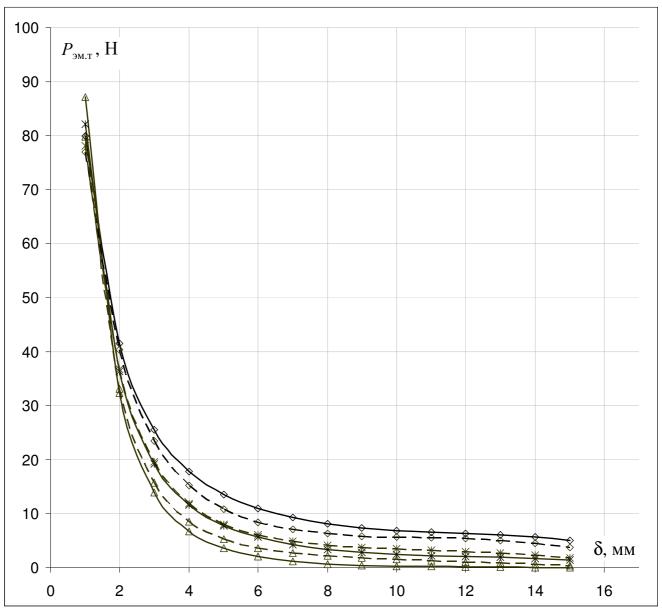


Рисунок 2.26 – Тяговые характеристики при различных значениях $H_{\rm cr}$

Сравним тяговые характеристики для электромагнитов с аксиальным и коаксиальным положением обмоток (рисунок 2.27) для геометрических размеров

в центре факторного пространства при двух значениях магнитодвижущей силы F = 1000A , F = 2500A .

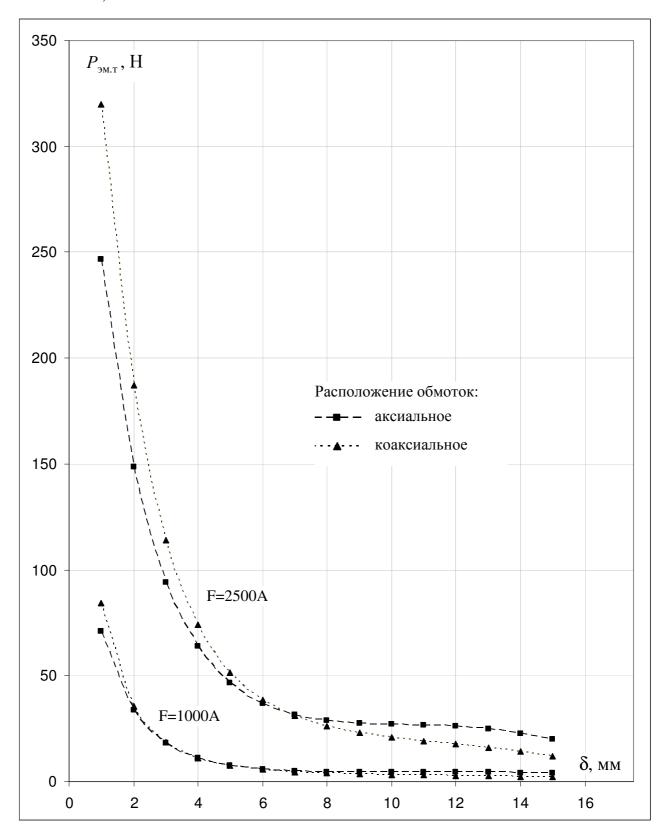


Рисунок 2.27 – Тяговые характеристики для MC с аксиальным и коаксиальным расположением обмоток

Из рисунка 2.27 очевидно, что система с аксиальным расположением обмоток при значительных значениях рабочего воздушного зазора развивает большее тяговое усилие, чем система с коаксиальным расположением. При конечном же положении якоря, наоборот, аксиальная система развивает меньшее усилие, чем коаксиальная.

Выводы к главе 2

- 1. Моделированием методом конечных элементов в программной среде FEMM на основе совместного применения методов теории подобия и планирования эксперимента получены полиномиальные модели: потокосцепления, магнитодвижущей силы, электромагнитной силы для одно и двухобмоточной МС ВБЭМ с разными исполнениями катушек: с двумя аксиально и коаксиально размещенными обмотками, выражающие функциональную связь между электромагнитными характеристиками, геометрическими размерами МС и магнитным состоянием ее элементов.
- 2. Получены математические выражения для максимальной магнитной индукции, устанавливающей границу линейности исследованных МС. Это позволяет единообразно описать статические электромагнитные характеристики линейных и нелинейных втяжных броневых МС, что позволит упростить алгоритмы и программы их синтеза.
- 3. Проведен анализ влияния факторов на электромагнитные характеристики однообмоточного ВБЭМ. Показано, что в однообмоточной МС существует оптимальная высота стопа, при которой достигается максимальное тяговое усилие при заданной высоте обмотки и фиксированной магнитодвижущей силе.
- 4. Было произведено сравнение тяговых характеристик двухобмоточного ВБЭМ с аксиальным и коаксиальным расположением обмоток. Показано, что при больших значениях рабочего зазора аксиальное расположение обмоток обеспечивает большее тяговое усилие, при малых значениях рабочего зазора коаксиальное расположение.

ГЛАВА 3 МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТАНОВИВШИХСЯ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВТЯЖНЫХ БРОНЕВЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТОВ ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Уравнение теплового состояния МС и, прежде всего ее обмотки, является [42, 49, 51, 61, 68, 124 и др.] одним из уравнений ее проектирования.

Особенностью тепловых расчетов броневых магнитных систем является некорректность использования формулы Ньютона [31, 98, 137, 138]. Связано это с тем, что все поверхности обмотки закрыты магнитопроводом и внутренние воздушные зазоры не связаны с окружающим воздухом. Охлаждение таких обмоток происходит теплопроводностью через слои изоляции, прослойки воздуха, толщины магнитных и немагнитных материалов [31, 68, 90, 98].

Как отмечается в цитируемом источнике [98], за расчетную поверхность охлаждения магнитопровода целесообразно принять сумму поверхностей граней, не закрытых другими деталями магнитной системы, механизма, установочной плитой. Также, обращается внимание на то, что поверхности, охваченные катушкой или обращенные в ее сторону, не могут эффективно передавать тепло конвекцией и излучением.

В промежутке между катушкой и внешним корпусом возможна при определенной толщине прослойки теплоотдача конвекцией в стесненных условиях [41]. Для этого вводится эквивалентная теплопроводность воздуха по формуле:

$$\lambda_{_{\mathfrak{I}_{K}}} = \lambda \cdot \varepsilon_{_{K}}$$

где λ — коэффициент теплопроводности воздуха при средней температуре внешней поверхности обмотки и внутренней стенки корпуса;

$$\varepsilon_{\kappa} = f(\operatorname{Gr}\operatorname{Pr})$$
 – коэффициент конвекции, $\varepsilon_{\kappa} \ge 1$.

При значениях $(Gr Pr)_{cp} < 1000$ величина $\varepsilon_{\kappa} = 1$, т.е. передача тепла через прослойку воздуха происходит теплопроводностью без конвективного теплообмена.

Для выяснения возможности стесненной конвенции в прослойке воздуха между катушкой и корпусом, толщина которой постоянна и равна $\Delta_{\kappa^*}=0,1$ был проведен предварительный эксперимент по расчету ε_{κ} , который оказался равен 1 для всех опытов. Теплоотдача внутри корпуса между прослойками воздуха и якорем, катушкой и ярмом моделировалась только теплопроводностью.

Объемная плотность мощности численно равна мощности, выделяемой в единице объема катушки, и определяется приложенным к ней напряжением.

Решение задачи теплообмена проводилось на модели, показанной на рисунке 3.1.

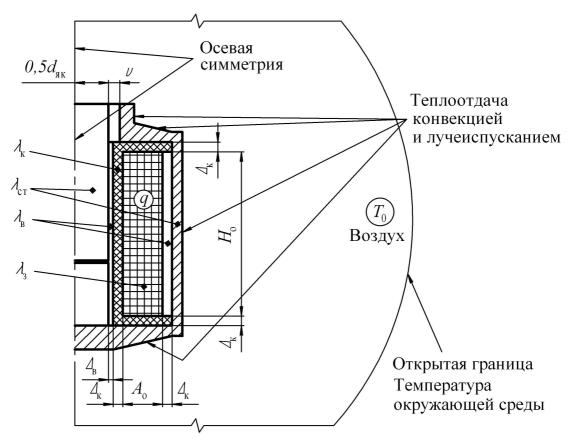


Рисунок 3.1 – Расчетная модель процессов теплообмена ВБЭМ постоянного напряжения

Коэффициент теплоотдачи с внешней стороны корпуса МС определяется как:

$$K_{\text{\tiny T.O}} = K_{\text{\tiny T.K}} + K_{\text{\tiny T.M}},$$

где $K_{_{\mathrm{T,K}}}=1{,}33{\left(\frac{\tau}{l}\right)}^{0{,}25}$ — коэффициент конвективного теплообмена, определяемый из критериального уравнения для свободного движения охлаждающей среды [41], $\frac{Bm}{{_M}^2\cdot{^{\circ}C}}$,

l – характерный размер корпуса (его высота), м;

 $au = T - T_0$ — превышение температуры поверхности корпуса над температурой окружающей среды, ${}^{\circ}C$;

$$K_{_{\mathrm{T.H}}} = rac{\mathcal{E}_1 \cdot 5,67 iggl[iggl(rac{T+273}{100} iggr)^4 - iggl(rac{T_0+273}{100} iggr)^4 iggr]}{T-T_0} -$$
 коэффициент теплоотдачи

излучением [145], $\frac{Bm}{M^2 \cdot {}^{\circ}C}$,

 $arepsilon_1$ — степень черноты, для внешней поверхности корпуса принимается равной 0,5;

T – среднеповерхностная температура корпуса, ${}^{\circ}C$.

3.1 Математические модели характерных температур нагрева обмотки втяжного электромагнита постоянного напряжения в установившемся режиме

В качестве факторов были выбраны безразмерные:

- высота обмотки $H_{{
 m o}^*}=H_{{
 m o}}/d_{{
 m gK}}$ и толщина обмотки $A_{{
 m o}^*}=A_{{
 m o}}/d_{{
 m gK}}$;
- воздушный зазор в «воротничке» $\nu_* = \nu/d_{_{\mathfrak{K}}}$;
- теплопроводность замещающего обмотку тела $\lambda_{_{3^*}} = \lambda_{_3}/(K_{_{\mathrm{T.6a3}}} \cdot d_{_{\mathrm{ЯК}}});$
- удельная объемная плотности мощности $q_* = q \cdot d_{_{\mathit{ЯК}}} / (K_{_{\mathsf{T}.баз}} \cdot T_{_0});$
- размерная температура окружающей среды T_0 (°C).

За базовый коэффициент теплоотдачи принят [151]:

$$K_{\text{\tiny T.6a3}} = 5,67 (2,73 + 0.01 T_0)^4 / T_0$$
.

Свойства материалов: теплопроводность стали магнитопровода $\lambda_{\rm cr} = 40\, Bm/\big(\text{M}\cdot^{\circ} C \big),$ теплопроводность текстолита $\lambda_{\rm k} = 0.17\, Bm/\big(\text{M}\cdot^{\circ} C \big),$ теплопроводность замещающего тела катушки $\lambda_{\rm s}$ приняты не зависящими от температуры; теплопроводность воздуха аппроксимирована полиномиальной зависимостью от температуры окружающей среды $\lambda_{\rm b} = (0.0075 \cdot T_0 + 2.44)/100$.

Следующие геометрические размеры держались постоянными: толщина каркаса катушки $\Delta_{\rm K}=2 m M$, толщина воздушного зазора между каркасом и сердечником $\Delta_{\rm B}=0,2 m M$, диаметр якоря $d_{\rm gK}=20\cdot 10^{-3} m M$; объемная плотность мощности q равномерно распределена по объему обмотки.

Характерные уровни факторов в матрице разработанного ортогонального центрально-композиционного плана второго порядка представлены в таблице 3.1.

Кодированные (в первом столбце) и истинные (во втором столбце) значения факторов приведены в таблице Б.1 ПРИЛОЖЕНИЯ Б в каждом из 77 расчетных опытов $n_{\Sigma 3} = 2^6 + 2 \cdot 6 + 1 = 77$.

 χ_i -1,761-10 +1,761+1 X_i $X_1 = H_{o^*}$ 1,199 1,714 2,500 3,286 3,801 $X_2 = A_{0*}$ 0,278 0,417 0,783 0,600 0,922 $X_3 = \nu_* \cdot 10^{-2}$ 1,15 1,95 3,00 4,05 4,85 $X_4 = T_0$, °C 24,8 40 80 95,2 60 $X_5 = \lambda_{3*}$ 1 1,13 1,3 1,47 1,6 $X_6 = q_*$ 1,500 1,932 2,500 3,068 3,500

Таблица 3.1 – Характерные уровни факторов

В качестве функций цели (исследуемых функций) выбраны максимальная температура $\Theta_{\rm m}$ (°C) в толще обмотки, среднеобъемная температура $\Theta_{\rm v}$ (°C) и

среднеповерхностная Θ_s (°C) температура на наружной поверхности обмотки. Функции цели представлены в относительных единицах:

$$Q_{\rm m*} = \Theta_{\rm m}/T_{\rm o}$$
, $Q_{\rm v*} = \Theta_{\rm v}/T_{\rm o}$, $Q_{\rm s*} = \Theta_{\rm s}/T_{\rm o}$.

Данные вычислительного эксперимента были обработаны с использованием специальной программы, алгоритм которой описан в [73], что позволило определить коэффициенты полиномиальных зависимостей:

$$Q_{\mathrm{m}*} = 10^{-2} \left(202,6 + 16,2x_{1} + 24,5x_{2} - 18,2x_{4} + 19,7x_{6} - 3,7x_{1}^{2} + 7,3x_{4}^{2} + 5,1x_{1}x_{2} - 3,6x_{1}x_{4} - 3,8x_{2}x_{4} + 2,9x_{1}x_{6} + 4,5x_{2}x_{6} - 3,6x_{4}x_{6}\right); \tag{3.1}$$

$$Q_{\mathrm{v}*} = 10^{-2} \left(191,3 + 14,6x_{1} + 20,5x_{2} - 17,2x_{4} + 17,4x_{6} - 3,1x_{1}^{2} + 6,9x_{4}^{2} + 4x_{1}x_{2} - 3,2x_{1}x_{4} - 3,7x_{2}x_{4} + 2,6x_{1}x_{6} + 3,6x_{2}x_{6} - 3,4x_{4}x_{6}\right); \tag{3.2}$$

$$Q_{\mathrm{s}*} = 10^{-2} \left(187,3 + 13,3x_{1} + 18,2x_{2} - 17,4x_{4} + 16,4x_{6} - 3x_{1}^{2} + 7x_{4}^{2} + 3,3x_{1}x_{2} - 3,2x_{1}x_{4} - 3,8x_{2}x_{4} + 2,3x_{1}x_{6} + 3,1x_{2}x_{6} - 3,4x_{4}x_{6}\right), \tag{3.3}$$
 где
$$x_{1} = 1,272 \ H_{\mathrm{o}*} - 3,181; \qquad x_{2} = 5,464A_{\mathrm{o}*} - 3,279; \qquad x_{3} = 95,24v_{*} - 2,857;$$

$$x_{5} = 5,882\lambda_{3}* - 7,647; \quad x_{6} = 1,761q_{*} - 4,401; \quad x_{4} = 0,05 \ T_{0} - 3.$$

В качестве примера на рисунке 3.2 приведены результаты расчета температурного поля однообмоточной броневой магнитной системы с втяжным якорем в условиях 1 (а) и 33 (б) опыта, отличающихся лишь величиной объемной плотности мощности $q_1 = 5.26 \cdot 10^4 \frac{Bm}{M^3}$; $q_{33} = 8.35 \cdot 10^4 \frac{Bm}{M^3}$.

По [99, 100] у данного типа катушек максимально нагретые слои расположены у центра поперечного сечения обмотки, что подтверждается полученными картинами температурного поля (см. рисунок 3.2), полученными в программе FEMM.

Средняя погрешность аппроксимации для (3.1)÷(3.3) составляет соответственно: 2,5; 2,6 и 2,8 %.

Как видно из выражений $(3.1) \div (3.3)$ на величины характерных температур не влияет безразмерная (относительная) теплопроводность замещающего тела обмотки λ_{3*} и безразмерная величина зазора у воротничка ν_{*} . Наиболее

существенное влияние на эти функции оказывают относительная толщина $A_{\rm o*}$ и удельная объемная мощность q_* обмотки.

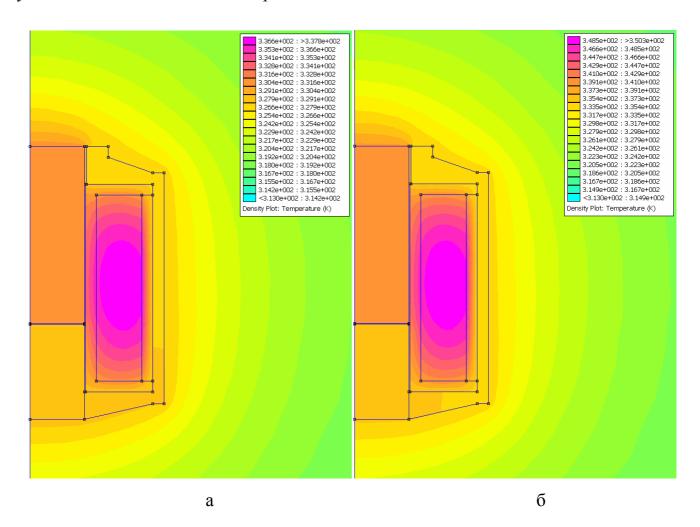


Рисунок 3.2 – К распределению температуры в меридианном сечении однообмоточной МС ВБЭМ

Проведенные исследования показали, что расчетные выражения для максимальной и среднеповерхностной температур обмоток позволяют определить и среднеобъемную их температуру как их среднеарифметическое значение. Разница в определении среднеобъемной температуры по модели и по формуле среднего арифметического не превышает 0,9 %.

3.2 Моделирование нагрева обмоток двухобмоточного втяжного электромагнита

Важным является знание температурных характеристик для проектирования форсированных двухобмоточных электромагнитных систем [86, 90 и др.].

Проведены исследования двухобмоточного ЭМ с различным расположением обмоток в установившемся режиме работы.

Практическое отсутствие влияния фактора x_3 , соответствующего величине зазора у воротничка v_* , на температуру при исследовании однообмоточного ЭМ можно объяснить распределением потоков тепла (см. рисунок 3.2), в котором зазор у внешнего воротничка «благодаря» своему месторасположению слабо участвует в теплопередаче. Ввиду вышеизложенного фактор x_3 исключен из рассмотрения в дальнейших опытах.

3.2.1 Математические модели нагрева двухобмоточного электромагнита с аксиально расположенными обмотками

MC электромагнита с аксиально расположенными обмотками с обозначением основных размеров и элементов приведена на рисунке 3.3.

В качестве факторов были выбраны безразмерные:

- высота $H_{{
 m o}^*}=H_{{
 m o}}/d_{{\scriptscriptstyle {
 m SK}}}$ и толщина $A_{{
 m o}^*}=A_{{
 m o}}/d_{{\scriptscriptstyle {
 m SK}}}$ обмотки;
- высота ПО $H_{\pi^*} = H_{\pi}/H_{o}$;
- теплопроводность замещающего УО тела $\lambda_{_{3}y^*} = \lambda_{_{3}y}/(K_{_{\text{т.баз}}} \cdot d_{_{\mathsf{ЯК}}});$
- отношение теплопроводностей замещающих ПО и УО тел $\lambda_* = \lambda_{_{3\Pi^*}}/\lambda_{_{3y^*}}$;
- удельная объемная плотность мощности УО $q_{\mathbf{y}^*} = q_{\mathbf{y}} \cdot d_{\mathbf{g}_{\mathbf{K}}}/(K_{\text{т.баз}} \cdot T_0);$
- отношение удельных объемных плотностей мощности ПО и УО $q_* = q_{\Pi^*}/q_{\mathbf{y}^*}\,;$
- размерная температура окружающей среды T_0 (°C).

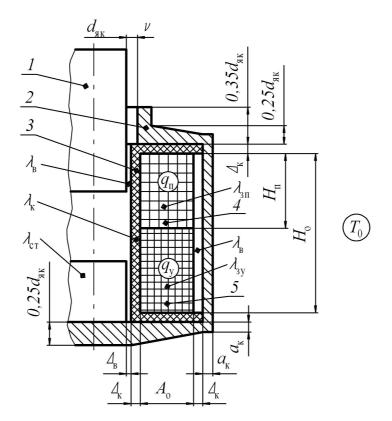


Рисунок 3.3 – К расчету теплового состояния двухобмоточной МС ВБЭМ с аксиальным расположением обмоток:

1 – якорь; 2 – магнитопровод (с внешним воротничком); 3 – каркас катушки; 4 – пусковая обмотка; 5 – удерживающая обмотка

Характерные уровни факторов в матрице разработанного ортогонального центрально-композиционного плана второго порядка представлены в таблице 3.2.

Количество опытов для восьми факторов составило $n_{\Sigma 4} = 2^8 + 2 \cdot 8 + 1 = 273$. Для каждого расчетного опыта в таблице Б.2 ПРИЛОЖЕНИЯ Б приведены кодированные (в первом столбце) и истинные (во втором столбце) значения факторов.

В качестве функций цели выбраны максимальная температура $\Theta_{\rm m}$ (°C) в толще удерживающей обмотки, среднеобъемные температуры УО и ПО $\Theta_{\rm vy}$, $\Theta_{\rm vn}$ (°C) и среднеповерхностные $\Theta_{\rm sy}$ (°C) и $\Theta_{\rm sn}$ (°C) температуры на наружной поверхности УО и ПО соответственно.

Таблица 3.2 – Характерные уровни факторов для двухобмоточной МС

X_i	-2,045	-1	0	+1	+2,045
$X_1 = H_{o^*}$	0,893	1,714	2,5	3,286	4,107
$X_2 = A_{o^*}$	0,226	0,417	0,6	0,783	0,974
X_3 H_{Π^*}	0,1	0,304	0,5	0,696	0,9
A_{Π^*}	0,3	0,4022	0,5	0,5978	0,7
$X_4 = T_0$, °C	19,1	40	60	80	100,9
$X_5 = \lambda_{3y^*}$	0,952	1,13	1,3	1,47	1,648
$X_6 = q_{y^*}$	1,338	1,932	2,5	3,068	3,662
$X_7 = q_* = q_{\pi} / q_{y^*}$	0,0	0,1278	0,25	0,3722	0,50
$X_8 = \lambda_* = \lambda_{3\pi} * / \lambda_{3y^*}$	1,05	1,178	1,30	1,422	1,55

Функции цели также представлены в относительных единицах:

$$Q_{\rm m^*} = \Theta_{\rm m}/T_0 \; ; \; Q_{\rm vv^*} = \Theta_{\rm vv}/T_0 \; ; \; Q_{\rm v\pi^*} = \Theta_{\rm v\pi}/T_0 \; ; \; Q_{\rm sv^*} = \Theta_{\rm sv}/T_0 \; ; \; Q_{\rm s\pi^*} = \Theta_{\rm s\pi}/T_0 \; .$$

Результаты вычислительного эксперимента представлены в виде полиномиальных зависимостей:

$$Q_{m*} = 10^{-2} (174.5 + 13.2x_1 + 16.4x_2 - 17.1x_3 - 11.6x_4 + 14.1x_6 + 4.3x_7 - 2.9x_1^2 - 2.7x_3^2 + 5.9x_4^2 + 4x_1x_2 - 2.3x_1x_3 - 2.4x_1x_4 + 2.6x_1x_6 - 4.4x_2x_3 - 2.4x_2x_4 + 4.3.2x_2x_6 + 3x_3x_4 - 3.3x_3x_6 + 2.4x_3x_7 + 2.5x_3x_8 - 2.3x_4x_6);$$
(3.4)
$$Q_{vy*} = 10^{-2} (167.5 + 11.7x_1 + 14.3x_2 - 15.1x_3 - 11.2x_4 + 12.6x_6 + 4x_7 - 2.5x_1^2 - 2.4x_3^2 + 5.8x_4^2 + 3.3x_1x_2 - 2.1x_1x_3 - 2.2x_1x_4 + 2.3x_1x_6 - 3.6x_2x_3 - 2.3x_2x_4 + 2.7x_2x_6 + 2.8x_3x_4 - 2.8x_3x_6 + 2.1x_3x_7 + 2.3x_3x_8 - 2.2x_4x_6);$$
(3.5)
$$Q_{vn*} = 10^{-2} (153.8 + 7.9x_1 + 11.4x_2 - 10.1x_3 - 10.2x_4 + 10x_6 + 6x_7 - 2.1x_1^2 - 1.6x_3^2 + 5.3x_4^2 + 2x_1x_2 - 1.8x_1x_4 - 1.9x_2x_3 - 2.2x_2x_4 + 2.1x_2x_6 + 2.2x_3x_4 - 1.8x_3x_6 + 2.6x_3x_7 - 2x_4x_6);$$
(3.6)
$$Q_{sv*} = 10^{-2} (165 + 10.9x_1 + 12.7x_2 - 14.2x_3 - 11.4x_4 + 12x_6 + 3.9x_7 - 2.5x_1^2 -$$

$$-2,4x_{3}^{2} + 5,8x_{4}^{2} + 2,9x_{1}x_{2} - 1,8x_{1}x_{3} - 2,3x_{1}x_{4} + 2,1x_{1}x_{6} - 3,1x_{2}x_{3} - 2,4x_{2}x_{4} + 2,3x_{2}x_{6} + 2,8x_{3}x_{4} - 2,6x_{3}x_{6} + 2x_{3}x_{7} + 2,1x_{3}x_{8} - 2,3x_{4}x_{6});$$

$$Q_{SII}^{*} = 10^{-2}(152 + 7,3x_{1} + 10,5x_{2} - 9,6x_{3} - 10,3x_{4} + 9,6x_{6} + 5,7x_{7} - 2,1x_{1}^{2} - 1,5x_{3}^{2} + 5,3x_{4}^{2} + 1,8x_{1}x_{2} - 1,8x_{1}x_{4} - 1,7x_{2}x_{3} - 2,2x_{2}x_{4} + 1,8x_{2}x_{6} + 2,2x_{3}x_{4} - 1,7x_{3}x_{6} + 2,4x_{3}x_{7} - 2x_{4}x_{6}),$$

$$(3.8)$$

где $x_1 = 1,272\ H_{o^*} - 3,181$; $x_2 = 5,464A_{o^*} - 3,279$; $x_3 = 5,102H_{\pi^*} - 2,551$; $x_4 = 0,05\ T_0 - 3$; $x_5 = 5,882\lambda_{3y^*} - 7,647$; $x_6 = 1,761q_{y^*} - 4,401$; $x_7 = 8,183\ q_* - 2,045$; $x_8 = 8,197\ \lambda_* - 10,66$.

Как видно из выражений (3.4) \div (3.8) на величины характерных температур УО и ПО не влияет безразмерная (относительная) теплопроводность замещающего УО тела $\lambda_{_{3y^*}}$ и минимально проявляет себя отношение теплопроводностей ПО и УО λ_* . Наиболее существенное влияние на эти функции оказывают относительная толщина обмоточного окна $A_{_{0^*}}$, относительная высота $H_{_{\Pi^*}}$ ПО и удельная объемная мощность $q_{_{y^*}}$ УО.

Аналогично с однообмоточным ЭМ среднеобъемную температуру УО можно представить как среднее арифметическое ее максимальной и среднеповерхностной температур.

Средняя погрешность аппроксимации для $(3.4)\div(3.8)$ составляет от 3,1 до 3,3 %.

3.2.2 Математические модели нагрева двухобмоточного электромагнита с коаксиально расположенными обмотками

MC электромагнита с коаксиально расположенными обмотками с основными размерами и элементами приведена на рисунке 3.4.

В качестве факторов были выбраны те же безразмерные величины, что и для МС с аксиальным расположением обмоток, только вместо высоты пусковой обмотки H_{π^*} изменяется ее толщина $A_{\pi^*} = A_{\pi}/A_{\rm o}$ (см. таблицу 3.2).

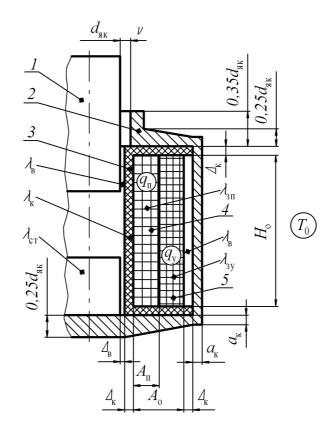


Рисунок 3.4 – К расчету теплового состояния двухобмоточной МС ВБЭМ с коаксиальным расположением обмоток:

1 – якорь; 2 – магнитопровод (с внешним воротничком); 3 – каркас катушки; 4 – пусковая обмотка; 5 – удерживающая обмотка.

Характерные уровни для i=8 факторов представлены в таблице 3.2. Кодированные (в первом столбце) и истинные (во втором столбце) значения факторов в матрице ортогонального центрально-композиционного плана второго порядка приведены в таблице Б.2 ПРИЛОЖЕНИЯ Б для каждого из 273 опытов.

Функциями цели выбраны максимальная температура $\Theta_{\rm m}$ (°C) в толще удерживающей обмотки, среднеобъемная температура ПО и УО $\Theta_{\rm vy}$, $\Theta_{\rm vn}$ (°C) и среднеповерхностная $\Theta_{\rm sy}$ (°C) температура на наружной поверхности УО. Функции цели также представлены в относительных единицах:

$$Q_{\rm m^*} = \Theta_{\rm m}/T_{\rm o} \; , \; Q_{\rm vy^*} = \Theta_{\rm vy}/T_{\rm o} \; , \; Q_{\rm v\pi^*} = \Theta_{\rm v\pi}/T_{\rm o} \; , \; Q_{\rm sy^*} = \Theta_{\rm sy}/T_{\rm o} \; . \label{eq:Qm*}$$

Результаты вычислительного эксперимента получены в виде полиномиальных зависимостей:

$$\begin{split} Q_{\mathrm{m}^*} &= 10^{-2} \big(173.5 + 11.7 x_1 + 18.1 x_2 - 7 x_3 - 12.5 x_4 + 14.2 x_6 + 4.4 x_7 - 2.9 x_1^2 + \\ &\quad + 6.4 x_4^2 + 3.7 x_1 x_2 - 2.5 x_1 x_4 + 2.2 x_1 x_6 - 2.8 x_2 x_4 + 3.4 x_2 x_6 - 2.5 x_4 x_6 \big); \\ Q_{\mathrm{vy}^*} &= 10^{-2} \big(166.6 + 10.6 x_1 + 15.6 x_2 - 6.1 x_3 - 11.9 x_4 + 12.7 x_6 + 3.9 x_7 - 2.5 x_1^2 + \\ &\quad + 6.1 x_4^2 + 3 x_1 x_2 - 2.3 x_1 x_4 + 2 x_1 x_6 - 2.7 x_2 x_4 + 2.9 x_2 x_6 - 2.4 x_4 x_6 \big); \\ Q_{\mathrm{vu}^*} &= 10^{-2} \big(164.2 + 11.1 x_1 + 14.6 x_2 - 5.7 x_3 - 11.8 x_4 + 12.2 x_6 + 4.4 x_7 - 2.4 x_1^2 + \\ &\quad + 6.1 x_4^2 + 3.2 x_1 x_2 - 2.3 x_1 x_4 + 2.1 x_1 x_6 - 2.6 x_2 x_4 + 2.7 x_2 x_6 - 2.3 x_4 x_6 \big); \\ Q_{\mathrm{sy}^*} &= 10^{-2} \big(164.7 + 10 x_1 + 14.4 x_2 - 5.6 x_3 - 12.1 x_4 + 12.3 x_6 + 3.7 x_7 - 2.4 x_1^2 + \\ &\quad + 6.2 x_4^2 + 2.7 x_1 x_2 - 2.3 x_1 x_4 + 1.8 x_1 x_6 - 2.8 x_2 x_4 + 2.6 x_2 x_6 - 2.4 x_4 x_6 \big), \\ &\quad \mathrm{TRe} \qquad x_1 = 1.272 \ H_{\mathrm{o}^*} - 3.181; \qquad x_2 = 5.464 A_{\mathrm{o}^*} - 3.279; \qquad x_3 = 10.22 A_{\mathrm{n}^*} - 5.112; \\ x_4 &= 0.05 \ T_0 - 3; \quad x_5 = 5.882 \lambda_{\mathrm{3y}^*} - 7.647; \quad x_6 = 1.761 q_{\mathrm{y}^*} - 4.401; \quad x_7 = 8.183 \ q_* - 2.046; \\ x_8 &= 8.197 \ \lambda_* - 10.66. \end{split}$$

Как видно из выражений (3.9) и (3.12) на величины характерных температур обмоток безразмерная удерживающей И пусковой также не влияет (относительная) теплопроводность замещающего тела обмотки. Наиболее существенное влияние на эти функции оказывают относительная толшина обмоточного окна A_{0*} и удельная объемная мощность q_{v*} удерживающей обмотки.

Средняя погрешность аппроксимации для (3.9)÷(3.12) составляет от 3,4 до 3,7 %.

Численное исследование влияния кодированных факторов на относительные тепловые параметры вынесено в ПРИЛОЖЕНИЕ Б, глава Б.2.

Выводы к главе 3

1. Моделированием методом конечных элементов в программной среде FEMM на основе совместного применения методов теории подобия и планирования эксперимента получены полиномиальные модели максимальной, среднеобъемной, среднеповерхностной температуры в установившемся режиме нагрева обмотки для однообмоточного и двухобмоточного ВБЭМ с аксиальным и коаксиальным размещением обмоток в катушке.

2. Полученные модели тепловых параметров по форме представления удобны для применения в методиках синтеза ресурсо- и энергосберегающих приводных ЭМ коммутационных аппаратов, средств автоматики и управления. Для определения максимальной температуры нагрева не требуется предварительного расчета радиуса слоя обмотки с максимальной температурой, коэффициентов теплопередачи с наружной и внутренней боковых поверхностей обмоток.

Полученные в безразмерном виде тепловые параметры однообмоточного электромагнита устанавливают их зависимость от максимальной температуры нагрева, температуры окружающей среды, а также от относительных толщины и высоты обмотки.

- 3. Установлено, что среднеобъемная температура может быть оценена, как среднее арифметическое максимальной и среднеповерхностной температур нагрева.
- 4. Согласно результатам проведенного исследования величины относительного воздушного зазора у воротничка и относительной теплопроводности замещающего тела обмотки в броневых МС с «внешним» воротничком практически не влияет на температурные характеристики обмотки.
- 5. Предложенные математические модели тепловых параметров двухобмоточных форсированных МС с аксиальным и коаксиальным размещением обмоток могут быть использованы в методиках синтеза оптимальных электромагнитов при различных схемах соединения пусковой и удерживающей обмоток.

ГЛАВА 4 МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВТЯЖНЫХ БРОНЕВЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТОВ ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Для упрощения моделирования методами вычислительного эксперимента и придания его результатам большей наглядности некоторые критерии подобия (1.9) предлагается преобразовать [11, 16]:

$$\pi_{13} = \frac{\pi_3}{\pi_1} = \frac{p}{\delta_{_{\rm H}}}, \ \pi_{54} = \left(\frac{\pi_4}{\pi_5}\right)^{0.5} = \frac{l}{\tau_{_{\rm H}}} \sqrt{\frac{m}{P_{_{\rm MX.H}}p}}, \ \pi_{57} = \frac{\pi_7}{\pi_5} = \frac{c_{_{\rm H}}l}{P_{_{\rm MX.H}}},$$

$$\pi_{56} = \frac{\pi_6}{\pi_5} = \frac{P_{_{\rm MX.K}}}{P_{_{\rm MX.I}}}, \ \pi_{78} = \frac{\pi_8}{\pi_7} = \frac{c_1}{c_{_{\rm H}}}. \tag{4.1}$$

Таким образом, динамические параметры: время, скорость, кинетическая энергия, запасаемая подвижной системой электромагнитного контактора соответственно, в характерных точках движения его подвижных элементов $t_* = t/\tau_{_{\rm H}}, \ V_* = \frac{V\tau_{_{\rm H}}}{l}, \ W_* = \frac{W_{_{\rm KUH}}}{\tau_{_{\rm H}}U^2/R}, \ {\rm onpedeляемыe, \ haпримеp, \ pemehuem \ cucтемы}$

дифференциальных уравнений, описываются функциями:

$$\begin{split} t_{\text{\tiny K}^*} &= f_1 \big(\pi_1, \, \pi_{13}, \, \pi_5, \, \pi_{54}, \, \pi_{57} \big); \\ V_{\text{\tiny K}^*} &= f_2 \big(\pi_1, \, \pi_{13}, \, \pi_5, \, \pi_{54}, \, \pi_{57} \big); \\ t_{\text{\tiny M}^*} &= f_3 \big(\pi_1, \, \pi_{13}, \, \pi_5, \, \pi_{54}, \, \pi_{57}, \, \pi_{56}, \, \pi_{78} \big); \\ V_{\text{\tiny M}^*} &= f_4 \big(\pi_1, \, \pi_{13}, \, \pi_5, \, \pi_{54}, \, \pi_{57}, \, \pi_{56}, \, \pi_{78} \big); \\ W_{\text{\tiny M}^*} &= f_5 \big(\pi_1, \, \pi_{13}, \, \pi_5, \, \pi_{54}, \, \pi_{57}, \, \pi_{56}, \, \pi_{78} \big), \end{split}$$

где индекс «к» обозначает динамические параметры ЭМ, соответствующие моменту замыкания контактов электромагнитного контактора и индекс «м» – моменту соударения якоря с магнитопроводом.

Для расчетного исследования переходных процессов нами предлагается алгоритм, заключающийся в комбинированном решении, основанном на решении уравнения электрической цепи обмотки итерационным методом Эйлера, на

каждом шаге расчета которого магнитное поле рассчитывается методом конечных элементов в вспомогательной программе FEMM.

Учет вихревых токов произведен с помощью подсчета дополнительных сопротивлений (1.10) вторичных контуров токов в магнитопроводе [83] в виде одновитковой вторичной обмотки, сцепленной с тем же магнитным потоком, что и намагничивающая обмотка. Вязкое трение, гистерезис, остаточное намагничивание, вес якоря (ось МС расположена горизонтально) в методике не учитываются.

Целесообразно в качестве исследуемых динамических характеристик выбирать зависимость перемещения якоря x(t) либо скорости его движения V(t) от времени [116], поскольку указанные зависимости обусловливают износостойкость аппарата и его временные показатели.

В качестве исследуемых функций цели выбраны скорость якоря в моменты срабатывания контактов V_{κ^*} и срабатывания электромагнита $V_{{}_{\rm M^*}}$ и соответствующие времена срабатывания $t_{{}_{\rm K^*}}$ и $t_{{}_{\rm M^*}}$. Функции цели представлены в безразмерной форме

$$V_{K^*} = \frac{V_{K}}{V_{6a3}}, V_{M^*} = \frac{V_{M}}{V_{6a3}}, t_{K^*} = \frac{t_{K}}{t_{6a3}}, t_{M^*} = \frac{t_{M}}{t_{6a3}},$$
 (4.2)

где
$$V_{\mathrm{баз}} = \frac{d_{\mathrm{c}}}{ au_{\mathrm{HB}}}$$
 и $t_{\mathrm{баз}} = au_{\mathrm{HB}}$,

 $au_{ ext{hb}}$ — электромагнитная постоянная времени цепи питания обмотки, рассчитанная с учетом влияния короткозамкнутых контуров при начальном положении якоря.

Для обеспечения применения разрабатываемых моделей к подобным ЭМ, а также для сокращения числа независимых переменных в качестве факторов вычислительного эксперимента используются преобразованные (4.1) безразмерные критерии подобия динамических процессов включения ЭМ:

$$Z_{1} = \frac{\delta_{_{\rm H}}}{d_{_{\rm SK}}}, \ Z_{2} = \frac{H_{_{\rm O}}}{d_{_{\rm SK}}}, \ Z_{3} = \frac{A_{_{\rm O}}}{d_{_{\rm SK}}}, \ Z_{4} = \frac{p}{\delta_{_{\rm H}}}, \ Z_{5} = \frac{P_{_{\rm MX.H}}\delta_{_{\rm H}}}{P_{_{\rm ЭЛ}}\tau_{_{\rm HB}}}, \ Z_{6} = \frac{d_{_{\rm SK}}}{\tau_{_{\rm HB}}} \sqrt{\frac{m}{P_{_{\rm MX.H}}\delta_{_{\rm H}}}}, \ (4.3)$$

где $P_{\scriptscriptstyle \mathrm{MX.H}}$ — противодействующее усилие механической характеристики электромагнитного аппарата, например контактора, в точке начального рабочего воздушного зазора $\delta_{\scriptscriptstyle \mathrm{H}}$ приводного ЭМ (см. рисунок 4.1);

 $p = (\delta_{\text{\tiny H}} - \delta_{\text{\tiny l}})$ – раствор главных контактов контактора;

 $P_{\scriptscriptstyle \mathrm{3Л}}$ — мощность, выделяющаяся в обмотке при заданных геометрических размерах, типе провода (ПЭВ-1, $d_{\scriptscriptstyle \mathrm{M}}=0{,}23$, $K_{\scriptscriptstyle \mathrm{3}}=0{,}5$) и заданной температуре нагрева обмотки;

m — приведенная масса подвижных элементов аппарата, связанная с якорем MC.

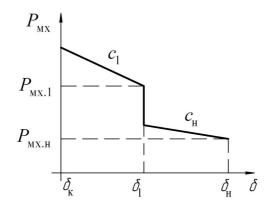


Рисунок 4.1 – Противодействующая характеристика ЭМ

Следующие геометрические размеры, соразмерности и параметры ЭМ приняты равными (см. рисунок 2.8): $d_{\rm sk}=20\cdot 10^{-3}\,{\rm M}\,;~H_{\rm ct^*}=H_{\rm ct}/H_{\rm o}=0,12\,;~H_{\rm b^*}=H_{\rm b}/d_{\rm sk}=0,35\,;~A_{\rm ll^*}=A_{\rm ll}/A_{\rm o}=1\,;~v_*=v/d_{\rm sk}=0,03\,;~P_{\rm mx.l}=3,5P_{\rm mx.h}$ — противодействующее усилие, соответствующее моменту срабатывания контактов контактора; $c_1=3\,c_{\rm h}$ — соотношение жесткостей контактных и возвратных пружин.

