

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

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Чебоксары – 2014

Работа выполнена на кафедре «Электрические и электронные аппараты» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова».

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Свинцов Геннадий Петрович

Официальные оппоненты: **Шоффа Вадим Николаевич**
доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», профессор кафедры «Электрические и электронные аппараты»

Макаров Валерий Геннадьевич
доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет», заведующий кафедрой «Электропривода и электротехники»

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова», г. Новочеркасск

Защита состоится «25» декабря 2014 г. в 16 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д212.301.06 при федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова» (428034, г. Чебоксары, ул. Университетская, д. 38, библиотечный корпус, третий этаж, к. 310).

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу 428015, г. Чебоксары, Московский пр., д. 15 на имя ученого секретаря диссертационного совета.

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

Автореферат разослан «23» октября 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д212.301.06



Н.В. Руссова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Втяжные броневые электромагниты постоянного напряжения (ВБЭМ) реализуют исполнительную функцию во многих областях приборо- и электроаппаратостроения. Они находят применение, в основном, как приводы коммутационно-защитной аппаратуры и управляющие устройства пневмо- и гидромеханики, используются в системах радиоэлектроаппаратуры, автоматики и телемеханики.

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 затрат ресурсов, энергии, времени, но и способного заменить дорогостоящие экспериментальные исследования математическим моделированием. 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.

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., Ковалев О.Ф., Курбатов П.А., Лобов Б.Н., Лысов Н.Е., Любчик М.А., Нестерин 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., Макарова В.Г. и др.

В настоящее время достаточно полно разработаны методы анализа ВБЭМ, основанные на цепевых и полевых методах, реализованных с применением специализированных САПР, позволяющие по заданной конструкции определить ее характеристики. В меньшей мере разработаны методики синтеза ВБЭМ, 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 методики проектного расчета ВБЭМ с плоским стопом, позволяющую 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:

1. 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 связь их характеристик с геометрическими соразмерностями МС, магнитного состояния ее 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 отличается учетом влияния вихревых токов, магнитной нагрузки на ферромагнитные эле-

менты МС, теплового состояния обмотки, позволивший получить обобщенные математические модели динамических параметров срабатывания, что открывает возможность его использования в случае форсированного управления.

4. Предложенная усовершенствованная методика проектного расчета короткоходового ВБЭМ с плоским стопом на базе моделей, полученных методами теории цепей, 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 позволило 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 магнитного состояния, различного расположения обмоток на катушке, а также тепловых параметров 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 соизмерностей 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 ресурсов 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, методы теории подобия, методы 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 результатов работы обусловлена корректным использованием методов математического анализа и подтверждается совпадением с погрешностью до 10 % 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» (г. Новочеркасск, 2008 г.), международная конференция «Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты» МКЭЭЭ-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 и 2012 гг.), 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 гг.

Публикации. По теме диссертации опубликованы 22 печатные работы, из них 5 статей в изданиях из перечня ВАК, 7 тезисов докладов на конференциях, 2 патента. Подготовлена к публикации в сборнике научных трудов «Региональная энергетика и электротехника: проблемы и решения», г. Чебоксары, 2014 г. статья «Усовершенствованная методика синтеза однообмоточного броневоего электромагнита постоянного напряжения с внедряющимся цилиндрическим якорем с плоским полюсом. Влияние условий производства и эксплуатации на размеры магнитной системы» авторов: Алексеевой О.Е., Архиповой Е.В., 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, изложена цель и задачи диссертационной работы, научная новизна и практическая ценность.

В первой главе проведен анализ методов моделирования, расчета статических и динамических характеристик, методик синтеза ВБЭМ.

Показано, что известные методики проектирования ВБЭМ базируются на цепевых методах, характеризующихся повышенной погрешностью, и методах теории поля, отличающихся значительной трудоемкостью и большими временными затратами при использовании. Научно-техническая информация, имеющаяся в изученных источниках, позволяет сделать вывод о целесообразности моделирования основных характеристик на основе использования методов теории подобия и регрессионного анализа, заменяя физическое моделирование математическим с применением пакета программ, позволяющего рассчитать характеристики ВБЭМ методами теории поля. Алгебраическая форма получаемых математических моделей, реализуя функциональную связь между исследуемыми функциями и факторами эксперимента, представленными в обобщенной критериальной (безразмерной) форме, обеспечивает эффективность и удобство использования их при разработке методик синтеза и анализа.

На основе анализа конечно-элементных программ выбран программный пакет FEMM, подтверждение работоспособности и эффективности которого приведено в большом количестве публикаций.

Во второй главе разработаны модели статических электромагнитных характеристик (СЭМХ) ВБЭМ с использованием методов вычислительного эксперимента, теории подобия, позволившие получить обобщенное математическое описание в критериальной форме статических нагрузочных характеристик, кривых намагничивания и др. Расчеты при выполнении вычислительного эксперимента проведены методом конечных элементов в программной среде FEMM.

Разработанные СЭМХ согласно теории подобия представлены в виде:

- кривые намагничивания ВБЭМ

$$\begin{cases} \Psi_* = \Psi / \Psi_{\text{баз}}; \\ F_* = F / F_{\text{баз}}; \end{cases} \quad (1)$$

- нагрузочные характеристики

$$\begin{cases} P_* = P_{\text{эм.т}} / P_{\text{баз}}; \\ F_* = F / F_{\text{баз}}, \end{cases} \quad (3)$$

где $P_{\text{эм.т}}$, F , Ψ , $P_{\text{баз}} = B_m^2 \pi d_{\text{як}}^2 / (8\mu_0)$, $F_{\text{баз}} = B_m d_{\text{як}} / \mu_0$, $\Psi_{\text{баз}} = B_m \pi d_{\text{як}}^2 N / 4$ – электромагнитное тяговое усилие, магнитодвижущая сила, потокосцепление обмотки и их базисные значения соответственно;

$d_{\text{як}}$ – диаметр якоря, выбранный в качестве базисного линейного размера ВБЭМ;

B_m – значение магнитной индукции, усредненное по наиболее нагруженному поперечному сечению ферромагнитного элемента;

N – количество витков обмотки;

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

Использованный способ представления СЭМХ для текущего зазора δ_i проиллюстрирован на рисунке 1. Точка Γ с индукцией $B_{\text{м.г}}$, менее которой зависимость $\Psi(F)$ прямолинейна, является границей линейности магнитной системы (МС). Значение $B_{\text{м.г}}$ определяется решением известного уравнения

$$\frac{d\Psi}{dF} = \frac{\Psi_{\Gamma}}{F_{\Gamma}}, \quad (4)$$

где в соответствии с (1) и (2) $\Psi = \Psi_* \cdot \Psi_{\text{баз}}$, $F = F_* \cdot F_{\text{баз}}$.

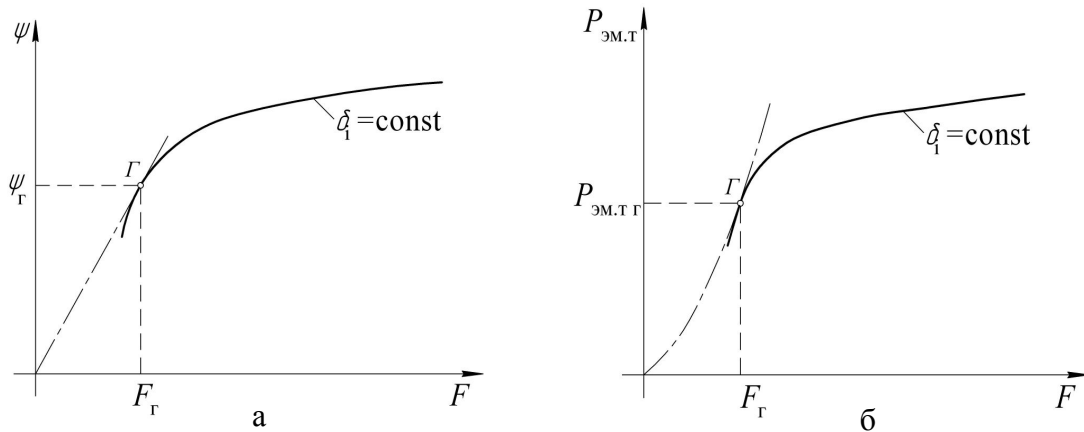


Рисунок 1 – К аппроксимации кривой намагничивания (а) и нагрузочной характеристики (б) МС

Исследуемая МС ВБЭМ с обозначенными основными размерами и элементами приведена на рисунке 2. Для двухобмоточного ВБЭМ возможно два варианта исполнения катушки по расположению пусковой (ПО) и удерживающей (УО) обмоток: 1) аксиальное расположение – толщина ПО и УО равны эффективной ширине обмоточного окна A_o , при этом ПО расположена у проходного фланца; 2) коаксиальное расположение – ПО и УО расположены в два слоя, при этом их высоты равны высоте обмоточного окна H_o , а ПО находится ближе к сердечнику.

