

На правах рукописи

Никитина Олеся Алексеевна

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

Специальность 05.09.01
Электромеханика и электрические аппараты

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Чебоксары 2017

Работа выполнена на кафедре электрических и электронных аппаратов федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова» (г. Чебоксары).

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Свинцов Геннадий Петрович

Официальные оппоненты: **Павленко Александр Валентинович**
доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова», кафедра «Электромеханика и электрические аппараты», заведующий кафедрой;

Дергачев Павел Андреевич
кандидат технических наук, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», кафедра электромеханики, электрических и электронных аппаратов, старший научный сотрудник.

Ведущая организация: **федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет»**

Защита состоится «25» декабря 2017 г. в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.301.06 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова» по адресу: г. Чебоксары, ул. Университетская, д. 38 (учебный корпус №3), зал заседаний Ученого совета, к.301.

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

Автореферат разослан «25» октября 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.301.06

Н.В. Руссова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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

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

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

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

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

В свою очередь применение оптимизационных методик, базирующихся на обобщенных электромагнитных и тепловых

характеристиках, полученных совместным использованием методов конечных элементов, теории подобия и планирования эксперимента, обеспечивает существенное сбережение ресурсов и электрической энергии, что является одной из важнейших задач электротехники.

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

Цель диссертационной работы – усовершенствование методик проектирования форсированных оптимальных ВБЭМ с различными схемами форсировки и математическое описание оптимальных соизмерностей и параметров в виде полиномиальных зависимостей.

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

1. Сравнительный анализ ВБЭМ и их методик проектирования с форсированным управлением.

2. Разработка усовершенствованных методик синтеза форсированных однообмоточных ВБЭМ в схеме с балластным резистором.

3. Разработка усовершенствованных методик синтеза форсированных двухобмоточных ВБЭМ.

4. Математическое описание оптимальных соизмерностей и параметров ВБЭМ в виде полиномиальных зависимостей.

5. Анализ, оценка и обобщение результатов проектирования оптимальных однообмоточных ВБЭМ в схеме с балластным резистором и двухобмоточных форсированных ВБЭМ.

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

Предмет исследования – разработка усовершенствованных методик проектного и оптимизационного расчетов.

Область исследования – методики синтеза ВБЭМ с плоским стопом.

Научная новизна работы:

1. Предложенные методики проектирования форсированных ВБЭМ на базе использования обобщенных нагрузочных и тепловых характеристик, в отличие от известных, позволяют значительно снизить затраты на доводку опытных образцов приводных ЭМ, что повышает качество проектных работ.

2. Предложенные оптимизационные методики с использованием двухразового сканирования факторного пространства позволяют с погрешностью, не превышающей 6 %, определить оптимальные значения параметров за приемлемое время, не требующие выполнения повторных оптимизационных расчетов.

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

4. Оригинальным результатом исследования являются полученные в удобной форме для расчета на ПЭВМ полиномиальные зависимости, учитывающие особенности конструкции и схемы питания, что позволяет упростить процесс проектирования и не требует высокой квалификации проектировщика.

Теоретическая и практическая значимость работы:

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

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

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

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

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

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

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

Основные положения диссертационной работы, выносимые на защиту:

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

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

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

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

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

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

– Региональный фестиваль студентов и молодежи «Человек. Гражданин. Ученый», Чебоксары, 2012 г.;

– Региональный фестиваль студентов и молодежи «Человек. Гражданин. Ученый», Чебоксары, 2014 г.;

– Всероссийская 48-я научная студенческая конференция по техническим, гуманитарным и естественным наукам, Чебоксары, 2014 г.;

– XI Республиканская научно-техническая конференция молодых специалистов, Чебоксары, 2014 г.;

– IX Всероссийская научно-техническая конференция «Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике», Чебоксары, 2014 г.;

– Региональный фестиваль студентов и молодежи «Человек. Гражданин. Ученый», Чебоксары, 2015 г.;

– Всероссийская 49-я научная студенческая конференция по техническим, гуманитарным и естественным наукам, Чебоксары, 2015 г.;

– XII Республиканская научно-техническая конференция молодых специалистов, Чебоксары, 2015 г.;

– Всероссийская 50-я научная студенческая конференция по техническим, гуманитарным и естественным наукам, Чебоксары, 2016 г.;

– Региональный фестиваль студентов и молодежи «Человек. Гражданин. Ученый», Чебоксары, 2016 г.