Диапазоны варьирования факторов (4.3) в эксперименте приведены в таблице 4.1. Матрица эксперимента с кодированными и истинными значениями критериев подобия $Z_1 \div Z_6$ приведена в таблице В.1 ПРИЛОЖЕНИЯ В в каждом из 77 опытов.

Кодированные значения факторов равны: $z_1=10\delta_*-4$, $z_2=2H_{o^*}-6$, $z_3=10A_{o^*}-6$, $z_4=20p_*-14$, $z_5=117{,}37Z_5-9{,}9765$, $z_6=2{,}5Z_6-16$.

Критерии Z_5 и Z_6 характеризуют тепловое состояние обмотки и механическую характеристику аппарата. Их расчет производится согласно разработанной методике, изложенной в ПРИЛОЖЕНИИ В, глава В.2.

Таблица 4.1

Z_i	-1,761	-1	0	+1	+1,761
Z_1	0,2239	0,30	0,40	0,50	0,5761
Z_2	2,12	2,5	3,0	3,5	3,88
Z_3	0,424	0,5	0,6	0,7	0,776
Z_4	0,612	0,65	0,70	0,75	0,788
Z_5	0,070	0,07648	0,085	0,09352	0,100
Z_6	5,696	6,0	6,4	6,8	7,104

Теория планирования эксперимента требует проведения достаточно большого количества опытов. Этот недостаток смягчается возможностью автоматизации расчета эскизов ЭМ с заданными геометрическими размерами и обмоточными данными в программе FEMM.

4.1 Оценка влияния вихревых токов на динамические характеристики электромагнита

Было проведено дополнительное исследование на предмет оценки влияния вихревых токов на ДХ ВБЭМ: были исследованы значения скорости якоря V(t) для двух механических характеристик с начальными жесткостями $c_{_{\rm H}}$ и $3,5c_{_{\rm H}}$. Величина жесткости противодействующей характеристики держалась на постоянном уровне $c_{_{\rm H}}=100\,H/m$.

Были рассчитаны (см. таблицу 4.2) $V(t_k)$, $V(t_m)$, $i(t_k)$, $i(t_m)$ в моменты срабатывания главных контактов t_k и срабатывания электромагнита t_m с учетом влияния вихревых токов и без их учета.

Данные говорят о влиянии вихревых токов, находящемся в пределах 9 %.

Таблица 4.2

Жесткость	C	H	3,5c _H		
	без учета	с учетом	без учета	с учетом	
Динамические	влияния	влияния	влияния	влияния	
характеристики	вихревых	вихревых	вихревых	вихревых	
	токов	токов	токов	токов	
$V(t_k)$, cm/c	26,1	26,0	25,0	24,9	
$V(t_{\rm M})$, cm/c	55,2	50,9	51,7	48,2	
$i(t_{\rm k})$, MA	14,1	14,1	14,1	14,1	
$i(t_{\scriptscriptstyle \rm M})$, MA	8,6	8,7	8,9	8,9	
t _k , MC	74,2	74,2	75,2	75,2	
t _M , MC	79,6	79,9	80,8	81,2	

4.2 Описание алгоритма расчета динамики включения втяжного броневого электромагнита постоянного напряжения

Постановка задачи заключается в проведении расчета динамики включения электромагнита, обмотка которого подключается на постоянное напряжение с учетом проводимости и нелинейных свойств материала магнитопровода, с учетом влияния вихревых токов до момента срабатывания аппарата.

Уравнения расчета динамики:

$$U = iR_{r} + \frac{\mathrm{d}\Psi}{\mathrm{d}t} \; ; \tag{4.4}$$

$$0 = i_{3}R_{3} + \frac{1}{N}\frac{d\Psi}{dt} ; (4.5)$$

$$\Psi = f_1(i, i_2, x); \tag{4.6}$$

$$P_{\text{\tiny 9M.T}} = \int_{0}^{i} \frac{\partial \Psi}{\partial x} di; \qquad (4.7)$$

$$ma(x) = P_{\text{MM}} - P_{\text{MX}}(x),$$
 (4.8)

где $R_{_{\Gamma}}$ — активное сопротивление обмотки в горячем состоянии, определяемое с помощью полученных температурных моделей (3.1) и (3.2) при известной максимальной допустимой температуре $\Theta_{_{\text{доп}}}$ в толще обмотки;

$$R_{_{9}} = \left(\frac{N^2}{R_{_{9.8K}}} + \frac{N^2}{R_{_{9.CT}}} + \frac{N^2}{R_{_{9.Пф}}} + \frac{N^2}{R_{_{9.Корп}}}\right)^{-1}$$
 — эквивалентное одновитковое

сопротивление короткозамкнутых контуров вихревых токов, определяемое по формулам для якоря, стопа, проходного фланца и корпуса [83].

Элементарное перемещение на отрезке времени dt рассчитывается по формуле:

$$dx = Vdt + a\frac{dt^2}{2}. (4.9)$$

Преобразуем выражение (4.4)

$$U = iR_{\Gamma} + \frac{d\Psi}{di} \frac{di}{dt} + \frac{d\Psi}{dx} \frac{dx}{dt}, \tag{4.10}$$

где $\mathrm{d}\Psi/\mathrm{d}i$ — производная потокосцепления при изменении тока на $\mathrm{d}i$;

 $\mathrm{d}\Psi/\mathrm{d}x$ — производная потокосцепления при изменении положения якоря на $\mathrm{d}x$.

Выразив дифференциалы конечными разностями, для (4.10) можно записать

$$U = iR_{\Gamma} + \frac{\Delta \Psi}{\Delta i} \frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} + \frac{\Delta \Psi}{\Delta x} V. \tag{4.11}$$

Для учета влияния вихревых токов на каждом k -м шаге интегрирования перед вычислением тягового усилия значение тока i_k корректируются по формуле [83, 86]

$$i_{\rm k} = i_{\rm k} - \frac{U - i_{\rm k} R_{\rm r}}{N^2 R_{\rm r}}.$$

Алгоритм расчета динамики можно представить следующим образом:

- 1. Задаются основные исходные данные в препроцессоре программы FEMM, геометрически размеры МС и параметры однообмоточного ЭМ: диаметр якоря $d_{\rm як}$, высота и ширина обмотки $H_{\rm o}$, $A_{\rm o}$, высота стопа $H_{\rm cr*}=0,12$, высота воротничка $H_{\rm B*}=0,35$, величина зазора у воротничка $v_*=0,03$, начальный рабочий воздушный зазор $\delta_{\rm H}$, раствор главных контактов p, начальное противодействующее усилие $P_{\rm мx.H}$, жесткость начального участка противодействующей характеристики $c_{\rm H}=75\cdot P_{\rm мx.H}$, приведенная масса якоря $m_{\rm як}$, постоянное напряжение источника питания $U_{\rm H}$, сопротивление обмотки в горячем состоянии $R_{\rm r}$, число витков обмотки N.
- 2. На этапе трогания задается положительное изменение тока di. Для первого шага задается начальное очень малое значение тока i_0 . Вычисляются в постпроцессоре программы FEMM $\Psi_{\bf k}$ и $P_{_{\rm 9M,T\,k}}$ на k-м шаге интегрирования. Вычисляется $\frac{\Delta\Psi}{\Delta i} = \frac{\Psi_{i_{\bf k}+\Delta i}-\Psi_{i_{\bf k}}}{\Delta i}$ для малого приращения тока $\Delta i=0,001A$. По формуле (4.11) рассчитывается dt.

Расчет повторяется с п. 2 до тех пор, пока не будет выполнено $P_{_{\scriptscriptstyle {\rm ЭМ.Т}\,k}} \ge P_{_{\scriptscriptstyle {\rm MX.H}}}$.

- 3. На этапе движения, когда выполняется $P_{_{\mathfrak{I}M.T\,k}} \geq P_{_{\mathrm{MX.H}}}$, задаемся значением изменения времени dt .
- 4. Пока якорь не прошел расстояние до замыкания главных контактов, т.е при $(\delta_{_{\rm H}}-\delta) < p$ противодействующее усилие рассчитывается по формуле: $P_{_{\rm MX,k}} = P_{_{\rm MX,H}} + (\delta_{_{\rm H}}-\delta) \cdot c_{_{\rm H}} \cdot 10^{-3}$. Когда расстояние, равное раствору главных контактов пройдено и начинает действовать пружина главных контактов, противодействующее усилие равно $P_{_{\rm MX,k}} = 3.5 \cdot P_{_{\rm MX,H}} + 3 \cdot (\delta_{_{\rm H}}-\delta) \cdot c_{_{\rm H}} \cdot 10^{-3}$. По формуле (4.9) определяются ускорение $a_{_{\rm K}}$ и скорость якоря $V_{_{\rm K}}$.
- 5. Вычисляется $\frac{\Delta \Psi}{\Delta i} = \frac{\Psi_{i_k + \Delta i} \Psi_{i_k}}{\Delta i}$. Отношение приращения потокосцепления к перемещению $\frac{\Delta \Psi}{\Delta x} = \frac{\Psi_{i_k + \Delta x} \Psi_{i_k}}{\Delta x \cdot 10^{-3}}$ рассчитывается для

известного текущего значения тока $i_{\rm k}$ при малом перемещении якоря dx=0.05 мм . По формуле (4.11) определяется di .

6. Перестраивается геометрические размеры ЭМ в препроцессоре для полученного значения перемещения dx.

Операции повторяются с п. 5. пока текущее значение рабочего воздушного зазора не станет меньше 0,2 мм.

Все полученные данные на каждом шаге расчета записываются в массивы. Текст программы приведен в ПРИЛОЖЕНИИ В, глава В.3.

Для примера на рисунках 4.2÷4.5 показаны рассчитанные ДХ по вышеприведенному алгоритму для условий первого опыта: $\delta_{\rm H}=6 mM$, $H_{\rm o}=50 mM$, $A_{\rm o}=10 mM$, p=3.9 mM, $P_{\rm MX.H}=1.62 H$, $m=0.284 \kappa z$, U=46.6 B, $R_{\rm f}=372.50 M$, N=6024, $\tau_{\rm HB}=18.03\cdot 10^{-3} c$.

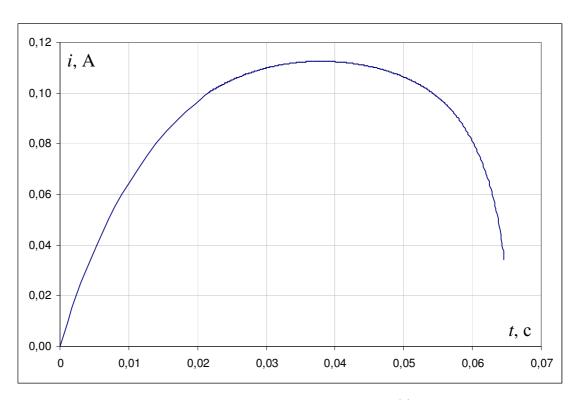


Рисунок 4.2 – Кривая изменения тока i(t) в обмотке

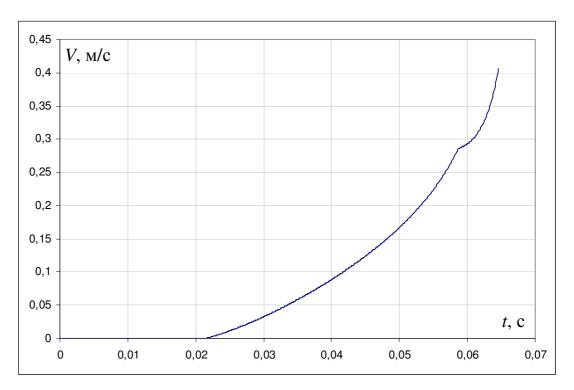


Рисунок 4.3 – Кривая изменения скорости движения V(t) подвижной системы ЭМ

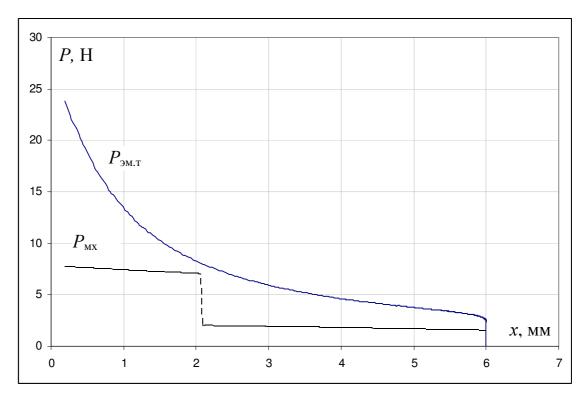


Рисунок 4.4 – Тяговая и противодействующая характеристики

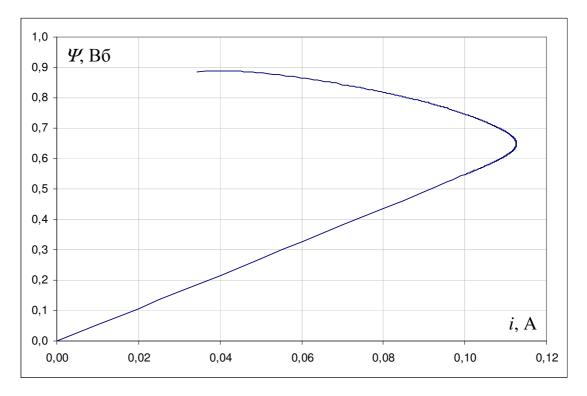


Рисунок 4.5 – Динамическая кривая намагничивания МС

4.3 Результаты моделирования динамики срабатывания однообмоточных броневых втяжных электромагнитов

Получены математические модели для безразмерных динамических параметров времен срабатывания контактов контактора $t_{_{\rm K}*}=t_{_{
m K}}/ au_{_{
m HB}}$, срабатывания ЭМ $t_{_{
m M}*}=t_{_{
m M}}/ au_{_{
m HB}}$ и соответствующих скоростей движения якоря $V_{_{
m K}*}=V_{_{
m K}}\cdot au_{_{
m HB}}/d_{_{
m ЯK}}$, $V_{_{
m M}*}=V_{_{
m M}}\cdot au_{_{
m HB}}/d_{_{
m ЯK}}$, имеющие вид:

$$t_{\kappa^*} = 10^{-2} (472,3 + 39,1z_1 + 34,3z_2 - 4,8z_3 + 7,3z_4 + 32,2z_5 + 16,9z_6 - 18,5z_1^2 - 12z_2^2 - 10,3z_3^2 + 28,8z_4^2 - 13,5z_5^2 - 14,5z_6^2 - 4,7z_2z_3 + 5,4z_2z_5);$$
(4.12)

$$t_{\kappa^*} = 10^{-2} (506,8 + 46,3z_1 + 36,4z_2 - 5,2z_3 + 34,2z_5 + 18,6z_6 - 20z_1^2 - 13,5z_2^2 - 11,5z_3^2 + 32,4z_4^2 - 15z_5^2 - 16,1z_6^2 + 5,6z_2z_5);$$
(4.13)

$$V_{\kappa^*} = 10^{-3} (257,8 + 11,2z_1 - 17,4z_2 + 3,7z_3 + 27,1z_4 - 17,8z_5 - 16,6z_6 + 9z_1^2 + 10,1z_2^2 + 7,4z_3^2 - 17,1z_4^2 + 11,4z_5^2 + 11,4z_6^2 - 3,8z_1z_2);$$
(4.14)

$$V_{\kappa^*} = 10^{-3} (514,8 + 52z_1 - 26,4z_2 + 6,7z_4 - 31,4z_5 - 32,4z_6 + 11,1z_1^2 + 17,1z_2^2 +$$

$$+14.7z_3^2 - 37.3z_4^2 + 22.2z_5^2 + 21.9z_6^2 - 5.9z_1z_2$$
; (4.15)

где кодированные значения факторов: $z_1=10\delta_*-4$, $z_2=2H_{\mathrm{o}^*}-6$, $z_3=10A_{\mathrm{o}^*}-6$, $z_4=20p_*-14$, $z_5=117{,}37Z_5-9{,}9765$, $z_6=2{,}5Z_6-16$.

Погрешность аппроксимации степенными рядами во всех опытах не превышает 9 %.

Проиллюстрируем в качестве примера (см. рисунок 4.6 и 4.7) влияние факторов $z_1 \div z_6$ на относительные динамические параметры срабатывания ЭМ.

По рисунку 4.7 можно сказать, что для относительной скорости соударения якоря о стоп $V_{\scriptscriptstyle \rm M*}$ в конце его хода существуют минимумы, зависящие от кодированных факторов z_2 , z_3 , z_5 , z_6 .

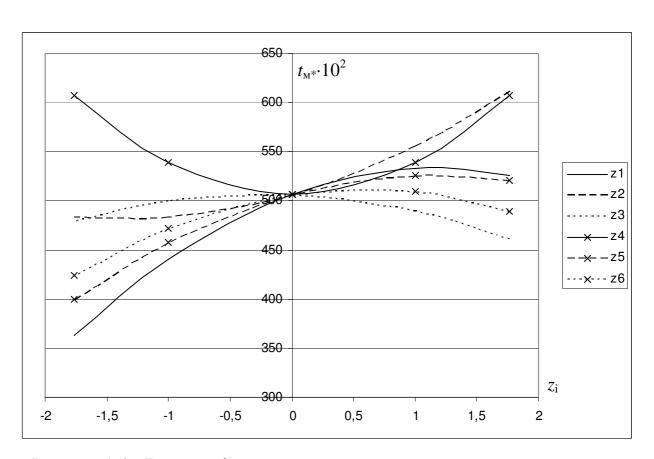


Рисунок 4.6 – Влияние факторов эксперимента z_i на относительное время срабатывания $t_{_{
m M}*}$

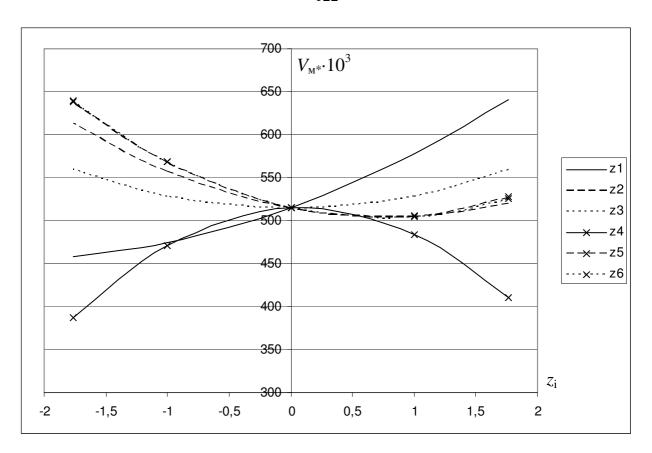


Рисунок 4.7 — Влияние факторов эксперимента $z_{\rm i}$ на относительную скорость соударения якоря со стопом $V_{_{\rm M}}{}^*$

Выводы к главе 4

- 1. Показана целесообразность использования в качестве факторов при проведении вычислительного эксперимента критериев подобия динамических процессов при срабатывании электромагнитов. Предложенные формы записей критериев подобия упрощают физическое и математическое толкование влияния параметров электромагнита на его ДХ, в качестве которых рекомендованы: скорость движения якоря в момент замыкания главных контактов контактора; время его срабатывания; скорость движения якоря в момент его соударения со стопом; время срабатывания электромагнита и др.
- 2. Предложен алгоритм расчета динамики включения ВБЭМ постоянного напряжения на основе решения электрического уравнения цепи обмотки с учетом

вихревых токов методом Эйлера. Магнитное поле МС на каждом шаге рассчитывается методом конечных элементов в программной среде FEMM.

3. На основе совместного применения методов теории подобия и планирования эксперимента получены полиномиальные модели динамических характеристик приводных электромагнитов постоянного напряжения с втяжными якорями и плоскими полюсами с помощью предлагаемого алгоритма моделирования динамики.

Полученные математические модели описывают динамические параметры ВБЭМ в критериальной (безразмерной) форме и применимы в расчетах без относительно геометрических размеров ЭМ, учитывают тепловое состояние обмотки, влияние вихревых токов, не требуют многократного выполнения громоздких расчетов магнитного поля ЭМ, что существенно сокращает затраты времени при параметрическом синтезе оптимальных приводных электромагнитов.

- 4. Проведена оценка влияния вихревых токов на динамику исследуемых MC ВБЭМ.
- 5. Предлагаемый подход позволяет разработать методики синтеза форсированных приводных ЭМ с учетом требующихся динамических параметров электромагнитного аппарата (контактора, пускателя, реле и т.п.).

ГЛАВА 5 ВОПРОСЫ ПРАКТИЧЕСКОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

5.1 Оценка достоверности полученных математических моделей

5.1.1 Сравнение расчетных и экспериментальных статических характеристик втяжного броневого электромагнита

Для подтверждения полученных моделей статических характеристик был исследован броневой электромагнит контактора типа SMM-60DP DC220V (LS Industrial Systems) и снята его тяговая статическая характеристика. Эскиз электромагнита с основными геометрическими размерами и элементами показан на рисунке 5.1.

Электромагнит имеет следующие параметры: U=220B, $I=0{,}090A$, N=21642, диаметр провода $d_{\rm np}=0{,}18{\it MM}$, ход якоря $\delta=7{\it MM}$. По полученным данным рассчитана магнитодвижущая сила катушки $F_{\rm K}=1948A$.

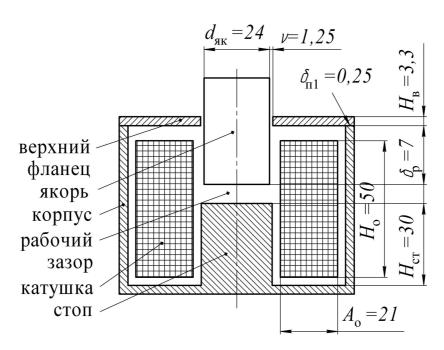


Рисунок 5.1 – Эскиз втяжного броневого электромагнита контактора постоянного тока с магнитопроводом в виде прямоугольной скобы

(все размеры указаны в мм)

Последовательность расчета с помощью математических моделей статических характеристик включает в себя следующие этапы:

1) При известной МДС $F_{\rm K}$ и геометрических размерах электромагнита по модели (2.11) для однообмоточной МС определяется неизвестная индукция $B_{\rm m}$ в наиболее нагруженном сечении магнитопровода с учетом падений напряжений в паразитном зазоре по выражению для ряда значений воздушного рабочего зазора $\delta_{\rm n}$:

$$F_{K} = (F_* \cdot d_{gK} + B_{1*} \cdot \delta_{g1}) B_{m} / \mu_0, \qquad (5.1)$$

где B_1 , δ_{n1} — магнитная индукция и значение воздушного паразитного зазора в месте сочленения корпуса и проходного фланца (2.21) (см. рисунок 5.1).

Полученная из (5.1) МДС $F = F_* \cdot F_{\text{баз}}$ идет на создание тягового усилия электромагнита.

2) По полученным значениям индукции $B_{\rm m}$ и известных геометрических размерах электромагнита по выражению (2.10) рассчитывается электромагнитная сила притяжения якоря $P_{_{\rm ЭМ.T}}$ при разных величинах воздушного зазора $\delta_{\rm p}$.

Были проведен расчет тяговой характеристики по методике, предложенной в [100]. Тяговое усилие рассчитывалось по формуле:

$$P_{_{3\text{M.T}}} = \frac{\varphi_0^2 \cdot F_{_{\text{K}}}^2}{2} \mu_0 \varepsilon_{_{\text{I}}}^2 \frac{\pi \cdot d_{_{\text{SK}}}^2}{4 \cdot \delta_{_{\text{p}}}^2} (1 + K_{_{\text{c}}}), \tag{5.2}$$

где $K_{\rm c} = \frac{2}{\pi} \left(\frac{\varphi_{\rm z}}{\varphi_0}\right)^2 \frac{q'}{\varepsilon_{\rm g}^2 x^2}$ – коэффициент, учитывающий дополнительные

тяговые силы за счет наличия рабочего бокового потока на высоте внедренной в катушку части якоря z;

 $(\varphi_0 \cdot F_{_{\rm K}})$ – падение МДС на основном (торцовом) зазоре;

 φ_0 , φ_z – уточняющие расчет коэффициенты, учитывающие падение МДС в стали и нерабочих зазорах на пути торцового и бокового потоков соответственно;

 $q' = \frac{q}{\mu_0}$ — относительная величина удельной проводимости на пути бокового потока;

 $\varepsilon_{\rm g}^2$ — коэффициент, учитывающий наличие потока выпучивания и искажения поля в рабочем зазоре (определяется по графику [85]);

$$x = \frac{d_{\text{як}}}{\delta_{\text{p}}}$$
 – определяющий размер.

Расчеты значений коэффициентов, входящих в формулу (5.2), сведены в таблицу 5.1.

$\delta_{ m p}$, mm	x	$oldsymbol{arepsilon}_{\scriptscriptstyle m J}^2$	q'	$oldsymbol{arphi}_0$	$\varphi_{\rm z} \cdot 10^{-3}$	$K_{\rm c} \cdot 10^{-3}$
0,53	45,283	1	3,429	0,196	9,88	0
0,9	26,667	1	3,429	0,285	79,14	0,24
1,43	16,783	1	3,429	0,376	147,28	1,19
2,33	10,3	1	3,429	0,477	217,09	4,27
3,6	6,667	1	3,429	0,563	267,8	11,11
4,5	5,333	1	3,429	0,604	286,74	17,27
5,4	4,444	1	3,429	0,636	297,68	24,18
6,3	3,81	1,334	3,429	0,558	213,68	16,58
6,63	3,62	1,352	3,429	0,566	214,49	17,68

Таблица 5.1 – К расчету по методике Любчика М.А. [100]

Результаты расчета и экспериментальные данные приведены в таблице 5.2, графические зависимости на рисунке 5.2.

Среднее расхождение по полученным данным между тяговым усилием, измеренным экспериментально, и усилием, полученным с помощью математических моделей, составляет 13,3 %. Та же сама погрешность для данных, полученных по методике [100] составляет 14,2 %.

T f f f f		
Таблина 5 2 — Эк	спериментальные и	расчетные данные
т иолици э.д	onephinem wibible in	pac icilible dallible

Эксперим	кспериментальная		Тяговая характеристика,			рактеристика,
ТЯТ	овая	полученная в результате			полученна	я в результате
характе	еристика	расчета	по предлож	кенным	расчета	по методике
			моделям		[100]
$\delta_{ m p}$, mm	$P_{\scriptscriptstyle \mathrm{9M.T}},\mathrm{H}$	B_{m} , Тл	$P_{\scriptscriptstyle \mathrm{9M.T}},\mathrm{H}$	$\Delta,\%$	$P_{\scriptscriptstyle{\mathrm{9M.T}}}$, H	$\Delta,\%$
0,53	157	1,649	149,3	0,8	147	2,3
0,9	114	1,583	115,4	6,0	108	0,8
1,43	84	1,508	82,6	3,1	74,6	7,0
2,33	54	1,413	50,5	6,2	45,4	4,5
3,6	35	1,315	28,2	18,5	26,7	22,9
4,5	27	1,263	19,7	21,9	19,8	21,6
5,4	22	1,221	14,1	32,3	15,3	26,4
6,3	16	1,187	10,1	24,3	11,5	14,0
6,63	11	1,177	8,9	6,3	10,8	28,3

Можно выделить следующие недочеты методики [100]:

- выражение для удельной проводимости рассеяния на пути бокового потока не включает в себя величины воздушного рабочего зазора, что вносит дополнительную погрешность;
- влияние паразитных зазоров $\delta_{\rm n1}$, $\delta_{\rm n2}$ и $\delta_{\rm n3}$ (см. рисунок 2.1) принимается во внимание путем учета падения магнитного напряжения на эквивалентном суммарном сосредоточенном зазоре $\delta_{\rm эк}$;
- В ПРИЛОЖЕНИИ Г вынесены данные по оценке статических характеристик, рассчитанных по [56] и [100] для экспериментальных данных, взятых из [56].

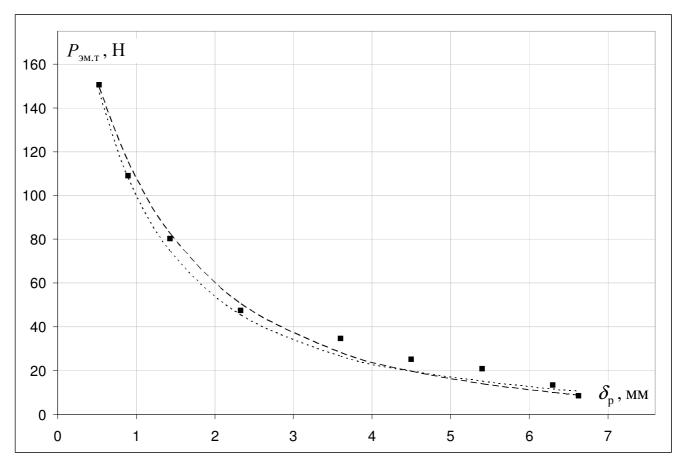


Рисунок 5.2 – Статические тяговые характеристики, полученные экспериментально (точки), по методике Любчика М.А. (малый пунктир), с помощью математических моделей (средний пунктир)

Была проверена адекватность тепловой модели максимальной температуры $\Theta_{\rm m}$ (3.1) сопоставлением с экспериментальными данными [122], полученными на модели втяжного броневого электромагнита постоянного тока, изображенного на рисунке 5.3.

Результаты расчета и экспериментальные данные приведены в таблице 5.3.

Обмотка расположена на латунном каркасе и имеет следующие параметры: число витков N=1076; диаметр провода $d_{\rm nn}=1$ мм, марка провода ПЭТВ-1.

Теплопроводность определялась по методике [149]: $\lambda_{_3} \approx 0.2 \, Bm/(M^{\circ}C)$.

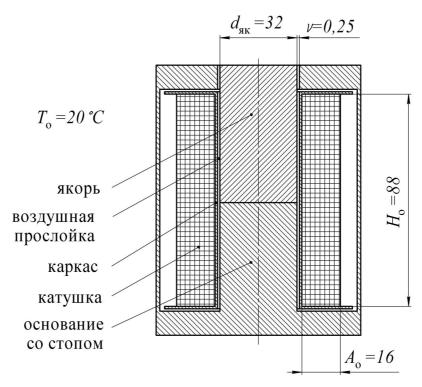


Рисунок 5.3 – Эскиз броневого втяжного электромагнита постоянного тока [122]

Таблица 5.3 – Результаты расчета и экспериментальные данны	e [122]
--	---------

Напряжение	Объемная плотность	x_6	Θ_{m} , °C		Относительное
U , $\mathrm B$	мощности q , $Bm/м^3$		Расчет Опыт		расхождение,
					%
4,3	20630	-1,620	43,6	46	5,2
6,6	48602	2,151	62,3	68	8,4
10,4	120680	11,868	111,6	121,7	8,3

Расхождения в расчете не превышают 8,4 процента.

5.1.2 Сравнительный анализ расчетных и экспериментальных динамических характеристик электромагнита

Проведена оценка достоверности методики моделирования динамики включения ВБЭМ постоянного напряжения (см. главу 4) сопоставлением экспериментально снятых данных [55] на модели электромагнита, изображенного на рисунке 5.4.

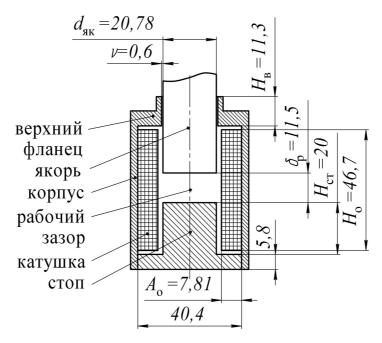


Рисунок 5.4 – Эскиз втяжного броневого электромагнита [55]

Результаты расчета и экспериментальные данные приведены в таблице 5.4.

Электромагнит имеет следующие параметры: сопротивление обмотки $R=0,276\,Om$; число витков N=144; величина воздушного рабочего зазора $\delta_{\rm p}=11,5\,{\rm mm}$.

Противодействующее усилие создавалось подвешенным за якорь грузом массой 0,25 кг.

Полученные данные (см. рисунок 5.5) удовлетворительно сходятся с опытом. Время расчета первого этапа алгоритма зависит от выбранного значения di. Погрешность расчета тока в обмотке не превышает 11,1%.

Погрешность расчета времени срабатывания электромагнита в сравнении с опытными данными составляет 2%.

Таблица 5.4 – Результаты расчета и экспериментальные данные [55]

Время t, с	Ток	I, A	Относительное
	Расчет		расхождение, %
0,001	8,0	7,2	-11,1
0,002	14,1	14,8	5,0
0,003	19,4	21,9	11,2

Продолжение таблицы 5.4

Время <i>t</i> , с	Ток	<i>I</i> , A	Относительное
Бреми і, с	Расчет	Эксперимент	расхождение, %
0,004	23,9	26,6	10,3
0,005	27,4	29,9	8,3
0,006	30,1	31,6	4,8
0,007	31,9	32,1	0,6
0,008	32,8	32,2	-1,7
0,009	32,6	31,9	-2,1
0,01	31,1	31	-0,3
0,011	28,2	28,8	2,0
0,012	23,0	25	8,0
0,01275	15,1	16,9	10,4
0,01299	10,6	-	-

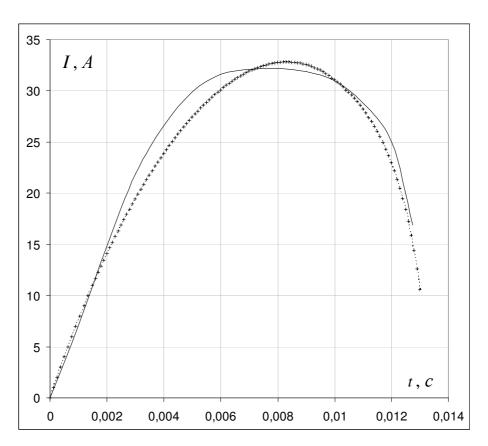


Рисунок 5.5 – Зависимости изменения тока в обмотке при включении ЭМ: экспериментальные данные (сплошная линия); данные, полученные с помощью разработанной методики (точки)

5.2 Методика синтеза втяжных броневых электромагнитов

Задачей синтеза приводного ЭМ является определение его размеров [61, 100, 120, 134, 135 и др.], обеспечивающих, как минимум, требуемое тяговое электромагнитное усилие $P_{_{\rm ЭМ.T}}$ при заданном положении якоря δ и превышения температуры нагрева обмотки не выше допустимого $\tau_{_{\rm доп}}$ при оговоренном режиме его работы.

Предложена [10] усовершенствованная инженерная методика проектного расчета короткоходовых ВБЭМ, базирующаяся на цепевых методах.

Выше были оговорены недостатки традиционного и критериального подходов к проектному расчету. Предлагаемая методика лишена этих недостатков благодаря обоснованному определению коэффициента запаса по магнитодвижущей силе по выражению, полученному на основе результатов экспериментальных исследований. В ней учтены зависимость коэффициента теплоотдачи от превышения температуры и эффективной площади охлаждения поверхности обмотки, режим работы электромагнита.

Методика синтеза и численный пример выполнения проектного расчета вынесены в ПРИЛОЖЕНИЕ Д.

5.2.1 Методика синтеза втяжного броневого электромагнита постоянного напряжения на основе полученных статических моделей

Ниже описана предлагаемая методика синтеза однообмоточного длинноходового ВБЭМ постоянного напряжения с учетом теплового состояния обмотки для длительного режима работы, базирующаяся на полученных статических характеристиках.

При проектировании должны выполняться следующие условия:

- электромагнит должен при критическом значении воздушного рабочего зазора $\delta_{\rm кp}$ развивать усилие $P_{\rm мx. kp}$ при минимальном напряжении в цепи его питания;

- обмотка при сопротивлении, соответствующем длительному ее нагреву $R_{_{\Gamma}}$, при максимально возможном напряжении должна нагреваться до температуры, не превышающей допустимой $\Theta_{_{\text{доп}}}$.

Использовались полиномиальные модели: максимальной $Q_{\mathrm{m}^*} = \Theta_{\mathrm{m}}/T_0$, среднеобъемной $Q_{\mathrm{v}^*} = \Theta_{\mathrm{v}}/T_0$ температуры нагрева обмотки (3.1)÷(3.3), электромагнитной силы (2.10) $P_* = P_{_{\mathrm{ЭМ.T}}} / \left(\frac{B_{\mathrm{m}}^2 \pi d_{_{\mathrm{ЯК}}}^2}{8\mu_0} \right)$, магнитодвижущей силы (2.11) $F_* = F / \left(\frac{B_{\mathrm{m}} d_{_{\mathrm{ЯК}}}}{\mu_0} \right)$, потокосцепления (2.12) $\Psi_* = \Psi / \left(\frac{B_{\mathrm{m}} \pi d_{_{\mathrm{ЯК}}}^2}{4} N \right)$.

Исходные данные для расчета:

- основные геометрические соразмерности МС, определяемые по рекомендациям [100]: $H_{\text{o}*}=H_{\text{o}}/d_{\text{як}}$, $A_{\text{o}*}=A_{\text{o}}/d_{\text{як}}$, $H_{\text{c}\text{T}*}=H_{\text{c}\text{T}}/H_{\text{o}}$, $H_{\text{в}*}=H_{\text{в}}/d_{\text{як}}$, $v_*=v/d_{\text{як}}$, $\Delta_{\text{к}*}=\Delta_{\text{к}}/d_{\text{як}}=0.1$;
- координаты критической точки на противодействующей характеристике $(\delta_{\rm \tiny KP}, P_{\rm \tiny MX,KP});$
- кратности максимального $K_{\mathrm{U\,max}} \geq 1$, минимального $K_{\mathrm{U\,min}} \leq 1$ напряжения питания;
 - коэффициент запаса по напряжению срабатывания $K_{\mathrm{Ucp}} \geq 1$;
 - коэффициент заполнения $0.3 \le K_{_3} \le 0.7$ обмоточного окна;
- допустимая температура $\Theta_{\text{доп}}$ нагрева обмотки, температура T_0 окружающей среды.

Мощность, выделяющаяся в обмотке

$$P_{\text{All}} = H_{\text{o}} A_{\text{o}} \pi d_{\text{gk}} \left(1 + 2\Delta_{\text{k*}} + A_{\text{o*}} \right) q. \tag{5.3}$$

Воспользовавшись известным [157] соотношением между максимальной магнитодвижущей силой $F_{\rm max}$ и мощностью, выделившейся в обмотке с учетом (5.3) можно получить

$$F_{\text{max}} = d_{\text{MK}}^2 H_{\text{o*}} A_{\text{o*}} \sqrt{\frac{K_3 q}{\rho_0 (1 + \alpha \Theta_{\text{v}})}},$$
 (5.4)

где ρ_0 , α — удельное электрическое сопротивление, температурный коэффициент сопротивления проводникового материала обмоточного провода.

Выразим $F_{\rm max}$ в (5.4) через $F_{\rm cp}$.

Примем во внимание, что

$$F_{\text{max}} = K_{\text{IJmax}} U_{\text{H}} N / R_{\text{r}} , \qquad (5.5)$$

где $U_{\scriptscriptstyle \mathrm{H}}$ – номинальное напряжение питания;

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

Необходимая магнитодвижущая сила срабатывания, соответствующая нагретому состоянию обмотки

$$F_{\rm cp} = \frac{K_{\rm Umin} U_{\rm H} N}{K_{\rm Ucn} R_{\rm F}}.$$
 (5.6)

На основании (5.5) и (5.6) можно записать

$$F_{\rm cp} = F_{\rm max} / K_{\rm max} , \qquad (5.7)$$

где $K_{\max} = K_{\text{Ucp}} \cdot K_{\text{Umax}} / K_{\text{Umin}}$.

Выражение (5.7) с учетом (5.4) может быть записано в виде

$$F_{\rm cp} = \frac{d_{\rm gk}^2 H_{\rm o^*} A_{\rm o^*}}{K_{\rm max}} \sqrt{\frac{K_{\rm s} q}{\rho_0 (1 + \alpha \Theta_{\rm v})}},$$
 (5.8)

где $K_{\text{max}} = K_{\text{Umax}} \cdot K_{\text{Ucp}} / K_{\text{Umin}}$.

Методика включает в себя следующие этапы:

- 1) Принимается значение $d_{\rm як}$ на первом шаге поиска. Поиск может вестись любыми численными методами, например, самым простым методом перебора.
 - 2) По формуле (2.10)

$$P_{\scriptscriptstyle \mathrm{3M.T}} = P_* \cdot \left(\frac{B_\mathrm{m}^2 \pi d_{\scriptscriptstyle \mathrm{RK}}^2}{8\mu_0} \right)$$

определяется такое значение B_{m} , при котором выполняется $P_{_{\scriptscriptstyle \mathrm{9M.T}}} = P_{_{\scriptscriptstyle \mathrm{MX.Kp}}}$.

Тогда можем определить МДС по формуле (2.11)

$$F_{\rm cp1} = F_* \cdot \left(\frac{B_{\rm m} d_{_{\rm SK}}}{\mu_0} \right).$$

Определяется значение $B_{\rm m.rp}$ – граничное значение индукции, определяющее условие линейности магнитной системы, которое устанавливается из анализа кривых намагничивания (2.11) и (2.12). Если $B_{\rm m} < B_{\rm m.rp}$, то F_* рассчитывается при $B_{\rm m} = B_{\rm m.rp}$, иначе F_* зависит от $B_{\rm m}$.

- 3) По формуле (3.1) $\Theta_{\rm m}$ определяется такое значение q, при котором $\Theta_{\rm m} = \Theta_{\rm доп}$. По полученному значению можем определить по (3.3) $\Theta_{\rm v}$.
 - 4) Рассчитываем сопротивление обмотки в горячем состоянии. По формуле (5.6) определяем $F_{\rm cp2}$.
 - 5) Сравниваются полученные значения $F_{
 m cp1}$ и $F_{
 m cp2}$. Если выполняется

$$\frac{F_{\text{cp1}} - F_{\text{cp2}}}{F_{\text{cp1}}} \le \varepsilon, \tag{5.9}$$

для заданной погрешности ε , то расчет закончен. Если (5.9) не выполняется значение $d_{\rm як}$ увеличивается.