С целью исследования степени влияния геометрических соизмерностей МС на исследуемые характеристики и отсеивания незначимых факторов был проведен ряд предварительных вычислительных опытов, на основе которых было установлено, что влиянием толщины каркаса катушки Δ_k можно пренебречь при построении плана эксперимента. Постоянными приняты: $d_{як} = 2 \cdot 10^{-2} \text{ м}$, $\Delta_k = 0,1 \cdot d_{як}$, $a_b = 0,2 \cdot d_{як}$, $H_{пф} = H_{оф} = 0,25 \cdot d_{як}$, кривая намагничивания стали марки 10895 ГОСТ 3836-83, диаметр провода $d_{пр} = 0,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, число витков $N = 1000$. Толщина a_k корпуса определялась из условия равенства площадей поперечного сечения якоря и корпуса.

В матрицу вычислительного эксперимента не включен относительный рабочий воздушный зазор $\delta_* = \delta/d_{як}$, который фиксировался на 15 уровнях.

На рисунке 3 показаны картины распределения магнитных силовых линий в исследуемых МС при разных H_o , которые подтверждают неправомочность в определенных случаях традиционных допущений о потокораспределении в броневых МС.

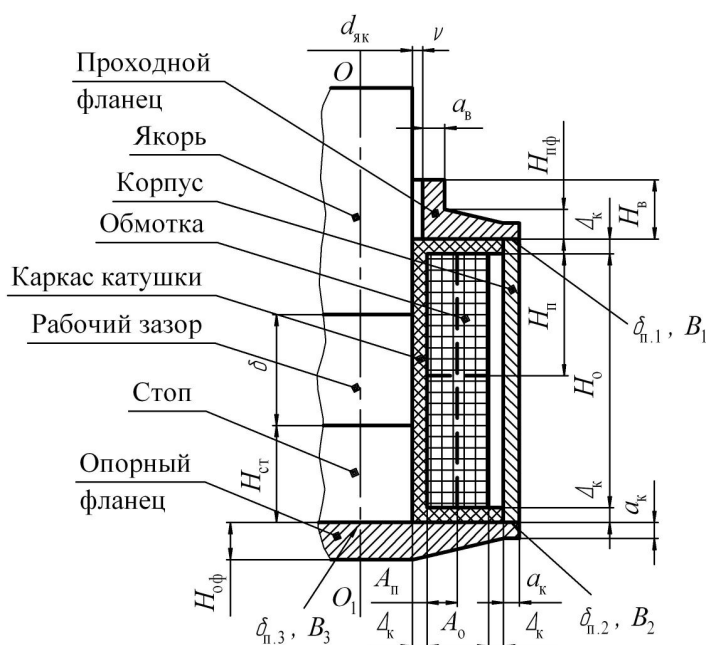


Рисунок 2 – МС ВБЭМ с обозначенными основными размерами и элементами (штриховой линией показано возможное расположение обмоток в катушке: аксиальное и коаксиальное)

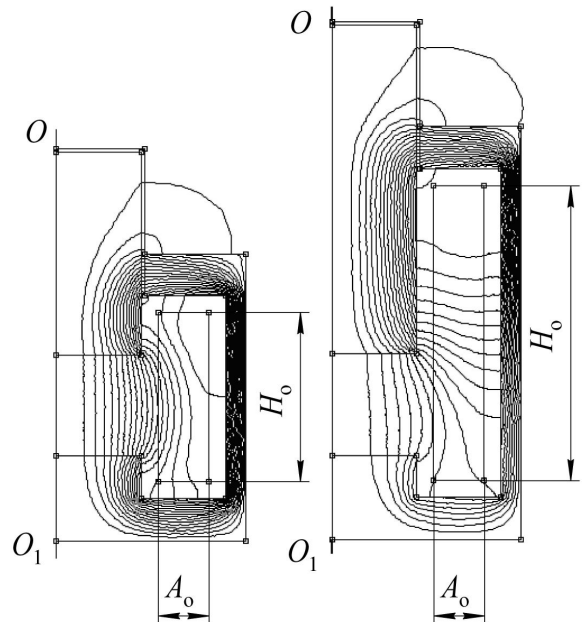


Рисунок 3 – Топологии магнитного поля исследуемых МС ВБЭМ, полученных в программной среде FEMM

Определяющие факторы (геометрические соизмерности в МС и B_m) и пределы их варьирования для однообмоточной МС представлены в виде:

$$1,12 \leq X_1 = H_{о*} = H_o/d_{як} \leq 3,88; \quad 0,019 \leq X_2 = H_{ст*} = H_{ст}/H_o \leq 0,481;$$

$$0,212 \leq X_3 = H_{в*} = H_v/d_{як} \leq 0,488; \quad 0,277 \leq X_4 = A_{о*} = A_o/d_{як} \leq 0,923;$$

$$1,155 \cdot 10^{-2} \leq X_5 = \nu_* = \nu/d_{як} \leq 4,846 \cdot 10^{-2}; \quad 0,884 \text{ Тл} \leq X_6 = B_m \leq 1,716 \text{ Тл};$$

$$0,05 \leq \delta_* = \delta/d_{як} \leq 0,75.$$

Аналогично для двухобмоточной МС с аксиальным расположением:

$$1 \leq X_1 = H_{о*} \leq 4; \quad 0,2 \leq X_2 = H_{п*} \leq 1; \quad 0 \leq X_3 = H_{ст*} \leq 0,5; \quad 0,2 \leq X_4 = H_{в*} \leq 0,5;$$

$0,25 \leq X_5 = A_{0*} \leq 0,95$; $0,01 \leq X_6 = \nu_* \leq 0,05$; $0,85T \leq X_7 = B_m \leq 1,75T$; $0,05 \leq \delta_* \leq 0,75$.
Факторы и диапазоны их варьирования для МС с коаксиальным расположением обмоток те же самые, только вместо высоты ПО $H_{\Pi*} = H_{\Pi}/H_0$ изменяется ее относительная толщина $A_{\Pi*} = A_{\Pi}/A_0$ (см. рисунок 2).

Расчеты функций (1)÷(3) проведены без учета практически неизбежных паразитных (технологических) зазоров между проходным фланцем и корпусом $\delta_{\Pi,1}$, между корпусом и опорным фланцем $\delta_{\Pi,2}$ и между опорным фланцем и стопом $\delta_{\Pi,3}$, которые ввиду их малости в сравнении с δ и ν не могут заметно повлиять на функции P_* , Ψ_* . Их влияние на F учтено в виде падений магнитных напряжений усредненными магнитными индукциями B_1 , B_2 , B_3 в паразитных зазорах величиной $\delta_{\Pi,1}$, $\delta_{\Pi,2}$, $\delta_{\Pi,3}$ соответственно (см. рисунок 2).

Общее количество вычислительных опытов для одно и двухобмоточной МС составило соответственно: $n_{\Sigma 1} = (2^n + 2n + 1) \cdot 15 = 1155$ для $n = 6$ факторов и $n_{\Sigma 2} = 2145$ для $n = 7$.

Получены следующие полиномиальные выражения P_* , F_* , Ψ_* , B_{1*} , B_{2*} , B_{3*} для однообмоточной МС:

$$P_* = 10^{-6} (a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_4 x_4 + a_5 x_5 + a_6 x_6 + a_{11} x_1^2 + a_{22} x_2^2 + a_{33} x_3^2 + a_{44} x_4^2 + a_{55} x_5^2 + a_{66} x_6^2 + a_{12} x_1 x_2 + a_{14} x_1 x_4 + a_{16} x_1 x_6 + a_{23} x_2 x_3 + a_{25} x_2 x_5 + a_{26} x_2 x_6 + a_{46} x_4 x_6 + a_{126} x_1 x_2 x_6 + a_{146} x_1 x_4 x_6 + a_{235} x_2 x_3 x_5 + a_{246} x_2 x_4 x_6)^2; \quad (5)$$

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

$$\Psi_* = 10^{-3} (c_0 + c_1 x_1 + c_2 x_2 + c_4 x_4 + c_5 x_5 + c_6 x_6 + c_{11} x_1^2 + c_{22} x_2^2 + c_{33} x_3^2 + c_{44} x_4^2 + c_{55} x_5^2 + c_{66} x_6^2 + c_{12} x_1 x_2 + c_{16} x_1 x_6 + c_{26} x_2 x_6); \quad (7)$$

$$B_{1*} = B_1/B_m = 10^{-6} (d_0 + d_1 x_1 + d_2 x_2 + d_4 x_4 + d_5 x_5 + d_6 x_6 + d_{11} x_1^2 + d_{22} x_2^2 + d_{66} x_6^2 + d_{12} x_1 x_2 + d_{24} x_2 x_4 + d_{26} x_2 x_6)^2; \quad (8)$$

$$B_{2*} = B_2/B_m = 10^{-6} (e_0 + e_1 x_1 + e_2 x_2 + e_4 x_4 + e_5 x_5 + e_6 x_6 + e_{11} x_1^2 + e_{22} x_2^2 + e_{66} x_6^2 + e_{12} x_1 x_2 + e_{24} x_2 x_4 + e_{26} x_2 x_6)^2; \quad (9)$$

$$B_{3*} = B_3/B_m = 10^{-6} (f_0 + f_1 x_1 + f_2 x_2 + f_4 x_4 + f_5 x_5 + f_6 x_6 + f_{22} x_2^2 + f_{66} x_6^2 + f_{12} x_1 x_2 + f_{14} x_1 x_4 + f_{24} x_2 x_4 + f_{26} x_2 x_6)^2, \quad (10)$$

где a_i , b_i , c_i , d_i , e_i , f_i – коэффициенты полиномиальных зависимостей, представляющие собой функции от относительного зазора δ_* .