Приведены результаты синтеза по предложенной методике и по методике $[100] \quad \text{для} \quad \text{следующих} \quad \text{фиксированных} \quad \text{значений:} \quad K_{\text{Umax}} = 1,0 \,, \quad K_{\text{Umin}} = 0,85 \,,$ $K_{\text{Ucp}} = 1,\!15 \,, \quad K_{_{3}} = 0,\!50 \,, \quad \Theta_{\text{доп}} = 80^{\circ}C \,, \quad T_{_{0}} = 20^{\circ}C \,, \quad H_{_{0}*} = 2,\!5 \,, \quad A_{_{0}*} = 0,\!60 \,, \quad H_{_{\text{CT}*}} = 0,\!25 \,,$ $H_{_{\text{B}*}} = 0,\!35 \,, \quad \nu_{_{*}} = 0,\!03 \,, \quad \text{коэффициент запаса по нагреву} \quad \xi_{_{0}} = 1 \,.$

Результаты расчета представлены в таблице 5.5. В верхней части ячейки представлены значения $d_{\rm як}$, полученные по предложенной нами методике, в нижней части – по методике Любчика М.А. [100].

Среднее расхождение между полученными значениями $d_{\rm як}$ по методике синтеза, предложенной выше, и по методике Любчика М.А. составляет 9,1 %.

По данным таблицы 5.5 можно сделать следующие выводы:

- применяемая в [100] формула для расчета электромагнитного тягового усилия $P_{\scriptscriptstyle \mathrm{ЭМ.Т}}$ учитывает падение магнитного напряжения только в области воздушных зазоров;
- строго говоря, расчет требует предварительных ориентировочных данных о диаметре якоря 9M для выбора интервала изменения параметра x и для выбора величины зазора у воротничка, что обуславливает дополнительные затраты времени при расчете.

Таблица 5.5 — Результаты расчета диаметра $d_{\scriptscriptstyle \mathsf{NK}}$

$P_{\text{MX.Kp}}$, H δ_{Kp} , MM	4	6	8	10	12	14
2	13,9	15,2	16,2	17,0	17,7	18,3
4	17,9	19,5	20,7	21,7	22,6	23,4
6	20,8	22,6	24,1	25,2	26,2	27,1
8	22,8 20,1	25,1	26,7	28,0	29,1	30,1
10	24,5	26,9	28,8	30,2	31,5	32,6
12	25,6	28,4	30,4	32,0	33,4 30,2	34,6
14	26,5	29,4	31,6	33,5	34,9	36,3

В ПРИЛОЖЕНИИ Е описана методика синтеза ВБЭМ, основанная на полученных моделях статических электромагнитных характеристик и тепловых параметров, учитывающая влияние паразитных зазоров на суммарную магнитодвижущую силу ЭМ падением напряжений в них. Там же проведено исследование влияния условий технологического процесса, условий работы на размеры синтезируемого ЭМ.

5.2.2 Синтез втяжного электромагнита с минимально потребляемой мощностью

Полученные модели также позволяют проводить синтез электромагнита с учетом различных критериев оптимальности. Приведем методики синтеза ВБЭМ для наиболее часто использующихся критериев оптимизации.

Условие минимального потребления мощности катушкой однообмоточного ЭМ может быть определено из уравнения потребляемой мощности (5.1). Достижение минимума выражения (5.1) возможно осуществлять во внешнем цикле для ряда значений геометрических соразмерностей. При этом внутренний цикл представляет собой вышеприведенную методику синтеза ЭМ.

5.2.3 Синтез втяжного электромагнита на заданную тяговую характеристику

ЭМ Традиционный подход К проектированию ПО значению электромагнитной тяговой силы критической В точке механической характеристики $P_{_{\scriptscriptstyle \mathrm{ЭM.T}}} = P_{_{\scriptscriptstyle \mathrm{MX.KP}}}$ не всегда гарантирует достижения желаемых результатов [121]. Представляет интерес проектирование при условии равенства тяговой силы в нескольких точках перемещения якоря.

Для контроля степени совпадения расчетной и необходимой тяговых характеристик рекомендуется [121] использование следующего показателя:

$$\Pi = \sum_{i=1}^{n} \left[1 - \frac{P_{\text{эм.тi}}}{K_{\text{запi}} P_{\text{эм.тзi}}} \right]^{2},$$
 (5.10)

где $P_{_{\scriptscriptstyle \mathrm{ЭМ.Т}i}}$ – расчетное значение силы в i -й точке;

 $P_{_{\scriptscriptstyle \mathrm{ЭМ.ТЗ}i}}$ – заданное значение силы в i -й точке;

 $K_{\mbox{\tiny 3an\,{\sc i}}}$ – коэффициент запаса в i -й точке тяговой характеристики;

n – число точек заданной характеристики.

Алгоритм проектирования представляет собой двухуровневый цикл, во внутреннем цикле реализована усовершенствованная методика синтеза ВБЭМ, во внешнем – достижение условия минимума выражения (5.10).

5.3 Разработка методики синтеза оптимальных втяжных броневых электромагнитов электромагнита с учетом динамических характеристик срабатывания

Постановка задачи заключается в проведении расчета динамики включения электромагнита, обмотка которого подключается на постоянное напряжение с учетом проводимости и нелинейных свойств материала магнитопровода, с учетом влияния вихревых токов до момента срабатывания аппарата.

Методика реализуется на базе методики синтеза ВБЭМ постоянного напряжения, описанной в главе 5.2. Вместо критической точки при этом задается значение начального рабочего воздушного зазора $\delta_{\rm H}$ и значение противодействующей силы в этой точке $P_{\rm MX.H}$. Задается также значение раствора главных контактов контактора p, приводом которого является рассчитываемый электромагнит. Кодированные значения факторов могут быть рассчитаны вместе следующим образом:

$$\begin{split} z_1 = & 10\delta_{_{\rm H}*} - 4 \;,\; z_2 = 2H_{_{\rm O}*} - 6 \;,\; z_3 = 10A_{_{\rm O}*} - 6 \;,\; z_4 = 20p_* - 14 \;,\\ z_5 = & 117,37 \frac{P_{_{\rm MX,H}}\delta_{_{\rm H}}}{P_{_{\rm 9JI}} \cdot \tau_{_{\rm HB}}} - 9,9765 \;,\; z_6 = 2,5 \frac{d_{_{\rm SK}}}{\tau_{_{\rm HB}}} \sqrt{\frac{m}{P_{_{\rm MX,H}}\delta_{_{\rm H}}}} - 16 \;, \end{split}$$

где мощность тепловыделения $P_{\text{эл}}$ определяется по (В.4), постоянная времени $\tau_{\text{нв}}$ по (В.15), приведенная масса якоря m по (В.18).

Задача оптимального проектирования в этом случае сводится к следующему: необходимо определить геометрические размеры, при которых реализуется зависимость V(t), наиболее близкая к оптимальной. В [126] показано, что идеальным вариантом режима движения якоря ЭМ будет такой, при котором $V_{\rm M} \to {\rm min}$ или $V_{\rm M} = V_{\rm M\,min}$. Поиск экстремумов динамических параметров (4.2) возможно осуществлять во внешнем цикле при различных значениях основных геометрических соотношений, например простым методом перебора.

5.4 Оценка динамических параметров максимального токового расцепителя модульного автоматического выключателя

Для оценки работоспособности контактно-дугогасительной системы выключателя в режиме короткого замыкания необходимо знать ток в момент начала расхождения его контактов. Подобная задача может быть решена, если известны ДХ электромагнитного расцепителя (ЭМР) максимального тока.

Особенностью срабатывания ЭМР является зависимость его ДХ от тока в защищаемой цепи. Токи короткого замыкания могут быть столь велики, что ферромагнитные элементы МС ЭМР могут быть насыщены и влияют на характер переходного процесса его срабатывания. Влиянием вихревых токов, протекающих в ферромагнитных элементах, можно пренебречь.

Ниже описан алгоритм расчета ДХ ЭМР при известных данных:

- линейный закон изменения тока короткого замыкания;
- геометрические размеры осесимметричной MC с втяжными подвижными элементами, обмоточные данные, марка материалов ферромагнитных элементов.
 - противодействующая характеристика $P_{\scriptscriptstyle \mathrm{MX}}$.

Расчет МС проводился методом конечных элементов в программной среде FEMM. Принят линейный закон изменения тока во времени t

$$i = \frac{\omega}{\pi} I_{\text{max}} t \,, \tag{5.11}$$

где I_{max} – ударный ток короткого замыкания;

 ω — угловая частота источника питания.

Алгоритм расчета ДХ ЭМР сведен к следующей последовательности вычислительных действий при заданном шаге изменения значения времени Δt . Для этого:

- 1. Рассчитывается текущее время $t = t_{\rm rp} + \Delta t \cdot k$, где $t_{\rm rp} = 0.285 {\it mc}$ время трогания, рассчитанное по известным методикам.
 - 2. Рассчитывается по (5.11) ток $i_{\mathbf{k}}$ к концу k -ого интервала времени.
 - 3. Определяется рабочий воздушный зазор $\delta_{\mathbf{k}}$ к концу k -ого интервала

$$\delta_{k} = \delta_{k-1} - \Delta x_{k},$$

где $\Delta x_{\rm k}$ – задаваемое приращение перемещения якоря.

4. Рассчитывается противодействующее усилие к концу k-ого интервала времени

$$P_{\text{MX},k} = P_{\text{MX},H} + c_{\text{MX}} \left(\delta_{\text{H}} - \delta_{\text{k}} \right),$$

где $P_{_{
m MX.H}}$ — начальное противодействующее усилие, $c_{_{
m MX}}$ — «жесткость» противодействующей характеристики, $\delta_{_{
m H}}=3,5$ мм — начальный рабочий воздушный зазор.

- 5. Проводится расчет МС и определяется электромагнитное усилие $P_{_{\mathfrak{I}^{M,T,k}}}$ в конце k -ого интервала.
 - 6. Определяется приращение перемещения

$$\Delta x_{k}' = a_{k} \cdot \Delta t^{2} / 2 + V_{k-1} \cdot \Delta t,$$

где $a_{\rm k} = (P_{_{\rm 9M,T,k}} - P_{_{
m MX,k}})/m_{_{
m SK}}$ – ускорение движения якоря ЭМР,

 $V_{\rm k-1} = a_{\rm k-1} \cdot \Delta t + V_{\rm k-2}$ — скорость движения якоря к концу (k-1)-ого интервала или начальная скорость на k -м интервале.

7. Оценивается расхождение между Δx_k и Δx_k . Если оно велико, то запускается процедура уточнения Δx_k . Когда расхождение становится допустимым, перестраивается эскиз в препроцессоре FEMM, опускается якорь на Δx_k и расчет повторяется, начиная с п. 3.

В таблице 5.6 приведены результаты расчета динамических характеристик срабатывания ЭМР при известном $I_{\rm max}=3000A$ и $\omega=314\frac{1}{c}$.

Результаты аналогичных расчетов при $I_{\rm max}=10000A$, при $\delta_{\rm k}=1,2$ мм показали, что индукция в магнитной системе достигает 3,6 Тл, что свидетельствует о глубоком ее насыщении.

Таблица 5.6 –	Результаты	расчета ДХ	срабатывания ЭМР
1 0001111111111111111111111111111111111	1 00) 012 1 00 1 21	p	P W C W I BIB WIII DI G I I I I

Номер	Текущее	Ток в	Электро-	Противо-	Перемещение	Воздушный
шага к	время t ,	обмотке	магнитная	действующее	якоря	рабочий
	мс	$i_{\rm k}$, A	сила	усилие	$\Delta x_{ m k}$, mm	зазор
			$P_{_{\scriptscriptstyle{\mathrm{9M.T.k}}}}$, H	$P_{_{ m MX.k}}$, H		$\delta_{_{ m k}}$, mm
1	0,385	115,0	5,43	2,00	0,008	3,492
2	0,485	145,0	7,60	2,02	0,030	3,462
3	0,585	175,0	9,46	2,05	0,061	3,401
4	0,685	205,0	11,29	2,11	0,101	3,300
5	0,785	235,0	13,20	2,19	0,150	3,150
6	0,885	265,0	15,13	2,30	0,208	2,942
7	0,985	295,0	17,49	2,44	0,275	2,667
8	1,085	325,0	20,36	2,63	0,354	2,314
9	1,185	355,0	24,21	2,86	0,448	1,866
10	1,285	385,0	30,24	3,16	0,565	1,301
11	1,301	390,0	31,63	3,22	0,101	1,200*

^{*} — соответствует рабочему зазору, при котором происходит срабатывание защелки; по этому значению уточнено $\Delta\chi_{11}$ и Δt_{11} .

Таким образом, контакты модульных выключателей размыкаются за время около 1,3 мс (механизм свободного расцепления срабатывает практически мгновенно) и при токе, значительно меньшем ожидаемого тока к.з., что подтверждает их высокую коммутационную способность. Результаты подобных расчетов могут быть также использованы при оценке отключающей системы и токоограничивающей возможности автоматических выключателей.

5.5 Усовершенствование приводного электромагнита реле времени РВ-100

Расчетным путем в программной среде FEMM исследовано влияние на статическую тяговую характеристику угла конусности якоря с конусообразным полюсом МС приводного ВБЭМ серийно выпускаемого реле РВ-100 (рисунок 5.6).

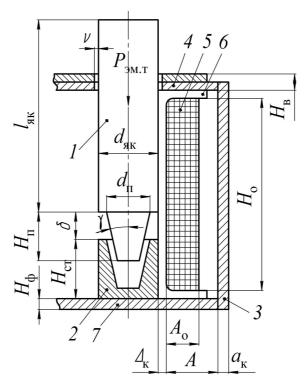


Рисунок 5.6 – МС постоянного тока с втяжным якорем с конусообразным полюсом: 1 – якорь; 2 – стоп; 3 – корпус; 4 – воротничок; 5 – обмотка; 6 – каркас; 7 – опорный фланец

Угол γ конусности рабочего полюса втяжного якоря составляет 15°, а магнитодвижущая сила срабатывания, определенная экспериментально, равна 1030 А.

Известно [42, 61, 78, 86, 98 и др.], что использование различных форм полюсов втяжного якоря (рисунок 5.7) видоизменяет статическую тяговую характеристику МС . Так, например, при прочих равных условиях, уменьшая угол конусности γ , можно увеличить тяговое усилие [61, 78, 98] при относительно больших величинах δ (при конических полюсах, см. рисунок 5.7, а).

При плоской форме полюса ($2\gamma = 180^\circ$) достигается большее усилие $P_{_{\rm ЭМ.Т}}$ при малых величинах рабочего воздушного зазора δ . Усеченно-коническая форма (рисунок 5.8, б) полюса обеспечивает тяговую характеристику, располагающуюся между выше упомянутыми зависимостями. Следовательно, варьируя форму

полюса, можно необходимым образом согласовать тяговую и механическую характеристики электромагнитного привода.

Вместе с тем используется [2] форма полюса по рисунку 5.7, в, которую можно назвать конусообразной. Отличается она тем, что диаметр основания полюса $d_{\rm п}$ меньше диаметра $d_{\rm як}$ якоря. Уменьшением угла конусности γ до нуля при фиксированном $d_{\rm п}$ можно полюс трансформировать (рисунок 5.7, г) в магнитный шунт с постоянным сечением [61, 98] (цилиндрический полюс).

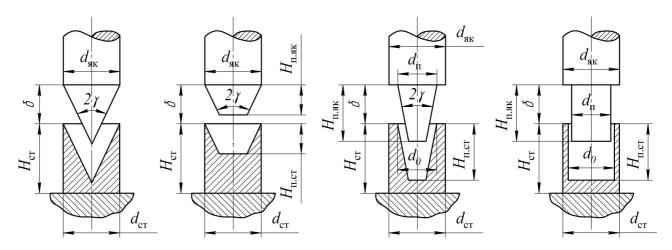


Рисунок 5.7 – Формы полюсов цилиндрического якоря и стопа:

а – коническая (плоская при $2\gamma = 180^{\circ}$); б – усеченно-коническая; в – конусообразная; г – цилиндрическая

Проведено исследование влияния угла γ на тяговую характеристику МС с конусообразным полюсом. Были приняты размеры осесимметричной МС (см. рисунок 5.6) серийно выпускаемого реле: $d_{\rm як}=14,5$ мм; $d_{\rm п}=10$ мм; $H_{\rm п}=12,5$ мм; $2\gamma=30^\circ$; $H_{\rm ст}=14,5$ мм; $a_{\rm ck}=3$ мм; $(b_{\rm ck}=44$ мм — ширина скобы), $H_{\rm o}=48$ мм; $A_{\rm o}=9,5$ мм; A=11,5 мм; $H_{\rm B}=3$ мм; V=0,6 мм; $\Delta_{\rm K}=1,5$ мм; $a_{\rm K}=1,5$ мм; $d_{\rm G}=11$ мм (см. рисунок 5.7, в). Якорь и стоп выполнены из стали марки 20 ГОСТ 1050-88, корпус, фланец, воротничок — из стали марки 08 ГОСТ 1050-88. При варьировании угла γ в диапазоне от 17° до 0° размер $d_{\rm п}$ оставался неизменным.

Результаты расчета тяговых характеристик при F=1000A для углов γ от 16° до 0° приведены на рисунке 5.8.

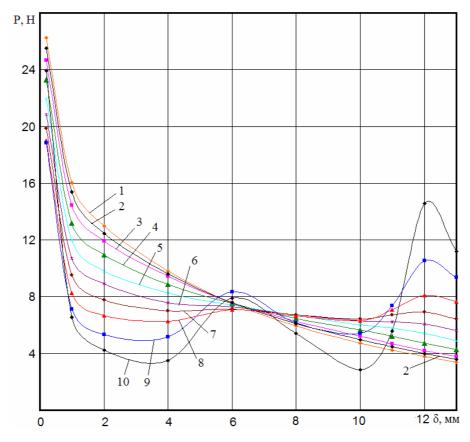


Рисунок 5.8 – Статические тяговые характеристики при F = 1000A и углах конусности полюса:

$$1 - 16^{\circ}$$
; $2 - 15^{\circ}$; $3 - 14^{\circ}$; $4 - 12^{\circ}$; $5 - 10^{\circ}$; $6 - 8^{\circ}$; $7 - 6^{\circ}$; $8 - 4^{\circ}$; $9 - 2^{\circ}$; $10 - 0^{\circ}$

Установлено, что в данном случае при изменении γ в диапазоне от 17° до 8° тяговые характеристики остаются монотонными. При $\gamma \leq 6^{\circ}$ в тяговой характеристике появляются два локальных максимума. Наиболее явно эти максимумы просматриваются при $\gamma = 0^{\circ}$.

Результаты расчета тяговых характеристик при F = 2000A приведены в виде таблицы 5.7. Видно, что при более нагруженной МС монотонность характеристик сохраняется при $\gamma \ge 11^\circ$.

Таблица 5.7 – Статические тяговые характеристики броневой магнитной системы с втяжным якорем с конусообразным полюсом при F = 2000A

δ ,MM γ , °	0,2	1	2	4	6	8	10	11	12	13
17	47,77	30,68	25,80	21,25	17,98	15,39	13,20	12,24	11,34	10,63
16	46,56	29,71	24,89	20,67	17,71	15,37	13,35	12,50	11,69	11,03
15	45,64	28,81	24,02	20,17	17,46	15,32	13,48	12,73	12,00	11,43
14	44,65	27,49	23,18	19,65	17,22	15,24	13,61	12,97	12,36	11,84
13	43,71	26,53	22,49	18,99	16,93	15,16	13,70	13,20	12,72	12,27
12	42,87	25,79	21,69	18,44	16,67	15,08	13,79	13,40	13,08	12,72
11	42,11	24,85	20,79	17,86	16,41	14,99	13,82	13,64	13,51	13,23
10	41,30	24,06	19,96	17,28	16,15	14,91	13,87	13,86	13,88	13,73
9	40,76	23,05	19,19	16,74	15,90	14,75	13,82	13,98	14,31	14,29
8	39,99	22,28	18,55	16,07	15,70	14,63	13,77	14,14	14,75	14,85
7	39,31	21,06	17,23	15,25	15,46	14,46	13,55	14,37	15,51	15,90
6	39,29	20,62	16,77	14,93	15,38	14,26	13,37	14,38	15,90	16,31
5	38,97	19,83	15,88	14,38	15,29	14,22	13,06	14,52	16,64	17,19
4	39,06	19,08	15,00	13,45	15,15	13,91	12,65	14,45	17,57	18,40
3	39,48	18,36	14,11	12,60	15,55	13,65	11,80	14,51	19,00	19,78
2	40,14	17,78	13,21	11,62	16,27	13,02	10,74	14,30	21,25	21,50
1	41,24	17,26	12,28	10,01	16,35	12,10	8,85	13,38	24,26	23,67
0	48,97	18,13	12,02	9,17	15,44	11,00	6,20	12,46	28,85	24,64

О форме тяговых характеристик можно судить и по кривым намагничивания $\Psi = f(F)$ MC. Известно [168], что

$$P_{\scriptscriptstyle \rm SM} = -\frac{\partial W_{\scriptscriptstyle \rm KO}}{\partial \mathcal{S}},$$

где $W_{\text{ко}} = \int\limits_{0}^{\text{I}} \Psi(\delta,i) \mathrm{d}i$ — магнитная коэнергия системы;

Ψ – потокосцепление системы.

Коэнергия системы пропорциональна площади между кривой намагничивания и осью абсцисс OF. Электромагнитное тяговое усилие $P_{\scriptscriptstyle \mathrm{ЭМ.T}}$

пропорционально скорости изменения этой площади при переходе из положения $\delta_{\rm i}$ в положение $\delta_{\rm i+1}$.

На рисунках 5.9 и 5.10 показаны кривые намагничивания для МС ВБЭМ с конусообразным полюсом при $\gamma = 8^{\circ}$ и $\gamma = 0^{\circ}$.

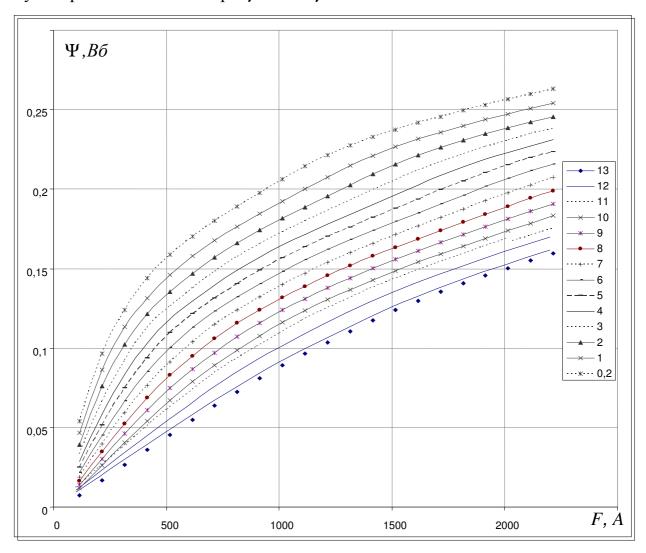


Рисунок 5.9 – Кривые намагничивания броневой магнитной системы с внедряющимся якорем с конусообразным полюсом при $\gamma = 8^{\circ}$,

$$0.2 \cdot 10^{-3} \le \delta \le 13 \cdot 10^{-3}$$

Кривые намагничивания (см. рисунок 5.9), соответствующие $\gamma = 8^{\circ}$, нарастают достаточно равномерно с изменением δ . Это приводит к монотонному (в первом приближении) увеличению тяговой силы. Кривые намагничивания (см. рисунок 5.10), соответствующие $\gamma = 0^{\circ}$, имеет области с относительно близко

расположенными друг к другу кривыми. Следовательно, при $\Delta \delta_{\rm i} = \delta_{\rm i+l} - \delta_{\rm i} = const$ на этих участках характеристик должно наблюдаться уменьшение тяговых усилий.

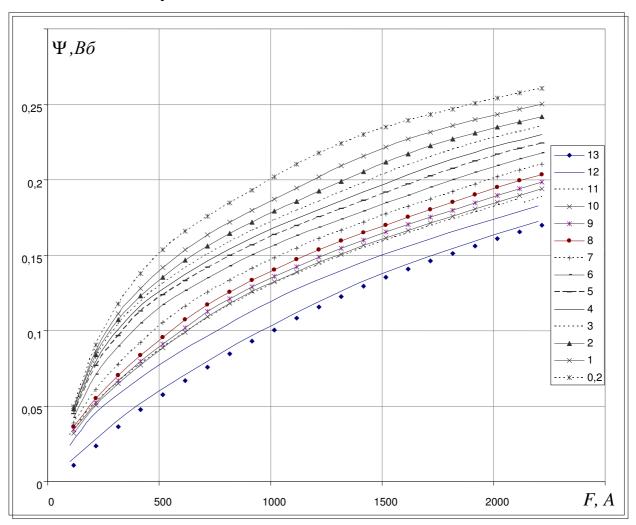


Рисунок 5.10 – Кривые намагничивания броневой магнитной системы с внедряющимся якорем с цилиндрическим полюсом при $\gamma=0^\circ$, $0.2\cdot 10^{-3} \le \delta \le 13\cdot 10^{-3}$

Проведенные исследования показали целесообразность выбора (рисунок 5.11) угла конусности конусообразного полюса втяжного якоря равным 8° в МС приводного электромагнита реле времени с часовым механизмом серии РВ-100.

Меньшая магнитодвижущая сила срабатывания (800A) в усовершенствованной магнитной системе позволяет уменьшить потребляемую реле мощность не меньше чем в 1,6 раза.

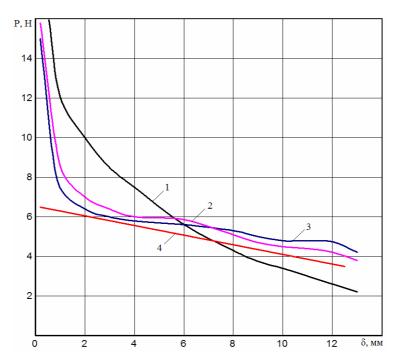


Рисунок 5.11 — Статические тяговые характеристики (1) при γ =15°, F=1000A, (2, 3) при γ =8° и γ =7°, F=800A; механическая характеристика (4) приводного ЭМ реле времени PB-100

Выводы к главе 5

- 1. Проведена оценка адекватности полученных моделей статических электромагнитных, тепловых и динамических характеристик. Погрешность расчета электромагнитной тяговой характеристики для контактора типа SMM-60DP DC220V (LS Industrial Systems), снятой экспериментально, не превышает 13,3 %. Проверена адекватность модели для максимальной температуры нагрева в толще обмотки ВБЭМ постоянного напряжения. Погрешность расчета максимальной температуры в сравнении с экспериментальными данными для ВБЭМ, исследованным Никитенко А.Г. [122] не превышает 8,4 %.
- 2. Проведена оценка работоспособности алгоритма расчета динамики включения на основе данных, предложенных Гараниным А.Ю. [55]. Динамические характеристики для тока в обмотке хорошо согласуются с полученными экспериментально. Погрешность расчета значения тока в обмотке

не превышает 11,1 %. Погрешность расчета времени срабатывания не превышает 2%.

- 3. Предложена усовершенствованная инженерная методика синтеза короткоходового ВБЭМ постоянного напряжения, позволяющая достоверно определить его размеры с учетом магнитного состояния ферромагнитных элементов конструкции, характеризующаяся неограниченностью в применении по величине условно-полезной работы, допустимого превышения температуры обмотки, режима работы.
- 4. Предложена методика синтеза ВБЭМ постоянного напряжения на основе обобщенных их характеристик, в которой минимизировано число произвольно выбираемых констант, позволяющая эффективно провести синтез ВБЭМ постоянного напряжения.

В ПРИЛОЖЕНИИ Г показано, что размеры синтезируемого ЭМ в большой степени зависят от условий технологического процесса производства, характеристик источника питания, условий окружающей его среды.

На основе разработанной методики предложены алгоритмы методик синтеза с учетом критерия оптимальности на минимальную потребляемую мощности и на заданную тяговую характеристику.

5. С успехом проведены оптимизация МС приводного ВБЭМ серийного реле времени РВ-100 и исследование ДХ для максимального электромагнитного расцепителя автоматического модульного выключателя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- 1. На основе совместного применения методов теории подобия, планирования эксперимента и метода конечных элементов, реализованного в программной среде FEMM получены:
- полиномиальные модели потокосцепления, магнитодвижущей силы, электромагнитной силы для одно и двухобмоточной МС ВБЭМ для разных исполнений катушек: с аксиально и коаксиально расположенными обмотками; математические выражения для максимальной усредненной по поперечному сечению магнитной индукции, устанавливающей границу линейности MC. позволяет единообразно исследованных что описать статические электромагнитные характеристики линейных и нелинейных втяжных броневых магнитных систем;
- полиномиальные модели максимальной, среднеобъемной, среднеповерхностной температуры в установившемся режиме нагрева обмотки для одно и двухобмоточного ВБЭМ;
- полиномиальные модели динамических параметров приводных электромагнитов постоянного напряжения с втяжными якорями и плоскими полюсами с учетом влияния нелинейности ферромагнитных материалов МС и вихревых токов на основе предлагаемого алгоритма расчета динамики.
- 2. Форма представления полученных математических моделей, непосредственно выражающая функциональную связь между входными и выходными параметрами и характеристиками, удобна для применения в методиках синтеза, в том числе ресурсо- и энергосберегающих приводных электромагнитов коммутационных аппаратов, средств автоматики и управления при различных схемах соединения пусковой и удерживающей обмоток. Они описывают необходимые параметры и характеристики ВБЭМ в критериальной (безразмерной) форме и применимы в расчетах безотносительно геометрических размеров электромагнита, учитывают тепловое состояние обмотки, не требуют многократного выполнения громоздких расчетов магнитного поля МС, что

существенно сокращает затраты времени при параметрическом синтезе оптимальных приводных электромагнитов.

- 3. Предложен алгоритм и методика расчета динамики включения ВБЭМ постоянного напряжения на основе решения уравнения электрической цепи обмотки с учетом вихревых токов методом Эйлера. Характеристики ВБЭМ на каждом шаге рассчитываются методом конечных элементов в программной среде FEMM.
- 4. Предложена усовершенствованная инженерная методика синтеза ВБЭМ постоянного напряжения с плоским стопом, позволяющая учесть магнитное сопротивление ферромагнитных элементов МС и с достаточной для практики точностью определить ее размеры.
- 5. Предложена методика проектного расчета однообмоточного ВБЭМ на базе обобщенных его статических электромагнитных характеристик и установившихся тепловых параметров, минимизирующая количество произвольно выбираемых коэффициентов, на основе которой предложены методики синтеза с учетом критериев оптимальности.
- 6. С успехом проведены оптимизация магнитной системы серийного реле времени PB-100 и исследование динамических характеристик для максимального электромагнитного расцепителя автоматического модульного выключателя.

В связи с дальнейшим развитием электротехники и появлением аппаратов с высокими энергетическими и массогабаритными показателями можно выделить перечень важных направлений в работе предприятия, занимающегося разработкой низковольтного электрооборудования:

- проработка, структуризация и объединение методологии применяемого математического обеспечения через разработку конкретных автоматизированных решений, предназначенных для эффективного проектирования в области низковольтной коммутационной аппаратуры и интеграция систем проектирования в единую информационную среду;
- разработка многокритериальных задач с учетом массогабаритных, стоимостных, надежностных, динамических и других показателей [48].

Необходимо, чтобы автоматизация принятия решений была разработана для всех жизненных этапов производства изделия, была объединена в единое информационное пространство. Это позволит в полной мере ощутить преимущества автоматизации процесса проектирования и будет способствовать организации динамично и гармонично развивающихся предприятий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Теория электрических аппаратов: Учебник для вузов / Г.Н. Александров, В.В. Борисов, Г.С. Каплан и др. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2000. 540 с.
- 2. Реле защиты / В.С.Алексеев, Г.П.Варганов, Б.И.Панфилов и др. М.: Энергия, 1976 464 с.
- 3. 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.
- 4. 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.
- 5. Архипова, Е.В. Безразмерные статические нагрузочные характеристики форсированного двухобмоточного броневого электромагнита постоянного напряжения с плоским стопом / Е.В. Архипова, Н.В. Руссова, Г.П. Свинцов // Труды академии электротехнических наук ЧР. 2010. №1. С. 56-58.
- 6. Архипова, Е.В. К выбору индукции в рабочем зазоре при проектировании броневых электромагнитов постоянного напряжения / Е.В. Архипова, Г.П. Свинцов // Труды академии электротехнических наук ЧР. 2009. № 1. С. 66-75.
- 7. 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.
- 8. Архипова, Е.В. К расчету проводимости выпучивания с боковых поверхностей цилиндрических полюсов броневых электромагнитов / Е.В.

- Архипова, Г.П. Свинцов // Труды академии электротехнических наук ЧР. 2009. № 1. С. 75-79.
- 9. К тепловому расчету двухобмоточных форсированных электромагнитов / Е.В. Архипова, А.В. Приказщиков, 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.
- 10. Архипова, Е.В. К усовершенствованной методике проектного расчета броневых электромагнитов постоянного напряжения / Е.В. Архипова, Г.П. Свинцов // Сборник конкурсных работ Всероссийского смотра-конкурса научнотехнического творчества студентов высших учебных заведений «Эврика-2008». Новочеркасск: Лик, 2008. С. 403-406.
- 11. Архипова, Е.В. Моделирование динамических характеристик броневого электромагнита постоянного напряжения / Е.В. Архипова // Сборник научных трудов молодых ученых и специалистов. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2013. С. 68-72.
- 12. Архипова, Е.В. Моделирование статических нагрузочных характеристик броневого электромагнита постоянного тока с плоским стопом / Е.В. Архипова, Г.П. Свинцов // Труды академии электротехнических наук ЧР. 2009. №2. С. 63-64.
- 13. Нагрузочные характеристики втяжных электромагнитов с круглыми полюсными наконечниками / Е.В. Архипова, И.П. Иванов, А.В. Приказщиков, Н.В. Руссова, Г.П. Свинцов // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2012. №4. С. 26-30.
- 14. 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.
- 15. 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.
- 16. Планирование вычислительного эксперимента при моделировании динамических параметров форсированного однообмоточного приводного электромагнита / Е.В. Архипова, И.П. Иванов, И.С. Павлов, 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.2. Ульяновск: УлГТУ, 2012. С. 392-394.
- 17. 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.
- 18. 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.
- 19. Синтез броневого 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.
- 20. 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.
- 21. 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, 29 сентября 4 октября 2008. С. 294.
- 22. 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.
- 23. Астахов, В.И. Математическое и компьютерное моделирование электромагнитного поля как основа для решения задач в электротехнике и электроэнергетике / В.И. Астахов // Изв. вузов. Электромеханика. 2004. № 6. С. 4-6.
- 24. Афанасьев, А.А. Новый метод расчета плоскопараллельных магнитных полей / А.А. Афанасьев, А.Н. Воробьев // Электричество. 1993. № 12. С. 32-39.
- 25. Афанасьев, А.А. Расчет магнитного поля в воздушном зазоре электрической машины // Электричество. 1985. № 6. С. 27-31.
- 26. Афанасьев, В.В. Обобщенные экспериментальные статические нагрузочные характеристики клапанных электромагнитов постоянного тока с круглыми полюсными наконечниками. Способ представления / В.В. Афанасьев, А.В. Приказщиков, Н.В. Руссова и др. // Электротехника. 2011. № 5. С. 39-45.
- 27. Динамические параметры срабатывания форсированных Ш-образных электромагнитов с внедряющимся якорем / И.З. Ахазов, В.Е. Мандравин, В.Г. Гришанов и др. // Электротехника. 1999. № 1. С. 11-15.
- 28. 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.
- 29. Байда, Е.И. Моделирование динамических характеристик электромагнитных механизмов постоянного тока с магнитной защелкой / Е.И. Байда // Електротехніка і електромеханіка. 2010. № 2. С. 3-5.

- 30. Байда, Е.И. Расчет переходных процессов в электромагнитном механизме на основании уравнений электромагнитного поля / Е.И. Байда // Електротехніка і електромеханіка. 2008. № 5. С. 39-43.
- 31. Байда, Е.И. Сравнительный анализ моделей конвективной теплоотдачи / Е.И. Байда // Електротехніка і електромеханіка. 2011. № 2. С. 14-17.
- 32. 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.
- 33. Батищев, Д.В. Проектирование электромагнитных приводов, работающих в условиях повышенной вибрации / Д.В. Батищев, А.В. Павленко // Электротехника. 2012. №. 8. С. 14-23.
- 34. Батищев, Д.И. Применение методов нелинейного программирования для определения оптимальных параметров электромагнитных реле / Д.И. Батищев // Автоматика и телемеханика. −1965. №1. Т26. С. 140-148.
- 35. 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.
- 36. 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.
- 37. Бодякшин, А.И. Метод расчета магнитных полей / А.И. Бодякшин. М.: Изд-во «Наука», 1968. 56 с.
- 38. Бранспиз, Ю.А. Аналитический расчет тягового усилия броневого электромагнита с конусным якорем / Ю. А. Бранспиз, А.Н. Пшеничный // Электротехника и электромеханика. 2005. № 2. С. 8-10.
- 39. Бранспиз, Ю.А. Учет магнитных свойств материала магнитопровода броневого электромагнита при расчете тяговой характеристики / Ю.А. Бранспиз,

- М.В. Загирняк, А.Н. Пшеничный // Электротехника и электромеханика. 2006. № 1. С. 17-20.
- 40. Буль, Б.К. Основы теории и расчета магнитных цепей. / Б.К. Буль. М.-Л.: Энергия, 1964. 464 с.
- 41. Буль, Б.К. Основы теории электрических аппаратов / Б.К. Буль, Г.В. Буткевич, А.Г. Годжелло и др. М.: Высш. шк., 1970. 600 с.
- 42. Буль Б.К. Электромеханические аппараты автоматики / Б.К. Буль, О.Б. Буль, В.А. Азанов, В.Н. Шоффа. М.: Высш. шк., 1988. 303 с.
- 43. 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.
- 44. Буль, О.Б. Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов. Программа ANSYS / О.Б. Буль. М.: Изд. центр «Академия», 2006. 288 с.
- 45. Буль, О.Б. Компьютерные программы расчета и анализа магнитных систем / О.Б. Буль // Электротехника. 2006. № 12. С. 50-55.
- 46. Буль, О.Б. Расчет параметров процесса включения электромагнита постоянного тока / О.Б. Буль // Электричество. 2001. № 4. С. 56-60.
- 47. Буль, О.Б. Сравнение инженерных методов расчета магнитных цепей и полей электромагнитов / О.Б. Буль // Электротехника. 2007. № 7. С. 42а-48.
- 48. Бут, Д.А. Электромеханика сегодня и завтра / Д.А. Бут // Электричество. 1995. № 1. С. 2-10.
- 49. Буткевич, Г.В. Задачник по электрическим аппаратам / Г.В. Буткевич, В.Г. Дегтярь, А.Г. Сливинская // М.: Высш.шк., 1987. 231 с.
- 50. Веников, В.А. Теория подобия и моделирование / В.А. Веников. М.: Высш. шк., 1976. 479 с.
- 51. Витенберг, М.И. Расчет электромагнитных реле / М.И. Виттенберг. Л.: «Энергия», 1975. 416 с.
- 52. Вознесенский, А.С. Компьютерные методы в научных исследованиях / А.С. Вознесенский. М.:МГГУ, 2011. 107 с.

- 53. 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.
- 54. Ганджа, С.А. Особенности построения системы автоматизированного проектирования вентильных машин с аксиальным зазором / С.А. Ганджа // Вестник ЮУрГУ. 2007. № 20. С. 19-23.
- 55. Гаранин, А.Ю. Методика расчета динамических характеристик втяжного электромагнита постоянного тока / А.Ю. Гаранин // Электротехника. 2001. N 11. C. 48-52.
- 56. Гаранин, А.Ю. Расчет втяжного электромагнита постоянного тока /А.Ю. Гаранин // Электротехника. 2000. № 10. С. 54-58.
- 57. Геча, В.Я. Определение тягового усилия и динамических характеристик цилиндрического электромагнита с различной формой штока / В.Я. Геча, А.Ю. Мильшин // Электротехнические комплексы и системы управления. $2013. \mathbb{N} \ 1. \mathbb{C}. \ 2-7.$
- 58. Глухов, В.П. Применение теории подобия и физического моделирования для анализа и расчета электрических цепей со сталью / В.П. Глухов // Электричество. $1967. N_{\odot} 2. C. 49-54.$
- 59. Глухов, В.П. Условия подобия процессов включения электромагнитов / В.П. Глухов, О.А. Шаповалов // Изв. АН Лат. ССР. Сер. физических и технических наук. 1966. № 5.
- 60. Переходные процессы в электрических машинах и аппаратах и вопросы их проектирования: Учеб. пособие для вузов / О.Д. Гольдберг, О.Б. Буль, И.С. Свириденко и др. Под ред. Гольдберга О.Д. М.: Высш. шк., 2001. 512 с.
- 61. Гордон, А.В. Электромагниты постоянного тока / А.В. Гордон, А.Г. Сливинская. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1960. 447 с.
- 62. Расчет броневого электромагнита переменного тока с массивным магнитопроводом / В.Н. Гревцов, Е.А. Дроздова, И.И. Пеккер и др. // Изв. вузов. Электромеханика. 1992. № 2. С.78-83.

- 63. Гринченков, В.П. Исследование динамических процессов в электромагнитах подвеса / В.П. Гринченков, А.Г. Никитенко, А.В. Павленко // Изв. вузов. Электромеханика. 1982. №12. С.1432-1437.
- 64. Математическое моделирование переходных характеристик электромагнитов с массивными магнитопроводами / В.П. Гринченков, А.Г. Никитенко, В.Я. Палий и др. // Изв. вузов. Электромеханика. 1977. №. 2. С. 50-54.
- 65. Гурницкий, В.Н. К теории приближенного подобия электромагнитов постоянного тока / В.Н. Гурницкий // Электричество. 1968. № 12. С. 34-38.
- 66. Демирчян, К.С. Машинные расчеты электромагнитных полей / К.С. Демирчян, В.П. Чечурин. М.: Высш. шк., 1968. 240 с.
- 67. Ершов, Ю.К. Расчет переходных процессов в нелинейной магнитной цепи с массивными проводящими участками магнитопровода / Ю.К. Ершов // Изв. вузов. Электромеханика. 2008. № 6. С. 67-74.
- 68. Залесский, А.М. Тепловые расчеты электрических аппаратов / А.М. Залесский, Г.А. Кукеков. Л.: Энергия, 1967. 379 с.
- 69. Зекцер, Д.М. Переходные процессы в реле с несколькими короткозамкнутыми контурами / Д.М. Зекцер // Электричество. 1992. №. 2. С. 15-18.
- 70. Иванов, И.П. Оценка путей снижения энергопотребления электромеханических аппаратов коммутации и защиты / И.П. Иванов, А.В. Приказщиков, Г.П. Свинцов // Энергосбережение в промышленности: материалы Всерос. науч.-практ. конф. Чебоксары, 2012. С. 7-9.
- 71. Иванов-Смоленский, А.В. Применение конечно-элементных моделей при учебном проектировании синхронных машин / А.В. Иванов-Смоленский, В.И. Гончаров, Тейн Наинг Тун // Изв. вузов. Электромеханика. 2010. № 2. С. 71-76.
- 72. 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.

- 73. Ивоботенко, Б.А. Планирование эксперимента в электромеханике / Б.А. Ивоботенко, Н.Ф. Ильинский, И.П. Копылов. М.: Энергия, 1975. 184 с.
- 74. Модели электромеханических устройств и систем в задачах синтеза / Н.Ф. Ильинский, Б.А. Ивоботенко, И.П. Копылов и др. // Электричество. 1973. $N \ge 3$. С. 36-40.
- 75. Ильинский, Н.Ф. Теория подобия в электромеханике (обзор) / Н.Ф. Ильинский, М.А. Попов // Электричество. 1988. № 5. С. 1-7.
- 76. Кадыков, В.К. Обобщенное представление исходных данных и результатов синтеза электромагнитов постоянного напряжения / В.К. Кадыков, Н.В. Руссова, Г. П. Свинцов // Електротехніка і електромеханіка. 2002. № 3. С. 45-46.
- 77. В.К. Калыков. Обобщенные экспериментальные зависимости потокораспределения, потокосцепления и магнитодвижущей силы в клапанных системах постоянного электромагнитных тока круглыми полюсными наконечниками / В.К. Кадыков, Н.В. Руссова, Г.П. Свинцов и др. // Электротехника. – 2007. – № 4. – С. 41-47.
- 78. Казаков, Л.А. Электромагнитные устройства РЭА: Справочник / Л.А. Казаков. М.: Радио и связь, 1991. 352 с.
- 79. Карасев, В.А. Влияние вихревых токов на переходные процессы в электромагнитах / В.А. Карасев // Электричество. 1963. № 9. С. 33-37.
- 80. Карасев, В.А. Расчет динамических режимов электромагнитов / В.А. Карасев // Электричество. 1964. № 1. С. 39-44.
- 81. Метод расчета переходных процессов в электрических цепях с машинами постоянного тока / С.И. Карибов, В.Д. Тулупов, А.П. Марченков и др. // Электротехника. 1980. N 3. С. 23-27.
- 82. Квартин, М.И. Электромеханические и магнитные устройства автоматики: Учебник для учащихся электроприборостроительных техникумов / М.И.Квартин. М.: Высшая школа, 1979. 352 с.

- 83. Клименко, Б.В. Интегрирование уравнений динамики электромагнитов при наличии вторичных контуров / Б.В. Клименко // Электричество. 1984. № 11. С. 52-55.
- 84. 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.
- 85. Клименко, Б.В. Применение теории подобия для определения магнитных проводимостей и их производных / Б.В. Клименко, М.А. Любчик // Изв. вузов. Электромеханика. 1968. № 9. С. 949-953.
- 86. Клименко, Б.В. Форсированные электромагнитные системы / Б.В. Клименко. М.: Энергоатомиздат, 1989. 160 с.
- 87. Ковалев, О.Ф. Проектирование электромагнитных механизмов с минимальной потребляемой мощностью / О.Ф. Ковалев, В.П. Гринченков, Э. Калленбах // Изв. вузов. Электромеханика. 2001. № 3. С. 47-49.
- 88. Ковалев, О.Ф. Расчет нестационарного температурного поля электромагнитных захватов методом конечных элементов / О.Ф. Ковалев, Б.Н. Лобов, Е.Н. Краснов // Изв. вузов. Электромеханика. 1995. № 1-2. С. 24-29.
- 89. Коц, Б.Э. Расчет насыщенных магнитных цепей электромагнитов постоянного тока / Б.Э. Коц // Электричество. 1968. № 4. С. 48-50.
- 90. Коц, Б.Э. Электромагниты постоянного тока с форсировкой / Б.Э. Коц. М.: Энергия, 1973. 80 с.
- 91. Курбатов, П.А. Численный расчет электромагнитных полей / П.А. Курбатов, С.А. Аринчин. М.: Энергоатомиздат, 1984. 167 с.
- 92. Лобов, Б.Н. О влиянии геометрических соотношений на время трогания электромагнита переменного тока / Б.Н. Лобов, Г.П. Мацупин, В.Я. Палий // Изв. вузов. Электромеханика. 1976. \mathbb{N} 1. С. 46-53.
- 93. Лобов, Б.Н. Оптимизация электромагнитов переменного тока с втяжным якорем и стопом / Б.Н. Лобов // Изв. вузов. Электромеханика. 2002. Notorize 2. C. 23-27.

- 94. Лобов, Б.Н. Расчет стационарного температурного поля электромагнита Π -образного типа постоянного тока / Б.Н. Лобов // Изв. вузов. Электромеханика. 1979. \mathbb{N} 6. C. 40-46.
- 95. Лысов, Н.Е. Расчет электромагнитных механизмов / Н.Е. Лысов. М.: Оборонгиз, 1949. 366 с.
- 96. Любчик, М.А. Динамическая эффективность электромагнитных механизмов / М.А. Любчик // Электричество. 1972. № 5. С. 48-54.
- 97. Любчик, М.А. Определение потокосцепления силовых электромагнитов / М.А. Любчик, Б.В. Клименко // Электротехника. 1971. № 9. 57-58.
- 98. Любчик М.А. Оптимальное проектирование силовых электромагнитных механизмов / М.А. Любчик. М.: Энергия, 1974. 392 с.
- 99. 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.
- 100. Любчик, М.А. Силовые электромагниты аппаратов и устройств автоматики постоянного тока (Расчет и элементы проектирования) / М.А. Любчик. М.: Энергия, 1968. 158 с.
- 101. Любчик, М.А. Электромагнитный привод устройств импульсного действия / М.А. Любчик, Б.В. Клименко // Изв. вузов. Электромеханика. 1967. № 2. С. 215-218.
- 102. Макарычев, Ю.М. Вихревые токи в магнитных системах топливных форсунок / Ю.М. Макарычев, С.Ю. Рыжов // Электричество. 1996. № 12. С. 58-63.
- 103. Макарычев, Ю.М. Проектирование электромагнитов: этапы, методы, модели / Ю.М. Макарычев, С.Ю. Рыжов, Т.П. Жидарева // Электричество. 1994. N 2. С. 46-51.
- 104. 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.
- 105. Михлин, С.Г. Приближенные методы решения дифференциальных и интегральных уравнений / С.Г. Михлин, Х.Л. Смолицкий. М.: Наука
- 106. Могилевский, Г.В. Применение теории подобия к проектированию электромагнитов / Г.В. Могилевский // Вестник электропромышленности. 1959. N_2 4. С. 34-38.
- 107. 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.
- 108. Наслян, Т.А. Расчет тепловых полей в электрических машинах и аппаратах методом исключения / Т.А. Наслян, Т.М. Нэмени // Электротехника. 1986. № 11. C. 31-33.
- 109. 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.
- 110. Некрасов, С.А. Интервальные и двусторонние методы расчета магнитных систем / С.А. Некрасов // Электричество. 2013. № 8. С. 55-59.
- 111. 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.
- 112. 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.
- 113. Никитенко, А.Г. К расчету процесса включения электромагнита, имеющего насыщенную магнитную систему / А.Г. Никитенко // Изв. вузов. Электромеханика. 1963. № 11. С. 1250-1262.

- 114. Никитенко, А.Г. О выборе оптимальной тяговой динамической характеристики электромагнита постоянного тока / А.Г. Никитенко // Изв. вузов. Электромеханика. 1974. \mathbb{N} 10. С. 1077-1081.
- 115. Никитенко, А.Г. О выборе расчетных значений индукции при проектировании электромагнитов постоянного тока / А.Г. Никитенко // Изв. вузов. Электромеханика. 1974. № 3. С. 278-284.
- 116. О проектировании электромагнитов с заданными динамическими свойствами / А.Г. Никитенко, Ю.А. Бахвалов, Ю.А. Никитенко, В.Г. Щербаков // Электротехника. 1998. № 9. С. 53-59.
- 117. Никитенко, А.Г. Об одном подходе к проектированию электромагнитов по заданным динамическим характеристикам / А.Г. Никитенко, В.П. Гринченков, А.Г. Старостин, В.В. Медведев // Изв. вузов. Электромеханика. 1999. № 4. С. 19-21.
- 118. Никитенко, А.Г. Проблемы разработки системы автоматизированного проектирования электрических аппаратов / А.Г. Никитенко // Изв. вузов. Электромеханика. 1983. \mathbb{N}_2 3. С. 73-79.
- 119. 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.
- 120. Никитенко, А.Г. Проектирование оптимальных электромагнитных механизмов / А.Г. Никитенко. М.: Энергия, 1974. 136 с.
- 121. Никитенко, А.Г. Проектирование электромагнита с заданной тяговой характеристикой / А.Г. Никитенко, Б.Н. Лобов // Изв. вузов. Электромеханика. 1981. №. 8. С. 899-903
- 122. Никитенко, А.Г. Расчет температурных полей электрических аппаратов методом конечных элементов / А.Г. Никитенко, В.П. Гринченков, О.Ф. Ковалев // Изв. вузов. Электромеханика. 1984. № 5. С. 86-92.
- 123. Никитенко, А.Г. Расчет стационарного температурного поля электромагнитного привода методом конечных элементов / А.Г. Никитенко, О.Ф.

- Ковалев, Б.Н. Лобов, С.Х. Щучинский // Изв. вузов. Электромеханика. 1993. № 4. С. 69-77.
- 124. Никитенко, А.Г. Расчеты электромагнитных механизмов на вычислительных машинах / А.Г. Никитенко, И.И. Пеккер. М.: Энергоатомиздат, 1985. 275 с.
- 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 // Изв. вузов. Электромеханика. 1988. № 6. С. 99-104.
- 127. 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 // Изв. вузов. Электромеханика. 1998. № 1. С.67-70.
- 129. Павленко, А.В. Моделирование динамики срабатывания нейтрального быстродействующего электромагнита / А.В. Павленко // Изв. вузов. Электромеханика. 1998. № 2-3. С. 40-42.
- 130. 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.
- 131. Проектирование быстродействующих электромагнитов с заданными динамическими параметрами / А.В. Павленко, В.П. Гринченков, Н.П. Беляев, Э. Калленбах // Изв. вузов. Электромеханика. 2002. № 4. С. 76-80.

- 132. Павленко, А.В. Расчет статических режимов поляризованного электромагнита быстродействующего автоматического выключателя / А.В. Павленко // Изв. вузов. Электромеханика. 1983. №. 5. С. 79-85.
- 133. Пеккер, И.И. Исследование динамики электромагнитного вентиля трубопроводной арматуры / И.И. Пеккер, С.Х. Щучинский // Изв. вузов. Электромеханика. 1971. № 7. С. 775-778.
- 134. Пеккер, И.И. Определение размеров броневых электромагнитов по заданным начальным параметрам с помощью безразмерных характеристик / И.И. Пеккер // Изв. вузов. Электромеханика. 1959. № 5. С. 44-52.
- 135. Пеккер, И.И. Опытные данные для выбора размеров броневых электромагнитов постоянного тока / И.И. Пеккер // Изв. вузов. Электромеханика. 1961. № 12. С. 56-65.
- 136. Пеккер, И.И. Расчет броневых электромагнитов на нагрев в длительном режиме работы с помощью ЭЦВМ / И.И. Пеккер, М.Е. Синельникова // Изв. вузов. Электромеханика. 1966. № 1. С. 80-86.
- 137. Пеккер И.И. Расчет силы тяги броневых электромагнитов с плоским торцом сердечника / И.И. Пеккер // Вестник электропромышленности. 1962. №5. С. 69-71.
- 138. Пеккер, И.И. Физическое моделирование электромагнитных механизмов / И.И. Пеккер. М.: Энергия, 1969. 64 с.
- 139. Пик Р., Уэйгар Г. Расчет коммутационных реле / Пер. с англ.; под ред. М.И. Виттенберга и А.В. Гордона. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1961. 584 с.
- 140. Попов, П.Г. Анализ электромагнитных устройств с индуктивными связями методом конечных элементов / П.Г. Попов, Ю.А. Шумилов // Электричество. 1978. № 11. С. 43-48.
- 141. 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.

- 142. Руссова, Н.В. Синтез оптимальных симметричных П-образных двухкатушечных электромагнитов с цилиндрическими сердечниками / Н.В. Руссова // Изв. вузов. Электромеханика. 2002. № 3. С. 30–34.
- 143. 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.
- 144. Рымша, В.В. Расчет двухмерного стационарного теплового поля вентильно-реактивного двигателя методом конечных элементов / В.В. Рымша, 3.П. Процына, П.А. Кравченко // Электротехника и электромеханика. 2010. № 4. С. 26-28.
- 145. 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.
- 146. Сахаров, П.В. Проектирование электрических аппаратов / П.В. Сахаров. М. : Энергия, 1971. 560 с.
- 147. Свинцов, Г.П. Динамические характеристики срабатывания Шобразных электромагнитов переменного напряжения / Г.П. Свинцов // Электротехника. 1998. № 1. С. 31-35.
- 148. Исследование и оптимизация быстродействующих контакторов постоянного тока повышенной механической устойчивости: отчет о НИР / Свинцов Г.П., Зайцев Ю.М., Николаев Н.Н. и др. Чебоксары: Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, 2013. 328 с.
- 149. Свинцов, Г.П. К динамике приводных П-образных электромагнитов переменного тока / Г.П. Свинцов, Ю.В. Софронов // Изв. вузов. Электромеханика. -1985. № 5. C. 72-78.
- 150. Свинцов, Г.П. О критериях подобия динамических процессов при включении приводного электромагнита / Г.П. Свинцов, Ю.В. Софронов // Изв. вузов Электромеханика. 1983. № 6. С. 73-77.

- 151. Разработка и исследование ресурсо- и энергосберегающих приводов электрических аппаратов: отчет о НИР. Математическое моделирование и исследование электромагнитных, тепловых характеристик приводов для электрических аппаратов / Свинцов Г.П., Руссова Н.В, Архипова Е.В. и др. Чебоксары: Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, 2012. 86 с.
- 152. Разработка и исследование ресурсо- и энергосберегающих приводов электрических аппаратов: отчет о НИР. Моделирование динамических параметров приводных электромагнитов / Свинцов Г.П., Руссова Н.В, Архипова Е.В. и др. Чебоксары: Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, 2013. 74 с.
- 153. Свинцов, Г.П. Расчет магнитных проводимостей рабочих воздушных зазоров электромагнитов: Метод. указания к курсовым, дипломным работам и проектам / Г.П. Свинцов. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 1990. 32 с.
- 154. 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.
- 155. Свинцов, Г.П. Электромагнитные контакторы и пускатели / Г.П. Свинцов: Учеб. пособие. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 1998. 260 с.
- 156. Сливинская, А.Г. Исследование динамических тяговых характеристик электромагнитов постоянного тока / А.Г. Сливинская // Известия вузов. Электромеханика. 1965. №. 11. С. 1273-1279.
- 157. Сливинская, А.Г. Электромагниты и постоянные магниты / А.Г. Сливинская. М.: «Энергия», 1972. 248 с.
- 158. Смирнов, Ю.В. Обобщенные закономерности для оптимизации электромагнитных устройств малой мощности / Ю.В. Смирнов // Электричество. -1974. № 12. C. 54-60.

- 159. Соболев, С.Н. Расчет и конструирование низковольтной электрической аппаратуры. Учебник для техникумов / С.Н. Соболев. М.: «Высшая школа», 1972. 264 с.
- 160. Сотсков, Б.С. Основы расчета и проектирования электромеханических элементов автоматических и телемеханических устройств / Б.С. Сотсков. М.-Л.: Энергия, 1965. 576 с.
- 161. Тер-Акопов, А.К. Динамика быстродействующих электромагнитов / А.К. Тер-Акопов. М.-Л.: Изд-во «Энергия», 1965. 168 с.
- 162. Тихонов, Д.Ю. Комбинированный метод расчета нестационарных плоскопараллельных электромагнитных полей / Д.Ю. Тихонов, А.Н. Ткачёв, Й. Центнер // Изв. вузов. Электромеханика. 2002. № 4. С. 39-48.
- 163. Туровский, Я. Электромагнитные расчеты элементов электрических машин / Я. Туровский. М.: Энергоатомиздат, 1986. 200 с.
- 164. Чабан, В.И. Принципы построения цепных математических моделей электротехнических устройств / В.И. Чабан // Электричество. 1993. № 8. С. 64-66.
- 165. 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.
- 166. Учет вихревых токов при расчете динамических характеристик электромагнита постоянного тока / О.А. Шлегель, Б.М, Горшков, А.Ю. Гаранин и др. // Электротехника. 2003. № 2. С. 51-54.
- 167. Шоффа, В.Н. Проектный метод расчета электромагнитов постоянного тока клапанного типа / В.Н. Шоффа // Электротехника. 1968. № 5. С. 41-45.
- 168. Шоффа, В. Н. Методы расчета магнитных систем постоянного тока / В. Н. Шоффа. М.: МЭИ, 1998. 40 с.
- 169. Расчет трехмерных стационарных магнитных полей методом конечных элементов / Н.Г. Шульженко, М.Г. Пантелят, Е.К. Руденко и др. // Электротехника и электромеханика. 2009. № 5. С. 40-43.

- 170. Расчет стационарного температурного поля электромагнитного привода методом конечных элементов / С.Х. Щучинский, А.Г. Никитенко, О.Ф. Ковалев и др.// Изв. вузов. Электромеханика. 1993. № 4. С.69-77.
- 171. Щучинский, С.Х. Электромагнитные приводы исполнительных механизмов / С.Х. Щучинский. М.: Энергоатомиздат, 1984. 152 с.
- 172. 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.
- 173. Яссе, Э. Электромагниты / Э. Яссе. М. Л.: Государственное энергетическое издательство, 1934. 194 с.
- 174. ANSYS [Электронный ресурс] / Центр информационной поддержки клиентов продуктов ANSYS. Электрон. дан. Режим доступа: http://www.ansys.com/. Загл. с экрана. (Дата обращения: 01.02.2014).
- 175. Birli, O. Grobdimensionerung magnetisher antriebssysteme mit dem programmsystem SESAM / O. Birli, E. Kallenbach // Изв. вузов. Электромеханика. 2002. № 4. С. 7-14.
- 176. Christophe Geuzaine. Gmsh a 3D finite element mesh generator with integrated CAD and post-processing facilities. GetDP a rather general finite element solver using mixed finite elements. Режим доступа: www.geuz.org. Загл. с экрана. (Дата обращения: 25.04.2014).
- 177. Comsol [Электронный ресурс] / Центр поддержки клиентов продуктов COMSOL. Электрон. дан. Режим доступа: http://www.comsol.com/. Загл. с экрана. (Дата обращения: 01.02.2014).
- 178. Cosmos/M. A complete finite element analysis system. User's Guide / Structural research and analysis Corp. Режим доступа: http://www.stresscalc.ru/cosmos/UsersGuide.pdf. Загл. с экрана. (Дата обращения: 12.04.2014).

- 179. Elcut / Центр информационной поддержки клиентов продуктов Elcut. Электрон. дан. Режим доступа: http://elcut.ru/. Загл. с экрана. (Дата обращения: 01.02.2014).
- 180. QuickField / Центр информационной поддержки клиентов продуктов QuickField. Электрон. дан. Режим доступа: http://www.quickfield.com/. Загл. с экрана. (Дата обращения: 01.02.2014).
- 181. Lambertson, C. Designing New Magnet Technology A Multiphysics Challenge / Cathleen Lambertson // Magnetics. Business and Technology: электронный научный журнал. 2012. Режим доступа: http://www.magneticsmagazine.com/main/channels/software-design/designing-new-magnet-technology-a-multiphysics-challenge/. (Дата обращения: 15.02.2013).
- 182. Mandache, L. Modeling of Nonlinear Ferromagnetic Cores / Lucian Mandache, Dumitru Topan, Al-Haddad Kamal // Rev. Roum. Sci. Techn. Électrotechn. et Énerg. 2008. No. 53(4). P. 403-412.
- 183. Meeker, D. Finite Element Method Magnetics. Version 4.2. User's Manual. / David Meeker. Режим доступа: http://www.femm.info/Archives/doc/manual42.pdf. Загл. с экрана. (Дата обращения: 25.04.2014).
- 184. Pusz, A. The modeling of thermal conductivity measurements using "FEMM" application [Электронный ресурс] / A. Pusz, Z. Trojnacki // Archives of Materials Science and Engineering: international scientific journal. 2012. V. 53. I. 1. P. 53-60. Режим доступа: http://www.archivesmse.org/vol53_1/5315.pdf. (Дата обращения: 01.06.2012).
- 185. Schmidt, E. Steady-state and transient analyses of a plunger core reactor with parallel windings / Erich Schmidt // Forschungsprojekte am Vienna Scientific Claster. 2006. Режим доступа: http://www.zid.tuwien.ac.at/projekte/2006/06-372-1.pdf. (Дата обращения: 15.02.2014).
- 186. Sirbu, I.-G. A new model for AC plunger-type magnets in steady-state regime / Ioana-Gabriela Sirbu, Mihai Iordache, Lucian Mandache // Annals of the University of Craiova, Electrical Engineering series. 2010. No. 34. C. 19-24.

Патенты

- 187. Пат. на полезную модель 136632 РФ, МПК Н01Н47/00. Схема управления электромагнитным коммутационным аппаратом / Е.В. Архипова, М.М. Афанасьева, Е.Г. Васильев, И.П. Иванов, О.А. Петров, А.В. Приказщиков, Г.П. Свинцов, Ю.М. Федоров // Бюл. «Изобретения. Полезные модели». 2014. № 1.
- 188. Пат. на полезную модель 142947 РФ, МПК Н01Н51/00. Электромагнитный коммутационный аппарат / Е.В. Архипова, Е.Г. Васильев, И.П. Иванов, О.А. Петров, А.В. Приказщиков, Ю.М. Федоров, Е.В. Сагарадзе // Бюл. «Изобретения. Полезные модели». 2014. № 19.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Дополнительные материалы по моделированию электромагнитных характеристик втяжного броневого электромагнита

Таблица А.1 – Матрица эксперимента моделирования электромагнитных характеристик с кодированными и истинными значениями факторов для однообмоточной МС ВБЭМ

	-	. 1									x_6		
No		;1 MM		\$2 MM		c ₃ MM		ν ₄	X			.6 , Тл	
1	-1	34,28	-1	, MM 4,08	-1	5,428	-1	MM 8,33	-1	мм 0,39	-1	1,064	
2	1	65,72	-1	7,82	-1	5,428	-1	8,33	-1	0,39	-1	1,064	
3	-1	34,28	1	13,06	-1	5,428	-1	8,33	-1	0,39	-1	1,064	
4	1	65,72	1	25,04	-1	5,428	-1	8,33	-1	0,39	-1	1,064	
5	-1	34,28	-1	4,08	1	8,572	-1	8,33	-1	0,39	-1	1,064	
6	1	65,72	-1	7,82	1	8,572	-1	8,33	-1	0,39	-1	1,064	
7	-1	34,28	1	13,06	1	8,572	-1	8,33	-1	0,39	-1	1,064	
8	1	65,72	1	25,04	1	8,572	-1	8,33	-1	0,39	-1	1,064	
9	-1	34,28	-1	4,08	-1	5,428	1	15,67	-1	0,39	-1	1,064	
10	1	65,72	-1	7,82	-1	5,428	1	15,67	-1	0,39	-1	1,064	
11	-1	34,28	1	13,06	-1	5,428	1	15,67	-1	0,39	-1	1,064	
12	1	65,72	1	25,04	-1	5,428	1	15,67	-1	0,39	-1	1,064	
13	-1	34,28	-1	4,08	1	8,572	1	15,67	-1	0,39	-1	1,064	
14	1	65,72	-1	7,82	1	8,572	1	15,67	-1	0,39	-1	1,064	
15	-1	34,28	1	13,06	1	8,572	1	15,67	-1	0,39	-1	1,064	
16	1	65,72	1	25,04	1	8,572	1	15,67	-1	0,39	-1	1,064	
17	-1	34,28	-1	4,08	-1	5,428	-1	8,33	1	0,81	-1	1,064	
18	1	65,72	-1	7,82	-1	5,428	-1	8,33	1	0,81	-1	1,064	
19	-1	34,28	1	13,06	-1	5,428	-1	8,33	1	0,81	-1	1,064	
20	1	65,72	1	25,04	-1	5,428	-1	8,33	1	0,81	-1	1,064	
21	-1	34,28	-1	4,08	1	8,572	-1	8,33	1	0,81	-1	1,064	
22	1	65,72	-1	7,82	1	8,572	-1	8,33	1	0,81	-1	1,064	
23	-1	34,28	1	13,06	1	8,572	-1	8,33	1	0,81	-1	1,064	
24	1	65,72	1	25,04	1	8,572	-1	8,33	1	0,81	-1	1,064	
25	-1	34,28	-1	4,08	-1	5,428	1	15,67	1	0,81	-1	1,064	
26	1	65,72	-1	7,82	-1	5,428	1	15,67	1	0,81	-1	1,064	
27	-1	34,28	1	13,06	-1	5,428	1	15,67	1	0,81	-1	1,064	
28	1	65,72	1	25,04	-1	5,428	1	15,67	1	0,81	-1	1,064	
29	-1	34,28	-1	4,08	1	8,572	1	15,67	1	0,81	-1	1,064	
30	1	65,72	-1	7,82	1	8,572	1	15,67	1	0,81	-1	1,064	
31	-1	34,28	1	13,06	1	8,572	1	15,67	1	0,81	-1	1,064	
32	1	65,72	1	25,04	1	8,572	1	15,67	1	0,81	-1	1,064	
33	-1	34,28	-1	4,08	-1	5,428	-1	8,33	-1	0,39	1	1,536	
34	1	65,72	-1	7,82	-1	5,428	-1	8,33	-1	0,39	1	1,536	
35	-1	34,28	1	13,06	-1	5,428	-1	8,33	-1	0,39	1	1,536	

	x_1		x_2		x_3		,	\mathfrak{c}_4		C ₅		\mathfrak{c}_6
No		MM		, MM		MM		MM		мм		, <i>Т</i> л
36	1	65,72	1	25,04	-1	5,428	-1	8,33	-1	0,39	1	1,536
37	-1	34,28	-1	4,08	1	8,572	-1	8,33	-1	0,39	1	1,536
38	1	65,72	-1	7,82	1	8,572	-1	8,33	-1	0,39	1	1,536
39	-1	34,28	1	13,06	1	8,572	-1	8,33	-1	0,39	1	1,536
40	1	65,72	1	25,04	1	8,572	-1	8,33	-1	0,39	1	1,536
41	-1	34,28	-1	4,08	-1	5,428	1	15,67	-1	0,39	1	1,536
42	1	65,72	-1	7,82	-1	5,428	1	15,67	-1	0,39	1	1,536
43	-1	34,28	1	13,06	-1	5,428	1	15,67	-1	0,39	1	1,536
44	1	65,72	1	25,04	-1	5,428	1	15,67	-1	0,39	1	1,536
45	-1	34,28	-1	4,08	1	8,572	1	15,67	-1	0,39	1	1,536
46	1	65,72	-1	7,82	1	8,572	1	15,67	-1	0,39	1	1,536
47	-1	34,28	1	13,06	1	8,572	1	15,67	-1	0,39	1	1,536
48	1	65,72	1	25,04	1	8,572	1	15,67	-1	0,39	1	1,536
49	-1	34,28	-1	4,08	-1	5,428	-1	8,33	1	0,81	1	1,536
50	1	65,72	-1	7,82	-1	5,428	-1	8,33	1	0,81	1	1,536
51	-1	34,28	1	13,06	-1	5,428	-1	8,33	1	0,81	1	1,536
52	1	65,72	1	25,04	-1	5,428	-1	8,33	1	0,81	1	1,536
53	-1	34,28	-1	4,08	1	8,572	-1	8,33	1	0,81	1	1,536
54	1	65,72	-1	7,82	1	8,572	-1	8,33	1	0,81	1	1,536
55	-1	34,28	1	13,06	1	8,572	-1	8,33	1	0,81	1	1,536
56	1	65,72	1	25,04	1	8,572	-1	8,33	1	0,81	1	1,536
57	-1	34,28	-1	4,08	-1	5,428	1	15,67	1	0,81	1	1,536
58	1	65,72	-1	7,82	-1	5,428	1	15,67	1	0,81	1	1,536
59	-1	34,28	1	13,06	-1	5,428	1	15,67	1	0,81	1	1,536
60	1	65,72	1	25,04	-1	5,428	1	15,67	1	0,81	1	1,536
61	-1	34,28	-1	4,08	1	8,572	1	15,67	1	0,81	1	1,536
62	1	65,72	-1	7,82	1	8,572	1	15,67	1	0,81	1	1,536
63	-1	34,28	1	13,06	1	8,572	1	15,67	1	0,81	1	1,536
64	1.761	65,72	1	25,04	1	8,572	1	15,67	1	0,81	1	1,536
65	-1,761	22,32	0	5,58	0	7	0	12	0	0,6	0	1,3
66	1,761	77,68	1761	19,42	0	7	0	12	0	0,6	0	1,3
67	0	50	-1,761	0,95	0	7	0	12	0	0,6	0	1,3
68	0	50	1,761	24,05	1.761	4 222	0	12	0	0,6	0	1,3
69	0	50	0	12,50	-1,761	4,232	0	12	0	0,6	0	1,3
70	0	50	0	12,50 12,50	1,761	9,76			0	0,6	0	1,3
71	0	50	0		0	7	-1,761 1,761	5,544	0	0,6	0	1,3
72		50		12,50		7	1,761	18,456	-1,761	0,6		1,3
73	0	50	0	12,50	0	7	0	12		0,231	0	1,3
74		50	0	12,50	0	7	0		1,761	0,969	_	1,3 0,8844
75	0	50		12,50		7		12	0	0,6	-1,761 1,761	
76	0		0	12,50	0	7	0	12	0	0,6	1,761	1,7156
77	0	50	0	12,50	0	/	0	12	0	0,6	0	1,3

Таблица А.2 – Матрица эксперимента моделирования электромагнитных характеристик с кодированными и истинными значениями факторов для двухобмоточной МС ВБЭМ с аксиальным и коаксиальным расположением обмоток

			ı												
		x_1		x_2			<i>;</i> 3		x_4		Ĉ5		\mathfrak{r}_6		x_7
No	H_0	, MM		(для ак		$H_{\rm cr}$, MM	$H_{\rm B}$, MM	A_0	MM	ν,	MM	$B_{\rm m}$, Тл
			A_{Π} (,	для коа	к-го),										
1	1	242	1	MM	2.24	1	4.1	1	<i>5</i> 4	1	0.2	1	0.20	1	1.064
1	-1	34,3	-1	13,4	3,24	-1	4,1	-1	5,4	-1	8,3	-1	0,39	-1	1,064
2	+1	65,7	-1	25,6	3,24	-1	7,8	-1	5,4	-1	8,3	-1	0,39	-1	1,064
3	-1	34,3	+1	27,8	6,72	-1	4,1	-1	5,4	-1	8,3	-1	0,39	-1	1,064
4	+1	65,7	+1	53,2	6,72	-1	7,8	-1	5,4	-1	8,3	-1	0,39	-1	1,064
5	-1	34,3	-1	13,4	3,24	+1	13,1	-1	5,4	-1	8,3	-1	0,39	-1	1,064
6	+1	65,7	-1	25,6	3,24	+1	25,0	-1	5,4	-1	8,3	-1	0,39	-1	1,064
7	-1	34,3	+1	27,8	6,72	+1	13,1	-1	5,4	-1	8,3	-1	0,39	-1	1,064
8	+1	65,7	+1	53,2	6,72	+1	25,0	-1	5,4	-1	8,3	-1	0,39	-1	1,064
9	-1	34,3	-1	13,4	3,24	-1	4,1	+1	8,6	-1	8,3	-1	0,39	-1	1,064
10	+1	65,7	-1	25,6	3,24	-1	7,8	+1	8,6	-1	8,3	-1	0,39	-1	1,064
11	-1	34,3	+1	27,8	6,72	-1	4,1	+1	8,6	-1	8,3	-1	0,39	-1	1,064
12	+1	65,7	+1	53,2	6,72	-1	7,8	+1	8,6	-1	8,3	-1	0,39	-1	1,064
13	-1	34,3	-1	13,4	3,24	+1	13,1	+1	8,6	-1	8,3	-1	0,39	-1	1,064
14	+1	65,7	-1	25,6	3,24	+1	25,0	+1	8,6	-1	8,3	-1	0,39	-1	1,064
15	-1	34,3	+1	27,8	6,72	+1	13,1	+1	8,6	-1	8,3	-1	0,39	-1	1,064
16	+1	65,7	+1	53,2	6,72	+1	25,0	+1	8,6	-1	8,3	-1	0,39	-1	1,064
17	-1	34,3	-1	13,4	6,12	-1	4,1	-1	5,4	+1	15,7	-1	0,39	-1	1,064
18	+1	65,7	-1	25,6	6,12	-1	7,8	-1	5,4	+1	15,7	-1	0,39	-1	1,064
19	-1	34,3	+1	27,8	12,7	-1	4,1	-1	5,4	+1	15,7	-1	0,39	-1	1,064
20	+1	65,7	+1	53,2	12,7	-1	7,8	-1	5,4	+1	15,7	-1	0,39	-1	1,064
21	-1	34,3	-1	13,4	6,12	+1	13,1	-1	5,4	+1	15,7	-1	0,39	-1	1,064
22	+1	65,7	-1	25,6	6,12	+1	25,0	-1	5,4	+1	15,7	-1	0,39	-1	1,064
23	-1	34,3	+1	27,8	12,7	+1	13,1	-1	5,4	+1	15,7	-1	0,39	-1	1,064
24	+1	65,7	+1	53,2	12,7	+1	25,0	-1	5,4	+1	15,7	-1	0,39	-1	1,064
25	-1	34,3	-1	13,4	6,12	-1	4,1	+1	8,6	+1	15,7	-1	0,39	-1	1,064
26	+1	65,7	-1	25,6	6,12	-1	7,8	+1	8,6	+1	15,7	-1	0,39	-1	1,064
27	-1	34,3	+1	27,8	12,7	-1	4,1	+1	8,6	+1	15,7		0,39	-1	1,064
28	+1	65,7	+1	53,2	12,7	-1	7,8	+1	8,6	+1	15,7		0,39	-1	1,064
29	-1	34,3	-1	13,4	6,12	+1	13,1	+1	8,6	+1	15,7		0,39	-1	1,064
30	+1	65,7	-1	25,6	6,12	+1	25,0	+1	8,6	+1	15,7		0,39	-1	1,064
31	-1	34,3	+1	27,8	12,7	+1	13,1	+1	8,6	+1			0,39	-1	1,064
32	+1	65,7	+1	53,2	12,7	+1	25,0	+1	8,6	+1	15,7		0,39	-1	1,064
33	-1	34,3	-1	13,4	3,24	-1	4,1	-1	5,4	-1	8,3	+1	0,81	-1	1,064
34	+1	65,7	-1	25,6	3,24	-1	7,8	-1	5,4	-1	8,3	+1	0,81	-1	1,064
35	-1	34,3	+1	27,8	6,72	-1	4,1	-1	5,4	-1	8,3	+1	0,81	-1	1,064
36	+1	65,7	+1	53,2	6,72	-1	7,8	-1	5,4	-1	8,3	+1	0,81	-1	1,064
37	-1	34,3	-1	13,4	3,24	+1	13,1	-1	5,4	-1	8,3	+1	0,81	-1	1,064
38	+1	65,7	-1	25,6	3,24	+1	25,0	-1	5,4	-1	8,3	+1	0,81	-1	1,064
39	-1	34,3	+1	27,8	6,72	+1	13,1	-1	5,4	-1	8,3	+1	0,81	-1	1,064

	$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$		1	<i>c</i> ₃		x_4	<i>x</i> ₅		x_6		<i>x</i> ₇				
		, MM	H_{-}	л <u>л</u> (для акс	C-EO)		, MM		, MM		MM		MM		л, Тл
$N_{\overline{0}}$	110,	, 141141		для коа		11cr	, 141141	118	, 141141	710,	171171	ν,	IVIIVI	Dm	, 131
			211 (для коа ММ	ж то),										
40	+1	65,7	+1	53,2	6,72	+1	25,0	-1	5,4	-1	8,3	+1	0,81	-1	1,064
41	-1	34,3	-1	13,4	3,24	-1	4,1	+1	8,6	-1	8,3	+1	0,81	-1	1,064
42	+1	65,7	-1	25,6	3,24	-1	7,8	+1	8,6	-1	8,3	+1	0,81	-1	1,064
43	-1	34,3	+1	27,8	6,72	-1	4,1	+1	8,6	-1	8,3	+1	0,81	-1	1,064
44	+1	65,7	+1	53,2	6,72	-1	7,8	+1	8,6	-1	8,3	+1	0,81	-1	1,064
45	-1	34,3	-1	13,4	3,24	+1	13,1	+1	8,6	-1	8,3	+1	0,81	-1	1,064
46	+1	65,7	-1	25,6	3,24	+1	25,0	+1	8,6	-1	8,3	+1	0,81	-1	1,064
47	-1	34,3	+1	27,8	6,72	+1	13,1	+1	8,6	-1	8,3	+1	0,81	-1	1,064
48	+1	65,7	+1	53,2	6,72	+1	25,0	+1	8,6	-1	8,3	+1	0,81	-1	1,064
49	-1	34,3	-1	13,4	6,12	-1	4,1	-1	5,4	+1	15,7	+1	0,81	-1	1,064
50	+1	65,7	-1	25,6	6,12	-1	7,8	-1	5,4	+1	15,7	+1	0,81	-1	1,064
51	-1	34,3	+1	27,8	12,7	-1	4,1	-1	5,4	+1	15,7	+1	0,81	-1	1,064
52	+1	65,7	+1	53,2	12,7	-1	7,8	-1	5,4	+1	15,7	+1	0,81	-1	1,064
53	-1	34,3	-1	13,4	6,12	+1	13,1	-1	5,4	+1	15,7	+1	0,81	-1	1,064
54	+1	65,7	-1	25,6	6,12	+1	25,0	-1	5,4	+1	15,7	+1	0,81	-1	1,064
55	-1	34,3	+1	27,8	12,7	+1	13,1	-1	5,4	+1	15,7	+1	0,81	-1	1,064
56	+1	65,7	+1	53,2	12,7	+1	25,0	-1	5,4	+1	15,7	+1	0,81	-1	1,064
57	-1	34,3	-1	13,4	6,12	-1	4,1	+1	8,6	+1	15,7	+1	0,81	-1	1,064
58	+1	65,7	-1	25,6	6,12	-1	7,8	+1	8,6	+1	15,7	+1	0,81	-1	1,064
59	-1	34,3	+1	27,8	12,7	-1	4,1	+1	8,6	+1	15,7	+1	0,81	-1	1,064
60	+1	65,7	+1	53,2	12,7	-1	7,8	+1	8,6	+1	15,7	+1	0,81	-1	1,064
61	-1	34,3	-1	13,4	6,12	+1	13,1	+1	8,6	+1	15,7	+1	0,81	-1	1,064
62	+1	65,7	-1	25,6	6,12	+1	25,0	+1	8,6	+1	15,7	+1	0,81	-1	1,064
63	-1	34,3	+1	27,8	12,7	+1	13,1	+1	8,6	+1	15,7	+1	0,81	-1	1,064
64	+1	65,7	+1	53,2	12,7	+1	25,0	+1	8,6	+1	15,7	+1	0,81	-1	1,064
65	-1	34,3	-1	13,4	3,24	-1	4,1	-1	5,4	-1	8,3	-1	0,39	+1	1,536
66	+1	65,7	-1	25,6	3,24	-1	7,8	-1	5,4	-1	8,3	-1	0,39	+1	1,536
67	-1	34,3	+1	27,8	6,72	-1	4,1	-1	5,4	-1	8,3	-1	0,39	+1	1,536
68	+1	65,7	+1	53,2	6,72	-1	7,8	-1	5,4	-1	8,3	-1	0,39	+1	1,536
69	-1	34,3	-1	13,4	3,24	+1	13,1	-1	5,4	-1	8,3	-1	0,39	+1	1,536
70	+1	65,7	-1	25,6	3,24	+1	25,0	-1	5,4	-1	8,3	-1	0,39	+1	1,536
71	-1	34,3	+1	27,8	6,72	+1	13,1	-1	5,4	-1	8,3	-1	0,39	+1	1,536
72	+1	65,7	+1	53,2	6,72	+1	25,0	-1	5,4	-1	8,3	-1	0,39	+1	1,536
73	-1	34,3	-1	13,4	3,24	-1	4,1	+1	8,6	-1	8,3	-1	0,39	+1	1,536
74	+1	65,7	-1	25,6	3,24	-1	7,8	+1	8,6	-1	8,3	-1	0,39	+1	1,536
75	-1	34,3	+1	27,8	6,72	-1	4,1	+1	8,6	-1	8,3	-1	0,39	+1	1,536
76	+1	65,7	+1	53,2	6,72	-1	7,8	+1	8,6	-1	8,3	-1	0,39	+1	1,536
77	-1	34,3	-1	13,4	3,24	+1	13,1	+1	8,6	-1	8,3	-1	0,39	+1	1,536
78	+1	65,7	-1	25,6	3,24	+1	25,0	+1	8,6	-1	8,3	-1	0,39	+1	1,536
79	-1	34,3	+1	27,8	6,72	+1	13,1	+1	8,6	-1	8,3	-1	0,39	+1	1,536
80	+1	65,7	+1	53,2	6,72	+1	25,0	+1	8,6	-1	8,3	-1	0,39	+1	1,536
81	-1	34,3	-1 1	13,4	6,12	-1	4,1	-1	5,4	+1	15,7	-1	0,39	+1	1,536
82	+1	65,7	-1	25,6	6,12	-1	7,8	-1	5,4	+1	15,7	-1	0,39	+1	1,536
83	-1	34,3	+1	27,8	12,7	-1 1	4,1	-1 1	5,4	+1	15,7	-1	0,39	+1	1,536
84	+1	65,7	+1	53,2	12,7	-1	7,8	-1	5,4	+1	15,7	-1	0,39	+1	1,536
85	-1	34,3	-1	13,4	6,12	+1	13,1	-1	5,4	+1	15,7	-1	0,39	+1	1,536