Кодированные факторы имеют вид: $x_1 = 1,27 H_{0*} - 3,181$, $x_2 = 7,634 H_{\text{ст}*} - 1,908$, $x_3 = 12,72 H_{\text{в}*} - 4,453$, $x_4 = 5,456 A_{0*} - 3,273$, $x_5 = 95,4 \nu_* - 2,862$, $x_6 = 4,237 B_m - 5,508$.

Средняя погрешность аппроксимации $\frac{1}{n_{\Sigma 1}} \sum_{i=1}^{i=n_{\Sigma 1}} \frac{(Y - Y_i)}{Y}$ между полученными значениями в эксперименте Y и предсказанными значениями Y_i для (5)÷(10) составляет: P_* – 5,7 %; F_* – 4,4 %; Ψ_* – 2,7 %; B_{1*} – 3,9 %; B_{2*} – 4,9 %; B_{3*} – 3,8 %.

Аналогично для МС с аксиальным расположением обмоток: 6,0 %; 1,8 %; 1,0 %; 1,0 %; 2,5 %; 3,2 % и для МС с коаксиальным расположением: 5,0 %; 1,9 %; 1,6 %; 3,5 %; 3,9 %; 3,5 %.

Преобразуя уравнение (4), для однообмоточной МС получено кубическое уравнение

$$x_6^3 + x_6^2 \frac{3M_c}{2c_{66}} + x_6 \frac{4b_{66}N_c + M_e M_c - 2c_{66}N_e}{2b_{66}c_{66}} + \frac{2M_e N_c - M_c N_e}{2b_{66}c_{66}} = 0, \quad (11)$$

где M_c, N_c представляют собой функции c_i и x_i ; M_e, N_e – функции b_i и x_i .

Решением уравнения (11) методом Виета-Кардано получено граничное значение индукции

$$B_{m,г} = (x_{6,г} + 5,508)/4,237. \quad (12)$$

Расчетами установлено, что в среднем $B_{m,г}$ может быть принята равной – 1,1 Тл.

На рисунке 4 приведены тяговые характеристики для ВБЭМ с аксиальным и коаксиальным положением обмоток для геометрических размеров в центре факторного пространства при двух значениях F 1000 А и 2500 А.

Видно, что в МС с аксиальным расположением обмоток при относительно больших δ развивается большее тяговое усилие, чем в системе с коаксиальным расположением. При относительно малых зазорах, наоборот, в аксиальной системе тяговое усилие меньше, чем в коаксиальной.

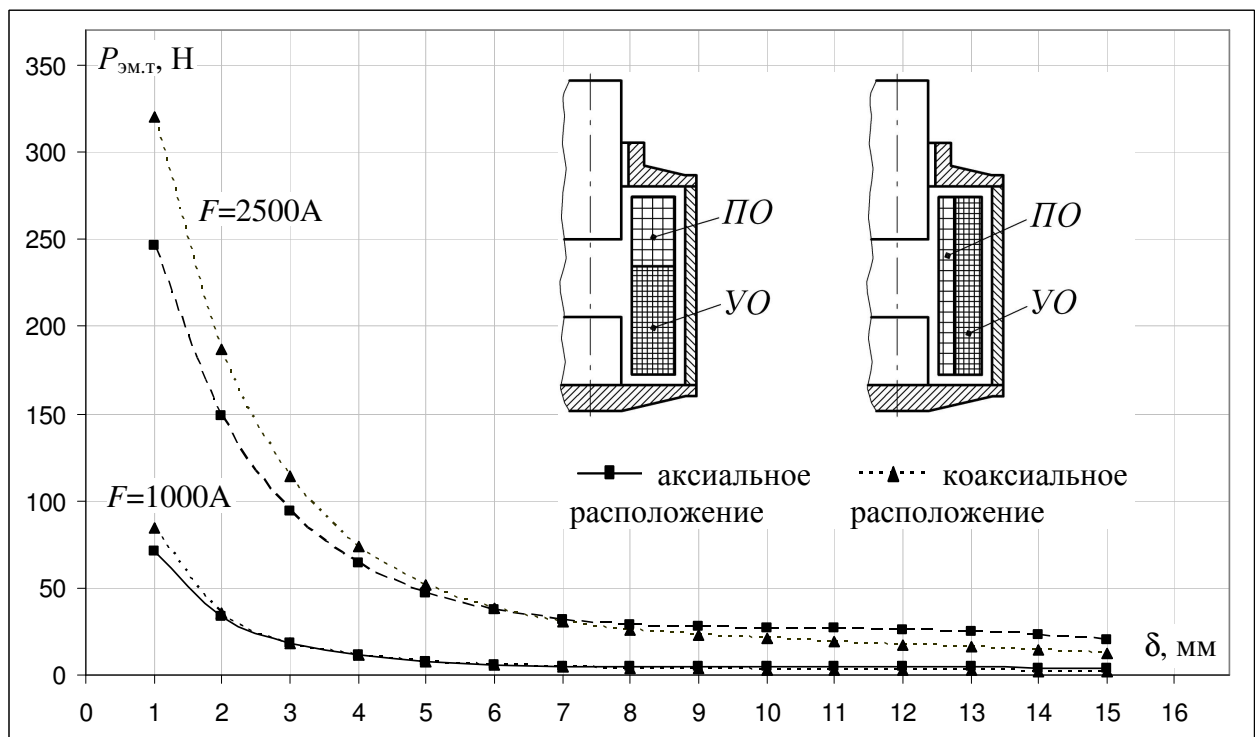


Рисунок 4 – Тяговые характеристики для МС с аксиальным и коаксиальным расположением обмоток

В результате проведенных вычислительных экспериментов разработаны полиномиальные модели СЭМХ, для одно и двухобмоточного ВБЭМ с разными исполнениями катушек: с аксиально и коаксиально размещенными обмотками. Получены выражения для магнитной индукции, устанавливающей границу линейности, что позволяет единообразно описать СЭМХ линейных и нелинейных броневых МС.

Полученные модели, связывающие геометрические размеры МС и ее электромагнитные характеристики, упрощают постановку алгоритмов синтеза и анализа ВБЭМ.

Проведена оценка влияния параметров втяжных броневых МС на их характеристики. Результаты численного анализа полученных моделей поддаются физическому толкованию.

В третьей главе выполнена разработка математических моделей тепловых параметров ВБЭМ в установившемся режиме. В качестве функций цели выбраны:

$$Q_{m*} = \Theta_m/T_0; \quad Q_{v*} = \Theta_v/T_0; \quad Q_{s*} = \Theta_s/T_0, \quad (13)$$

где Θ_m , Θ_v , Θ_s , T_0 – максимальная в толще, среднеобъемная и среднеповерхностная (по наружной поверхности обмотки) температуры, температура окружающей среды соответственно, °C;

Для броневых МС характерна некорректность использования формулы Ньютона: охлаждение поверхностей обмоток, закрытых магнитопроводом, происходит теплопроводностью через слои изоляции, прослойки воздуха, толщины магнитных и немагнитных материалов.

Решение задачи теплообмена в однообмоточной МС ВБЭМ проводилось на модели, показанной на рисунке 5. Коэффициент теплоотдачи с внешней стороны корпуса ЭМ определяется как

$$K_{т.о} = K_{т.к} + K_{т.и},$$

где $K_{т.к} = 1,33(\tau/l)^{0,25}$ – коэффициент конвективного теплообмена, определяемый из критериального уравнения для свободного движения охлаждающей среды, $Bm/(m^2 \cdot ^\circ C)$;

$\tau = T - T_0$ – превышение температуры, °C;

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

$K_{т.и} = \frac{\varepsilon_1 \cdot 5,67 \left[\left(\frac{T+273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_0+273}{100} \right)^4 \right]}{T - T_0}$ – коэффициент теплоотдачи

излучением, $Bm/(m^2 \cdot ^\circ C)$;

ε_1 – степень черноты (принимается равной 0,5);

T – среднеповерхностная температура корпуса, °C.