	$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$					3	<i>c</i> ₃		x_4	λ	€5		<i>κ</i> ₆	x_7	
).c		MM	H_{π} (для ак	с-го),		, MM		, MM	l .	MM		MM		, Тл
№	07			для коа		01	,	ь	,	07		,,	1,11,1		.,
			n (MM	,,										
86	+1	65,7	-1	25,6	6,12	+1	25,0	-1	5,4	+1	15,7	-1	0,39	+1	1,536
87	-1	34,3	+1	27,8	12,7	+1	13,1	-1	5,4	+1	15,7	-1	0,39	+1	1,536
88	+1	65,7	+1	53,2	12,7	+1	25,0	-1	5,4	+1	15,7	-1	0,39	+1	1,536
89	-1	34,3	-1	13,4	6,12	-1	4,1	+1	8,6	+1	15,7	-1	0,39	+1	1,536
90	+1	65,7	-1	25,6	6,12	-1	7,8	+1	8,6	+1	15,7	-1	0,39	+1	1,536
91	-1	34,3	+1	27,8	12,7	-1	4,1	+1	8,6	+1	15,7	-1	0,39	+1	1,536
92	+1	65,7	+1	53,2	12,7	-1	7,8	+1	8,6	+1	15,7	-1	0,39	+1	1,536
93	-1	34,3	-1	13,4	6,12	+1	13,1	+1	8,6	+1	15,7	-1	0,39	+1	1,536
94	+1	65,7	-1	25,6	6,12	+1	25,0	+1	8,6	+1	15,7	-1	0,39	+1	1,536
95	-1	34,3	+1	27,8	12,7	+1	13,1	+1	8,6	+1	15,7	-1	0,39	+1	1,536
96	+1	65,7	+1	53,2	12,7	+1	25,0	+1	8,6	+1	15,7	-1	0,39	+1	1,536
97	-1	34,3	-1	13,4	3,24	-1	4,1	-1	5,4	-1	8,3	+1	0,81	+1	1,536
98	+1	65,7	-1	25,6	3,24	-1	7,8	-1	5,4	-1	8,3	+1	0,81	+1	1,536
99	-1	34,3	+1	27,8	6,72	-1	4,1	-1	5,4	-1	8,3	+1	0,81	+1	1,536
100	+1	65,7	+1	53,2	6,72	-1	7,8	-1	5,4	-1	8,3	+1	0,81	+1	1,536
101	-1	34,3	-1	13,4	3,24	+1	13,1	-1	5,4	-1	8,3	+1	0,81	+1	1,536
102	+1	65,7	-1	25,6	3,24	+1	25,0	-1	5,4	-1	8,3	+1	0,81	+1	1,536
103	-1	34,3	+1	27,8	6,72	+1	13,1	-1	5,4	-1	8,3	+1	0,81	+1	1,536
104	+1	65,7	+1	53,2	6,72	+1	25,0	-1	5,4	-1	8,3	+1	0,81	+1	1,536
105	-1	34,3	-1	13,4	3,24	-1	4,1	+1	8,6	-1	8,3	+1	0,81	+1	1,536
106	+1	65,7	-1	25,6	3,24	-1	7,8	+1	8,6	-1	8,3	+1	0,81	+1	1,536
107	-1	34,3	+1	27,8	6,72	-1	4,1	+1	8,6	-1	8,3	+1	0,81	+1	1,536
108	+1	65,7	+1	53,2	6,72	-1	7,8	+1	8,6	-1	8,3	+1	0,81	+1	1,536
109	-1	34,3	-1	13,4	3,24	+1	13,1	+1	8,6	-1	8,3	+1	0,81	+1	1,536
110	+1	65,7	-1	25,6	3,24	+1	25,0	+1	8,6	-1	8,3	+1	0,81	+1	1,536
111	-1	34,3	+1	27,8	6,72	+1	13,1	+1	8,6	-1	8,3	+1	0,81	+1	1,536
112	+1	65,7	+1	53,2	6,72	+1	25,0	+1	8,6	-1	8,3	+1	0,81	+1	1,536
113	-1	34,3	-1	13,4	6,12	-1	4,1	-1	5,4	+1	15,7	+1	0,81	+1	1,536
114	+1	65,7	-1	25,6	6,12	-1	7,8	-1	5,4	+1	15,7	+1	0,81	+1	1,536
115	-1	34,3	+1	27,8	12,7	-1	4,1	-1	5,4	+1	15,7	+1	0,81	+1	1,536
116	+1	65,7	+1	53,2	12,7	-1	7,8	-1	5,4	+1	15,7	+1	0,81	+1	1,536
117	-1	34,3	-1	13,4	6,12	+1	13,1	-1	5,4	+1	15,7	+1	0,81	+1	1,536
118	+1	65,7	-1	25,6	6,12	+1	25,0	-1	5,4	+1	15,7	+1	0,81	+1	1,536
119	-1	34,3	+1	27,8	12,7	+1	13,1	-1	5,4	+1	15,7	+1	0,81	+1	1,536
120	+1	65,7	+1	53,2	12,7	+1	25,0	-1	5,4	+1	15,7	+1	0,81	+1	1,536
121	-1	34,3	-1	13,4	6,12	-1	4,1	+1	8,6	+1	15,7	+1	0,81	+1	1,536
122	+1	65,7	-1	25,6	6,12	-1	7,8	+1	8,6	+1	15,7	+1	0,81	+1	1,536
123	-1	34,3	+1	27,8	12,7	-1	4,1	+1	8,6	+1	15,7	+1	0,81	+1	1,536
124	+1	65,7	+1	53,2	12,7	-1	7,8	+1	8,6	+1	15,7	+1	0,81	+1	1,536
125	-1	34,3	-1	13,4	6,12	+1	13,1	+1	8,6	+1	15,7	+1	0,81	+1	1,536
126	+1	65,7	-1	25,6	6,12	+1	25,0	+1	8,6	+1	15,7	+1	0,81	+1	1,536
127	-1	34,3	+1	27,8	12,7	+1	13,1	+1	8,6	+1	15,7	+1	0,81	+1	1,536
128	+1	65,7	+1	53,2	12,7	+1	25,0	+1	8,6	+1	15,7	+1	0,81	+1	1,536
129	-1,909	20	0	12	7,2	0	5	0	7	0	12	0	0,60	0	1,30
130	+1,909	80	0	48	7,2	0	20	0	7	0	12	0	0,60	0	1,30
131	0	50	-1,909	10	2,4	0	12,5	0	7	0	12	0	0,60	0	1,30

№	X_1 H_0 , MM		x_2 H_{Π} (для акс-го), A_{Π} (для коак-го), мм		H_{ct} , MM			$H_{ m B}$, MM		5 MM		6 MM	$B_{\rm m}$,	⁷ 7 Тл	
132	0	50	+1,909	50	12	0	12,5	0	7	0	12	0	0,60	0	1,30
133	0	50	0	30	7,2	-1,909	0	0	7	0	12	0	0,60	0	1,30
134	0	50	0	30	7,2	+1,909	25	0	7	0	12	0	0,60	0	1,30
135	0	50	0	30	7,2	0	12,5	-1,909	4	0	12	0	0,60	0	1,30
136	0	50	0	30	7,2	0	12,5	+1,909	10	0	12	0	0,60	0	1,30
137	0	50	0	30	3	0	12,5	0	7	-1,909	5	0	0,60	0	1,30
138	0	50	0	30	11,4	0	12,5	0	7	+1,909	19	0	0,60	0	1,30
139	0	500	0	30	7,2	0	12,5	0	7	0	12	-1,909	0,20	0	1,30
140	0	50	0	30	7,2	0	12,5	0	7	0	12	+1,909	1,0	0	1,30
141	0	50	0	30	7,2	0	12,5	0	7	0	12	0	0,60	-1,909	0,85
142	0	50	0	30	7,2	0	12,5	0	7	0	12	0	0,60	+1,909	1,75
143	0	50	0	30	7,2	0	12,5	0	7	0	12	0	0,60	0	1,30

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Дополнительные материалы по моделированию тепловых характеристик втяжного броневого электромагнита

Б.1 Матрицы экспериментов

Таблица Б.1 – Матрица эксперимента моделирования тепловых характеристик с кодированными и истинными значениями факторов для однообмоточной МС ВБЭМ

No	х	\mathfrak{c}_1	x	·2	х	3		x_4		<i>x</i> ₅	x_6 ·	
	$H_{\rm o}$,	MM	A_{o} ,	MM	<i>V</i> , 1	MM	T_0	, °C	λ_3 , BT	$/(\mathbf{M} \cdot {}^{\circ}\mathbf{C})$	q, BT	$/(\text{M}^3)$
1	-1	34,3	-1	8,34	-1	0,39	-1	40	-1	0,308	-1	5,26
2	+1	65,7	-1	8,34	-1	0,39	-1	40	-1	0,308	-1	5,26
3	-1	34,3	+1	15,7	-1	0,39	-1	40	-1	0,308	-1	5,26
4	+1	65,7	+1	15,7	-1	0,39	-1	40	-1	0,308	-1	5,26
5	-1	34,3	-1	8,34	+1	0,81	-1	40	-1	0,308	-1	5,26
6	+1	65,7	-1	8,34	+1	0,81	-1	40	-1	0,308	-1	5,26
7	-1	34,3	+1	15,7	+1	0,81	-1	40	-1	0,308	-1	5,26
8	+1	65,7	+1	15,7	+1	0,81	-1	40	-1	0,308	-1	5,26
9	-1	34,3	-1	8,34	-1	0,39	+1	80	-1	0,249	-1	8,51
10	+1	65,7	-1	8,34	-1	0,39	+1	80	-1	0,249	-1	8,51
11	-1	34,3	+1	15,7	-1	0,39	+1	80	-1	0,249	-1	8,51
12	+1	65,7	+1	15,7	-1	0,39	+1	80	-1	0,249	-1	8,51
13	-1	34,3	-1	8,34	+1	0,81	+1	80	-1	0,249	-1	8,51
14	+1	65,7	-1	8,34	+1	0,81	+1	80	-1	0,249	-1	8,51
15	-1	34,3	+1	15,7	+1	0,81	+1	80	-1	0,249	-1	8,51
16	+1	65,7	+1	15,7	+1	0,81	+1	80	-1	0,249	-1	8,51
17	-1	34,3	-1	8,34	-1	0,39	-1	40	+1	0,4	-1	5,26
18	+1	65,7	-1	8,34	-1	0,39	-1	40	+1	0,4	-1	5,26
19	-1	34,3	+1	15,7	-1	0,39	-1	40	+1	0,4	-1	5,26
20	+1	65,7	+1	15,7	-1	0,39	-1	40	+1	0,4	-1	5,26
21	-1	34,3	-1	8,34	+1	0,81	-1	40	+1	0,4	-1	5,26
22	+1	65,7	-1	8,34	+1	0,81	-1	40	+1	0,4	-1	5,26
23	-1	34,3	+1	15,7	+1	0,81	-1	40	+1	0,4	-1	5,26
24	+1	65,7	+1	15,7	+1	0,81	-1	40	+1	0,4	-1	5,26
25	-1	34,3	-1	8,34	-1	0,39	+1	80	+1	0,324	-1	8,51
26	+1	65,7	-1	8,34	-1	0,39	+1	80	+1	0,324	-1	8,51
27	-1	34,3	+1	15,7	-1	0,39	+1	80	+1	0,324	-1	8,51
28	+1	65,7	+1	15,7	-1	0,39	+1	80	+1	0,324	-1	8,51
29	-1	34,3	-1	8,34	+1	0,81	+1	80	+1	0,324	-1	8,51
30	+1	65,7	-1	8,34	+1	0,81	+1	80	+1	0,324	-1	8,51
31	-1	34,3	+1	15,7	+1	0,81	+1	80	+1	0,324	-1	8,51
32	+1	65,7	+1	15,7	+1	0,81	+1	80	+1	0,324	-1	8,51
33	-1	34,3	-1	8,34	-1	0,39	-1	40	-1	0,308	+1	8,35

Продолжение таблицы Б.2

№	•	•.	1	·	1	·	Ι.	ν.	Ι.	×-	x_6 ·1	104
110		C ₁ MM	A_{o} ,		X	MM		<i>x</i> ₄ , °C		х ₅ /(м·°С)	q, B_T	/(m ³)
34	+1	65,7	-1	8,34	-1	0,39	-1	40	-1	0,308	+1	8,35
35	-1	34,3	+1	15,7	-1	0,39	-1	40	-1	0,308	+1	8,35
36	+1	65,7	+1	15,7	-1	0,39	-1	40	-1	0,308	+1	8,35
37	-1	34,3	-1	8,34	+1	0,81	-1	40	-1	0,308	+1	8,35
38	+1	65,7	-1	8,34	+1	0,81	-1	40	-1	0,308	+1	8,35
39	-1	34,3	+1	15,7	+1	0,81	-1	40	-1	0,308	+1	8,35
40	+1	65,7	+1	15,7	+1	0,81	-1	40	-1	0,308	+1	8,35
41	-1	34,3	-1	8,34	-1	0,39	+1	80	-1	0,249	+1	13,5
42	+1	65,7	-1	8,34	-1	0,39	+1	80	-1	0,249	+1	13,5
43	-1	34,3	+1	15,7	-1	0,39	+1	80	-1	0,249	+1	13,5
44	+1	65,7	+1	15,7	-1	0,39	+1	80	-1	0,249	+1	13,5
45	-1	34,3	-1	8,34	+1	0,81	+1	80	-1	0,249	+1	13,5
46	+1	65,7	-1	8,34	+1	0,81	+1	80	-1	0,249	+1	13,5
47	-1	34,3	+1	15,7	+1	0,81	+1	80	-1	0,249	+1	13,5
48	+1	65,7	+1	15,7	+1	0,81	+1	80	-1	0,249	+1	13,5
49	-1	34,3	-1	8,34	-1	0,39	-1	40	+1	0,4	+1	8,35
50	+1	65,7	-1	8,34	-1	0,39	-1	40	+1	0,4	+1	8,35
51	-1	34,3	+1	15,7	-1	0,39	-1	40	+1	0,4	+1	8,35
52	+1	65,7	+1	15,7	-1	0,39	-1	40	+1	0,4	+1	8,35
53	-1	34,3	-1	8,34	+1	0,81	-1	40	+1	0,4	+1	8,35
54	+1	65,7	-1	8,34	+1	0,81	-1	40	+1	0,4	+1	8,35
55	-1	34,3	+1	15,7	+1	0,81	-1	40	+1	0,4	+1	8,35
56	+1	65,7	+1	15,7	+1	0,81	-1	40	+1	0,4	+1	8,35
57	-1	34,3	-1	8,34	-1	0,39	+1	80	+1	0,324	+1	13,5
58	+1	65,7	-1	8,34	-1	0,39	+1	80	+1	0,324	+1	13,5
59	-1	34,3	+1	15,7	-1	0,39	+1	80	+1	0,324	+1	13,5
60	+1	65,7	+1	15,7	-1	0,39	+1	80	+1	0,324	+1	13,5
61	-1	34,3	-1	8,34	+1	0,81	+1	80	+1	0,324	+1	13,5
62	+1	65,7	-1	8,34	+1	0,81	+1	80	+1	0,324	+1	13,5
63	-1	34,3	+1	15,7	+1	0,81	+1	80	+1	0,324	+1	13,5
64	+1	65,7	+1	15,7	+1	0,81	+1	80	+1	0,324	+1	13,5
	-1,761	24	0	12	0	0,6	0	60	0	0,302	0	8,72
	+1,761	76	0	12	0	0,6	0	60	0	0,302	0	8,72
67	0	50	-1,761	5,56	0	0,6	0	60	0	0,302	0	8,72
68	0		+1,761	18,4	0	0,6	0	60	0	0,302	0	8,72
69	0	50	0	12	-1,761	0,23	0	60	0	0,302	0	8,72
70	0	50	0	12	+1,761	0,97	0	60	0	0,302	0	8,72
71	0	50	0	12	0	0,6	-1,761	24,8	0	0,467	0	5,57
72	0	50	0	12	0	0,6	+1,761	95,2	0	0,285	0	13
73	0	50	0	12	0	0,6	0	60	-1,761	0,232	0	8,72
74	0	50	0	12	0	0,6	0	60	+1,761	0,372	0	8,72
75	0	50	0	12	0	0,6	0	60	0	0,302	-1,761	5,2
76	0	50	0	12	0	0,6	0	60	0		+1,761	12,2
77	0	50	0	12	0	0,6	0	60	0	0,302	0	8,72

Таблица Б.2 – Матрица эксперимента с кодированными и истинными значениями факторов для исследования двухобмоточной МС ВБЭМ с коаксиальным и аксиальным расположением обмоток

	х	:1	x	2		<i>x</i> ₃		х	4		x ₅	λ	6		$\overline{x_7}$		x_8
№		MM	A_{o} ,		H_{π}	(акс.)	A_{Π}	T_0 ,			зу,		10^{4} ,		10^{4} ,		$\lambda_{3\Pi}$,
	07		07			акс.),		0,			(M·°C)		(M^3)		$\sqrt{(M^3)}$		(M·°C)
1	-1	34,3	-1	8,34	_	8,16	3,35	-1	40	-1	0,308	-1	5,26	-1	0,672	-1	0,363
2	+1	65,7	-1	8,34		15,6	3,35	-1	40	-1	0,308	-1	5,26	-1	0,672	-1	0,363
3	-1	34,3	+1	15,7	-1	8,16	6,31	-1	40	-1	0,308	-1	5,26	-1	0,672	-1	0,363
4	+1	65,7	+1		-1	15,6	6,31	-1	40	-1	0,308	-1	5,26	-1	0,672	-1	0,363
5	-1	34,3	-1	8,34		26,1	4,99	-1	40	-1	0,308	-1	5,26	-1	0,672	-1	0,363
6	+1	65,7	-1	8,34	+1	50,1	4,99	-1	40	-1	0,308	-1	5,26	-1	0,672	-1	0,363
7	-1	34,3	+1	15,7	+1	26,1	9,39	-1	40	-1	0,308	-1	5,26	-1	0,672	-1	0,363
8	+1	65,7	+1	15,7	+1	50,1	9,39	-1	40	-1	0,308	-1	5,26	-1	0,672	-1	0,363
9	-1	34,3	-1	8,34	-1	8,16	3,35	+1	80	-1	0,249	-1	8,51	-1	1,09	-1	0,293
10	+1	65,7	-1	8,34	-1	15,6	3,35	+1	80	-1	0,249	-1	8,51	-1	1,09	-1	0,293
11	-1	34,3	+1	15,7	-1	8,16	6,31	+1	80	-1	0,249	-1	8,51	-1	1,09	-1	0,293
12	+1	65,7	+1	15,7	-1	15,6	6,31	+1	80	-1	0,249	-1	8,51	-1	1,09	-1	0,293
13	-1	34,3	-1	8,34	+1	26,1	4,99	+1	80	-1	0,249	-1	8,51	-1	1,09	-1	0,293
14	+1	65,7	-1	8,34	+1	50,1	4,99	+1	80	-1	0,249	-1	8,51	-1	1,09	-1	0,293
15	-1	34,3	+1	15,7	+1	26,1	9,39	+1	80	-1	0,249	-1	8,51	-1	1,09	-1	0,293
16	+1	65,7	+1	15,7	+1	50,1	9,39	+1	80	-1	0,249	-1	8,51	-1	1,09	-1	0,293
17	-1	34,3	-1	8,34	-1	8,16	3,35	-1	40	+1	0,4	-1	5,26	-1	0,672	-1	0,471
18	+1	65,7	-1	8,34	-1	15,6	3,35	-1	40	+1	0,4	-1	5,26	-1	0,672	-1	0,471
19	-1	34,3	+1	15,7	-1	8,16	6,31	-1	40	+1	0,4	-1	5,26	-1	0,672	-1	0,471
20	+1	65,7	+1	15,7	-1	15,6	6,31	-1	40	+1	0,4	-1	5,26	-1	0,672	-1	0,471
21	-1	34,3	-1	8,34		26,1	4,99	-1	40	+1	0,4	-1	5,26	-1	0,672	-1	0,471
22	+1	65,7	-1	8,34		50,1	4,99	-1	40	+1	0,4	-1	5,26	-1	0,672	-1	0,471
23	-1	34,3	+1		+1	26,1	9,39	-1	40	+1	0,4	-1	5,26	-1	0,672	-1	0,471
24	+1	65,7	+1		+1	50,1	9,39	-1	40	+1	0,4	-1	5,26	-1	0,672	-1	0,471
25	-1	34,3	-1	8,34		8,16	3,35	+1	80	+1	0,324	-1	8,51	-1	1,09	-1	0,382
26	+1	65,7	-1	8,34		15,6	3,35	+1	80	+1	0,324	-1	8,51	-1	1,09	-1	0,382
27	-1	34,3	+1	15,7	-1	8,16	6,31	+1	80	+1	0,324	-1	8,51	-1	1,09	-1	0,382
28	+1	65,7	+1	15,7	-1	15,6	6,31	+1	80	+1	0,324	-1	8,51	-1	1,09	-1	0,382
29	-1	34,3	-1	8,34		26,1	4,99	+1	80	+1	0,324		8,51	-1	1,09	-1	0,382
30	+1	65,7	-1	8,34		50,1	4,99	+1	80	+1	0,324	-1	8,51	-1	1,09	-1	0,382
31	-1	34,3	+1	15,7		26,1	9,39	+1	80	+1	0,324	-1	8,51	-1	1,09	-1	0,382
32	+1	65,7	+1	15,7		50,1	9,39	+1	80	+1	0,324	-1	8,51	-1	1,09	-1	0,382
33	-1	34,3	-1	8,34		8,16	3,35	-1	40	-1	0,308	+1	8,35	-1	1,07	-1	0,363
34	+1	65,7	-1	8,34		15,6	3,35	-1	40	-1	0,308	+1	8,35	-1	1,07	-1	0,363
35	-1	34,3	+1	15,7		8,16	6,31	-1	40	-1	0,308	+1	8,35	-1	1,07	-1	0,363
36	+1	65,7	+1	15,7		15,6	6,31	-1	40	-1	0,308	+1	8,35	-1	1,07	-1	0,363
37	-1	34,3	-1	8,34		26,1	4,99	-1	40	-1 1	0,308	+1	8,35	<u>-1</u>	1,07	-1	0,363
38	+1	65,7	-1	8,34		50,1	4,99	-1	40	-1	0,308	+1	8,35	-1	1,07	-1	0,363
39	-1	34,3	+1	15,7		26,1	9,39	-1	40	-1	0,308	+1	8,35	-1	1,07	-1	0,363
40	+1	65,7	+1	15,7		50,1	9,39	-1	40	-1	0,308	+1	8,35	-1	1,07	-1	0,363
41 42	-1	34,3	-1	8,34		8,16	3,35	+1	80	-1 1	0,249	+1	13,5	<u>-1</u>	1,73	-1 -1	0,293
42	+1	65,7	-1	8,34	-1	15,6	3,35	+1	80	-1	0,249	+1	13,5	-1	1,73	-1	0,293

	_		x_i		цы Б			v		-	v -	,	¢6		v-		v o
№	H_{o} ,		A_0		Н	x ₃ (акс.)	Δ	T_0 ,			\mathfrak{r}_5		10^4 ,		$x_7 \cdot 10^4$,		x_8
]14⊻	110,	IVIIVI	Λ_0 ,	IVIIVI		(акс.), акс.),		10,	C	D _T //	зу, м.°С)		(M^3)		$\frac{10}{(M^3)}$		λ₃π, /(м.°С)
43	-1	34,3	+1	15,7	-1	8,16	6,31	+1	80	-1	0,249	+1	13,5	-1	1,73	-1	0,293
44	+1	65,7	+1		-1	15,6	6,31	+1	80	-1	0,249	+1	13,5	-1	1,73	-1	0,293
45	-1	34,3	-1	8,34		26,1	4,99	+1	80	-1	0,249	+1	13,5	-1	1,73	-1	0,293
46	+1	65,7	-1	8,34		50,1	4,99	+1	80	-1	0,249	+1	13,5	-1	1,73	-1	0,293
47	-1	34,3	+1		+1	26,1	9,39	+1	80	-1	0,249	+1	13,5	-1	1,73	-1	0,293
48	+1	65,7	+1		+1	50,1	9,39	+1	80	-1	0,249	+1	13,5	-1	1,73	-1	0,293
49	-1	34,3	-1	8,34		8,16	3,35	-1	40	+1	0,4	+1	8,35	-1	1,07	-1	0,471
50	+1	65,7	-1	8,34		15,6	3,35	-1	40	+1	0,4	+1	8,35	-1	1,07	-1	0,471
51	-1	34,3	+1		-1	8,16	6,31	-1	40	+1	0,4	+1	8,35	-1	1,07	-1	0,471
52	+1	65,7	+1		-1	15,6	6,31	-1	40	+1	0,4	+1	8,35	-1	1,07	-1	0,471
53	-1	34,3	-1	8,34		26,1	4,99	-1	40	+1	0,4	+1	8,35	-1	1,07	-1	0,471
54	+1	65,7	-1	8,34		50,1	4,99	-1	40	+1	0,4	+1	8,35	-1	1,07	-1	0,471
55	-1	34,3	+1		+1	26,1	9,39	-1	40	+1	0,4	+1	8,35	-1	1,07	-1	0,471
56	+1	65,7	+1	15,7		50,1	9,39	-1	40	+1	0,4	+1	8,35	-1	1,07	-1	0,471
57	-1	34,3	-1	8,34		8,16	3,35	+1	80	+1	0,324	+1	13,5	-1	1,73	-1	0,382
58	+1	65,7	-1	8,34		15,6	3,35	+1	80	+1	0,324	+1	13,5	-1	1,73	-1	0,382
59	-1	34,3	+1		-1	8,16	6,31	+1	80	+1	0,324	+1	13,5	-1	1,73	-1	0,382
60	+1	65,7	+1	15,7	-1	15,6	6,31	+1	80	+1	0,324	+1	13,5	-1	1,73	-1	0,382
61	-1	34,3	-1	8,34	+1	26,1	4,99	+1	80	+1	0,324	+1	13,5	-1	1,73	-1	0,382
62	+1	65,7	-1	8,34	+1	50,1	4,99	+1	80	+1	0,324	+1	13,5	-1	1,73	-1	0,382
63	-1	34,3	+1	15,7	+1	26,1	9,39	+1	80	+1	0,324	+1	13,5	-1	1,73	-1	0,382
64	+1	65,7	+1	15,7	+1	50,1	9,39	+1	80	+1	0,324	+1	13,5	-1	1,73	-1	0,382
65	-1	34,3	-1	8,34	-1	8,16	3,35	-1	40	-1	0,308	-1	5,26	+1	1,96	-1	0,363
66	+1	65,7	-1	8,34	-1	15,6	3,35	-1	40	-1	0,308	-1	5,26	+1	1,96	-1	0,363
67	-1	34,3	+1	15,7	-1	8,16	6,31	-1	40	-1	0,308	-1	5,26	+1	1,96	-1	0,363
68	+1	65,7	+1	15,7	-1	15,6	6,31	-1	40	-1	0,308	-1	5,26	+1	1,96	-1	0,363
69	-1	34,3	-1	8,34	+1	26,1	4,99	-1	40	-1	0,308	-1	5,26	+1	1,96	-1	0,363
70	+1	65,7	-1	8,34	+1	50,1	4,99	-1	40	-1	0,308	-1	5,26	+1	1,96	-1	0,363
71	-1	34,3	+1	,	+1	26,1	9,39	-1	40	-1	0,308	-1	5,26	+1	1,96	-1	0,363
72	+1	65,7	+1	15,7		50,1	9,39	-1	40	-1	0,308	-1	5,26	+1	1,96	-1	0,363
73	-1	34,3	-1	8,34		8,16	3,35	+1	80	-1	0,249	-1	8,51	+1	3,17	-1	0,293
74	+1	65,7	-1	8,34		15,6	3,35	+1	80	-1	0,249	-1	8,51	+1	3,17	-1	0,293
75	-1	34,3	+1	15,7		8,16	6,31	+1	80	-1	0,249	-1	8,51	+1	3,17	-1	0,293
76	+1	65,7	+1	15,7		15,6	6,31	+1	80	-1	0,249	-1	8,51	+1	3,17	-1	0,293
77	-1	34,3	-1	8,34		26,1	4,99	+1	80	-1	0,249		8,51	+1	3,17	-1	0,293
78 7 8	+1	65,7	-1	8,34		50,1	4,99	+1	80	-1	0,249	-1	8,51	+1	3,17	-1	0,293
79	-1	34,3	+1	15,7		26,1	9,39	+1	80	-1	0,249	-1	8,51	+1	3,17	-1	0,293
80	+1	65,7	+1	15,7		50,1	9,39	+1	80	-1	0,249	-1	8,51	+1	3,17	-1	0,293
81	-1	34,3	-1	8,34		8,16	3,35	-1	40	+1	0,4	-1	5,26	+1	1,96	-1	0,471
82	+1	65,7	-1	8,34		15,6	3,35	-1	40	+1	0,4	-1	5,26	+1	1,96	-1	0,471
83	-1	34,3	+1	15,7		8,16	6,31	-1	40	+1	0,4	-1	5,26	+1	1,96	-1	0,471
84	+1	65,7	+1	15,7		15,6	6,31	-1	40	+1	0,4	-1	5,26	+1	1,96	-1	0,471
85	-1	34,3	-1	8,34		26,1	4,99	-1	40	+1	0,4	-1	5,26	+1	1,96	-1	0,471
86	+1	65,7	-1	8,34		50,1	4,99	-1	40	+1	0,4	-1	5,26	+1	1,96	-1	0,471
87	-1	34,3	+1	15,7		26,1	9,39	-1	40	+1	0,4	-1	5,26	+1	1,96	-1	0,471
88	+1	65,7	+1	15,7		50,1	9,39	-1	40	+1	0,4	-1	5,26	+1	1,96	-1	0,471
89	-1	34,3	-1	8,34	-1	8,16	3,35	+1	80	+1	0,324	-1	8,51	+1	3,17	-1	0,382

	x	:1	x	2		<i>x</i> ₃		х)	r ₅		6		x_7		<i>x</i> ₈
$N_{\overline{0}}$	H_{0} ,	MM	A_{o} ,	MM		(акс.)		T_0 ,	°C		зу ,	$q_{ m y}$	10^{4}	q_{Π}	10^4		$\lambda_{3\Pi}$,
				,		ракс.),					м .°C)		(M^3)	Вт	/(m ³)		$(M \cdot {}^{\circ}C)$
90	+1	65,7	-1	8,34		15,6	3,35	+1	80	+1	0,324	-1	8,51	+1	3,17	-1	0,382
91	-1	34,3	+1	15,7		8,16	6,31	+1	80	+1	0,324	-1	8,51	+1	3,17	-1	0,382
92	+1	65,7	+1	15,7	-1	15,6	6,31	+1	80	+1	0,324	-1	8,51	+1	3,17	-1	0,382
93	-1	34,3	-1	8,34		26,1	4,99	+1	80	+1	0,324	-1	8,51	+1	3,17	-1	0,382
94	+1	65,7	-1	8,34		50,1	4,99	+1	80	+1	0,324	-1	8,51	+1	3,17	-1	0,382
95	-1	34,3	+1	15,7		26,1	9,39	+1	80	+1	0,324	-1	8,51	+1	3,17	-1	0,382
96	+1	65,7	+1	15,7		50,1	9,39	+1	80	+1	0,324	-1	8,51	+1	3,17	-1	0,382
97	-1	34,3	-1	8,34		8,16	3,35	-1	40	-1	0,308	+1	8,35	+1	3,11	-1	0,363
98	+1	65,7	-1	8,34		15,6	3,35	-1	40	-1	0,308	+1	8,35	+1	3,11	-1	0,363
99	-1	34,3	+1	15,7		8,16	6,31	-1	40	-1	0,308	+1	8,35	+1	3,11	-1	0,363
100	+1	65,7	+1	15,7	-1	15,6	6,31	-1	40	-1	0,308	+1	8,35	+1	3,11	-1	0,363
101	-1	34,3	-1	8,34		26,1	4,99	-1	40	-1	0,308	+1	8,35	+1	3,11	-1	0,363
102	+1	65,7	-1	8,34		50,1	4,99	-1	40	-1	0,308	+1	8,35	+1	3,11	-1	0,363
103 104	-1	34,3	+1	15,7		26,1	9,39	-1 -1	40	-1 -1	0,308	+1	8,35 8,35	+1	3,11	-1 -1	0,363
104	+1 -1	65,7 34,3	+1 -1	15,7 8,34		50,1 8,16	9,39	+1	80	-1 -1	0,308	+1	13,5	+1	3,11 5,02	-1 -1	0,363
106	+1	65,7	-1	8,34		15,6	3,35	+1	80	-1 -1	0,249	+1	13,5	+1	5,02	-1 -1	0,293
107	-1	34,3	+1		-1	8,16	6,31	+1	80	-1	0,249	+1	13,5	+1	5,02	-1	0,293
107	+1	65,7	+1		-1	15,6	6,31	+1	80	-1	0,249	+1	13,5	+1	5,02	-1	0,293
109	-1	34,3	-1	8,34		26,1	4,99	+1	80	-1	0,249	+1	13,5	+1	5,02	-1	0,293
110	+1	65,7	-1	8,34		50,1	4,99	+1	80	-1	0,249	+1	13,5	+1	5,02	-1	0,293
111	-1	34,3	+1	15,7		26,1	9,39	+1	80	-1	0,249	+1	13,5	+1	5,02	-1	0,293
112	+1	65,7	+1		+1	50,1	9,39	+1	80	-1	0,249	+1	13,5	+1	5,02	-1	0,293
113	-1	34,3	-1	8,34		8,16	3,35	-1	40	+1	0,4	+1	8,35	+1	3,11	-1	0,471
114	+1	65,7	-1	8,34		15,6	3,35	-1	40	+1	0,4	+1	8,35	+1	3,11	-1	0,471
115	-1	34,3	+1	15,7	-1	8,16	6,31	-1	40	+1	0,4	+1	8,35	+1	3,11	-1	0,471
116	+1	65,7	+1			15,6	6,31	-1	40	+1	0,4	+1	8,35	+1	3,11	-1	0,471
117	-1	34,3	-1	8,34		26,1	4,99	-1	40	+1	0,4	+1	8,35	+1	3,11	-1	0,471
118	+1	65,7	-1	8,34	+1	50,1	4,99	-1	40	+1	0,4	+1	8,35	+1	3,11	-1	0,471
119	-1	34,3	+1	15,7		26,1	9,39	-1	40	+1	0,4	+1	8,35	+1	3,11	-1	0,471
120	+1	65,7	+1	15,7	+1	50,1	9,39	-1	40	+1	0,4	+1	8,35	+1	3,11	-1	0,471
121	-1	34,3	-1	8,34	-1	8,16	3,35	+1	80	+1	0,324	+1	13,5	+1	5,02	-1	0,382
122	+1	65,7	-1	8,34	-1	15,6	3,35	+1	80	+1	0,324	+1	13,5	+1	5,02	-1	0,382
123	-1	34,3	+1	15,7	-1	8,16	6,31	+1	80	+1	0,324	+1	13,5	+1	5,02	-1	0,382
124	+1	65,7	+1	15,7	-1	15,6	6,31	+1	80	+1	0,324	+1	13,5	+1	5,02	-1	0,382
125	-1	34,3	-1	8,34		26,1	4,99	+1	80	+1	0,324	+1	13,5	+1	5,02	-1	0,382
126	+1	65,7	-1	8,34		50,1	4,99	+1	80	+1	0,324	+1	13,5	+1	5,02	-1	0,382
127	-1	34,3	+1	15,7		26,1	9,39	+1	80	+1	0,324	+1	13,5	+1	5,02	-1	0,382
128	+1	65,7	+1	15,7		50,1	9,39	+1	80	+1	0,324	+1	13,5	+1	5,02	-1	0,382
129	-1	34,3	-1	8,34		10,4	3,35	-1	40	-1	0,308	-1	5,26	-1	0,672	+1	0,438
130	+1	65,7	-1	8,34		20	3,35	-1	40	-1	0,308	-1	5,26	-1	0,672	+1	0,438
131	-1	34,3	+1	15,7		10,4	6,31	-1	40	-1	0,308	-1	5,26	-1	0,672	+1	0,438
132	+1	65,7	+1	15,7		20	6,31	-1	40	-1	0,308	-1	5,26	-1	0,672	+1	0,438
133	-1	34,3	-1	8,34		23,9	4,99	-1	40	-1	0,308	-1	5,26	-1	0,672	+1	0,438
134	+1	65,7	-1	8,34		45,7	4,99	-1	40	-1	0,308	-1	5,26	-1	0,672	+1	0,438
135	-1	34,3	+1	15,7		23,9	9,39	-1	40	-1	0,308	-1	5,26	-1	0,672	+1	0,438
136	+1	65,7	+1	15,7	+1	45,7	9,39	-1	40	-1	0,308	-1	5,26	-1	0,672	+1	0,438

	r	:1	x	2		<i>x</i> ₃		х	4	1	¢5	1	: 6		x_7		<i>x</i> ₈
№		MM	$A_{\rm o}$		H_{-}	(aкс.)	<i>A</i> _	T_0 ,			зу,		10^4 ,		$\cdot 10^4$		$\lambda_{3\Pi}$,
312	110,	IVIIVI	710,	141141		(акс.), ракс.),		10,	C	Pr//	зу, м.°С)		(M^3)		$n/(M^3)$		(м·°C)
137	-1	34,3	-1	8,34		10,4	3,35	+1	80	-1	0,249	-1	8,51	-1	1,09	+1	0,354
138	+1	65,7	-1	8,34		20	3,35	+1	80	-1	0,249	-1	8,51	-1	1,09	+1	0,354
139	-1	34,3	+1	15,7	-1	10,4	6,31	+1	80	-1	0,249	-1	8,51	-1	1,09	+1	0,354
140	+1	65,7	+1		-1	20	6,31	+1	80	-1	0,249	-1	8,51	-1	1,09	+1	0,354
141	-1	34,3	-1	8,34		23,9	4,99	+1	80	-1	0,249	-1	8,51	-1	1,09	+1	0,354
142	+1	65,7	-1	8,34		45,7	4,99	+1	80	-1	0,249	-1	8,51	-1	1,09	+1	0,354
143	-1	34,3	+1	15,7	+1	23,9	9,39	+1	80	-1	0,249	-1	8,51	-1	1,09	+1	0,354
144	+1	65,7	+1		+1	45,7	9,39	+1	80	-1	0,249	-1	8,51	-1	1,09	+1	0,354
145	-1	34,3	-1	8,34	-1	10,4	3,35	-1	40	+1	0,4	-1	5,26	-1	0,672	+1	0,569
146	+1	65,7	-1	8,34		20	3,35	-1	40	+1	0,4	-1	5,26	-1	0,672	+1	0,569
147	-1	34,3	+1	15,7	-1	10,4	6,31	-1	40	+1	0,4	-1	5,26	-1	0,672	+1	0,569
148	+1	65,7	+1	15,7	-1	20	6,31	-1	40	+1	0,4	-1	5,26	-1	0,672	+1	0,569
149	-1	34,3	-1	8,34	+1	23,9	4,99	-1	40	+1	0,4	-1	5,26	-1	0,672	+1	0,569
150	+1	65,7	-1	8,34	+1	45,7	4,99	-1	40	+1	0,4	-1	5,26	-1	0,672	+1	0,569
151	-1	34,3	+1	15,7	+1	23,9	9,39	-1	40	+1	0,4	-1	5,26	-1	0,672	+1	0,569
152	+1	65,7	+1	15,7	+1	45,7	9,39	-1	40	+1	0,4	-1	5,26	-1	0,672	+1	0,569
153	-1	34,3	-1	8,34	-1	10,4	3,35	+1	80	+1	0,324	-1	8,51	-1	1,09	+1	0,461
154	+1	65,7	-1	8,34		20	3,35	+1	80	+1	0,324	-1	8,51	-1	1,09	+1	0,461
155	-1	34,3	+1	15,7	-1	10,4	6,31	+1	80	+1	0,324	-1	8,51	-1	1,09	+1	0,461
156	+1	65,7	+1	15,7	-1	20	6,31	+1	80	+1	0,324	-1	8,51	-1	1,09	+1	0,461
157	-1	34,3	-1		+1	23,9	4,99	+1	80	+1	0,324	-1	8,51	-1	1,09	+1	0,461
158	+1	65,7	-1	8,34		45,7	4,99	+1	80	+1	0,324	-1	8,51	-1	1,09	+1	0,461
159	-1	34,3	+1	15,7	+1	23,9	9,39	+1	80	+1	0,324	-1	8,51	-1	1,09	+1	0,461
160	+1	65,7	+1		+1	45,7	9,39	+1	80	+1	0,324	-1	8,51	-1	1,09	+1	0,461
161	-1	34,3	-1	8,34		10,4	3,35	-1	40	-1	0,308	+1	8,35	-1	1,07	+1	0,438
162	+1	65,7	-1			20	3,35	-1	40	-1	0,308	+1	8,35	-1	1,07	+1	0,438
163	-1	34,3	+1	,	-1	10,4	6,31	-1	40	-1	0,308	+1	8,35	-1	1,07	+1	0,438
164	+1	65,7	+1	15,7		20	6,31	-1	40	-1	0,308		8,35	-1	1,07	+1	0,438
165	-1	34,3	-1	8,34		23,9	4,99	-1	40	-1	0,308	+1	8,35	-1	1,07	+1	0,438
166	+1	65,7	-1	8,34		45,7	4,99	-1	40	-1	0,308	+1	8,35	-1	1,07	+1	0,438
167	-1	34,3	+1		+1	23,9	9,39	-1	40	-1	0,308	+1	8,35	-1	1,07	+1	0,438
168	+1	65,7	+1	15,7		45,7	9,39	-1	40	-1	0,308	+1	8,35	-1	1,07	+1	0,438
169	-1	34,3	-1	8,34		10,4	3,35	+1	80	-1 1	0,249	+1	13,5	-1 1	1,73	+1	0,354
170	+1	65,7	-1	8,34		20	3,35	+1	80	-1	0,249	+1	13,5	-1 -1	1,73	+1	0,354
171 172	-1 +1	34,3 65,7	+1	15,7 15,7		10,4	6,31	+1 +1	80	-1 -1	0,249	+1 +1	13,5	-1 -1	1,73	+1	0,354
173	+1 -1	34,3	-1	8,34		23,9	4,99	+1	80	-1 -1	0,249	+1	13,5 13,5	-1 -1	1,73 1,73	+1	0,354
173	+1	65,7	-1 -1	8,34		45,7	4,99	+1	80	-1 -1	0,249	+1	13,5	-1 -1	1,73	+1	0,354
175	+1 -1	34,3	+1	15,7		23,9	9,39	+1	80	-1 -1	0,249	+1	13,5	-1 -1	1,73	+1	0,354
176	+1	65,7	+1	15,7		45,7	9,39	+1	80	-1 -1	0,249	+1	13,5	-1 -1	1,73	+1	0,354
177	-1	34,3	-1	8,34		10,4	3,35	-1	40	+1	0,249	+1	8,35	-1	1,07	+1	0,569
178	+1	65,7	-1	8,34		20	3,35	-1	40	+1	0,4	+1	8,35	-1	1,07	+1	0,569
179	-1	34,3	+1	15,7		10,4	6,31	-1	40	+1	0,4	+1	8,35	-1	1,07	+1	0,569
180	+1	65,7	+1			20	6,31	-1	40	+1	0,4	+1	8,35	-1	1,07	+1	0,569
181	-1	34,3	-1	8,34		23,9	4,99	-1	40	+1	0,4	+1	8,35	-1	1,07	+1	0,569
182	+1	65,7	-1	8,34		45,7	4,99	-1	40	+1	0,4	+1	8,35	-1	1,07	+1	0,569
183	-1	34,3	+1	15,7		23,9	9,39	-1	40	+1	0,4	+1	8,35	-1	1,07	+1	0,569
		,-		- , .		- 1-	- ,- /				-, -		- ,		, , ,		- ,

	1 ·	•.	v			v.		· ·		٠,	w-	٠,	• .		v-		v _o
№		; ₁ MM	1		И	x ₃ (акс.)	1	T_0 ,			v ₅		10^4 ,		$x_7 \cdot 10^4$,		x_8
110	110,	MIM	A_{0} ,	IVIIVI		(акс.), ракс.),		10,	C		зу, м.°С)		(M^3)		/(m ³)		∂ _{зп} , (м.°С)
184	+1	65,7	+1	15,7		45,7	9,39	-1	40	+1	0,4	+1	8,35	-1	1,07	+1	0,569
185	-1	34,3	-1	8,34		10,4	3,35	+1	80	+1	0,324	+1	13,5	-1	1,73	+1	0,369
186	+1	65,7	-1	8,34		20	3,35	+1	80	+1	0,324	+1	13,5	-1	1,73	+1	0,461
187	-1	34,3	+1	15,7	-1	10,4	6,31	+1	80	+1	0,324	+1	13,5	-1	1,73	+1	0,461
188	+1	65,7	+1	15,7	-1	20	6,31	+1	80	+1	0,324	+1	13,5	-1	1,73	+1	0,461
189	-1	34,3	-1	8,34		23,9	4,99	+1	80	+1	0,324	+1	13,5	-1	1,73	+1	0,461
190	+1	65,7	-1	8,34		45,7	4,99	+1	80	+1	0,324	+1	13,5	-1	1,73	+1	0,461
191	-1	34,3	+1	15,7	+1	23,9	9,39	+1	80	+1	0,324	+1	13,5	-1	1,73	+1	0,461
192	+1	65,7	+1	15,7		45,7	9,39	+1	80	+1	0,324	+1	13,5	-1	1,73	+1	0,461
193	-1	34,3	-1	8,34		10,4	3,35	-1	40	-1	0,308	-1	5,26	+1	1,96	+1	0,438
194	+1	65,7	-1	8,34		20	3,35	-1	40	-1	0,308	-1	5,26	+1	1,96	+1	0,438
195	-1	34,3	+1	15,7	-1	10,4	6,31	-1	40	-1	0,308	-1	5,26	+1	1,96	+1	0,438
196	+1	65,7	+1	15,7	-1	20	6,31	-1	40	-1	0,308	-1	5,26	+1	1,96	+1	0,438
197	-1	34,3	-1	8,34		23,9	4,99	-1	40	-1	0,308	-1	5,26	+1	1,96	+1	0,438
198	+1	65,7	-1	8,34		45,7	4,99	-1	40	-1	0,308	-1	5,26	+1	1,96	+1	0,438
199	-1	34,3	+1	15,7	+1	23,9	9,39	-1	40	-1	0,308	-1	5,26	+1	1,96	+1	0,438
200	+1	65,7	+1	15,7	+1	45,7	9,39	-1	40	-1	0,308	-1	5,26	+1	1,96	+1	0,438
201	-1	34,3	-1	8,34	-1	10,4	3,35	+1	80	-1	0,249	-1	8,51	+1	3,17	+1	0,354
202	+1	65,7	-1	8,34	-1	20	3,35	+1	80	-1	0,249	-1	8,51	+1	3,17	+1	0,354
203	-1	34,3	+1	15,7	-1	10,4	6,31	+1	80	-1	0,249	-1	8,51	+1	3,17	+1	0,354
204	+1	65,7	+1	15,7	-1	20	6,31	+1	80	-1	0,249	-1	8,51	+1	3,17	+1	0,354
205	-1	34,3	-1	8,34	+1	23,9	4,99	+1	80	-1	0,249	-1	8,51	+1	3,17	+1	0,354
206	+1	65,7	-1	8,34	+1	45,7	4,99	+1	80	-1	0,249	-1	8,51	+1	3,17	+1	0,354
207	-1	34,3	+1	15,7	+1	23,9	9,39	+1	80	-1	0,249	-1	8,51	+1	3,17	+1	0,354
208	+1	65,7	+1	15,7	+1	45,7	9,39	+1	80	-1	0,249	-1	8,51	+1	3,17	+1	0,354
209	-1	34,3	-1	8,34	-1	10,4	3,35	-1	40	+1	0,4	-1	5,26	+1	1,96	+1	0,569
210	+1	65,7	-1	8,34		20	3,35	-1	40	+1	0,4	-1	5,26	+1	1,96	+1	0,569
211	-1	34,3	+1	15,7	-1	10,4	6,31	-1	40	+1	0,4	-1	5,26	+1	1,96	+1	0,569
212	+1	65,7	+1	15,7	-1	20	6,31	-1	40	+1	0,4	-1	5,26	+1	1,96	+1	0,569
213	-1	34,3	-1	8,34		23,9	4,99	-1	40	+1	0,4	-1	5,26	+1	1,96	+1	0,569
214	+1	65,7	-1	8,34		45,7	4,99	-1	40	+1	0,4	-1	5,26	+1	1,96	+1	0,569
215	-1	34,3	+1			23,9	9,39	-1	40	+1	0,4	-1	5,26	+1	1,96	+1	0,569
216	+1	65,7	+1	15,7		45,7	9,39	-1	40	+1	0,4	-1	5,26	+1	1,96	+1	0,569
217	-1	34,3	-1	8,34		10,4	3,35	+1	80	+1	0,324	-1	8,51	+1	3,17	+1	0,461
218	+1	65,7	-1	8,34		20	3,35	+1	80	+1	0,324		8,51	+1	3,17	+1	0,461
219	-1	34,3	+1	15,7		10,4	6,31	+1	80	+1	0,324	-1	8,51	+1	3,17	+1	0,461
220	+1	65,7	+1	15,7		20	6,31	+1	80	+1	0,324		8,51	+1	3,17	+1	0,461
221	-1	34,3	-1	8,34		23,9	4,99	+1	80	+1	0,324		8,51	+1	3,17	+1	0,461
222	+1	65,7	-1	8,34		45,7	4,99	+1	80	+1	0,324	-1	8,51	+1	3,17	+1	0,461
223	-1	34,3	+1	15,7		23,9	9,39	+1	80	+1	0,324	-1	8,51	+1	3,17	+1	0,461
224	+1	65,7	+1	15,7		45,7	9,39	+1	80	+1	0,324	-1	8,51	+1	3,17	+1	0,461
225	-1	34,3	-1	8,34		10,4	3,35	-1	40	-1	0,308	+1	8,35	+1	3,11	+1	0,438
226	+1	65,7	-1	8,34		20	3,35	-1	40	-1	0,308	+1	8,35	+1	3,11	+1	0,438
227 228	-1	34,3	+1	15,7	-1	10,4	6,31	-1 -1	40	-1 1	0,308	+1	8,35	+1	3,11	+1	0,438
	+1	65,7	+1	15,7		20	6,31		40	-1	0,308	+1	8,35	+1 1	3,11	+1	0,438
229		34,3	-1 1	8,34		23,9	4,99	-1		-1	0,308	+1	8,35	+1	3,11	+1	0,438
230	+1	65,7	-1	8,34	+1	45,7	4,99	-1	40	-1	0,308	+1	8,35	+1	3,11	+1	0,438

	х	1	x_2	,		<i>x</i> ₃		X	·/4	х	5	х	6		x_7		x_8
№	$H_{\rm o}$		A_0 , 1		H_{π}	(акс.),	A_{π}	T_0 ,			з зу ,	$q_{ m y}$.			10^{4} ,		$l_{3\Pi}$,
31-	110,	141141	210, 1	VIIVI		акс.),		10,	C	BT/(r	_{зу} , м.°С)	BT/	(M^3)	911 Вт	$\sqrt{(M^3)}$		и.°C)
231	-1	34,3	+1	15,7	+1	23,9	9,39	-1	40	-1	0,308	+1	8,35	+1	3,11	+1	$\frac{0,438}{0,438}$
232	+1	65,7	+1	15,7	+1	45,7	9,39	-1	40	-1	0,308	+1	8,35	+1	3,11	+1	0,438
233	-1	34,3	-1	8,34	-1	10,4	3,35	+1	80	-1	0,249	+1	13,5	+1	5,02	+1	0,354
234	+1	65,7	-1		-1	20	3,35	+1	80	-1	0,249	+1	13,5	+1	5,02	+1	0,354
235	-1	34,3	+1	15,7	-1	10,4	6,31	+1	80	-1	0,249	+1	13,5	+1	5,02	+1	0,354
236	+1	65,7	+1	15,7	-1	20	6,31	+1	80	-1	0,249	+1	13,5	+1	5,02	+1	0,354
237	-1	34,3	-1	8,34		23,9	4,99	+1	80	-1	0,249	+1	13,5	+1	5,02	+1	0,354
238	+1	65,7	-1	8,34		45,7	4,99	+1	80	-1	0,249	+1	13,5	+1	5,02	+1	0,354
239	-1	34,3	+1	15,7	+1	23,9	9,39	+1	80	-1	0,249	+1	13,5	+1	5,02	+1	0,354
240	+1	65,7	+1		+1	45,7	9,39	+1	80	-1	0,249	+1	13,5	+1	5,02	+1	0,354
241	-1	34,3	-1		-1	10,4	3,35	-1	40	+1	0,249	+1	8,35	+1	3,11	+1	0,569
242	+1	65,7		8,34		20	3,35	-1	40	+1	0,4	+1	8,35	+1	3,11	+1	0,569
243	-1	34,3	+1	15,7	-1	10,4	6,31	-1	40	+1	0,4	+1	8,35	+1	3,11	+1	0,569
243	+1	65,7	+1	15,7	-1	20	6,31	-1	40	+1	0,4	+1	8,35	+1	3,11	+1	0,569
245	-1	34,3	-1	8,34		23,9	4,99	-1	40	+1	0,4	+1		+1	3,11	+1	0,569
243	+1	65,7	-1		+1	45,7	4,99	-1	40				8,35 8,35			+1	0,569
240	-1							-1 -1	40	+1	0,4	+1		+1	3,11		
248	+1	34,3 65,7	+1	15,7 15,7	+1	23,9 45,7	9,39	-1	40	+1	0,4	+1	8,35 8,35	+1	3,11	+1	0,569
							9,39								3,11		0,569
249	-1	34,3	-1		-1 -1	10,4	3,35	+1	80	+1	0,324	+1	13,5	+1	5,02	+1	0,461
250	+1	65,7	-1			20	3,35	+1	80	+1	0,324	+1	13,5	+1	5,02	+1	0,461
251	-1	34,3	+1	15,7	-1	10,4	6,31	+1	80	+1	0,324	+1	13,5	+1	5,02	+1	0,461
252	+1	65,7	+1 -1	15,7	-1	20	6,31	+1	80	+1	0,324	+1	13,5	+1	5,02	+1	0,461
253		34,3			+1	23,9	4,99	+1	80	+1	0,324	+1	13,5	+1	5,02	+1	0,461
254	+1	65,7	-1	8,34	+1	45,7	4,99	+1	80	+1	0,324	+1	13,5	+1	5,02	+1	0,461
255	-1	34,3	+1	15,7	+1	23,9	9,39	+1	80	+1	0,324	+1	13,5	+1	5,02	+1	0,461
256	+1	65,7	+1	15,7	+1	45,7	9,39	+1	80	+1	0,324	+1	13,5	+1	5,02	+1	0,461
	-2,045 +2,045	17,9 82,1	0	12 12	0	8,95	6	0	60	0	0,302	0	8,72	0	2,18	0	0,393
_						41,05					0,302		8,72		2,18		0,393
259	0	50	-2,045		0	25	2,26	0	60	0	0,302	0	8,72	0	2,18	0	0,393
260	0	50 50	+2,045	19,48		25 5	9,74	0	60	0	0,302	0	8,72	0	2,18	0	0,393
261					2,045		3,6		60		0,302		8,72	0	2,18		0,393
262	0	50	0		12,045	45	8,4	0	10.1	0	0,302	0	8,72 5 16	0	2,18	0	0,393
263	0	50	0	12	0	25	6	-2,045	19,1	0	0,562	0	5,16	0	1,29	0	0,731
264	0	50	0	12	0	25	6	+2,045		0	0,285	0	13,85	0	3,46	0	0,371
265	0	50	0	12	0	25	6	0	60	-2,045	0,221	0	8,72	0	2,18	0	0,287
266	0	50	0		0	25	6	0		+2,045		0	8,72	0	2,18	0	0,498
267	0	50	0	12	0	25	6	0	60	0	0,302		4,66	0	1,165	0	0,393
268	0	50	0		0	25	6	0	60	0		+2,045		0	3,19	0	0,393
269	0	50	0	12	0	25	6	0	60	0	0,302	0		-2,045	0	0	0,393
270	0	50	0	12	0	25	6	0	60	0	0,302	0		+2,045	4,36	0	0,393
271	0	50	0		0	25	6	0	60	0	0,302	0	8,72	0	2,18	-2,045	0,317
272	0	50	0	12	0	25	6	0	60	0	0,302	0	8,72	0	2,18	+2,045	0,468
273	0	50	0	12	0	25	6	0	60	0	0,302	0	8,72	0	2,18	0	0,393

Б.2 Численное исследование статических тепловых характеристик втяжного броневого электромагнита

Для определения влияния факторов на тепловые характеристики обмотки, построим кривые зависимостей относительных температур (3.1)÷(3.3) от значения фактора в кодированном виде. При изменении каждого фактора, другие будут держаться на среднем уровне, соответствующем центру факторного пространства.

Для однообмоточного ВБЭМ полученные зависимости показаны на рисунке Б.1. Для электромагнита с аксиальным расположением обмоток зависимости показаны на рисунках Б.3, с коаксиальным – на рисунке Б.4.

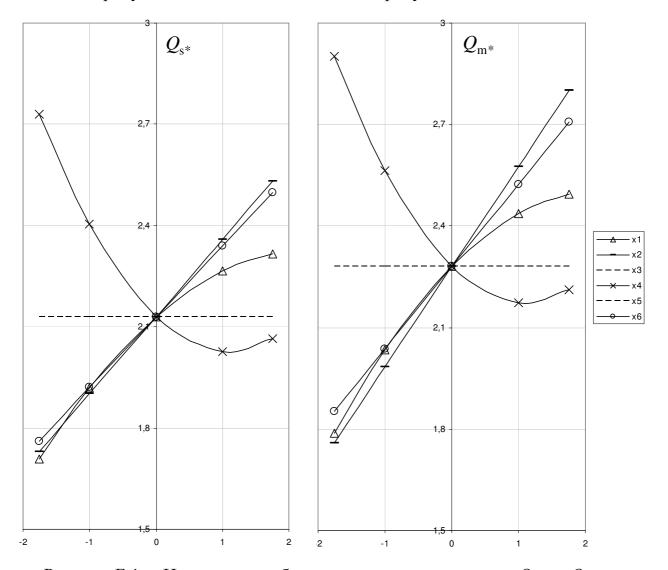


Рисунок Б.1 – Исследование безразмерных характеристик Q_{s^*} и Q_{m^*} от кодированных значений факторов x_i для однообмоточного ВБЭМ

Полученные зависимости адекватно описывают тепловые процессы в ЭМ. При увеличении высоты (при одинаковой ширине), ширины (при одинаковой высоте) обмотки и ее мощности, относительные, а значит и размерные, максимальная и среднеповерхностная температуры увеличиваются.

Проанализируем влияние фактора x_4 , зависящего от температуры окружающей среды T_0 не для относительной максимальной температуры, а для ее размерного значения $\Theta_{\rm m} = Q_{\rm m^*} T_0$ (см. рисунок Б.2).

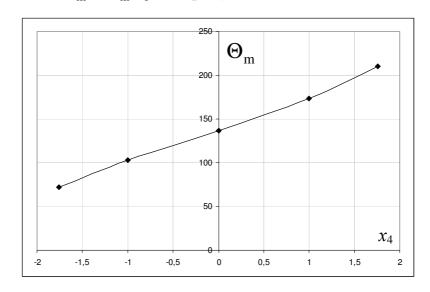


Рисунок Б.2 – Влияние кодированного фактора x_4 на максимальную температуру $\Theta_{\rm m}$ в толще обмотки.

Для двухобмоточного ЭМ с аксиальным расположением имеем те же зависимости для факторов, отвечающих за высоту, ширину обмоточного окна и за мощности обмоток.

При увеличении высоты пусковой обмотки (фактор x_3) относительные температуры падают вследствие уменьшения общей величины теплоты, выделяемой удерживающей обмоткой (при той же величине плотности мощности, ее объем уменьшается).

Как можно видеть по рисунку Б.4 типы зависимостей для относительных среднеповерхностной и максимальной температур схожи с предыдущими. Вместо высоты пусковой обмотки, за объем удерживающей теперь отвечает толщина пусковой обмотки.

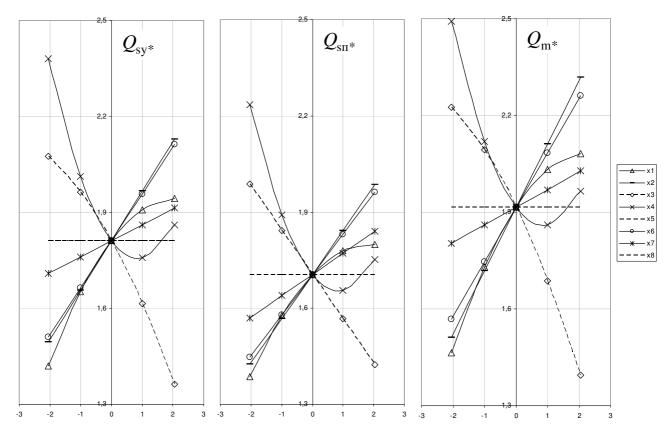


Рисунок Б.3 — Исследование безразмерных характеристик $Q_{\rm sy^*}$, $Q_{\rm sn^*}$ и $Q_{\rm m^*}$ от x_i для МС с аксиальным расположением обмоток

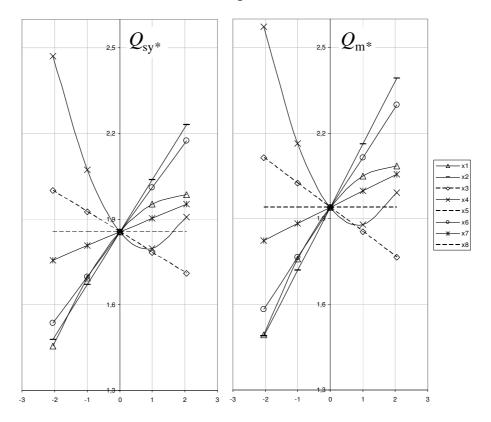


Рисунок Б.4 — Исследование безразмерных характеристик $Q_{\rm sy^*}$ и $Q_{\rm m^*}$ от x_i для МС с коаксиальным расположением обмоток

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Дополнительные материалы по моделированию динамических параметров втяжного броневого электромагнита постоянного напряжения

В.1 Матрица эксперимента

Таблица В.1 – Матрица эксперимента для исследования динамических параметров срабатывания ВБЭМ постоянного напряжения

	(2)	()	(,)	()	(-)			<u> </u>	
z_i	$z_{\scriptscriptstyle 1}(\delta_{\scriptscriptstyle \mathrm{H}}),$	$z_2(H_o),$	$z_3(A_o),$	$z_4(p)$,	$z_5(P_{\scriptscriptstyle{\mathrm{MX.H}}}),$	$z_6(m)$,	$U_{_{\mathrm{H}}}$, B	$R_{_{\Gamma}}$,	N,
u	MM	MM	MM	MM	Н	КГ		Ом	витк.
1	-1(6)	-1(50)	-1(10)	-1(3,9)	-1(1,62)	-1(0,284)	46,6	372,5	6024
2	+1(10)	-1(50)	-1(10)	-1(6,5)	-1(0,683)	-1(0,099)	46,6	372,5	6024
3	-1(6)	+1(70)	-1(10)	-1(3,9)	-1(3,14)	-1(1,47)	60,1	521,6	8434
4	+1(10)	+1(70)	-1(10)	-1(6,5)	-1(1,40)	-1(0,604)	60,1	521,6	8434
5	-1(6)	-1(50)	+1(14)	-1(3,9)	-1(2,41)	-1(0,640)	64,1	582,6	8434
6	+1(10)	-1(50)	+1(14)	-1(6,5)	-1(1,02)	-1(0,224)	64,1	582,6	8434
7	-1(6)	+1(70)	+1(14)	-1(3,9)	-1(4,46)	-1(2,96)	82,1	815,6	11807
8	+1(10)	+1(70)	+1(14)	-1(6,5)	-1(1,99)	-1(1,212)	82,1	815,6	11807
9	-1(6)	-1(50)	-1(10)	+1(4,5)	-1(1,62)	-1(0,284)	46,6	372,5	6024
10	+1(10)	-1(50)	-1(10)	+1(7,5)	-1(0,683)	-1(0,099)	46,6	372,5	6024
11	-1(6)	+1(70)	-1(10)	+1(4,5)	-1(3,14)	-1(1,47)	60,1	521,6	8434
12	+1(10)	+1(70)	-1(10)	+1(7,5)	-1(1,40)	-1(0,604)	60,1	521,6	8434
13	-1(6)	-1(50)	+1(14)	+1(4,5)	-1(2,41)	-1(0,640)	64,1	582,6	8434
14	+1(10)	-1(50)	+1(14)	+1(7,5)	-1(1,02)	-1(0,224)	64,1	582,6	8434
15	-1(6)	+1(70)	+1(14)	+1(4,5)	-1(4,46)	-1(2,96)	82,1	815,6	11807
16	+1(10)	+1(70)	+1(14)	+1(7,5)	-1(1,99)	-1(1,212)	82,1	815,6	11807
17	-1(6)	-1(50)	-1(10)	-1(3,9)	+1(1,98)	-1(0,347)	46,6	372,5	6024
18	+1(10)	-1(50)	-1(10)	-1(6,5)	+1(0,836)	-1(0,121)	46,6	372,5	6024
19	-1(6)	+1(70)	-1(10)	-1(3,9)	+1(3,84)	-1(1,794)	60,1	521,6	8434
20	+1(10)	+1(70)	-1(10)	-1(6,5)	+1(1,71)	-1(0,696)	60,1	521,6	8434
21	-1(6)	-1(50)	+1(14)	-1(3,9)	+1(2,95)	-1(0,781)	64,1	582,6	8434
22	+1(10)	-1(50)	+1(14)	-1(6,5)	+1(1,25)	-1(0,275)	64,1	582,6	8434
23	-1(6)	+1(70)	+1(14)	-1(3,9)	+1(5,46)	-1(3,63)	82,1	815,6	11807
24	+1(10)	+1(70)	+1(14)	-1(6,5)	+1(2,43)	-1(1,481)	82,1	815,6	11807
25	-1(6)	-1(50)	-1(10)	+1(4,5)	+1(1,98)	-1(0,347)	46,6	372,5	6024
26	+1(10)	-1(50)	-1(10)	+1(7,5)	+1(0,836)	-1(0,121)	46,6	372,5	6024
27	-1(6)	+1(70)	-1(10)	+1(4,5)	+1(3,84)	-1(1,794)	60,1	521,6	8434
28	+1(10)	+1(70)	-1(10)	+1(7,5)	+1(1,71)	-1(0,696)	60,1	521,6	8434
29	-1(6)	-1(50)	+1(14)	+1(4,5)	+1(2,95)	-1(0,781)	64,1	582,6	8434
30	+1(10)	-1(50)	+1(14)	+1(7,5)	+1(1,25)	-1(0,275)	64,1	582,6	8434
31	-1(6)	+1(70)	+1(14)	+1(4,5)	+1(5,46)	-1(3,63)	82,1	815,6	11807
32	+1(10)	+1(70)	+1(14)	+1(7,5)	+1(2,43)	-1(1,481)	82,1	815,6	11807
33	-1(6)	-1(50)	-1(10)	-1(3,9)	-1(1,62)	+1(0,365)	46,6	372,5	6024
34	+1(10)	-1(50)	-1(10)	-1(6,5)	-1(0,683)	+1(0,127)	46,6	372,5	6024
35	-1(6)	+1(70)	-1(10)	-1(3,9)	-1(3,14)	+1(1,887)	60,1	521,6	8434

Продолжение таблицы В.1

z_i	$z_{\scriptscriptstyle 1}(\delta_{\scriptscriptstyle \mathrm{H}}),$	$z_2(H_o)$,	$z_3(A_o)$,	$z_4(p)$,	$z_5(P_{\scriptscriptstyle{\mathrm{MX.H}}})$,	$z_6(m)$,	$U_{\scriptscriptstyle \mathrm{H}}$, B	$R_{_{\Gamma}}$,	N ,
u	MM	MM	MM	MM	Н	ΚΓ		Ом	витк.
36	+1(10)	+1(70)	-1(10)	-1(6,5)	-1(1,40)	+1(0,776)	60,1	521,6	8434
37	-1(6)	-1(50)	+1(14)	-1(3,9)	-1(2,41)	+1(0,882)	64,1	582,6	8434
38	+1(10)	-1(50)	+1(14)	-1(6,5)	-1(1,02)	+1(0,288)	64,1	582,6	8434
39	-1(6)	+1(70)	+1(14)	-1(3,9)	-1(4,46)	+1(3,80)	82,1	815,6	11807
40	+1(10)	+1(70)	+1(14)	-1(6,5)	-1(1,99)	+1(1,56)	82,1	815,6	11807
41	-1(6)	-1(50)	-1(10)	+1(4,5)	-1(1,62)	+1(0,365)	46,6	372,5	6024
42	+1(10)	-1(50)	-1(10)	+1(7,5)	-1(0,683)	+1(0,127)	46,6	372,5	6024
43	-1(6)	+1(70)	-1(10)	+1(4,5)	-1(3,14)	+1(1,887)	60,1	521,6	8434
44	+1(10)	+1(70)	-1(10)	+1(7,5)	-1(1,40)	+1(0,776)	60,1	521,6	8434
45	-1(6)	-1(50)	+1(14)	+1(4,5)	-1(2,41)	+1(0,882)	64,1	582,6	8434
46	+1(10)	-1(50)	+1(14)	+1(7,5)	-1(1,02)	+1(0,288)	64,1	582,6	8434
47	-1(6)	+1(70)	+1(14)	+1(4,5)	-1(4,46)	+1(3,80)	82,1	815,6	11807
48	+1(10)	+1(70)	+1(14)	+1(7,5)	-1(1,99)	+1(1,56)	82,1	815,6	11807
49	-1(6)	-1(50)	-1(10)	-1(3,9)	+1(1,98)	+1(0,446)	46,6	372,5	6024
50	+1(10)	-1(50)	-1(10)	-1(6,5)	+1(0,836)	+1(0,155)	46,6	372,5	6024
51	-1(6)	+1(70)	-1(10)	-1(3,9)	+1(3,84)	+1(2,30)	60,1	521,6	8434
52	+1(10)	+1(70)	-1(10)	-1(6,5)	+1(1,71)	+1(0,894)	60,1	521,6	8434
53	-1(6)	-1(50)	+1(14)	-1(3,9)	+1(2,95)	+1(1,00)	64,1	582,6	8434
54	+1(10)	-1(50)	+1(14)	-1(6,5)	+1(1,25)	+1(0,353)	64,1	582,6	8434
55	-1(6)	+1(70)	+1(14)	-1(3,9)	+1(5,46)	+1(4,66)	82,1	815,6	11807
56	+1(10)	+1(70)	+1(14)	-1(6,5)	+1(2,43)	+1(1,902)	82,1	815,6	11807
57	-1(6)	-1(50)	-1(10)	+1(4,5)	+1(1,98)	+1(0,446)	46,6	372,5	6024
58	+1(10)	-1(50)	-1(10)	+1(7,5)	+1(0,836)	+1(0,155)	46,6	372,5	6024
59	-1(6)	+1(70)	-1(10)	+1(4,5)	+1(3,84)	+1(2,30)	60,1	521,6	8434
60	+1(10)	+1(70)	-1(10)	+1(7,5)	+1(1,71)	+1(0,894)	60,1	521,6	8434
61	-1(6)	-1(50)	+1(14)	+1(4,5)	+1(2,95)	+1(1,00)	64,1	582,6	8434
62	+1(10)	-1(50)	+1(14)	+1(7,5)	+1(1,25)	+1(0,353)	64,1	582,6	8434
63	-1(6)	+1(70)	+1(14)	+1(4,5)	+1(5,46)	+1(4,66)	82,1	815,6	11807
64	+1(10)	+1(70)	+1(14)	+1(7,5)	+1(2,43)	+1(1,902)	82,1	815,6	11807
65	-1,761 (4,48)	0(60)	0(12)	0 (3,14)	0 (5,03)	0(2,215)	63,3	567,6	8675
66	+1,761(11,52)	0(60)	0(12)	0 (8,06)	0(1,18)	0 (0,489)	63,3	567,6	8675
67	0(8)	-1,761(42,4)	0(12)	0(5,6)	0(1,04)	0(0,156)	49,3	401,1	6130
68	0(8)	+1,761(77,6)	0(12)	0(5,6)	0(3,34)	0(2,763)	77,4	734,1	11219
69	0(8)	0(60)	-1,761(8,48)	0(5,6)	0(1,48)	0 (0,484)	45,6	362	6130
70	0(8)	0(60)	+1,761(15,52)	0(5,6)	0 (2,58)	0(1,306)	80,5	806,2	11219
71	0(8)	0(60)	0(12)	-1,761(4,90)	0(1,99)	0(0,781)	63,3	567,6	8675
72	0(8)	0(60)	0(12)	+1,761(6,30)	0(1,99)	0(0,781)	63,3	567,6	8675
73	0(8)	0(60)	0(12)	0(5,6)	-1,761(1,64)	0 (0,643)	63,3	567,6	8675
74	0(8)	0(60)	0(12)	0(5,6)	+1,761(2,34)	0(0,918)	63,3	567,6	8675
75	0(8)	0(60)	0(12)	0(5,6)	0(1,99)	-1,761 (0,619)	63,3	567,6	8675
76	0(8)	0(60)	0(12)	0(5,6)	0(1,99)	+1,761(0,963)	63,3	567,6	8675
77	0(8)	0(60)	0(12)	0 (5,6)	0(1,99)	0(0,781)	63,3	567,6	8675

В.2 Описание методики определения критериев подобия для моделирования динамических параметров втяжного броневого электромагнита постоянного напряжения

В.2.1 Расчет мощности тепловыделения

Необходимый тепловой расчет обмотки произведен с помощью ранее полученных критериальных зависимостей (3.1)÷(3.2) для максимальной температуры нагрева $\Theta_{\rm m}$ и средней температуры по объему обмотки $\Theta_{\rm v}$.

Принимаем температуру окружающей среды $T_0=40^\circ C$, следовательно $x_4=0.05\cdot T_0-3=-1$, значение максимальной температуры в толще обмотки $\Theta_{\rm m}=120^\circ C$, тогда $Q_{\rm m^*}=\frac{\Theta_{\rm m}}{T_0}=\frac{120}{40}=3$. Подставляя полученные значения в (3.1) получаем:

$$300 = 202,6 + 16,2x_1 + 24,5x_2 + 18,2 + 19,7x_6 - 3,7x_1^2 + 7,3 + 5,1x_1x_2 + 3,6x_1 + 4,8x_2 + 2,9x_1x_6 + 4,5x_2x_6 + 3,6x_6,$$

$$71,9 = 19,8x_1 - 3,7x_1^2 + 28,3x_2 + 5,1x_1x_2 + x_6(23,3 + 2,9x_1 + 4,5x_2).$$

Откуда

$$x_6 = \frac{71.9 - M}{Y},\tag{B.1}$$

где
$$M = 19.8x_1 - 3.7x_1^2 + 28.3x_2 + 5.1x_1x_2$$
, $Y = 23.3 + 2.9x_1 + 4.5x_2$.

Из выражения (3.2) получаем:

$$\Theta_{v} = 0.4(191.3 + 14.6x_{1} + 20.5x_{2} + 17.2 - 3.1x_{1}^{2} + 6.9 + 4x_{1}x_{2} + 3.2x_{1} + 3.7x_{2} + x_{6}(20.8 + 2.6x_{1} + 3.6x_{2})),$$

$$\Theta_{v} = 0.4(215.4 + 17.8x_1 + 24.7x_2 - 3.1x_1^2 + 4x_1x_2 + x_6(20.8 + 2.6x_1 + 3.6x_2)).$$
 (B.2)

Для пересчета значений факторов на выбранный диапазон варьирования из таблицы для подстановки в (B.1) и (B.2) составим вспомогательную таблицу B.2.

Вычислим значения Θ_v для характерных номеров опытов, используя выражения (В.1), (В.2) и таблицу В.2. Рассчитанные данные показаны в таблице В.3. По полученным данным (см. таблицу В.3) видно, что среднеобъемная температура практически одинакова для всех опытов и можно с погрешностью менее 0.5% принять среднее значение для температуры обмотки $(\Theta_v)_{\text{средн}} = 112.4^{\circ}C$.

Таблица В.2

Диапазон H_{o^*}	2,12	2,5	3,0	3,5	3,88
$x_1 = 1,272H_{o^*} - 3,181$	-0,484	0	0,635	1,271	1,754
Диапазон A_{o^*}	0,424	0,5	0,6	0,7	0,776
$x_2 = 5,464A_{0^*} - 3,279$	-0,962	-0,547	0	0,546	0,961

Таблица В.3

№ опыта <i>и</i>	Z_2	Z_3	x_1	x_2	M	Y	x_6	$\Theta_{\rm v}$, °C
1; 2	2,5	0,5	0	-0,547	-14,93	20,7	4,146	112,4
3; 4	3,5	0,5	1,271	-0,547	1,218	24,39	2,857	114,3
5; 6	2,5	0,7	0	0,546	14,91	25,29	2,037	111,5
7; 8	3,5	0,7	1,271	0,546	38,14	28,98	1,13	111,7
	,	,	,	,	,	,	,	, ,
65	3,0	0,6	0,635	0	11,34	24,84	2,398	112,2
67	2,12	0,6	-0,484	0	-10,64	21,6	3,853	112,4
68	3,88	0,6	1,754	0	24,05	28,09	1,668	112,6
69	3,0	0,424	0,635	-0,962	-18,04	20,8	4,276	113,1
70	3,0	0,776	0,635	0,961	40,68	28,88	1,046	111,3

Максимальная магнитодвижущая сила, вырабатываемая обмоткой с известными геометрическими размерами и при заданной температуре нагрева, равна:

$$F_{\text{max}} = \sqrt{P_{_{3\Pi}}} \sqrt{\frac{H_{_{0}} A_{_{0}} K_{_{3}}}{\rho_{_{\Gamma}} \pi (d_{_{9K}} + 2\Delta_{_{K}} + A_{_{0}})}},$$
 (B.3)

где $P_{\rm эл} = qV$ — потери мощности в обмотке при температуре нагрева $\left(\Theta_{\rm v}\right)_{\rm cneлн} = 112,4^{\circ}C\,;$

 $\rho_{_{\Gamma}} = 1{,}62 \cdot 10^{-8} \big(1 + 0{,}0043 \cdot 112{,}4\big) = 2{,}403 \cdot 10^{-8} \, O_{M} \cdot _{M} - \text{удельное сопротивление}$ материала провода обмотки при $\big(\Theta_{_{V}}\big)_{_{\text{средн}}} = 112{,}4^{\circ}C$.

Из [49] мощность тепловыделения:

$$P_{_{9\Pi}} = qV = qA_{_{0}}H_{_{0}}\pi d_{_{9K}}(1,2 + A_{_{0}*}) = qA_{_{0}*}H_{_{0}*}(1,2 + A_{_{0}*})\pi d_{_{9K}}^{3}, \qquad (B.4)$$

где $V = A_{\rm o} H_{\rm o} \pi d_{\rm sk} (1.2 + A_{\rm o^*})$ – объем, занимаемый обмоткой ЭМ.

Подставляя (В.4) в (В.3) получим:

$$F_{\text{max}} = \sqrt{qA_{0*}H_{0*}(1,2+A_{0*})\pi d_{\text{gk}}^{3}} \sqrt{\frac{A_{0*}H_{0*}K_{3}d_{\text{gk}}^{2}}{\rho_{\Gamma}\pi d_{\text{gk}}(1,2+A_{0*})}},$$

$$F_{\text{max}} = \sqrt{\frac{q}{\rho_{\Gamma}}K_{3}}A_{0*}H_{0*}d_{\text{gk}}^{2}.$$
(B.5)

Преобразуем выражение для $K_{\text{т.баз}}$:

$$K_{\text{\tiny T.6a3}} \cdot T_0 = 5,67(2,73+0,01T_0)^4 \frac{T_0}{T_0} = 5,67(2,73+0,01\cdot40)^4 = 544,2.$$

Учитывая

$$x_6 = 1,761q_* - 4,401 = 1,761 \frac{q \cdot d_{\text{MK}}}{K_{\text{T.6a3}} \cdot T_0} - 4,401,$$

для плотности тепловых потерь обмотки q можно записать:

$$q = \frac{544.2}{20 \cdot 10^{-3}} \frac{x_6 + 4.401}{1.761} = 1.545 \cdot 10^4 (x_6 + 4.401).$$
 (B.6)

Тогда, объединяя (В.5) и (В.6), получим:

$$F_{\text{max}} = \frac{\sqrt{K_3 d_{\text{sk}}^2}}{\sqrt{\rho_{\Gamma}}} \sqrt{1,545} \cdot 10^2 \sqrt{x_6 + 4,401} A_{\text{o*}} H_{\text{o*}},$$

$$F_{\text{max}} = \frac{\sqrt{0.5} (20 \cdot 10^{-3})^2}{\sqrt{2.403} \cdot 10^{-4}} \sqrt{1.545} \cdot 10^2 \sqrt{x_6 + 4.401} A_{0*} H_{0*},$$

$$F_{\text{max}} = 227\sqrt{x_6 + 4,401}A_{0^*}H_{0^*} = 227\sqrt{x_6 + 4,401}Z_2Z_3.$$
 (B.7)

Для объема, занимаемой обмоткой можно записать:

$$V = A_{o}H_{o}\pi d_{gK}(1,2 + A_{o*}) = 25,12 \cdot 10^{-6}(1,2 + A_{o*})A_{o*}H_{o*}.$$
 (B.8)

Мы получили выражения (В.6), (В.7) и (В.8), с помощью которых можем рассчитать, зная геометрические размеры, величину $P_{\scriptscriptstyle 3Л}$, необходимую для расчета критерия Z_5 :

$$P_{\text{\tiny 3JI}} = 0.388(x_6 + 4.401) \cdot (1.2 + A_{\text{\tiny 0*}}) A_{\text{\tiny 0*}} H_{\text{\tiny 0*}}.$$
 (B.9)

Рассчитаем $P_{\text{эл}}$ для характерных номеров опытов, продолжив таблицу В.3. (таблица В.4).

Таблица В.4

№ опыта	Z_2	Z_3	x_6	$F_{\rm max}$, A	$q \cdot 10^4$,	$V \cdot 10^{-6}$,	$P_{\scriptscriptstyle \mathrm{ЭЛ}}$, Вт
и					BT/M^3	\mathbf{M}^3	
1; 2	2,5	0,5	4,146	830	13,21	53,38	7,05
3; 4	3,5	0,5	2,857	1070	11,21	74,73	8,38
5; 6	2,5	0,7	2,214	1022	10,22	83,52	8,54
7; 8	3,5	0,7	1,13	1308	8,55	117	10,0
65	3,0	0,6	2,398	1065	10,50	81,39	8,55
67	2,12	0,6	3,853	830	12,75	57,51	7,33
68	3,88	0,6	1,668	1247	9,38	105,3	9,87
69	3,0	0,424	4,276	851	13,41	51,89	6,96
70	3,0	0,776	1,046	1233	8,42	116	9,73

В.2.2 Расчет электромагнитной постоянной времени

Для расчета электромагнитной постоянной времени обмотки $au_{\scriptscriptstyle {
m HB}}$ используем выражение:

$$\tau_{\scriptscriptstyle \rm HB} = \frac{L_{\scriptscriptstyle \rm H}}{R_{\scriptscriptstyle '_{\rm 2KB}}},\tag{B.10}$$

где $R_{_{9 \text{KB}}}$ — приведенное активное сопротивление обмотки с учетом влияния вихревых токов, обусловленных вторичными контурами тока, проходящего по якорю, стопу, фланцам и корпусу ЭМ;

 $L_{\!\scriptscriptstyle
m H}$ — индуктивность системы, вычисленная для начального положения якоря.