В качестве факторов были выбраны (см. рисунок 2): $H_{o*} = H_o/d_{як}$, $A_{o*} = A_o/d_{як}$, $v_* = v/d_{як}$, теплопроводность замещающего обмотку тела $\lambda_{3*} = \lambda_3/(K_{т.баз} \cdot d_{як})$, удельная объемная плотности мощности $q_* = q \cdot d_{як}/(K_{т.баз} \cdot T_0)$ и T_0 . За базисный коэффициент теплоотдачи принят $K_{т.баз} = 5,67(2,73 + 0,01T_0)^4/T_0$.

Пределы варьирования факторов эксперимента представлены в виде: $1,199 \leq H_{o*} \leq 3,801$; $0,278 \leq A_{o*} \leq 0,922$; $1,15 \leq v_* \cdot 10^{-2} \leq 4,85$; $1 \leq \lambda_{3*} \leq 1,6$; $1,500 \leq q_* \leq 3,500$; $24,8 \text{ } ^\circ C \leq T_0 \leq 95,2 \text{ } ^\circ C$.

Количество опытов составило: $n_{\Sigma 3} = 2^6 + 2 \cdot 6 + 1 = 77$.

Свойства материалов: теплопроводность стали магнитопровода $\lambda_{ст} = 40 Bm/(m \cdot ^\circ C)$, теплопроводность (текстолита) каркаса $\lambda_{к} = 0,17 Bm/(m \cdot ^\circ C)$, теплопроводность замещающего тела обмотки λ_3 приняты не зависящими от темпера-

туры. Теплопроводность воздуха аппроксимирована полиномиальной зависимостью $\lambda_b = (0,0075 \cdot T_0 + 2,44)/100$.

Следующие геометрические размеры МС фиксировались на постоянном уровне: относительная толщина каркаса катушки $\Delta_k^* = 0,1$, относительная толщина воздушного зазора между каркасом и сердечником $\Delta_b^* = 0,01$. Объемная плотность мощности q принималась равномерно распределенной по объему обмотки.

В качестве примера на рисунке 6 приведены результаты расчета температурного поля однообмоточной МС ВБЭМ в условиях первого опыта (объемная плотность мощности $q_{25} = 5,26 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^3$).

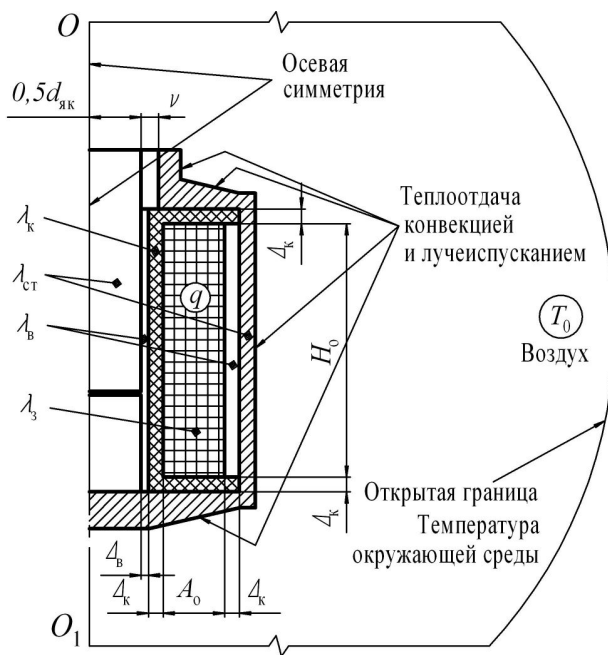


Рисунок 5 – Расчетная модель процессов теплообмена ВБЭМ

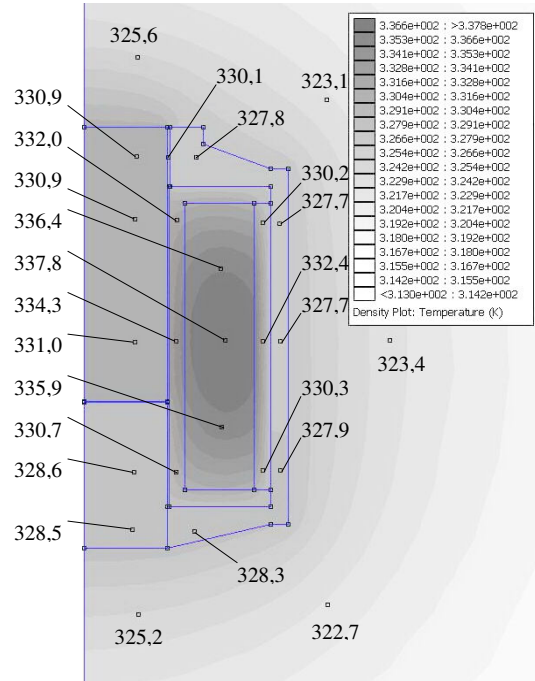


Рисунок 6 – К распределению температуры ($^{\circ}\text{K}$) в меридианном сечении однообмоточной МС ВБЭМ

Получены следующие выражения для Q_{m^*} , Q_{v^*} , Q_{s^*} :

$$Q_{m^*} = 10^{-2} (202,6 + 16,2x_1 + 24,5x_2 - 18,2x_4 + 19,7x_6 - 3,7x_1^2 + 7,3x_4^2 + 5,1x_1x_2 - 3,6x_1x_4 - 3,8x_2x_4 + 2,9x_1x_6 + 4,5x_2x_6 - 3,6x_4x_6); \quad (14)$$

$$Q_{v^*} = 10^{-2} (191,3 + 14,6x_1 + 20,5x_2 - 17,2x_4 + 17,4x_6 - 3,1x_1^2 + 6,9x_4^2 + 4x_1x_2 - 3,2x_1x_4 - 3,7x_2x_4 + 2,6x_1x_6 + 3,6x_2x_6 - 3,4x_4x_6); \quad (15)$$

$$Q_{s^*} = 10^{-2} (187,3 + 13,3x_1 + 18,2x_2 - 17,4x_4 + 16,4x_6 - 3x_1^2 + 7x_4^2 + 3,3x_1x_2 - 3,2x_1x_4 - 3,8x_2x_4 + 2,3x_1x_6 + 3,1x_2x_6 - 3,4x_4x_6), \quad (16)$$

где $x_1 = 1,27 H_{0^*} - 3,181$, $x_2 = 5,464 A_{0^*} - 3,279$, $x_3 = 95,2\nu^* - 2,857$, $x_4 = 0,05 T_0 - 3$, $x_5 = 5,88\lambda_{3^*} - 7,647$, $x_6 = 1,76q^* - 4,401$.

Аналогично были получены модели для установившегося режима (учитывается теплопроводность замещающего УО тела $\lambda_{3^*} = \lambda_{3y^*}$) работы двухобмоточного ВБЭМ. Количество опытов составило $n_{\Sigma 4} = 2^8 + 2 \cdot 8 + 1 = 273$ для восьми факторов.

К факторам эксперимента были добавлены: отношение удельных объемных плотностей мощности ПО и УО $q^* = q_{\text{п}}^*/q_{\text{у}}^*$, отношение теплопроводностей замещающих ПО и УО тел $\lambda^* = \lambda_{\text{зп}}^*/\lambda_{\text{зу}}^*$, толщина ПО $A_{\text{п}}^* = A_{\text{п}}/A_0$ для коаксиального расположения обмоток (высота ПО $H_{\text{п}}^* = H_{\text{п}}/H_0$ – для аксиального).

Функции цели для коаксиального расположения обмоток: $Q_{\text{м}}^* = \Theta_{\text{м}}/T_0$; $Q_{\text{vy}}^* = \Theta_{\text{vy}}/T_0$; $Q_{\text{вп}}^* = \Theta_{\text{вп}}/T_0$; $Q_{\text{sy}}^* = \Theta_{\text{sy}}/T_0$, для аксиального расположения обмоток: $Q_{\text{м}}^* = \Theta_{\text{м}}/T_0$; $Q_{\text{vy}}^* = \Theta_{\text{vy}}/T_0$; $Q_{\text{вп}}^* = \Theta_{\text{вп}}/T_0$; $Q_{\text{sy}}^* = \Theta_{\text{sy}}/T_0$; $Q_{\text{сп}}^* = \Theta_{\text{сп}}/T_0$, где $\Theta_{\text{м}}$, Θ_{vy} , $\Theta_{\text{вп}}$, Θ_{sy} , $\Theta_{\text{сп}}$ – максимальная в толще УО, среднеобъемная УО и ПО, среднеповерхностная УО и ПО температуры соответственно. Средняя ошибка аппроксимации между предсказанными выражениями и результатами моделирования для одно и двухобмоточного ВБЭМ с аксиальным и коаксиальным расположением обмоток не превосходит соответственно: 2,8; 3,3 и 3,7 %.