Для расчета $R_{_{_{9KB}}}$ используем формулы Клименко Б.В. [86]:

$$R_{_{9KB}} = \frac{R_{_{\Gamma}}R_{_{9}}'}{R_{_{\Gamma}} + R_{_{9}}'},$$
 (B.11)

где $R_{_{\Gamma}} = \rho_{_{\Gamma}} \frac{\pi (1 + 2\Delta_{_{\mathrm{K}^*}} + A_{_{\mathrm{O}^*}})}{d_{_{\mathrm{NK}}} A_{_{\mathrm{O}^*}} H_{_{\mathrm{O}^*}} K_{_3}} N^2$ – сопротивление обмотки при температуре

нагрева $(\Theta_{v})_{cpeдh}$;

$$R_{_{9}}^{'} = \left(\frac{N^2}{R_{_{9.9K}}} + \frac{N^2}{R_{_{9.CT}}} + \frac{N^2}{R_{_{9.Пф}}} + \frac{N^2}{R_{_{9.Корп}}}\right)^{-1}$$
 — эквивалентное сопротивление

вторичных контуров вихревых токов;

$$R_{_{9.\mathrm{ЯK}}} = \frac{8\pi \rho_{_{\mathrm{CT}}}}{H + 2\Delta_{_{\mathrm{K}}} - H_{_{\mathrm{CT}}} - \delta_{_{\mathrm{H}}}} = \frac{8\pi \rho_{_{\mathrm{CT}}}}{d_{_{\mathrm{ЯK}}} (H_{_{\mathrm{O}^*}} (1 - H_{_{\mathrm{CT}^*}}) + 2\Delta_{_{\mathrm{K}^*}} - \delta_{_*})} \quad - \quad \text{эквивалентное}$$

сопротивление вторичного контура токов, проходящих по якорю ЭМ;

$$R_{\text{э.ст}} = \frac{8\pi\rho_{\text{ст}}}{d_{\text{як}}(\Delta_{\text{к*}} + H_{\text{o*}}H_{\text{ст*}})}$$
 – эквивалентное сопротивление вторичного

контура токов, проходящих по стопу ЭМ;

$$R_{\text{э.пф}} = \frac{\rho_{\text{ст}}}{0.25 d_{\text{як}}} \cdot \frac{24\pi}{\ln k_4}$$
 — эквивалентное сопротивление вторичного контура

токов, проходящих по проходному фланцу ЭМ, $k_4 = \frac{D_{\scriptscriptstyle \rm B}}{d_{\scriptscriptstyle \rm gK} + 2\nu} = \frac{1 + 4\Delta_{\scriptscriptstyle \rm K^*} + 2A_{\scriptscriptstyle \rm O^*}}{1 + 2\nu_*}$;

$$R_{_{9.\text{КОРII}}} = \frac{8\pi\rho_{_{\text{CT}}}}{d_{_{\text{NK}}}} \cdot \frac{1}{\left(H_{_{\text{O}^*}} + 2\Delta_{_{\text{K}^*}} + 0.5\right)} \cdot \frac{\left(k_3^2 - 1\right)^2}{k_3^2 \left(k_3^2 + 4\left(1 - k_3^2\left(1 - \ln k_3\right)\right)\right) - 1} - \frac{1}{k_3^2 \left(k_3^2 + 4\left(1 - k_3^2\left(1 - \ln k_3\right)\right)\right) - 1}$$

эквивалентное сопротивление вторичного контура токов, проходящих по

корпусу ЭМ,
$$k_3 = \frac{D_{_{\rm H}}}{D_{_{\rm B}}} = \sqrt{1 + \left(\frac{d_{_{\rm ЯК}}}{D_{_{\rm B}}}\right)^2} = \sqrt{1 + \frac{1}{\left(1 + 4\Delta_{_{\rm K}*} + 2A_{_{\rm O}*}\right)^2}}$$
.

Для расчета индуктивности используем ранее полученные критериальные зависимости (2.10)÷(2.12) для статических нагрузочных характеристик электромагнита: электромагнитной силы P_* , потокосцепления Ψ_* и магнитодвижущей силы F_* , каждая из которых является функцией, зависящей от воздушного рабочего зазора, геометрических факторов и магнитной индукции в наиболее насыщенном участке магнитопровода ЭМ $f(\delta_{_{\rm H}}, x_i, B_{_{\rm m}})$.

Базисные характеристики равны: $P_{\text{баз}} = \frac{B_{\text{m}}^2 \pi d_{\text{як}}^2}{8\mu_0}, \qquad F_{\text{баз}} = \frac{B_{\text{m}}}{\mu_0} d_{\text{як}},$

$$\Psi_{\text{баз}} = \frac{B_{\text{m}}\pi d_{\,\text{як}}^2 N}{4}$$
. Тогда для индуктивности можно записать $L_{\scriptscriptstyle ext{H}} = \frac{\Psi}{i} = N\, \frac{\Psi_{*_{\scriptscriptstyle \Gamma}}\Psi_{\text{баз}}}{F_{*_{\scriptscriptstyle \Gamma}}F_{\text{баз}}}.$

После подстановки получаем:

 $+b_{14}x_1x_4+b_{26}x_2x_6)^2$

$$L_{\rm H} = \frac{\mu_0 \pi d_{_{\rm SK}}}{4} N^2 \frac{\Psi_{*_{\Gamma}}}{F_{*_{\Gamma}}}. \tag{B.12}$$

$$\text{Чесь } \Psi_* = 10^{-3} (c_0 + c_1 x_1 + c_2 x_2 + c_4 x_4 + c_5 x_5 + c_6 x_6 + c_{11} x_1^2 + c_{22} x_2^2 + c_{33} x_3^2 +$$

где
$$b_0=193,6+868,7\delta_*-1363,9\delta_*^2+932,7\delta_*^3$$
;
$$b_1=2,8-71,2\delta_*+12,2\delta_*^2+17,1\delta_*^3\;;\;b_2=-7,8+77,7\delta_*-16,4\delta_*^2-63,6\delta_*^3\;;\;b_6=23-41,3\delta_*+135,1\delta_*^2-92,9\delta_*^3\;;\;b_{22}=-4,1-42,2\delta_*+79,3\delta_*^2-84,8\delta_*^3\;;\;b_{44}=-0,8-10,3\delta_*+17,6\delta_*^2-17,1\delta_*^3\;;\;b_{66}=-5,6+3,1\delta_*+22,8\delta_*^2-33,6\delta_*^3\;;\;b_{12}=-3,5+50,6\delta_*-125,5\delta_*^2+123,8\delta_*^3\;;b_{14}=0,2+12,8\delta_*-10,2\delta_*^2+5\delta_*^3\;;\;b_{26}=5,4+50,4\delta_*-76,4\delta_*^2+53,8\delta_*^3\;,$$

Кодированные факторы:

$$x_1 = 1,272 H_{o^*} - 3,181, \qquad x_2 = 7,634 H_{cr^*} - 1,908 = 7,634 \cdot 0,12 - 1,908 = -1,$$

$$x_3 = 12,723 H_{B^*} - 4,453 = 12,723 \cdot 0,35 - 4,453 = 0, \qquad x_4 = 5,456 A_{o^*} - 3,273,$$

$$x_5 = 95,42 v_* - 2,862 = 95,42 \cdot 0,03 - 2,862 = 0, \quad x_6 = 4,237 B_{m} - 5,508.$$

Преобразуем, подставляя известные данные для граничной точки с индукцией $B_{\rm m.r}=1{,}1T\pi$, $x_6=4{,}237B_{\rm m.r}-5{,}508=-0{,}8473$:

$$\Psi_{*_{\Gamma}} = 10^{-3} (c_0 + c_1 x_1 - c_2 + c_4 x_4 - 0.8473 c_6 + c_{11} x_1^2 + c_{22} + c_{44} x_4^2 + 0.7179 c_{66} - c_{12} x_1 - 0.8473 c_{16} x_1 + 0.8473 c_{26}),$$

Получим:

$$\Psi_{*_{\Gamma}} = 10^{-2} (\overline{c_0} + \overline{c_1} x_1 + c_2 x_2 + c_{11} x_1^2 + c_{22} x_2^2), \tag{B.13}$$

где $\overline{c_0} = 835.9 + 158.9\delta_* - 1300.6\delta_*^2 + 1163.8\delta_*^3$;

$$\overline{c_1} = 42,6 - 457,6\delta_* + 1072,5\delta_*^2 - 810,9\delta_*^3; c_2 = -1,1 + 102,8\delta_* - 117,8\delta_*^2 + 57,5\delta_*^3;$$

$$c_{11} = -13,6 + 65,3\delta_* - 39,8\delta_*^2 - 25,5\delta_*^3; c_{22} = -8,8 + 11\delta_* - 21,8\delta_*^2;$$

$$x_1 = 1,272H_{0^*} - 3,181; x_2 = 5,456A_{0^*} - 3,273.$$

Аналогично преобразуем F_* и получим:

$$F_{*_{\Gamma}} = 10^{-6} (\overline{b_0} + \overline{b_1} x_1 + b_{22} x_2^2 + b_{12} x_1 x_2)^2,$$
(B.14)

где $\overline{b_0} = 178,4 + 828,7 \delta_* - 1430,7 \delta_*^2 + 1011,7 \delta_*^3;$

$$\overline{b_1} = 6.3 - 121.8\delta_* + 137.7\delta_*^2 - 106.7\delta_*^3; \ b_{22} = -0.8 - 10.3\delta_* + 17.6\delta_*^2 - 17.1\delta_*^3;$$

$$b_{12} = 0.2 + 12.8\delta_* - 10.2\delta_*^2 + 5\delta_*^3.$$

Тогда электромагнитную постоянную времени обмотки можно рассчитать, используя (B.13)÷(B.14):

$$\tau_{_{\rm HB}} = \frac{1}{R_{_{^{9{\rm KB}}}}} \frac{\mu_0 \pi d_{_{\rm SK}}}{4} N^2 \frac{\Psi_{*_{_{\Gamma}}}}{F_{*_{_{\Gamma}}}}.$$
 (B.15)

Рассчитанные данные $au_{\text{нв}}$ для характерных номеров опытов показаны в таблице В.5.

Таблица В.5

№ опыта и	$R_{\scriptscriptstyle \mathrm{9KB}} \cdot N^2 \cdot 10^{-5}, \mathrm{Om}$	$\Psi_{*_{\Gamma}}$	$F_{*_{\Gamma}}$	$\tau_{\text{\tiny HB}} \cdot 10^{-3}, \text{c}$
1	0,8996	0,7935	0,06937	18,03
2	0,9054	0,7248	0,1246	12,68
3	0,6413	0,7808	0,08161	29,42
4	0,6456	0,7270	0,1014	21,87
5	0,7309	0,8139	0,0992	22,15
6	0,7366	0,7484	0,1284	15,62
7	0,5228	0,8012	0,0862	35,04
8	0,5257	0,7505	0,1082	26,01
65	0,6614	0,8258	0,0794	30,98
66	0,6696	0,7122	0,1119	18,74
67	0,9414	0,7810	0,1228	13,29
68	0,5148	0,7757	0,0934	31,8
69	0,8295	0,7345	0,0875	19,98
70	0,5775	0,7737	0,1062	24,88
77	0,6653	0,7541	0,1021	21,89

В.2.3 Расчет начального противодействующего усилия

Для расчета противодействующего усилия $P_{\rm мx.h}$ используем выражение (2.7) (см. рисунок 2.3, б и В.1):

$$P_{\text{\tiny MX.H}} = P_{\text{\tiny 9M.T.\Gamma}} \left(\frac{F_{\text{cp}}}{F_{\Gamma}} \right)^2, \tag{B.16}$$

основывающееся на равенстве электромагнитного усилия $P_{_{\rm ЭМ.Т.cp}} = P_{_{\rm MX.H}}$ противодействующей силе при срабатывании ЭМ, где $F_{\rm cp}$ — магнитодвижущая сила срабатывания обмотки.

Определим $F_{\rm cp}$, исходя из [146]: $F_{\rm hom} = F_{\rm max}/1$,1, $F_{\rm cp} = 0$,7 $F_{\rm hom}$. Откуда

$$F_{\rm cp} = 0.7 \, \frac{227 \sqrt{x_6 + 4.401}}{1.1} \, Z_2 Z_3.$$

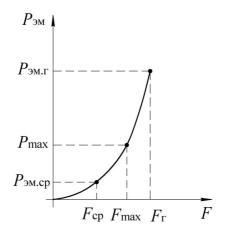


Рисунок В.1 – К представлению нагрузочной характеристики

Преобразуем P_* (2.10), подставляя известные данные:

$$\begin{split} P_* &= 10^{-6} \, a_0 + a_1 x_1 - a_2 + a_4 x_4 - 0,8473 a_6 + a_{11} x_1^2 + a_{22} + a_{44} x_4^2 + 0,7179 a_{66} - \\ &- a_{12} x_1 + a_{14} x_1 x_4 - 0,8473 a_{16} x_1 + 0,8473 a_{26} - 0,8473 a_{46} x_4 + 0,8473 a_{126} x_1 - \\ &- 0,8473 a_{146} x_1 x_4 + 0,8473 a_{246} x_4, \\ \text{где } a_0 &= 796,6 - 2121,6 \delta_* + 3876,1 \delta_*^2 - 2268,1 \delta_*^3 \, ; \\ a_1 &= -5,6 - 247,4 \delta_* + 370,7 \delta_*^2 - 164 \delta_*^3 \, ; \, a_2 = -17,5 + 297,6 \delta_* - 590,2 \delta_*^2 + 271,6 \delta_*^3 \, ; \\ a_4 &= 0,3 + 61,7 \delta_* - 179,4 \delta_*^2 + 133,6 \delta_*^3 \, ; \\ a_6 &= 148,9 - 961,8 \delta_* + 3211,6 \delta_*^2 - 4519,7 \delta_*^3 + 2273,1 \delta_*^4 \, ; \\ a_{11} &= -12,1 + 78,3 \delta_* - 65,5 \delta_*^2 - 48,1 \delta_*^3 \, ; \, a_{22} = -36,5 + 56,8 \delta_* - 90,2 \delta_*^2 - 1,8 \delta_*^3 \, ; \\ a_{44} &= -7,5 + 5,4 \delta_* - 6,8 \delta_*^2 \, ; \, a_{66} &= -47 + 218,3 \delta_* - 380,3 \delta_*^2 + 213,6 \delta_*^3 \, ; \end{split}$$

$$\begin{split} a_{12} &= -9, 3 + 157, 1\delta_* - 402, 8\delta_*^2 + 368, 3\delta_*^3; \ a_{14} = 3, 7 + 19, 8\delta_* - 16, 3\delta_*^2; \\ a_{16} &= -23, 9 + 221, 5\delta_* - 928, 9\delta_*^2 + 1461, 7\delta_*^3 - 761, 4\delta_*^4; \\ a_{26} &= 43, 3 - 22, 1\delta_* + 14, 5\delta_*^2; \ a_{46} = 2, 5 - 40, 6\delta_* + 75, 3\delta_*^2 - 47, 4\delta_*^3; \\ a_{126} &= 8, 4 - 65, 2\delta_* + 74\delta_*^2; \ a_{146} = 2 + 10, 3\delta_* - 10, 5\delta_*^2; \ a_{246} = -2, 6 - 2, 2\delta_*. \end{split}$$

Получим:

$$P_{*_{\Gamma}} = 10^{-6} (\overline{a_0} + \overline{a_1} x_1 + \overline{a_2} x_2 + a_{11} x_1^2 + a_{22} x_2^2 + \overline{a_{12}} x_1 x_2)^2,$$
 (B.17)
где $\overline{a_0} = 654,4 - 1409,5\delta_* + 1394,2\delta_*^2 + 1441,4\delta_*^3 - 1926\delta_*^4;$
 $\overline{a_1} = 31,1 + 161,6\delta_* + 1623,3\delta_*^2 - 1770,8\delta_*^3 + 645,1\delta_*^4;$
 $\overline{a_2} = -4 + 94,2\delta_* - 243,2\delta_*^2 + 173,8\delta_*^3; \ \overline{a_{12}} = 2 + 11,1\delta_* - 7,4\delta_*^2;$
 $x_1 = 1,272H_{o^*} - 3,181; \ x_2 = 5,456A_{o^*} - 3,273.$

При заданном значении $B_{\rm m.r}=1{,}1T\pi$ можем определить значение $P_{\rm мx.h}$ для каждого опыта по (B.16) (см. таблицу B.6).

Таблица В.6

3.0				
№ опыта и	$F_{\rm max}$, A	$F_{\rm cp}$, A	$P_{\scriptscriptstyle ext{MX.H}}$, H	
1	830	528	2,13	
2	830	528	0,934	
3	1070	681	3,79	
4	1070	681	2,51	
5	1022	650	3,21	
6	1022	650	1,39	
7	1308	832	5,36	
8	1308	832	3,43	
65	1065	677	4,15	
66	1065	677	2,466	
67	830	530	1,237	
68	1247	793	3,66	
69	851	541	1,92	
70	1233	788	3,01	
77	1064	677	2,31	

Масса якоря $m_{_{\rm ЯК}}$ определяется по формуле:

$$m_{_{\mathsf{NK}}} = \rho_{_{\mathsf{CT}}} \cdot l_{_{\mathsf{NK}}} \cdot S_{_{\mathsf{NK}}}, \tag{B.18}$$

где $l_{\text{як}} = 2\Delta_{\text{к}} + H_{\text{o}} + H_{\text{в}} - H_{\text{ст}} -$ длина якоря;

$$S_{_{\mathrm{ЯК}}} = \frac{\pi d_{_{\mathrm{ЯК}}}^2}{4}$$
 – площадь поперечного сечения якоря;

$$\rho_{\rm cr} = 7800 \frac{\kappa z}{M^3} -$$
плотность материала якоря.

Подставляя известные данные в (В.18) имеем:

$$l_{\text{MK}} = d_{\text{MK}} (H_{\text{B*}} + 2\Delta_{\text{K*}} + H_{\text{O*}} (1 - H_{\text{CT*}})) = d_{\text{MK}} (0.35 + 2.0.1 + H_{\text{O*}} (1 - 0.12)),$$

$$l_{\text{MK}} = d_{\text{MK}} (0.55 + 0.88 H_{\text{O*}}),$$

$$S_{\text{MK}} = \frac{3.14 (20 \cdot 10^{-3})^2}{4} = 3.14 \cdot 10^{-4} M^2,$$

$$m_{\text{MK}} = 7800 \cdot 3.14 \cdot 10^{-4} \cdot 2 \cdot 10^{-2} (0.55 + 0.88 H_{\text{O*}}),$$

$$m_{\text{MK}} = 48.98 \cdot 10^{-3} (0.55 + 0.88 H_{\text{O*}}).$$
(B.19)

С помощью вышеприведенных формул (В.15), (В.16), (В.19) были рассчитаны диапазоны варьирования для оставшихся критериев подобия Z_5 и Z_6 (таблица В.7). В результате составления матрицы для 6 факторов число опытов составило $n_{\Sigma}=2^6+2\cdot 6+1=77$.

Проведение опыта в программе FEMM требует дополнительных данных о номинальном напряжении источника питания $U_{\rm H}$, подключаемого к катушке, сопротивления ее в горячем состоянии $R_{\rm F}$, числе ее витков N. Эти данные рассчитываются по следующим формулам (для провода ПЭВ-1, $d_{\rm M}=0.23$ мм, $K_{\rm R}=0.5$):

$$N = \frac{A_{\rm o}H_{\rm o}K_{\rm 3}}{q_{\rm m}}; \tag{B.20}$$

$$R_{\Gamma} = \rho_{\Gamma} \frac{l_{\rm cp} N}{q_{\rm M}},\tag{B.21}$$

где $l_{\rm cp} = \pi d_{\rm sk} (1 + 2\Delta_{\rm k*} + A_{\rm o*}).$

$$U_{\rm H} = \frac{U_{\rm max}}{1,1} = \frac{\sqrt{P_{\rm 9J}R_{\rm F}}}{1,1}.$$
 (B.22)

Матрица эксперимента приведена в таблице В.1.

За базисные значения скорости и времени принимаем $V_{\rm баз} = \frac{d_{_{
m ЯК}}}{ au_{_{
m HB}}}$ электромагнитную постоянную времени, рассчитанную по формуле (В.15).

Таблица В.7

№опыта	$v_{\rm 6a3}$, M/c	$\tau_{\scriptscriptstyle \rm HB} \cdot 10^3$, c	№ опыта	v_{6a3} , M/c	$\tau_{\text{\tiny HB}} \cdot 10^3, \text{c}$		
1	1,109	18,03	40	0,7689	26,01		
2	1,577	12,68	41	1,109	18,03		
3	0,6798	29,42	42	1,577	12,68		
4	0,9403	21,27	43	0,6798	29,42		
5	0,9029	22,15	44	0,9403	21,27		
6	1,280	15,62	45	0,9029	22,15		
7	0,5708	35,04	46	1,280	15,62		
8	0,7689	26,01	47	0,5708	35,04		
9	1,109	18,03	48	0,7689	26,01		
10	1,577	12,68	49	1,109	18,03		
11	0,6798	29,42	50	1,577	12,68		
12	0,9403	21,27	51	0,6798	29,42		
13	0,9029	22,15	52	0,9403	21,27		
14	1,280	15,62	53	0,9029	22,15		
15	0,5708	35,04	54	1,280	15,62		
16	0,7689	26,01	55	0,5708	35,04		
17	1,109	18,03	56	0,7689	26,01		
18	1,577	12,68	57	1,109	18,03		
19	0,6798	29,42	58	1,577	12,68		
20	0,9403	21,27	59	0,6798	29,42		
21	0,9029	22,15	60	0,9403	21,27		
22	1,280	15,62	61	0,9029	22,15		
23	0,5708	35,04	62	1,280	15,62		
24	0,7689	26,01	63	0,5708	35,04		
25	1,109	18,03	64	0,7689	26,01		
26	1,577	12,68	65	0,6456	30,98		
27	0,6798	29,42	66	1,067	18,74		
28	0,9403	21,27	67	1,505	13,29		
29	0,9029	22,15	68	0,6289	31,80		

Продолжение т	габлицы	B.7
---------------	---------	-----

№опыта	v_{6a3} , M/c	$\tau_{_{\rm HB}}\cdot 10^3$, c	№ опыта	v_{6a3} , M/c	$\tau_{\text{\tiny HB}} \cdot 10^{-3}, \text{c}$
30	1,280	15,62	69	1,001	19,98
31	0,5708	35,04	70	0,8039	24,88
32	0,7689	26,01	71	0,9137	21,89
33	1,109	18,03	72	0,9137	21,89
34	1,577	12,68	73	0,9137	21,89
35	0,6798	29,42	74	0,9137	21,89
36	0,9403	21,27	75	0,9137	21,89
37	0,9029	22,15	76	0,9137	21,89
38	1,280	15,62	77	0,9137	21,89
39	0,5708	35,04			

В.3 Текст алгоритма расчета динамики срабатывания однообмоточного втяжного броневого электромагнита постоянного напряжения на языке Lua

```
---Ввод исходных данных
djk = 20 --- Диаметр якоря, мм
delta = 2 --- Толщина промежутка между обмоткой и магнитопроводом, мм
av = 4 --- Толщина воротничка, мм
Hv = 7 --- Высота воротничка, мм
v = 0.6 --- Толщина зазора воротничка, мм
Но = 50 --- Высота обмотки, мм
Ao = 10 --- Ширина обмотки, мм
Hst = 0.12*H --- Высота стопа, мм
vz = 6 --- Начальный воздушный рабочий зазор, мм
rastvor = 3.9 --- Раствор главных контактов, мм
Pmx 0 = 1.62 --- Начальное противодействующее усилие, H
tang = 75*Pmx_0 --- Жесткость противодействующей характеристики
mjk = 0.284 --- Масса якоря, кг
Ukat = 46.6 --- Постоянное напряжение, приложенное к обмотке, В
Rkat = 372.5 --- Сопротивление обмотки в горячем состоянии, Ом
Wk = 6024 --- Число витков обмотки
Hjk = 2*delta + Hv + Ho - Hst --- Высота якоря, мм
Dvnut = djk+4*delta+2*Ao --- Внутренний диаметр корпуса, мм
Dnar = ((djk*djk)+(Dvnut*Dvnut))^{(0.5)} --- Внешний диаметр корпуса, мм
ak = 0.5*(Dnar - Dvnut) --- Толщина корпуса, мм
pi = 3.1415926535
     function Ifloor(ch) --- Функция округления
       local chi
       if ch < 0 then ch = -ch end
       chi = ch-1
       fl = 0
       if fl > chi then break end
       fl = fl + 1
```

```
until false
             return fl
           end
           function round(num, idp)
           local mult = 10^{(idp or 0)}
           return Ifloor(num * mult + 0.5) / mult
           end
      do --- Создание модели
      create(0) --- Создаем документ для магнитных задач
      mi_probdef(0,"millimeters","axi",1E-8,30) -- Создаем задачу
      mi saveas("oput.fem")
      do --- Задание материалов
           mi_addmaterial("Airinto",1,1) --- Добавляем материал воздух
           mi_addmaterial("Airout",1,1) --- Добавляем материал воздух
           mi_addmaterial("Coil",1,1,"","",57.143,"","",3,"","","",0.23) --- Добавляем
материал медный провод диаметром 0.23 проводимостью 57.143
           mi_addmaterial("10895","","","","",9) --- Задание материала корпуса
электромагнита- стали 10895 и проводимостью 9
           mi_addmaterial("jakor<sup>®</sup>,"","","",9) --- Задание материала якоря
электромагнита- стали 10895 и проводимостью 9
           mi addbhpoint("10895",0,0) --- Задание кривой намагничивания ВН для стали
10895
           mi_addbhpoint("10895",0.080,50)
           mi addbhpoint("10895",0.110,60)
           mi_addbhpoint("10895",0.130,70)
           mi_addbhpoint("10895",0.180,80)
           mi_addbhpoint("10895",0.240,90)
           mi_addbhpoint("10895",0.300,100)
           mi_addbhpoint("10895",0.740,150)
           mi_addbhpoint("10895",0.960,200)
           mi_addbhpoint("10895",1.180,300)
           mi_addbhpoint("10895",1.280,400)
           mi_addbhpoint("10895",1.350,500)
           mi_addbhpoint("10895",1.400,600)
           mi_addbhpoint("10895",1.430,700)
           mi_addbhpoint("10895",1.460,800)
           mi addbhpoint("10895",1.480,900)
           mi_addbhpoint("10895",1.520,1000)
           mi_addbhpoint("10895",1.570,1500)
           mi_addbhpoint("10895",1.610,2000)
           mi addbhpoint("10895",1.725,5000)
           mi addbhpoint("10895",1.781,7000)
           mi_addbhpoint("10895",1.853,10000)
           mi_addbhpoint("10895",1.960,15000)
           mi_addbhpoint("10895",2.025,20000)
           mi_addbhpoint("10895",2.120,30000)
           mi_addbhpoint("10895",2.170,40000)
           mi_addbhpoint("10895",2.205,50000)
           mi_addbhpoint("10895",2.250,70000)
           mi_addbhpoint("10895",2.300,100000)
           mi_addbhpoint("jakor",0,0) --- То же самое для материала якоря
           --//--
           mi_addbhpoint("jakor",2.300,100000)
```

```
end
      mi addboundprop("A=0",0,0,0,0,0,0,0,0,0) --- Задание граничного условия оси
симметрии электромагнита
      mi addboundprop("MBC",0,0,0,0,0,0,2653928,0,2) --- Задание граничного условия
удаленной границы
      mi_addnode(0,300) --- Создаем границу внешней области радиусом 0.3 метра
      mi addnode(0,-300)
      mi_addsegment(0,300,0,-300)
      mi_addarc(0,-300,0,300,180,5)
      mi_addnode(0,0) --- Якорь
      mi addnode(0,Hjk)
      mi_addnode((0.5*djk),Hjk)
      mi_addnode((0.5*djk),0)
      mi_addnode(0,-vz) --- Κορπγς
      mi_addnode((0.5*djk),-vz)
      mi addnode((0.5*dik),-(vz+Hst))
      mi_addnode(((0.5*djk)+2*delta+Ao),-(vz+Hst))
      mi_addnode(((0.5*djk)+2*delta+Ao),((Ho+2*delta)-(vz+Hst)))
      mi addnode(((0.5*djk)+v),((Ho+2*delta)-(vz+Hst)))
      mi addnode(((0.5*dik)+v),((Hv+Ho+2*delta)-(vz+Hst)))
      mi addnode(((0.5*djk)+v),(Hjk+v))
      mi addnode(0,(Hik+v))
      mi_addnode(((0.5*djk)+v+av),((Hv+Ho+2*delta)-(vz+Hst)))
      mi addnode(((0.5*djk)+v+av),((0.2*djk+Ho+2*delta)-(vz+Hst)))
      mi addnode(((0.5*djk)+2*delta+Ao),((ak+Ho+2*delta)-(vz+Hst)))
      mi_addnode((ak+(0.5*djk)+2*delta+Ao),((ak+Ho+2*delta)-(vz+Hst)))
      mi_addnode((ak+(0.5*djk)+2*delta+Ao),(-ak-vz-Hst))
      mi_addnode(((0.5*djk)+2*delta+Ao),(-ak-vz-Hst))
      mi_addnode((0.5*djk),(-0.25*djk-vz-Hst))
      mi_addnode(0,(-0.25*djk-vz-Hst))
      mi_addnode(((0.5*djk)+delta),(delta-vz-Hst)) --- Катушка
      mi_addnode(((0.5*djk)+delta+Ao),(delta-vz-Hst))
      mi_addnode(((0.5*djk)+delta),(Ho+delta-vz-Hst))
      mi_addnode(((0.5*djk)+delta+Ao),(Ho+delta-vz-Hst))
      mi_addsegment(0,0,(0.5*djk),0)
      mi_addsegment((0.5*djk),0,(0.5*djk),Hjk)
      mi addsegment((0.5*djk),Hjk,0,Hjk)
      mi_addsegment(0,-vz,(0.5*djk),-vz)
      mi_addsegment((0.5*djk),-vz,(0.5*djk),-(vz+Hst))
      mi_addsegment((0.5*djk),-(vz+Hst),((0.5*djk)+2*delta+Ao),-(vz+Hst))
      mi addsegment(((0.5*djk)+2*delta+Ao),-
(vz+Hst), ((0.5*dik)+2*delta+Ao), ((Ho+2*delta)-(vz+Hst)))
      mi_addsegment(((0.5*djk)+2*delta+Ao),((Ho+2*delta)-
(vz+Hst), ((0.5*djk)+v), ((Ho+2*delta)-(vz+Hst))
      mi_addsegment(((0.5*djk)+v),((Ho+2*delta)-
(vz+Hst), ((0.5*dik)+v), ((Hv+H+2*delta)-(vz+Hst))
      mi_addsegment(((0.5*djk)+v),((Hv+Ho+2*delta)-(vz+Hst)),((0.5*djk)+v),(Hjk+v))
      mi_addsegment(((0.5*djk)+v),(Hjk+v),0,(Hjk+v))
      mi_addsegment(((0.5*djk)+v),((Hv+Ho+2*delta)-
(vz+Hst), ((0.5*djk)+v+av), ((Hv+Ho+2*delta)-(vz+Hst))
      mi_addsegment(((0.5*djk)+v+av),((Hv+Ho+2*delta)-
(vz+Hst), ((0.5*djk)+v+av), ((0.2*djk+Ho+2*delta)-(vz+Hst))
```

```
mi addsegment(((0.5*djk)+v+av),((0.2*djk+Ho+2*delta)-
(vz+Hst), ((0.5*dik)+2*delta+Ao), ((ak+Ho+2*delta)-(vz+Hst)))
       mi_addsegment(((0.5*djk)+2*delta+Ao),((ak+Ho+2*delta)-
(vz+Hst), (ak+(0.5*djk)+2*delta+Ao), ((ak+Ho+2*delta)-(vz+Hst))
      mi_addsegment((ak+(0.5*djk)+2*delta+Ao),((ak+Ho+2*delta)-
(vz+Hst), (ak+(0.5*djk)+2*delta+Ao), (-ak-vz-Hst)
      mi addsegment((ak+(0.5*djk)+2*delta+Ao),(-ak-vz-Hst),((0.5*djk)+2*delta+Ao),(-ak-vz-Hst))
vz-Hst))
      mi_addsegment(((0.5*djk)+2*delta+Ao),(-ak-vz-Hst),(0.5*djk),(-0.25*djk-vz-Hst))
      mi_addsegment((0.5*djk),(-0.25*djk-vz-Hst),0,(-0.25*djk-vz-Hst))
      mi_addsegment(((0.5*djk)+delta),(delta-vz-Hst),((0.5*djk)+delta+Ao),(delta-vz-Hst))
      mi_addsegment(((0.5*djk)+delta+Ao),(delta-vz-Hst),((0.5*djk)+delta+Ao),(Ho+delta-
vz-Hst))
      mi_addsegment(((0.5*djk)+delta+Ao),(Ho+delta-vz-Hst),((0.5*djk)+delta),(Ho+delta-
vz-Hst))
      mi addsegment(((0.5*djk)+delta),(Ho+delta-vz-Hst),((0.5*djk)+delta),(delta-vz-Hst))
      mi_addblocklabel((0.25*djk),(0.5*Ho)) --- Добавляем блок якоря
      mi_addblocklabel((0.25*djk),(-vz-Hst-0.1*djk)) --- Добавляем блок корпуса
      mi_addblocklabel((0.5*djk+delta+0.5*Ao),(Ho-vz-Hst+delta-0.5*Ho)) --- Добавляем
блок катушки
      mi addblocklabel((0.5*djk+delta+0.5*Ao),(-vz-Hst+1)) --- Добавляем блок воздуха
внутри
      mi_addblocklabel(150,0) --- Добавляем блок воздуха снаружи
      mi clearselected() --- Отменяем выделение всего
      mi_selectlabel((0.25*djk),(0.5*Ho)) --- Выделяем метку блока якоря mi_setblockprop("jakor", 0,0.5, "", "",") --- Устанавливаем свойства блока якоря
      mi_clearselected()
      mi_selectlabel((0.25*djk),(-vz-Hst-0.1*djk)) --- Выделяем метку блока корпуса mi_setblockprop("10895", 0,0.5, "", "", "",0) --- Устанавливаем свойства блока
корпуса
      mi_clearselected()
      mi_selectlabel((0.5*djk+delta+0.5*Ao),(-vz-Hst+1)) --- Выделяем метку блока
воздуха внутри
      mi_setblockprop("Airinto", 0,0.3, "", "", "",0) --- Устанавливаем свойства блока
воздуха внутри
      mi_clearselected()
      mi selectlabel(150,0) --- Выделяем метку блока воздуха снаружи
      mi_setblockprop("Airout", 0,5, "", "", "",0) --- Устанавливаем свойства блока
воздуха снаружи
      mi clearselected()
      mi selectsegment(0,(0.5*Hjk)) --- Устанавливаем свойства границ
      mi selectsegment(0,(Hik+0.5*v))
      mi selectsegment(0,200)
      mi_selectsegment(0,(-0.5*vz))
      mi_selectsegment(0,(-0.5*Hst-vz))
      mi_selectsegment(0,-200)
      mi_setsegmentprop("A=0","",1,0,0)
      mi_clearselected()
      mi_selectarcsegment(300,0)
      mi_setarcsegmentprop(5,"MBC",0,0)
      mi clearselected()
      mi_selectnode(0,0) --- Создание группы - якорь
      mi_selectnode(0,Hjk)
```

```
mi_selectnode((0.5*djk),Hjk)
      mi selectnode((0.5*dik),0)
      mi selectnode(((0.5*djk)+v),(Hjk+v))
      mi_selectnode(0,(Hjk+v))
      mi_setnodeprop("",1) --- Группа «1» якорь
      mi clearselected()
      mi zoomnatural() --- Устанавливаем зум так что бы было видно на весь экран
      end
      mi_selectlabel((0.5*djk+delta+0.5*Ao),(Ho-vz-Hst+delta-0.5*Ho)) --- Выделяем
метку блока обмотки
      Ikat pr = 10^{(-3)}
      mi_addcircprop("Ikatushka",Ikat_pr,1)
      mi_setblockprop("Coil", 0,1, "Ikatushka", "", "", Wk) --- Устанавливаем свойства
блока катушки
      mi clearselected()
      mi analyze(1) --- Проверка. Анализируем (скрывая окно анализа "1")
      mi loadsolution() --- Запускаем саму программу постпроцессора
      mo_seteditmode ("area")
      mo selectblock(1,1)
      Pem 0 = mo blockintegral(19)
      Pem 0 = \text{Pem } 0^*(-1)
      mo clearblock ()
      current_re,volts_re,Psi_0 = mo_getcircuitproperties("Ikatushka")
      mo close()
      --- Основной расчет
      showconsole() --- Показываем окно вывода промежуточных данных
      clearconsole()
      f_Psi = \{\}
      f_Pem = \{\}
      f_Pmx = \{\}
      f_{vx} = \{ \}
      f_ax = \{ \}
      f_x = \{ \}
      f dx = \{\}
      f Ikat = \{\}
      f_t = \{ \}
      k = 0 --- Счетчик шагов
      tk = 0 --- Время
      Ik = 0.00001 --- Значение тока на первом шаге i_0
      dI = 0.01 --- Значение изменения тока di
      repeat --- Якорь стоит
      k = k+1
      print(k)
      -- Расчет эквивалентных сопротивлений Rejk, Rest, Repf, Rek для якоря, стопа,
проходного фланца и корпуса по формулам [87]
      Re = (Wk^2*(1/Rejk+1/Rest+1/Repf+1/Rek))^{-1} --- Расчет эквивалентного
сопротивления
      Ik = Ik-(Ukat-Ik*Rkat)/(Re*Wk^2) --- Корректировка тока с учетом вихревых токов
      --- Рассчитываем dPsi/di
      mi_modifycircprop("Ikatushka",1,Ik)
      mi_analyze(1)
      mi_loadsolution()
      mo_seteditmode ("area")
```

mo selectblock(1,1)

```
Pem = mo blockintegral(19)
      Pem = Pem*(-1)
      mo clearblock ()
      current_re,volts_re,Psi1 = mo_getcircuitproperties("Ikatushka")
      mo close()
      mi modifycircprop("Ikatushka",1,Ik*1.001)
      mi_analyze(1)
      mi_loadsolution()
      current_re,volts_re,Psi2 = mo_getcircuitproperties("Ikatushka")
      mo close()
      dPsidi = (Psi2-Psi1)/(Ik*0.001)
      dt = dPsidi*dI/(Ukat-Ik*Rkat)
      f_Psi[k] = Psi1
      f \operatorname{Pem}[k] = \operatorname{Pem}
      f Pmx[k] = Pmx 0
      f_vx[k] = 0
      f_ax[k] = 0
      f x[k] = vz
      f dx[k] = 0
      f \text{ Ikat}[k] = Ik
      f t[k] = tk
      Ik = Ik + dI
      tk = tk + dt
      --- Вывод данных в окно консоли для контроля
      print("TOK"..f_Ikat[k])
      print("сила"..f_Pem[k])
      print("dx"..f_dx[k])
      print("x"..f_x[k])
      print("t"..f_t[k])
      until (Pem > Pmx_0)
      dt = 0.0001 --- Значение изменения времени dt
      vx = 0
      ax = 0
      x = vz
      di = 0
      repeat --- Якорь трогается
      k = k+1
      -- Расчет эквивалентных сопротивлений Rejk, Rest, Repf, Rek для якоря, стопа,
проходного фланца и корпуса по формулам [87]
      Re = (Wk^2*(1/Rejk+1/Rest+1/Repf+1/Rek))^{-1} --- Расчет эквивалентного
сопротивления
      Ik = Ik-(Ukat-Ik*Rkat)/(Re*Wk^2) --- Корректировка тока с учетом вихревых токов
      print(k)
      --- Рассчитываем dPsi/di
      mi_modifycircprop("Ikatushka",1,Ik)
      mi_analyze(1)
      mi_loadsolution()
      mo_seteditmode ("area")
      mo_selectblock(1,1)
      Pem = mo_blockintegral(19)
      Pem = Pem*(-1)
      mo_clearblock()
```

current re, volts re, Psi1 = mo getcircuitproperties ("Ikatushka")

```
mo close()
      mi modifycircprop("Ikatushka",1,Ik*1.001)
      mi analyze(1)
      mi loadsolution()
      current re, volts re, Psi2 = mo getcircuit properties ("Ikatushka")
      mo close()
      dPsidi = (Psi2-Psi1)/(Ik*0.001)
      --- Рассчитываем dPsi/dx
      mi_modifycircprop("Ikatushka",1,Ik)
      mi selectgroup(1)
      mi_movetranslate(0,-0.05)
      mi_clearselected()
      mi_analyze(1)
      mi loadsolution()
      current_re,volts_re,Psi3 = mo_getcircuitproperties("Ikatushka")
      mo close()
      dPsidx = (Psi3-Psi1)/(0.00005)
      mi selectgroup(1)
      mi movetranslate(0.0.05)
      mi clearselected()
      if (vz-x) < rastvor then Pmx = Pmx 0 + (vz-x)*tang*10^(-3)
      else Pmx = Pmx_0*3.5 + (vz-x)*tang*3*10^(-3) end
      ax = (Pem - Pmx)/mik --- Ускорение в м/с2
      vx = vx + ax*dt
      dx = (vx*dt+ax*dt*dt/2)*1000 --- Перемещение, мм
      x = x - dx --- Координата якоря
      di = dt*(Ukat-Ik*\hat{R}kat-dPsidx*vx)/dPsidi
      f_Psi[k] = Psi1
      f Pem[k] = Pem
      f_Pmx[k] = Pmx
      f_vx[k] = vx
      f_ax[k] = ax
      f_x[k] = x
      f_dx[k] = dx
      f_{k} = Ik
      f t[k] = tk
      tk = tk + dt
      Ik = Ik + di
      --- Двигаем якорь вниз на dx
      mi selectgroup(1)
      mi movetranslate(0,-dx)
      mi clearselected()
      until (x < 0.2)
      handle = openfile("rezalt.txt","a") --- Создаем файл
      for i=1,k do
      write (handle,round(f_t[i],5).." "..round(f_x[i],6).." "..round(f_Ikat[i],6).."
"..round(f_Pem[i],5).." "..round(f_Pmx[i],5).." "..round(f_vx[i],6).."
"..round(f_Psi[i],6).."\n") ---запись округленных данных в файл
      end
      closefile(handle)
      print("Конец расчета")
```

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Дополнительные материалы к оценке статических электромагнитных характеристик втяжного броневого электромагнита

В [56] Гараниным А.Ю. предложена методика расчета статической тяговой характеристики ВБЭМ, там же проведены экспериментальные исследования и расчет ВБЭМ по предложенной методике [56]. Основные элементы и геометрические размеры приведены на рисунке 5.4. Электромагнит имеет следующие параметры: U = 10B; R = 0,19OM; N = 140, $\delta = 10MM$.