Проведенные исследования показали, что расчетные выражения для $\Theta_{\text{м}}$ и $\Theta_{\text{с}}$ позволяют определить и значение Θ_{v} как их среднеарифметическое значение с погрешностью не более 0,9 %.

Разработанные модели тепловых параметров обмоток для одно и двухобмоточного ВБЭМ устанавливают их зависимость с геометрическими соизмерностями МС, температурой окружающей среды и удобны для применения в методиках синтеза ВБЭМ, при этом не требуется предварительного расчета радиуса слоя обмотки с максимальной температурой, коэффициентов теплопередачи с наружной и внутренней боковых поверхностей обмоток.

В четвертой главе предложен алгоритм расчета динамики срабатывания, базирующийся на методе конечных элементов. На его основе методами подобия и регрессионного анализа получены математические модели динамических параметров однообмоточного ВБЭМ.

Для исследования электромеханических переходных процессов в ВБЭМ постоянного напряжения предложена методика, заключающаяся в комбинированном решении уравнений динамики: уравнение электрической цепи обмотки решается методом Эйлера, на каждом шаге расчета которого магнитное поле рассчитывается методом конечных элементов в программной среде FEMM. Учет вихревых токов произведен с помощью подсчета дополнительных сопротивлений вторичных контуров токов в магнитопроводе 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 алгоритме не учитываются.

В качестве исследуемых функций цели выбраны скорость якоря в моменты замыкания контактов $V_{\text{к}}$ и срабатывания ЭМ $V_{\text{м}}$ и соответствующие времена $t_{\text{к}}$ и $t_{\text{м}}$ коммутационного аппарата, представленные в безразмерной форме:

$$V_{\text{к}}^* = V_{\text{к}}/V_{\text{баз}}; V_{\text{м}}^* = V_{\text{м}}/V_{\text{баз}}; t_{\text{к}}^* = t_{\text{к}}/t_{\text{баз}}; t_{\text{м}}^* = t_{\text{м}}/t_{\text{баз}}, \quad (17)$$

где $V_{\text{баз}} = d_{\text{с}}/\tau_{\text{нв}}$ и $t_{\text{баз}} = \tau_{\text{нв}}$; $\tau_{\text{нв}}$ – электромагнитная постоянная времени цепи питания обмотки, рассчитанная с учетом влияния короткозамкнутых контуров при начальном положении якоря.

Для обеспечения применимости разрабатываемых моделей к подобным ЭМ, а также для сокращения числа независимых переменных в качестве факторов вычислительного эксперимента использованы безразмерные критерии подобия динамических процессов включения ЭМ:

$$Z_1 = \frac{\delta_H}{d_{\text{як}}}; Z_2 = \frac{H_0}{d_{\text{як}}}; Z_3 = \frac{A_0}{d_{\text{як}}}; Z_4 = \frac{p}{\delta_H}; Z_5 = \frac{P_{\text{мх.н}} \delta_H}{P_{\text{эл}} \tau_{\text{нв}}}; Z_6 = \frac{d_{\text{як}}}{\tau_{\text{нв}}} \sqrt{\frac{m}{P_{\text{мх.н}} \delta_H}},$$

где $P_{\text{мх.н}}$ – противодействующее усилие при начальном рабочем воздушном зазоре δ_H в приводном ЭМ контактора (см. рисунок 7);

$p = \delta_H - \delta_1$ – раствор главных контактов контактора;

$P_{\text{эл}}$ – мощность, выделяющаяся в обмотке при заданных геометрических размерах, типе провода (ПЭВ-1, $d_M = 0,23$, $K_3 = 0,5$) и заданной температуре нагрева обмотки;

m – приведенная масса подвижных элементов аппарата, связанная с якорем МС.

Динамические процессы в ВБЭМ описываются системой уравнений:

$$\begin{cases} U = iR_r + \frac{d\Psi}{dt}; & 0 = i_3 R_3 + \frac{d\Psi}{dt}; \\ \Psi = f_1(i, x); & P_{\text{эм.т}} = \int_0^i \frac{\partial \Psi}{\partial x} di; & ma(x) = P_{\text{эм.т}} - P_{\text{мх}}(x), \end{cases} \quad (18)$$

где U – напряжение источника питания;

R_r – активное сопротивление обмотки в горячем состоянии, определяется с помощью полученных моделей (14) и (15) при известной максимальной допустимой температуре в толще обмотки $\Theta_{\text{доп}}$;

R_3 – эквивалентное сопротивление короткозамкнутых контуров вихревых токов, определяемое по известным выражениям¹. Элементарное перемещение на отрезке времени dt рассчитывается по формуле:

$$dx = Vdt + a \frac{dt^2}{2}. \quad (19)$$

Выражение (18) можно преобразовать, заменив производные $d\Psi/di$ и $d\Psi/dx$ конечными разностями. Тогда для (18) можно записать:

$$U = iR_r + \frac{\Delta\Psi}{\Delta i} \frac{di}{dt} + \frac{\Delta\Psi}{\Delta x} V. \quad (20)$$

Для учета вихревых токов на каждом k -м шаге интегрирования перед вычислением тягового усилия корректируются значение тока i_k по формуле

$$i_k = i_k - \frac{U - i_k R_r}{N^2 R_3}.$$

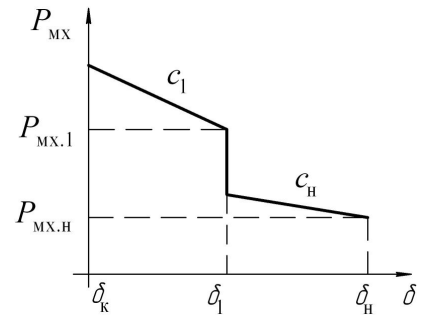


Рисунок 7 – Механическая характеристика приводного ЭМ контактора

¹ Клименко Б.В. Форсированные электромагнитные системы. – М., 1989. – С. 66.

Алгоритм расчета динамики срабатывания сведен к следующей последовательности вычислений:

1. Задаются основные исходные данные в препроцессоре программы FEMM, геометрические размеры МС и параметры однообмоточного ЭМ: $d_{\text{як}}$, H_0 , A_0 , $H_{\text{ст}^*} = 0,12$, $H_{\text{в}^*} = 0,35$, $\nu^* = 0,03$, $\delta_{\text{н}}$, p , $P_{\text{мх.н}}$, $c_{\text{н}} = 75 \cdot P_{\text{мх.н}}$, m , U , R_{Γ} , N .

2. На этапе трогания задается положительное изменение тока di . Для первого шага задается начальное очень малое значение тока i_0 . Вычисляются в программе

FEMM Ψ_k и $P_{\text{эм.т}k}$ на k -м шаге интегрирования. Вычисляется $\frac{\Delta\Psi}{\Delta i} = \frac{\Psi_{i_k+\Delta i} - \Psi_{i_k}}{\Delta i}$

для малого приращения тока $\Delta i = 10^{-3}$ А. По формуле (20) рассчитывается dt . Расчет повторяется с п. 2 до тех пор, пока не будет выполнено $P_{\text{эм.т}k} \geq P_{\text{мх.н}}$.

3. На этапе движения, когда выполняется $P_{\text{эм.т}k} \geq P_{\text{мх.н}}$, задаемся значением изменения времени dt .

4. Пока якорь не переместился на расстояние до замыкания главных контактов или при $(\delta_{\text{н}} - \delta) < p$ противодействующее усилие рассчитывается по формуле: $P_{\text{мх.к}} = P_{\text{мх.н}} + c_{\text{н}} \cdot (\delta_{\text{н}} - \delta)$. Когда расстояние, равное раствору главных контактов пройдено и начинает действовать пружина главных контактов, противодействующее усилие равно $P_{\text{мх.к}} = 3,5 \cdot P_{\text{мх.н}} + 3c_{\text{н}} \cdot (\delta_{\text{н}} - \delta)$.

По формуле (19) определяются ускорение a_k и скорость якоря V_k .

5. Вычисляется $\frac{\Delta\Psi}{\Delta i} = \frac{\Psi_{i_k+\Delta i} - \Psi_{i_k}}{\Delta i}$. Отношение приращения потокосцепления к перемещению $\frac{\Delta\Psi}{\Delta x} = \frac{\Psi_{i_k+\Delta x} - \Psi_{i_k}}{\Delta x}$ рассчитывается для известного текущего значения тока i_k при малом перемещении якоря $dx = 5 \cdot 10^{-5}$ м. По формуле (20) определяется di .

6. Перестраиваются геометрические размеры МС в препроцессоре для полученного значения перемещения dx по формуле (20). Операции повторяются с п. 5, пока текущее значение рабочего воздушного зазора не станет меньше 0,2 мм.

В качестве примера на рисунке 9 приведены рассчитанные динамические характеристики по вышеприведенному алгоритму для ВБЭМ для условий первого опыта: $\delta_{\text{н}} = 6\text{мм}$, $H_0 = 50\text{мм}$, $A_0 = 10\text{мм}$, $p = 3,9\text{мм}$, $P_{\text{мх.н}} = 1,62\text{Н}$, $m = 0,284\text{кг}$, $U = 46,6\text{В}$, $R_{\Gamma} = 372,5\text{Ом}$, $N = 6024$, $\tau_{\text{нв}} = 18,03 \cdot 10^{-3}\text{с}$.

Исследовано влияние вихревых токов на $V(t)$ для двух вариантов механической характеристики с начальными жесткостями $c_{\text{н}}$ и $3,5c_{\text{н}}$, $c_{\text{н}} = 100\text{Н/м}$. Полученные данные свидетельствуют о влиянии вихревых токов, находящемся в пределах 9 %.

При проведении вычислительного эксперимента приняты (см. рисунок 2): $d_{\text{як}} = 20 \cdot 10^{-3}\text{м}$; $H_{\text{ст}^*} = 0,12$; $H_{\text{в}^*} = 0,35$; $A_{\text{п}^*} = 1$; $\nu^* = 0,03$; $P_{\text{мх.1}} = 3,5P_{\text{мх.н}}$ – противодействующее усилие, соответствующее моменту замыкания контактов контактора; $c_1 = 3c_{\text{н}}$ – соотношение жесткостей контактных и возвратных пружин.

Разработана методика планирования эксперимента при моделировании динамических параметров включения однообмоточного ВБЭМ, в качестве факторов ко-

того предложены критерии подобия динамики срабатывания ЭМ, обладающие наглядной формой и обеспечивающие применимость моделей для подобных ЭМ, а также сокращение числа независимых переменных при постановке эксперимента.

Диапазоны варьирования факторов в эксперименте представлены в виде: $0,224 \leq Z_1 \leq 0,576$; $2,12 \leq Z_2 \leq 3,88$; $0,424 \leq Z_3 \leq 0,776$; $0,612 \leq Z_4 \leq 0,788$; $0,070 \leq Z_5 \leq 0,100$; $5,70 \leq Z_6 \leq 7,10$. Количество опытов составило 77.

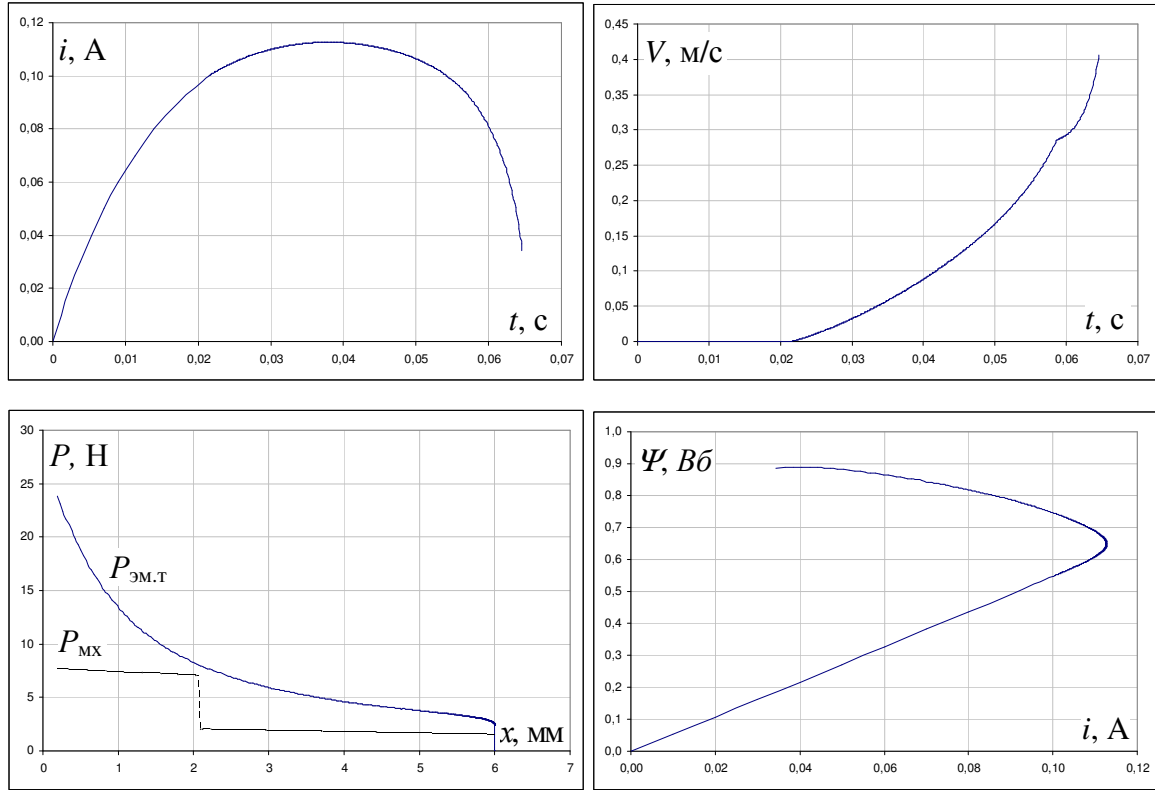


Рисунок 8 – Динамические характеристики ВБЭМ для значений факторов первого опыта

Полученные выражения для безразмерных динамических параметров:

$$t_{K*} = 10^{-2} (472,3 + 39,1z_1 + 34,3z_2 - 4,8z_3 + 7,3z_4 + 32,2z_5 + 16,9z_6 - 18,5z_1^2 - 12z_2^2 - 10,3z_3^2 + 28,8z_4^2 - 13,5z_5^2 - 14,5z_6^2 - 4,7z_2z_3 + 5,4z_2z_5); \quad (21)$$

$$t_{M*} = 10^{-2} (506,8 + 46,3z_1 + 36,4z_2 - 5,2z_3 + 34,2z_5 + 18,6z_6 - 20z_1^2 - 13,5z_2^2 - 11,5z_3^2 + 32,4z_4^2 - 15z_5^2 - 16,1z_6^2 + 5,6z_2z_5); \quad (22)$$

$$V_{K*} = 10^{-3} (257,8 + 11,2z_1 - 17,4z_2 + 3,7z_3 + 27,1z_4 - 17,8z_5 - 16,6z_6 + 9z_1^2 + 10,1z_2^2 + 7,4z_3^2 - 17,1z_4^2 + 11,4z_5^2 + 11,4z_6^2 - 3,8z_1z_2); \quad (23)$$

$$V_{M*} = 10^{-3} (514,8 + 52z_1 - 26,4z_2 + 6,7z_4 - 31,4z_5 - 32,4z_6 + 11,1z_1^2 + 17,1z_2^2 + 14,7z_3^2 - 37,3z_4^2 + 22,2z_5^2 + 21,9z_6^2 - 5,9z_1z_2), \quad (24)$$

где кодированные значения факторов $z_1 = 10\delta_* - 4$, $z_2 = 2H_{o*} - 6$, $z_3 = 10A_{o*} - 6$, $z_4 = 20p_* - 14$, $z_5 = 117,4Z_5 - 9,977$, $z_6 = 2,5Z_6 - 16$.

Погрешность аппроксимации степенными рядами в (21)÷(24) не превышает 9 %.

С помощью применения разработанного алгоритма динамики срабатывания ВБЭМ постоянного напряжения, получены полиномиальные модели его динамических параметров, позволяющие разработать эффективные методики синтеза форси-

рованных приводных ЭМ с учетом требующихся динамических параметров электромагнитного аппарата (контактора, пускателя, реле и т.п.).

В пятой главе проведена оценка адекватности полученных моделей СЭМХ. Был исследован броневой ЭМ контактора типа SMM-60DP DC220V (LS Industrial Systems). Результаты расчета по формулам (5)÷(6) и экспериментальные данные представлены на рисунке 9. Учтено влияние паразитных зазоров с помощью выражения $F = (F_* B_m d_{\text{як}} + B_i \delta_{\text{пi}}) / \mu_0$, где B_i – магнитная индукция в месте паразитного зазора величиной $\delta_{\text{пi}}$ (см. рисунок 2). Электромагнит имеет следующие параметры: $U = 220\text{В}$, $I = 0,090\text{А}$, $N = 21642$, $d_{\text{пр}} = 0,18\text{мм}$, $d_{\text{як}} = 24\text{мм}$, $H_0 = 50\text{мм}$, $A_0 = 21\text{мм}$, $H_{\text{ст}} = 30\text{мм}$, $H_{\text{в}} = 3,3\text{мм}$, $\nu = 1,25\text{мм}$, $\delta = 7\text{мм}$, $\delta_{\text{пi}} = 0,25\text{мм}$.