Для исследованного ВБЭМ проведен расчет по предложенным нами СЭМХ для однообмоточной МС ВБЭМ и также по методике, предложенной в [100]. Следует отметить, что в процессе расчета индукция достигала значений 4,2 Тл, вследствие чего расчет производился по выражениям (2.33). Результаты расчета и экспериментальные данные, приведены в таблице Г.1. Соответствующие графические зависимости показаны на рисунке Г.1.

Таблица Г.1 – Экспериментальные и расчетные данные тяговых характеристик

	$P_{\scriptscriptstyle ЭМ.T},H$														
$\delta_{ m p}$, mm	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	9,5	10
Экспе- римент- альные данные	371	329	302	275	250	232	218	205	193	182	172	163	153	144	135
По мето- дике [56]	364,57	332,54	304,55	280,08	258,61	239,66	222,8	207,71	194,13	181,98	170,99	161,18	152,39	144,41	137,09
По мето- дике [100]	821,7	683	576	481,1	411	357,4	315,2	281,2	253,4	230,3	210,8	194,1	179,7	167,2	156,2
B_{m} , Тл	4,29	3,92	3,62	3,37	3,16	2,985	2,82	2,68	2,55	2,435	2,335	2,25	2,16	2,08	2,02
По пред- ложенным моделям	1150,2	912,1	745,6	624,5	534,5	467,1	410,1	365,8	327,8	296,4	270,3	249,0	227,4	208,6	194,3

Данные таблицы говорят о сильной насыщенности МС исследованного ВБЭМ. Среднее расхождение между данными методик [56] и [100] достигает 48 %.

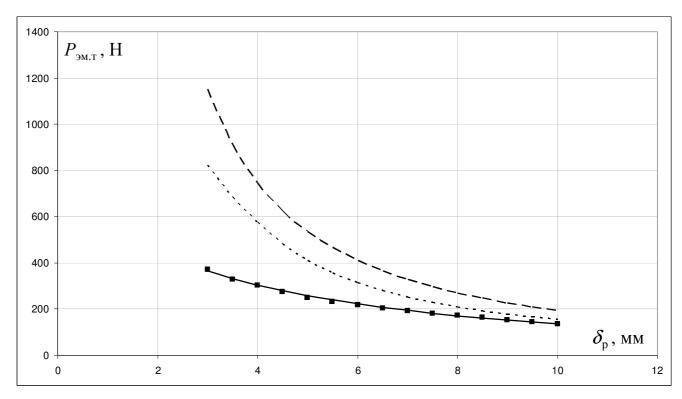


Рисунок Г.1 – Статические тяговые характеристики, полученные экспериментально (точки), по методике [56] (сплошная линия), по методике [100] (малый пунктир), по предложенным моделям (средний пунктир).

Можно сделать вывод о необходимости дальнейшего исследования сильно насыщенных систем.

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Усовершенствованная инженерная методика проектного расчета короткоходового втяжного броневого электромагнита, базирующаяся на методах цепей

Ниже предлагается усовершенствованная инженерная методика синтеза короткоходовых ВБЭМ [10], позволяющая учесть магнитное состояние ферромагнитных элементов магнитопровода и не ограниченная значениями условно-полезной работы, допустимого превышения температуры обмотки, режима работы.

Рассмотрим проектирование короткоходовых ЭМ, в которых в первом приближении можно пренебречь влиянием потоков рассеяния на тяговое электромагнитное усилие $P_{\scriptscriptstyle \mathrm{3M,T}}$.

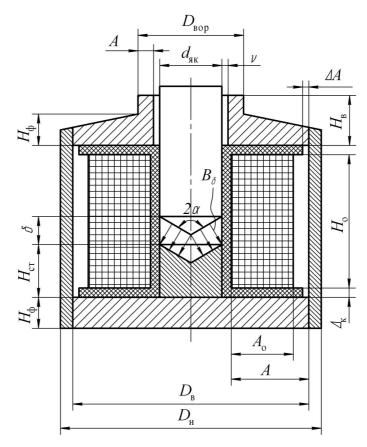


Рисунок Д.1 – Исследуемая МС ВБЭМ

Магнитодвижущая сила обмотки F может быть записана [157] в виде

$$F = k \frac{B_{\delta}}{\mu_0} \delta \sin \alpha , \qquad (\text{Д.1})$$

где $k = k_{\Pi} \cdot k_{3 \text{a}\Pi}$;

 $k_{\rm n}$ – коэффициент, учитывающий падение магнитного напряжения в стали магнитопровода и в нерабочих зазорах;

 α – половина угла при вершине конусообразного полюса (рисунок Д.1).

Коэффициент запаса $k_{\rm 3an}$ по магнитодвижущей силе может быть определен по коэффициенту запаса k_0 по тяговому электромагнитному усилию $k_{\rm 3an}=\sqrt{k_0}$, который рекомендуется [100] выбирать из диапазонов:

$$k_0 = \begin{cases} 3 \div 4 - \text{для быстродействующих реле;} \\ 2 \div 3 - \text{для маломощных реле;} \\ 1,5 \div 2 - \text{для реле управления, электроклапанов, электроспусков;} \\ 1,2 \div 1,5 - \text{для контакторов, пускателей, тянущих, толкающих ЭМ;} \\ 1,1 \div 1,2 - \text{для удерживающих ЭМ;} \end{cases}$$

Выражение для тягового электромагнитного усилия запишем в виде

$$P_{\text{\tiny 9M.T}} = \frac{B_{\delta}^2 S_{\text{пр}}}{2\mu_0} \sin \alpha \,, \tag{Д.2}$$

где $S_{\rm np}$ — приведенная по проводимости Λ_{δ} рабочего зазора δ площадь полюса сердечника.

Расчетная формула проводимости рабочего зазора заимствована из [157]

$$\Lambda_{\delta} = \frac{\mu_0 S_{\text{пр}}}{\delta \sin \alpha} = \mu_0 \pi d_{\text{як}} \left[\frac{d_{\text{як}}}{4 \delta \sin^2 \alpha} + \frac{0.75}{\pi \sin \alpha} - \frac{0.157}{\pi \sin \alpha} + \lambda_{\text{бок}} \right] = \mu_0 \pi d_{\text{як}} x_{\text{к}}, \quad (\text{Д}.3)$$

в которой $\lambda_{\text{бок}}$ — удельная геометрическая проводимость выпучивания с боковых поверхностей полюсов уточнена [8] в виде выражения

$$\lambda_{\text{50K}} = \frac{1}{\pi} \ln \left(1 + \frac{z_*}{0.5\delta_*} \right) + \frac{4z_*}{\pi^2} + \frac{0.078r_*^3 + 0.143r_*^2 + 0.073r_* + 0.333y_{C*}(x_{B*} + x_{C*} + x_{B*}x_{C*})^2}{0.5[0.785(r_* + y_{D*}) + 1.414(\Delta_{K*} + A_{0*}\Delta A_*)]^2} - \frac{0.078r_*^3 + 0.143r_*^2 + 0.073r_* + 0.333y_{C*}(x_{B*} + x_{C*} + x_{B*}x_{C*})^2}{0.5[0.785(r_* + y_{D*}) + 1.414(\Delta_{K*} + A_{0*}\Delta A_*)]^2}$$

$$-\frac{\left(0,667\,y_{D^*}^3+0,785\,y_{D^*}^2+0,25\,y_{D^*}\right)}{0,5\big[0,785\big(r_*+y_{D^*}\big)+1,414\big(\Delta_{\mathbf{K}^*}+A_{\mathbf{0}^*}\Delta A_*\big)\big]^2}\,,$$
 где $z_*=y_{D^*}-0,5\delta_*$; $r_*=\sqrt{2}\big(\Delta_{\mathbf{K}^*}+A_{\mathbf{0}^*}\big)$; $x_{B^*}=x_{C^*}+y_{C^*}$; $x_{C^*}=0,5+\Delta_{\mathbf{K}^*}+A_{\mathbf{0}^*}$; $y_{C^*}=\Delta_{\mathbf{K}^*}+A_{\mathbf{0}^*}\Delta A_*$; $\Delta A_*=\frac{\Delta A}{A_{\mathbf{0}}}$; $y_{D^*}=y_{E^*}+r_*$; $y_{E^*}=0,5+y_{C^*}-x_{C^*}$.

Выражение (Д.3) решим относительно $S_{\rm np}$. Подставив его в (Д.2), решим последнее относительно $d_{\rm як}$ и получим:

$$d_{_{\text{MK}}} = \frac{1}{B_{\delta} \sin \alpha} \sqrt{\frac{2\mu_0 P_{_{\text{9M.T}}}}{\pi \delta_* x_{_{\text{K}}}}} \,. \tag{Д.4}$$

Превышение температуры нагрева поверхности обмотки ЭМ определяется выражением

$$\tau = \frac{I^2 R}{k_{\rm \scriptscriptstyle T} S_{\rm \scriptscriptstyle OXJ} n_{\rm \scriptscriptstyle p}},\tag{Д.5}$$

где I — ток в обмотке; R — электрическое сопротивление обмотки. Коэффициент перегрузки по мощности $n_{\rm p}$ [49]

$$n_{\rm p} = \begin{cases} 1 - {\rm длительный \ режим \ нагрева;} \\ \frac{1 - {\rm exp} \left(-t_{_{\rm II}}/{\rm T} \right)}{1 - {\rm exp} \left(-t_{_{\rm BKJ}}/{\rm T} \right)} - {\rm повторно} - {\rm кратковременный \ режим \ нагрева;} \\ \frac{1}{1 - {\rm exp} \left(-t_{_{\rm BKJ}}/{\rm T} \right)} - {\rm кратковременный \ режим,} \end{cases}$$

где $t_{_{\mathrm{II}}}=t_{_{\mathrm{ВКЛ}}}+t_{_{\mathrm{II}}}$ – время цикла;

 $t_{\text{вкл}}$ – время включенного состояния;

 $t_{\scriptscriptstyle \Pi}$ – время безтоковой паузы;

T – тепловая постоянная времени нагрева обмотки.

Выразив (Д.5) через МДС обмотки F [157] можно записать

$$F^{2} = \frac{\pi k_{T} S_{\text{OXJ}} n_{p} K_{3} A_{\text{o}*} H_{\text{o}}}{\rho_{\tau} \pi (1 + 2\Delta_{K^{*}} + A_{\text{o}*})},$$
 (Д.6)

где $K_{_{3}}\,$ — коэффициент заполнения обмоточного окна.

Возведем (Д.1) в квадрат, приравняв к выражению (Д.6), получим уравнение решение которого относительно B^2_δ имеет вид

$$B_{\delta}^{2} = \frac{\pi k_{\mathrm{T}} S_{\mathrm{OXJ}} n_{\mathrm{p}} K_{\mathrm{3}} \mu_{0}^{2} A_{\mathrm{o}*} H_{\mathrm{o}*} d_{\mathrm{gK}}}{k^{2} \delta^{2} \sin^{2} \alpha \rho_{\tau} \pi (1 + 2\Delta_{\mathrm{K}*} + A_{\mathrm{o}*})}, \tag{Д.7}$$

где
$$S_{\text{охл}} = \pi d_{\text{як}}^2 H_{\text{o*}} [(1 + 2\Delta_{\kappa^*})(1 + \beta) + 2A_{\text{o*}}] = \pi d_{\text{як}}^2 S$$
;

 β — коэффициент, учитывающий различные условия теплоотдачи с наружной и внутренней поверхностей обмотки [100];

$$k_{\mathrm{T}} = \begin{cases} 2.1(1+0.005\tau)/\sqrt[3]{S_{\mathrm{ox}_{\mathrm{J}}}}, & npu \ S_{\mathrm{ox}_{\mathrm{J}}} \le 175.5 \cdot 10^{-4} \,\mathrm{m}^2, \\ 3.6(1+0.005\tau)/\sqrt[5]{S_{\mathrm{ox}_{\mathrm{J}}}}, & npu \ S_{\mathrm{ox}_{\mathrm{J}}} > 175.5 \cdot 10^{-4} \,\mathrm{m}^2. \end{cases}$$
 (Д.8)

Рассмотрим случай $S_{\text{охл}} \le 175, 5 \cdot 10^{-4} \, \text{м}^2$.

Учтем, что $K_{_3} \approx 0.188 / d_{_{\rm 9K}}^{0.2}\,$ и тогда (Д.7) может быть записана в виде

$$B_{\delta}^{2} = Y_{1} \frac{n_{\rm p}}{k^{2}} \frac{\left(d_{{\scriptscriptstyle \rm SK}}^{2}\right)^{1/15}}{\left(\delta_{*} \sin \alpha\right)^{2}},$$
 (Д.9)

где
$$Y_1 = \frac{2,1 \cdot 0,188\mu_0^2}{\pi^{1/3}} \cdot \frac{(1+0,005\tau)\tau}{\rho_{\tau}} \cdot \frac{A_{o*}H_{o*}^3\sqrt{[H_{o*}[(1+2\Delta_{\kappa^*})(1+\beta)+2A_{o*}]]^2}}{1+2\Delta_{\kappa^*}+A_{o*}}$$

Решив (Д.9) относительно $d_{{}_{\mathsf{ЯК}}},$ запишем выражение относительного зазора δ_{*} в виде

$$\delta_* = \left(\frac{\sqrt{Y_1 n_p}}{B_{\delta} k \delta_* \sin \alpha}\right)^{15} \delta. \tag{Д.10}$$

На основании экспериментальных исследований [78] падений магнитного потенциала в паразитных зазорах и в стали [6], можно показать, что

$$k = k_{\text{зап}} \frac{1 + 1.79 \cdot 10^{-2} \left[1 + 3\delta_* \left(1 - \delta_*^2 \right) \sin^2 \alpha \right] / \delta_* \sin^2 \alpha}{0.915 - c (B_{\delta} - 0.55)^2}.$$

Подставив последнее выражение в (Д.10) и выполнив очевидное преобразование получим

$$\delta_*^{1/15} \left[\frac{\delta_* \sin^2 \alpha + 1,79 \cdot 10^{-2} \left[1 + 3\delta_* \left(1 - \delta_*^2 \right) \sin^2 \alpha \right]}{\sin \alpha} \right] \left[\frac{B_{\delta}}{0,915 - c (B_{\delta} - 0,55)^2} \right] =$$

$$= \frac{\sqrt{Y_1 n_p}}{k_{\text{norm}}} \delta^{1/15} . \tag{Д.11}$$

Выразим B_{δ} из (Д.4)

$$B_{\delta} = \sqrt{\frac{2\mu_0 P_{\text{эм.т}}}{\pi \delta^2 \sin^2 \alpha}} \sqrt{\frac{\delta_*}{x_{\text{\tiny K}}}}.$$
 (Д.12)

Как видно из (Д.11) с учетом (Д.12) оно является функцией переменной δ_* и может быть представлена в виде

$$f_{1}(\delta_{*}) = \left\{ \delta_{*}^{1/15} \left[\frac{\delta_{*} \sin^{2} \alpha + 1{,}79 \cdot 10^{-2} \left[1 + 3\delta_{*} \left(1 - \delta_{*}^{2} \right) \sin^{2} \alpha \right]}{\sin \alpha} \right] \right\}$$

$$\left[\frac{B_{\delta}}{0{,}915 - c(B_{\delta} - 0{,}55)^{2}} \right] - \frac{\sqrt{Y_{1} n_{p}}}{k_{3\text{aii}}} \delta^{1/15} = 0. \tag{Д.13}$$

Относительный зазор может быть определен из выражения (Д.13) одним из численных методов.

Для случая $S_{\text{охл}} > 175,5 \cdot 10^{-4} \, \text{м}^2$ аналогично получено:

$$f_{2}(\delta_{*}) = \left\{ \delta_{*}^{1/5} \left[\frac{\delta_{*} \sin^{2} \alpha + 1,79 \cdot 10^{-2} \left[1 + 3\delta_{*} \left(1 - \delta_{*}^{2} \right) \sin^{2} \alpha \right] \right] \right\}$$

$$\left[\frac{B_{\delta}}{0,915 - c(B_{\delta} - 0,55)^{2}} \right] - \frac{\sqrt{Y_{2} n_{p}}}{k_{3\text{all}}} \delta^{1/5} = 0, \tag{Д.14}$$

где
$$Y_2 = \frac{3.6 \cdot 0.188 \mu_0^2}{\pi^{0.2}} \cdot \frac{\left(1 + 0.005 \tau\right) \tau}{\rho_{\tau}} \cdot \frac{A_{\mathrm{o}*} H_{\mathrm{o}*} \left[H_{\mathrm{o}*} \left[\left(1 + 2 \Delta_{_{\mathrm{K}*}}\right) \left(1 + \beta\right) + 2 A_{\mathrm{o}*}\right]\right]^{0.8}}{\left(1 + 2 \Delta_{_{\mathrm{K}*}} + A_{\mathrm{o}*}\right)} \,.$$

Пример проектного расчета броневого электромагнита постоянного тока. Исходные данные заимствованы из [115]:

$$\begin{split} P_{\scriptscriptstyle 9\mathrm{M.T}} &= 49H \; ; \; \delta = 5 \cdot 10^{-3} \, \text{m} \; ; \; \tau = 70^{\circ} C \; ; \; \theta_{0} = 40^{\circ} C \; ; \; \beta = 1,7 \; ; \; \alpha = 90^{\circ} \; ; \\ A_{\mathrm{o}^{*}} &= 0,4 \; ; \; \Delta A_{*} = 0 \; ; \; \Delta_{_{\mathrm{K}^{*}}} = 0,1 \; ; \; H_{_{\mathrm{o}^{*}}} = 2 \; ; \; \nu_{*} = 2,5 \cdot 10^{-2} \; ; \; H_{_{\mathrm{CT}^{*}}} = 0,45 \; ; \; H_{_{\mathrm{B}^{*}}} = 0,35 \; . \end{split}$$

Полагаем, что проектируемый электромагнит будет использован в качестве привода в контакторе, тогда $k_{\rm san} = 1{,}16$.

В качестве метода численного решения задачи выбираем метод Ньютона. Полагаем, что $S_{\rm oxn} > 175, 5 \cdot 10^{-4} \, m^2$; режим работы длительный: $n_p = 1$.

Определим производную от функции $f_2(\delta_*)$

$$f_{2}'(\delta) = \{\delta_{*}\}'[B_{\delta}] + \{\delta_{*}\}[B_{\delta}], \qquad (JI.15)$$
где $\{\delta_{*}\}' = \frac{0.2}{\delta_{*}^{0.8}}[\delta_{*}\sin^{2}\alpha + 1.79 \cdot 10^{-2}[1 + 3\delta_{*}(1 - \delta_{*}^{2})\sin^{2}\alpha]] +$

$$\delta_{*}^{0.2}\sin\alpha[1 + 5.37 \cdot 10^{-2}(1 - 3\delta_{*}^{2})]; [B_{\delta}] = \frac{B_{\delta}}{0.915 - c(B_{\delta} - 0.55)^{2}};$$

$$\{\delta_{*}\} = \delta_{*}^{0.2}\left[\frac{\delta_{*}\sin^{2}\alpha + 1.79 \cdot 10^{-2}[1 + 3\delta_{*}(1 - \delta_{*}^{2})\sin^{2}\alpha]}{\sin\alpha}\right];$$

$$[B_{\delta}]' = B'\frac{[0.915 - c(B_{\delta} - 0.55)^{2} + 2cB_{\delta}(B_{\delta} - 0.55)]}{[0.915 - c(B_{\delta} - 0.55)^{2}]^{2}};$$

$$B' = \frac{0.5a}{\sqrt{\delta_{*}}} \cdot \frac{x - \delta_{*}x'}{x\sqrt{x}}; a = \sqrt{\frac{2\mu_{0}P_{\text{DMT}}}{\pi\delta^{2}\sin^{2}\alpha}}; x' = -\left(\frac{0.25}{\delta_{*}^{2}\sin^{2}\alpha} + \frac{1}{\pi\delta_{*}} + \frac{2}{\pi^{2}}\right).$$

$$\frac{\text{Расчет: } S = H_{0*}[(1 + 2\Delta_{\kappa^{*}})(1 + \beta) + 2A_{0*}] = 2[(1 + 2 \cdot 0.1)(1 + 1.7) + 2 \cdot 0.4] = 8.08.$$

$$\frac{A_{0*}H_{0*}S^{0.8}}{1 + 2\Delta_{\kappa^{*}} + A_{0*}} = \frac{0.4 \cdot 2 \cdot 8.08^{0.8}}{1 + 2 \cdot 0.1 + 0.4} = 2.66. \text{ Для меди } \gamma = 0.0043 \text{ } \frac{1}{\sigma_{C}}.$$

$$\frac{r(1 + 0.005\tau)}{1 + 0.0043(\tau + \theta_{0})} = \frac{70(1 + 0.005 \cdot 70)}{1 + 0.0043(70 + 40)} = 64.2,$$

$$\frac{0.188 \cdot 3.6\mu_{0}^{2}}{\pi^{0.2}1.62 \cdot 10^{-8}} = \frac{0.188 \cdot 3.6(12.56 \cdot 10^{-7})^{2}}{3.14^{0.2} \cdot 1.62 \cdot 10^{-8}} = 52.43 \cdot 10^{-6},$$

$$Y_{2} = 52.43 \cdot 10^{-6} \cdot 64.2 \cdot 2.66 = 0.8954 \cdot 10^{-2}.$$

$$r_{*} = 1.4142(0.1 + 0.4) = 0.7071; x_{C*} = 0.1 + 0.4 + 0.5 = 1; y_{C*} = 0.1 + 0.4 \cdot 0 = 0.1;$$

$$x_{B*} = 1 + 0.1 = 1.1; y_{E*} = 0.1 - 1 + 0.5 = -0.4; y_{D*} = -0.4 + 0.7071 = 0.3071.$$

В качестве стартовой точки (значение корня первого приближения) принимаем $\delta_* = 0.12$.

$$z_* = 0.3071 - 0.5 \cdot 0.12 = 0.2471$$
, $\lambda_1 = \frac{1}{3.14} \ln \left(1 + \frac{0.2471}{0.5 \cdot 0.12} \right) + \frac{4 \cdot 0.2471}{3.14^2} = 0.62$,

$$\begin{split} &\lambda_2 = \frac{0.078(0.7071)^3 + 0.143(0.7071)^2 + 0.073 \cdot 0.7071 + 0.333 \cdot 0.1[1.1^2 + 1^2 + 1.1 \cdot 1)}{0.5[0.785(0.7071 + 0.3071) + 1.414(0.1 + 0.4 \cdot 0)]^2} \\ &- \frac{0.667 \cdot 0.3071^3 + 0.785 \cdot 0.3071^2 + 0.25 \cdot 0.3071}{0.5[0.785(0.7071 + 0.3071) + 1.414(0.1 + 0.4 \cdot 0)]^2} = 0.2066, \\ &x = \frac{1}{4 \cdot 0.12 \cdot 1^2} + \frac{0.75}{3.14} - \frac{0.157}{3.14 \cdot 1^2} + 0.62 + 0.2066 = 3.099, \\ &x' = -\left(\frac{0.25}{0.12^2 \cdot 1^2} + \frac{0.318}{0.12} + 0.203\right) = -20.21, \\ &a = \sqrt{\frac{2 \cdot 12.56 \cdot 10^{-7} \cdot 49}{3.14(5 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 1^2}} = 1.252, \\ &\frac{\sqrt{n_p Y_2}}{k_{\text{3min}}} \delta^{0.2} = \frac{\sqrt{1 \cdot 0.8954 \cdot 10^{-2}}}{1.16} \left(5 \cdot 10^{-3}\right)^{0.2} = 2.825 \cdot 10^{-2}, \\ &B' = \frac{0.5 \cdot 1.252}{\sqrt{0.12}} \cdot \frac{3.099 + 0.12 \cdot 20.21}{3.099\sqrt{3.099}} = 1.83. \\ &\left[\frac{\delta. \sin^2 \alpha + 1.79 \cdot 10^{-2} \left[1 + 3\delta. \left(1 - \delta.^2\right) \sin^2 \alpha\right]}{\sin \alpha}\right] = \\ &= \left[\frac{0.12 \cdot 1^2 + 1.79 \cdot 10^{-2} \left[1 + 3 \cdot 0.12 \left(1 - 0.12^2\right)^2\right]}{1}\right] = 0.1443, \\ &\delta^{0.2} = 0.12^{0.2} = 0.6544, \ \delta^{0.8} = 0.12^{0.8} = 0.1834, \ B_{\delta} = 1.252 \sqrt{\frac{0.12}{3.099}} \approx 0.25T, \\ &\left[1 + 5.37 \cdot 10^{-2} \left(1 - 3\delta.^2\right)\right] = 1 + 5.37 \cdot 10^{-2} \left(1 - 3 \cdot 0.12^2\right) = 1.0514, \\ &\left[0.915 - c(B_{\delta} - 0.55)^2\right] = 0.915 - 0.938(0.25 - 0.55)^2 = 0.8366. \\ &\text{B pa6ote получено } c = 0.938 \text{ при } B_{\delta} \leq 0.55T \text{ и } c = 0.238 \text{ при } B_{\delta} > 0.55T. \\ &f_2(0.12) = \frac{0.6544}{1} \cdot 0.1443 \cdot 0.301 + 2.825 \cdot 10^{-2} = 1.7 \cdot 10^{-4}, \\ &\{\delta_*\} = \frac{0.6544}{1} \cdot 0.1443 = 9.443 \cdot 10^{-2}, \end{aligned}$$

 $[B_{\delta}] = \frac{0.25}{0.8306} = 0.301, \{\delta_*\}' = \frac{0.2}{0.1834} \cdot 0.1443 + \frac{0.6544}{1} \cdot 1.0514 = 0.8454.$

$$[B_{\delta}]' = 1.83 \frac{0.8306 + 2 \cdot 0.938 \cdot 0.25(0.25 - .55)}{0.8306^2} = 1.83.$$

В соответствии с (Д.15):

$$f_2'(\delta_*) = f'(0.12) = 0.8454 \cdot 0.301 + 9.443 \cdot 10^{-2} \cdot 1.83 = 0.4273.$$

Очередное приближение δ_{*_1} может быть вычислено по выражению

$$\delta_{*1} = \delta_* - \frac{f_2(0,12)}{f_2'(0,12)} = 0.12 - \frac{1.7 \cdot 10^{-4}}{0.4273} = 0.1196.$$

Относительное расхождение ε корней двух соседних итераций составляет:

$$\varepsilon = \frac{0,1196-0,12}{0,12}100 = -0,33\%$$
 , что приемлемо для решаемой задачи.

$$d_{\text{MK}} = \delta/\delta_* = \frac{5 \cdot 10^{-3}}{0.1196} = 41.8 \cdot 10^{-3} \,\text{M}, d_{\text{MK}}^2 = 1747 \cdot 10^{-6} \,\text{M}^2,$$

$$S_{\text{OXJI}} = \pi d_{\text{RK}}^2 S = 3.14 \cdot 1747 \cdot 10^{-6} \cdot 8.08 = 443 \cdot 10^{-4} \,\text{m}^2.$$

Таким образом, видно, что расчетное выражение выбрано верно. Округлив $d_{_{\rm ЯК}} \ {\rm дo} \ 42 \cdot 10^{-3} \, {\it м} \ , {\rm имеем:}$

$$\begin{split} A_{\rm o} &= A_{\rm o^*} \cdot d_{\, {\rm gK}} = 0,4 \cdot 42 \cdot 10^{-3} = 16,8 \cdot 10^{-3} \, {\rm M} \, , \\ H_{\rm o} &= H_{\rm o^*} \cdot d_{\, {\rm gK}} = 84 \cdot 10^{-3} \, {\rm M} \, , \\ \Delta_{\rm K} &= \Delta_{\rm K^*} \cdot d_{\, {\rm gK}} = 0,1 \cdot 42 \cdot 10^{-3} = 42 \cdot 10^{-4} \, {\rm M} \, , \\ v &= 0,25 \cdot 10^{-2} \cdot 42 \cdot 10^{-3} = 0,11 \cdot 10^{-3} \, {\rm M} \, , \\ H_{\rm ct} &= H_{\rm ct^*} \cdot H_{\rm o} = 0,45 \cdot 84 \cdot 10^{-3} = 38 \cdot 10^{-3} \, {\rm M} \, , \\ H_{\rm b} &= H_{\rm b^*} \cdot d_{\, {\rm gK}} = 0,35 \cdot 42 \cdot 10^{-3} = 15 \cdot 10^{-3} \, {\rm M} \, . \end{split}$$

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

Методика синтеза длинноходового втяжного броневого электромагнита, базирующаяся на обобщенных их характеристиках

Предлагается усовершенствованная методика синтеза длинноходовых однообмоточного ВБЭМ постоянного напряжения.

Разница с приведенной в главе 5 методикой синтеза состоит в определении магнитодвижущей силы по формуле, основанной на законе Кирхгофа для магнитной цепи с учетом падения магнитного напряжения на паразитных зазорах

$$F_{\Sigma^*} = F_{\Sigma} / \left(\frac{B_{\rm m} d_{_{\rm SK}}}{\mu_0} \right) = F_* + B_{1^*} \delta_{_{\Pi,1^*}} + B_{2^*} \delta_{_{\Pi,2^*}} + B_{3^*} \delta_{_{\Pi,3^*}},$$

где B_{1*} , B_{2*} , B_{3*} определяются по (2.13)÷(2.15).

Алгоритм состоит из следующих этапов:

1) Из условия $P_{_{\rm 3M.T}}=P_{_{\rm MX.KP}}$ определяется $B_{_{\rm m}}$. Если $B_{_{\rm m}}< B_{_{\rm m.rp}}$ ($B_{_{\rm m.rp}}-$ граничное значение индукции, определяющее условие линейности магнитной системы, которое устанавливается из анализа кривых намагничивания (2.11) и (2.12)), то F_{Σ^*} рассчитывается при $B_{_{\rm m}}=B_{_{\rm m.rp}}$, иначе F_{Σ^*} зависит от $B_{_{\rm m}}$. Рассчитывается $F_{\rm cp1}$:

$$F_{\rm cp1} = (F_* B_{\rm m} d_{\rm gK} + B_1 \delta_{\rm n1} + B_2 \delta_{\rm n2} + B_3 \delta_{\rm n3}) / \mu_0.$$
 (E.1)

2) Из выражения (3.1) для максимальной температуры в толще обмотки $\Theta_{\rm m} = f \big(A_{\rm o}, H_{\rm o}, q, T_{\rm o} \big) \quad \text{определяется объемная плотность мощности } q \; . \; \text{ На основании выражения для определения кодированного значения фактора } x_6 \,$ можно получить

$$q = 3.22(2.73 + 0.01T_0)^4 (x_6 + 4.401)/d_{gk}.$$
 (E.2)

С другой стороны из выражения (3.1) следует:

$$x_6 = \frac{100 \cdot Q_{\text{m}^*} - M}{Y},\tag{E.3}$$

где
$$M = 221,7+18,8x_1+27,7x_2-21,5x_4-4,3x_1^2+8,7x_4^2+5,6x_1x_2-4x_1x_4-$$

$$-4,3x_{2}x_{4};$$

$$Y = 22.5 + 3.3x_1 + 5x_2 - 4.1x_4$$
;

$$x_1 = 1,272 \ H_{o^*} - 3,181; \ x_2 = 5,464 A_{o^*} - 3,279; x_4 = 0,05 \ T_0 - 3.$$

Подставляя (Е.3) в (Е.2) получим расчетное выражение для q.

По выражению (5.6) рассчитывается $F_{\rm cp2}$.

3) Очевидно, что при определенном значении диаметра якоря $d_{\rm як}$ следует ожидать $F_{\rm cn1} = F_{\rm cn2}$.

Следовательно, можно составить уравнение:

$$f(d_{gK}) = F_{cp1} - F_{cp2} = 0.$$
 (E.4)

Численное решение (Е.4) позволяет определить $d_{\rm як}$, а значит и все размеры МС электромагнита. На рисунке Е.1 показана структурная схема описанного алгоритма, в которой выражение для (Е.4) ищется методом дихотомии.

В таблице Е.1 приведены результаты решения уравнения (Е.4) при различных координатах критической точки механической характеристики, поддающиеся очевидному физическому толкованию. Принимались следующие фиксированные значения: $K_{\rm Umax}=1{,}15$, $K_{\rm Umin}=0{,}80$, $K_{\rm Ucp}=1{,}15$, $K_{\rm 3}=0{,}50$, $\Theta_{\rm доп}=130^{\circ}C$, $T_{\rm 0}=60^{\circ}C$, $H_{\rm 0*}=2{,}5$, $A_{\rm 0*}=0{,}60$, $H_{\rm cr*}=0{,}25$, $H_{\rm B*}=0{,}35$, $v_{\rm *}=0{,}03$, $\delta_{\rm n,1}=\delta_{\rm n,2}=\delta_{\rm n,3}=0{,}1{\cdot}10^{-3}$ M.

Дадим оценку влияния условий производства и эксплуатации на размеры магнитной системы. На рисунках $E.2 \div E.4$ показаны расчетные данные для диаметра якоря при изменениях коэффициентов K_{Ucp} , K_{Umin} , K_{Umax} и температуры окружающей среды T_0 .

Стабильность технологического процесса изготовления можно характеризовать величиной коэффициента запаса по напряжению (магнитодвижущей силы) срабатывания. Чем стабильнее и качественнее процесс, тем меньше $K_{\rm Ucp}$ отличается от 1,0.

Таблица Е.1

Факторы		$d_{\scriptscriptstyle{NK}} \cdot 10^{-3} M$								
$P_{\text{MX.Kp}}$, H		2	4	6	8	10	12	14	16	18
	4	18,0	20,9	22,9	24,4	25,6	26,7	27,7	28,6	29,4
$\delta_{_{ m \kappa p}}$,	6	21,0	24,2	26,3	28,0	29,4	30,6	31,6	32,6	33,4
10 ⁻³ м	8	23,4	27,0	29,5	31,1	32,6	33,9	35,0	36,0	36,9
	10	25,5	29,4	31,9	33,9	35,5	36,8	38,0	39,1	40,1

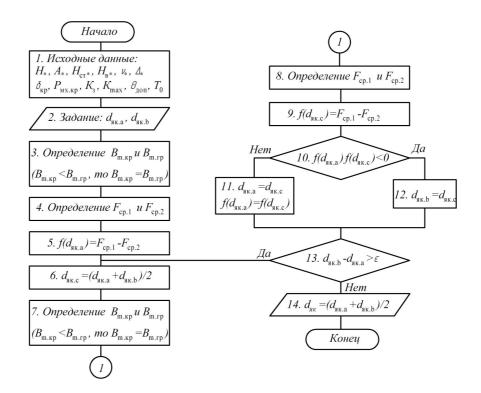


Рисунок Е.1 – Блок-схема методики синтеза

K_{Ucp}	$d_{\scriptscriptstyle \mathrm{SK}}$, M
1,05	0,0521
1,065	0,0525
1,08	0,0528
1,095	0,0531
1,11	0,0534
1,125	0,0537
1,14	0,0541
1,155	0,0544
1,17	0,0547
1,185	0,055
1,2	0,0553

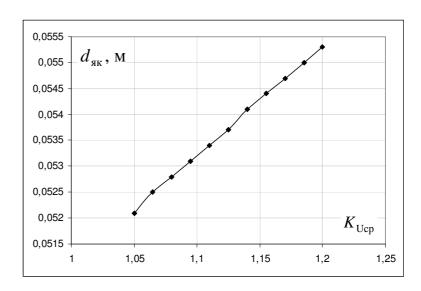


Рисунок Е.2 – Влияние на $d_{\scriptscriptstyle \mathsf{ЯK}}$ коэффициента запаса по напряжению питания

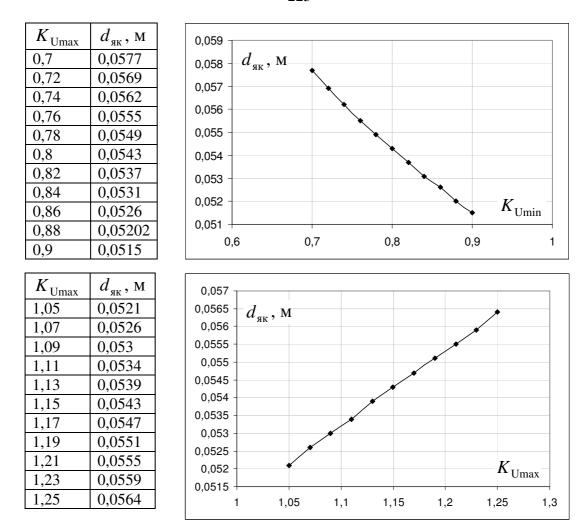


Рисунок Е.3 – Влияние на диаметр якоря колебания напряжения питания в процессе эксплуатации

T_0 , °C	$d_{\scriptscriptstyle{MK}}$, M
25	0,0475
32	0,0494
39	0,0509
46	0,0521
53	0,0532
60	0,0543
67	0,0556
74	0,0576
81	0,061
88	0,0684
95	0,1235

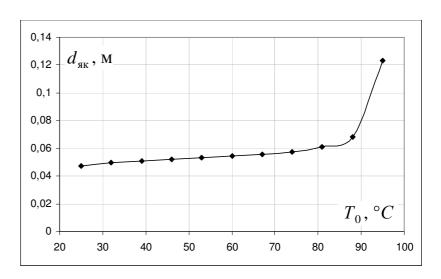


Рисунок Е.4 — Влияние на диаметр якоря возможной температуры окружающего электромагнит воздуха при $\delta_{\rm kp}=8.5\cdot 10^{-3}\, M$, $P_{\rm mx.kp}=101H$, $\Theta_{\rm gon}=130^{\circ}C$

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж

Материалы о внедрении результатов диссертационного исследования

ЗАКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО

«ЧЕБОКСАРСКИЙ ЭЛЕКТРОАППАРАТНЫЙ ЗАВОД»



«ШУПАШКАРТИ ЭЛЕКТРОАППАРАТ ЗАВОЧЁ»

ХУП Ă АКЦИОНЕРЛĂ ПĔРЛЕШУ

428000, г. Чебоксары, пр. Яковлева, 5. Тел. (8352) 62-20-99 (отдел продаж), 39-56-09 (справ. завода), 62-04-61 (приемная ген. директора), 39-57-43 (канцелярия) E-mail: Cheaz@cheaz.ru; cheaz@chtts.ru, http://www.cheaz.ru. Факс: (8352) 62-72-67, 62-73-24, 62-72-31





№ от « » г.

На № 12 от «30» 08 2014 г.

СПРАВКА

об использовании и практической полезности результатов диссертационной работы Архиповой Елены Владимировны «Моделирование втяжных броневых электромагнитов и разработка усовершенствованных методик их проектного расчета», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук

- 1. Рекомендации по модернизации приводного электромагнита реле времени серии РВ 100 с часовым механизмом позволили уменьшить потребляемую им мощность в 1,6 раза.
- 2. Практическую ценность для разработчиков электромагнитной аппаратурь представляют:
 - инженерная методика проектного расчета короткоходового втяжного электромагнита;
- методика проектного расчета втяжного электромагнита, разработанная на основе обобщенных его электромагнитных характеристик и тепловых параметров;
- методика проектного расчета электромагнита, минимизирующая потребляемую им мощность;
- математические модели динамических параметров приводного электромагнита контактора, реле, позволяющих прогнозировать износостойкость контактной системы и привода аппарата.

Заместитель генерального директора по развитию и инжинирингу ЗАО «ЧЭАЗ» кандидат технических наук

В.А. Матисон

Исполнитель <u>Михайлов А.В.</u> Тел. <u>39-59-16</u> Файл _____

Входящий №

Исполнено.

В дело №

20____г

минобрнауки РОССИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова» (ФГБОУ ВПО «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 OГРН 1022101274315 ИНН 2129009412

<u>2014 r.</u> № 3288

РАССЕЙ ФЕДЕРАЦИЙЁН ВЁРЕНУ́ПЕ ĂСЛА́ЛА́Х МИНИСТЕРСТВИ

федерацин профессилле асла пёлу паракан «И.Н. Ульянов ячёллё Чаваш патшалах университечё» патшалах вёрену бюджет учрежденийё

428015 Шупашкар хули, Мускав пр., 15

СПРАВКА

об использовании результатов диссертационной работы Архиповой Елены Владимировны «Моделирование втяжных броневых электромагнитов и разработка усовершенствованных методик их проектного расчета», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, на кафедре электрических и электронных аппаратов ФГБОУ ВПО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова»

Результаты работы используются в учебном процессе при чтении дисциплин «Основы теории электрических аппаратов», «Электрические и электронные аппараты», «Основы проектирования», «Моделирование магнитных и тепловых полей» и при выполнении курсовых проектов, выпускных квалификационных работ по направлению бакалаврской подготовки 140400.62 — Электроэнергетика и электротехника и по специальности 140602 — Электрические и электронные аппараты.

При проведении НИР «Разработка и исследование ресурсо- и энергосберегающих приводов электрических аппаратов» выполненной в рамках государственного задания Министерства образования и науки Российской Федерации использованы в отчетах:

- 1. «Математическое моделирование и исследование электромагнитных, тепловых характеристик приводов для электрических аппаратов» (2012 г., этап 3);
- 2. «Моделирование динамических параметров приводных электромагнитов» (2013 г., этап 4).

В них отражены полученные модели статических электромагнитных характеристик и тепловых параметров одно, двухобмоточных броневых электромагнитов постоянного напряжения, а также динамических параметров однообмоточного нефорсированного втяжного электромагнита, которые могут составить основу методик их проектирования.

Ректор



А.Ю. Александров

Исп.: Тел.:

60

20

Е.Г. Егоров (8352) 583602 (доб. 26-02)



СПРАВКА

об использовании и практической ценности результатов диссертационной работы Архиповой Елены Владимировны «Моделирование втяжных броневых электромагнитов и разработка усовершенствованных методик их проектного расчета», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук

Результаты диссертационной работы были использованы при исследовании динамических характеристик и расчете основных параметров максимальных электромагнитных расцепителей автоматического модульного выключателя серии ВМ11.

Практическая ценность результатов диссертационной работы заключается в возможности дальнейшего внедрения методик синтеза, математических моделей статических электромагнитных характеристик, тепловых и динамических параметров, а также алгоритма моделирования динамики включения втяжного броневого электромагнита при проведении предварительных исследований, направленных на подготовку предложений по разработке новых изделий с электромагнитным приводом.

Генеральный директор ОАО «ВНИИР-Прогресс», кандидат технических наук



А.В. Приказщиков 30.08, 2014 г.