Среднее расхождение между тяговым усилием, измеренным экспериментально, и усилием, полученным с помощью математических моделей, составляет 13,3 %. Та же самая погрешность для данных, полученных по методике Любчика М.А.² составляет 14,2 %. При этом можно отметить следующие недочеты методики Любчика М.А.: 1) выражение для удельной проводимости рассеяния на пути бокового потока не включает в себя величину воздушного рабочего зазора, что вносит дополнительную погрешность; 2) учет паразитных зазоров $\delta_{\text{п1}}$, $\delta_{\text{п2}}$ и $\delta_{\text{п3}}$ происходит путем учета падения напряжения на эквивалентном суммарном сосредоточенном зазоре $\delta_{\text{ЭК}}$; 3) расчет коэффициента, учитывающего наличие потока выпучивания и искажения поля в рабочем зазоре проводится для приближенных значений диапазонов изменения относительного рабочего зазора.

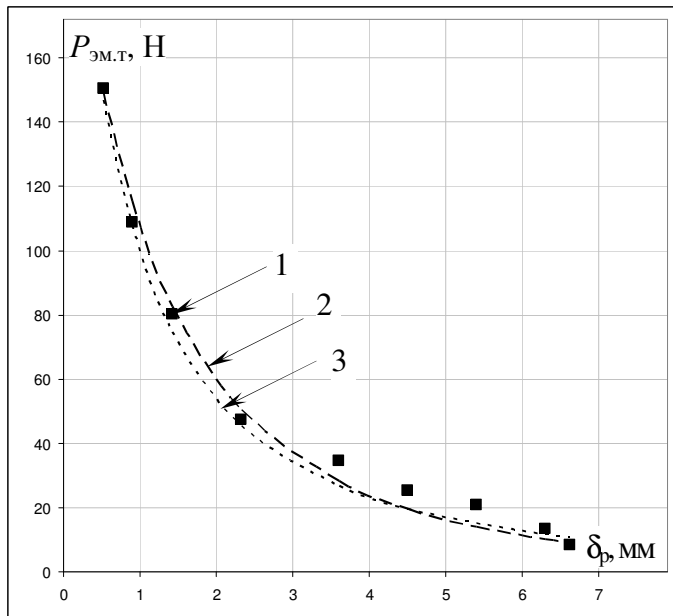


Рисунок 9 – Статические тяговые характеристики: 1 – эксперимент, 2 – расчет по моделям; 3 – расчет по методике Любчика М.А.

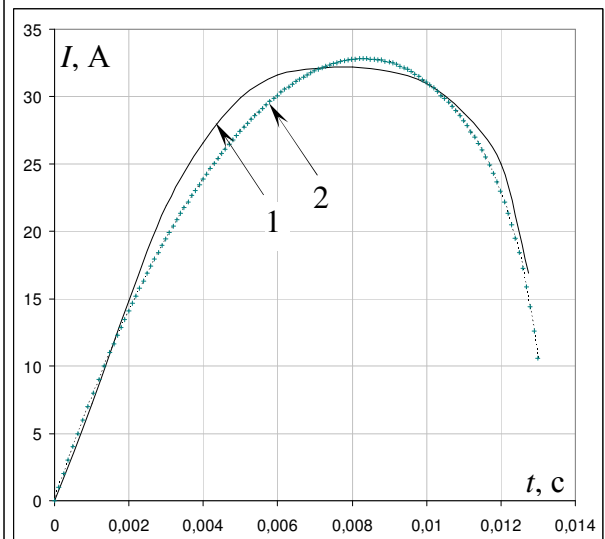


Рисунок 10 – Зависимости изменения тока в обмотке при включении электромагнита: 1 – эксперимент, 2 – расчет

² Любчик М.А. Силовые электромагниты аппаратов и устройств автоматики постоянного тока. – М., 1968. – 152 с.

Дана оценка адекватности тепловой модели максимальной температуры Θ_m (14) на основе сопоставления экспериментально полученных данных Никитенко А.Г.³ для ЭМ со следующими размерами и параметрами: $N = 1076$, $d_{\text{пр}} = 1\text{мм}$, марка провода ПЭТВ-1, $\lambda_3 \approx 0,2\text{Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$, $d_{\text{як}} = 32\text{мм}$, $H_0 = 88\text{мм}$, $A_0 = 16\text{мм}$, $\nu = 0,25\text{мм}$, $T_0 = 20^\circ\text{C}$. Относительное расхождение не превышает 8,7 процента.

Протестирован алгоритм моделирования динамики включения с помощью экспериментально снятых данных Гараниным А.Ю.⁴ для модели ВБЭМ постоянного напряжения со следующими параметрами: $R = 0,276\text{Ом}$, $N = 144$, $\delta = 11,5\text{мм}$, $d_{\text{як}} = 20,78\text{мм}$, $H_0 = 46,7\text{мм}$, $A_0 = 7,81\text{мм}$, $H_{\text{ст}} = 20\text{мм}$, $H_{\text{в}} = 11,3\text{мм}$, $\nu = 0,6\text{мм}$. Противодействующее усилие создавалось подвешенным за якорь грузом массой 0,25 кг.

Расчетные данные вполне удовлетворительно согласуются с опытом (см. рисунок 10). Время расчета первого этапа алгоритма зависит от выбранного значения di . Погрешность расчета тока в сравнении с опытными данными не превышает 11,1%, времени срабатывания электромагнита – 2%.

Предложена методика синтеза однообмоточного ВБЭМ постоянного напряжения для длительного режима работы.

Условия проектирования: при критическом значении воздушного рабочего зазора $\delta_{\text{кр}}$ ЭМ должен развивать усилие $P_{\text{мх.кр}}$ при минимальном напряжении в цепи его питания; обмотка при сопротивлении, соответствующем длительному ее нагреву R_r , при максимально возможном напряжении должна нагреваться до температуры, не превышающей допустимой $\Theta_{\text{доп}}$.

Исходные данные для расчета: основные геометрические соизмерности МС: H_{0*} , A_{0*} , $H_{\text{ст}*}$, $H_{\text{в}*}$, ν_* , $\Delta_{\text{к}*} = 0,1$; координаты критической точки на механической характеристике $(\delta_{\text{кр}}, P_{\text{мх.кр}})$; кратности максимального $K_{\text{Уmax}} \geq 1$, минимального $K_{\text{Уmin}} \leq 1$ напряжения питания; коэффициент запаса по напряжению срабатывания $K_{\text{Уср}} \geq 1$; коэффициент заполнения $0,3 \leq K_3 \leq 0,7$ обмоточного окна; допустимая температура $\Theta_{\text{доп}}$ нагрева обмотки; температура T_0 окружающей среды.

Мощность, выделяющаяся в обмотке

$$P_{\text{эл}} = H_0 A_0 \pi d_{\text{як}} (1 + 2\Delta_{\text{к}*} + A_{0*}) q. \quad (25)$$

Максимальная магнитодвижущая сила F_{max} с учетом (25)

$$F_{\text{max}} = d_{\text{як}}^2 H_{0*} A_{0*} \sqrt{\frac{K_3 q}{\rho_0 (1 + \alpha \Theta_{\text{в}})}}, \quad (26)$$

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

Магнитодвижущая сила срабатывания $F_{\text{ср}}$ с учетом $F_{\text{ср}} = F_{\text{max}} / K_{\text{max}}$ может быть записана в виде

³ Никитенко А.Г., Гринченков В.П., Ковалев О.Ф. Расчет температурных полей электрических аппаратов методом конечных элементов // Изв. вузов. Электромеханика. – 1984. – № 5. – С. 86-92.

⁴ Гаранин А.Ю. Методика расчета динамических характеристик втяжного электромагнита постоянного тока // Электротехника. – 2001. – № 11. – С. 48-52.

$$F_{cp} = \frac{d_{як}^2 H_{o*} A_{o*}}{K_{max}} \sqrt{\frac{K_3 q}{\rho_0 (1 + \alpha \Theta_v)}}, \quad (27)$$

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

Алгоритм включает в себя следующие действия:

1. Принимается значение $d_{як}$ на первом шаге поиска.
2. По формуле (5) определяется такое значение B_m , при котором выполняется $P_{эм.т} = P_{мх.кр}$. Определяем F_{cp1} по формуле (6).

Определяется значение $B_{m.гр}$ из анализа кривых намагничивания по (12). Если $B_m < B_{m.гр}$, то F_* рассчитывается при $B_m = B_{m.гр}$, иначе F_* зависит от B_m .

3. По формуле (14) определяется такое значение q , при котором $\Theta_m = \Theta_{доп}$. По полученному значению, используя (15), можно определить Θ_v . По формуле (27) определяется F_{cp2} .

4. Сравниваем полученные значения F_{cp1} и F_{cp2} . Если выполняется $(F_{cp1} - F_{cp2}) / F_{cp1} \leq 0,01$, расчет закончен. Если нет, значение $d_{як}$ увеличивается.

Блок-схема алгоритма показана на рисунке 11.

На основе разработанного алгоритма динамики проведена оценка работоспособности контактно-дугогасительной системы автоматического выключателя в режиме короткого замыкания путем исследования динамических характеристик максимального электромагнитного расцепителя модульного автоматического выключателя.

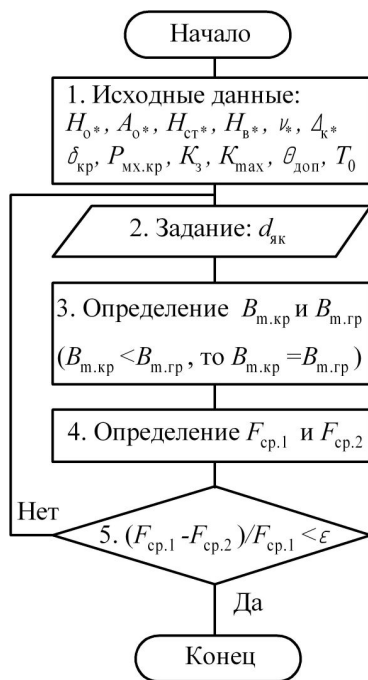


Рисунок 11 – Алгоритм методики синтеза ВБЭМ

Расчетным путем в программной среде FEMM исследовано влияние на статическую тяговую характеристику броневой втяжной МС угла конусности якоря с конусообразным полюсом серийно выпускаемого реле РВ-100. Проведенные исследования позволили уменьшить потребляемую реле мощность не меньше чем в 1,6 раза.

Проведенная оценка адекватности полученных моделей статических электромагнитных, тепловых и алгоритма моделирования динамики включения ВБЭМ позволяет утверждать о их достоверности. Опробование разработанных методик при исследовании и модернизации существующих МС показало их эффективность и практическую применимость.

Проведенная оценка адекватности полученных моделей статических электромагнитных, тепловых и алгоритма моделирования динамики включения ВБЭМ позволяет утверждать о их достоверности. Опробование разработанных методик при исследовании и модернизации существующих МС показало их эффективность и практическую применимость.

На основе разработанных моделей (1)÷(3) и (13) разработана методика синтеза ВБЭМ постоянного напряжения, позволяющая эффективно определить его размеры с минимальным количеством предварительно задаваемых констант, а также составить основу методики синтеза оптимальных ВБЭМ.

В ПРИЛОЖЕНИИ Д диссертационной работы приведена усовершенствованная инженерная методика синтеза короткоходового ВБЭМ постоянного напряже-

ния, базирующаяся на цепевых методах расчета, учитывающая магнитное состояние ферромагнитных элементов конструкции, характеризующаяся неограниченностью в применении по величине условно-полезной работы, допустимого превышения температуры обмотки, режима работы.

В ПРИЛОЖЕНИИ Г диссертационного исследования показано, что размеры синтезируемого ЭМ зависят и от условий технологического процесса производства, стабильности напряжения источника питания, условий окружающей его среды.

Сформулированы направления дальнейших исследований:

1. На основе вышеприведенной методики возможна реализация оптимизационных алгоритмов. Например, условие минимального потребления мощности катушкой однообмоточного ЭМ выполняется при минимизации выражения (25), которое возможно осуществлять во внешнем цикле для ряда значений геометрических соразмерностей различными численными методами.

2. Задача оптимального проектирования с учетом динамических характеристик сводится к определению критериев подобия, при которых реализуется зависимость $V(t)$, наиболее близкая к желаемой. Идеальным вариантом режима движения якоря ЭМ будет такой, при котором $V_M \rightarrow \min$ или $V_M = V_{M\min}$. Поиск экстремумов динамических параметров (17) возможно осуществлять во внешнем цикле при различных значениях основных геометрических соотношений, например методом сканирования.

3. На основе полученных моделей статических характеристик и тепловых параметров для двухобмоточной МС с различными исполнениями катушек возможна разработка методики синтеза ВБЭМ в схемах форсированного управления для различных режимов работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основе совместного применения методов теории подобия, планирования эксперимента и конечных элементов, реализованного в программной среде FEMM получены:

- полиномиальные модели СЭМХ для одно и двухобмоточной МС ВБЭМ при разных исполнениях катушек: с аксиально и коаксиально расположенными обмотками, определены их границы линейности;

- полиномиальные модели тепловых параметров в установившемся режиме нагрева обмотки для одно и двухобмоточного ВБЭМ с учетом специфики его конструкции;

- полиномиальные модели динамических параметров ВБЭМ с учетом влияния нелинейности ферромагнитных материалов МС и вихревых токов на основе предлагаемого алгоритма расчета динамики.

2. Полученные модели по форме представления удобны для применения в методиках синтеза, в том числе ресурсо- и энергосберегающих приводных ЭМ коммутационных аппаратов, средств автоматики и управления при различных схемах соединения ПО и УО. Они описывают необходимые параметры и характери-

стики ВБЭМ в критериальной (безразмерной) форме и применимы в расчетах безотносительно геометрических размеров ЭМ, учитывают тепловое состояние обмотки, не требуют многократного выполнения громоздких расчетов магнитного поля МС, что существенно сокращает затраты времени при параметрическом синтезе ЭМ.

3. Предложен алгоритм расчета динамики включения ВБЭМ постоянного напряжения на основе решения электрического уравнения цепи обмотки с учетом вихревых токов методом Эйлера. Характеристики ВБЭМ на каждом шаге рассчитываются методом конечных элементов в программной среде FEMM.

4. Предложена усовершенствованная методика синтеза ВБЭМ постоянного напряжения с плоским стопом на базе моделей, полученных методами теории цепей, позволившая 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 СЭМХ и установившихся тепловых параметров, минимизирующая количество произвольно выбираемых коэффициентов, на основе которой предложены методики синтеза с учетом критериев оптимальности.

6. Проведены расчеты магнитной системы серийного реле времени РВ-100, позволившие выработать рекомендации по снижению потребляемой мощности в 1,6 раза, и исследованы динамические характеристики максимального электромагнитного расцепителя автоматического модульного выключателя, разработанного в ОАО «ВНИИР-Прогресс».

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В научных изданиях, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки РФ:

1. 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.

2. Нагрузочные характеристики втяжных электромагнитов с круглыми полюсными наконечниками / Е.В. Архипова, И.П. Иванов, А.В. Приказчиков, Н.В. Руссова, Г.П. Свинцов // *Известия высших учебных заведений. Электромеханика*. – 2012. – №4. – С. 26-30.

3. 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.

4. 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.

5. Архипова, Е.В. Усовершенствованная методика проектного расчета броневых электромагнитов постоянного напряжения с внедряющимися якорями / Е.В. Ар-

хипова, Н.В. Руссова, Г.П. Свинцов // Вестник Чувашского университета. – 2013. – № 3. – С. 156-161.

В других научных изданиях:

6. 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.

7. 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.

8. 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.

9. 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. 66-74.

10. 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. 44-56.

11. 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.

12. К тепловому расчету двухобмоточных форсированных электромагнитов / Е.В. Архипова, А.В. Приказшиков, 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.

13. Архипова, Е.В. К усовершенствованной методике проектного расчета броневых электромагнитов постоянного напряжения / Е.В. Архипова, Г.П. Свинцов // Сборник конкурсных работ Всероссийского смотра-конкурса научно-технического творчества студентов высших учебных заведений «Эврика-2008». – Новочеркасск: Лик, 2008. – С. 403-406.

14. 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.

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. Синтез броневго 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.

18. 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.

19. 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.

20. Усовершенствованная методика проектного расчета броневго электромагнита постоянного напряжения с втяжным якорем / О.Е. Алексеева, Е.В. Архипова, И.П. Иванов, О.А. Никитина, Н.В. Руссова, Г.П. Свинцов // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике: материалы IX Всерос. науч.-техн. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2014. – С. 58-61.

Патенты:

21. 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. Приказчиков, Г.П. Свинцов, Ю.М. Федоров // Бюл. «Изобретения. Полезные модели». – 2014. – № 1.

22. 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. Приказчиков, Ю.М. Федоров, Е.В. Сагарадзе // Бюл. «Изобретения. Полезные модели». – 2014. – № 19.

Личный вклад соискателя в работы, опубликованные в соавторстве:

[1, 17, 18] – разработка методики исследования;

[2, 3, 8, 10, 14, 15] – разработка моделей статических электромагнитных характеристик, их исследование и обработка данных;

[4, 6, 12] – разработка и исследование моделей тепловых параметров и характеристик, анализ результатов;

[5, 9, 11, 13, 19, 20] – обзор известных подходов и методик проектного расчета, исследование магнитных систем;

[7, 16] – разработка методики планирования эксперимента моделирования динамических процессов, обработка данных;

[21, 22] – исследование магнитной системы приводного электромагнита контактора, ее оптимизация.