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

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

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи диссертационного исследования, научная новизна и практическая значимость работы, представлена структура работы.

В первом разделе даны краткий анализ и классификация ВБЭМ, наиболее распространенный из которых изображен на рисунке 1. Приведены математические модели нагрузочных (1), (2) и тяговых характеристик (рисунок 2), известных из литературных источников, и максимальных температур (3) в толще обмотки, которые использованы при разработке усовершенствованных методик.

Нагрузочные характеристики одно- и двухобмоточных ВБЭМ:

$$\begin{cases} P_{эм} = P_* P_{баз}, \end{cases} \quad (1)$$

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

$$\Theta_{m*} = f(x_i) \quad (3)$$

где для *однообмоточных* ВБЭМ:

$$P_* = f(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, a_j); \quad F_* = f(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, b_j) -$$

безразмерные функции электромагнитной и магнитодвижущих сил соответственно;

$$B_{1*} = f(x_1, x_2, x_4, x_5, x_6, d_j); \quad B_{2*} = f(x_1, x_2, x_4, x_5, x_6, e_j);$$

$B_{3*} = f(x_1, x_2, x_4, x_5, x_6, g_j)$ – относительные значения магнитных индукций в местах стыка проходного фланца и корпуса, опорного фланца и корпуса, опорного фланца и стопа соответственно;

$\Theta_{m*} = f(x_1, x_4, x_7, x_8)$ – относительное значение максимальной температуры в толще обмотки;

$\Theta_{v*} = f(x_1, x_4, x_7, x_8)$ – относительное значение среднеобъемной температуры обмотки;

$$x_1 = 1,272H_* - 3,181; \quad x_2 = 7,634H_{ст*} - 1,908; \quad x_3 = 12,723H_{в*} - 4,453;$$

$$x_4 = 5,456A_* - 3,279; \quad x_5 = 95,42v_* - 2,862; \quad x_6 = 4,237B_m - 5,508;$$

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

где $q_* = q \cdot d_{як} / (K_{т.баз} \cdot T_0)$ – удельная объемная плотность мощности обмотки; $K_{т.баз}$ – базисный коэффициент теплоотдачи.

Пределы варьирования относительных геометрических размеров ЭМ, используемые во 2 разделе в качестве функций ограничений при оптимизации однообмоточного ВБЭМ: $1,120 \leq H_* = H_0 / d_{як} \leq 5,500$; $0,0193 \leq H_{ст*} = H_{ст} / H_0 \leq 0,4807$; $0,2116 \leq H_{в*} = H_{в} / d_{як} \leq 0,488$; $0,280 \leq A_* = A_0 / d_{як} \leq 0,920$; $1,1545 \cdot 10^{-2} \leq v_* = v / d_{як} \leq 4,8455 \cdot 10^{-2}$, $1,20 \leq B_m \leq 1,75$ (для нелинейной магнитной системы, для линейных – 1,20 Тл).

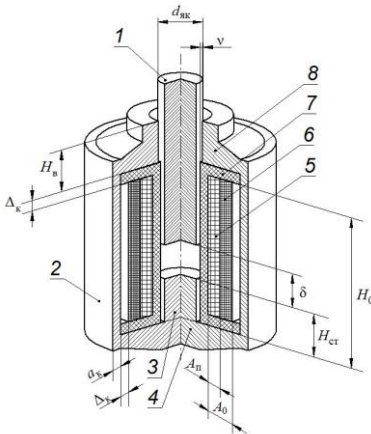


Рисунок 1 – Эскиз ВБЭМ:
1 – якорь; 2 – корпус; 3 – стоп;
4 – опорный фланец; 5 – пусковая обмотка; 6 – удерживающая обмотка;
7 – каркас катушки; 8 – проходной фланец

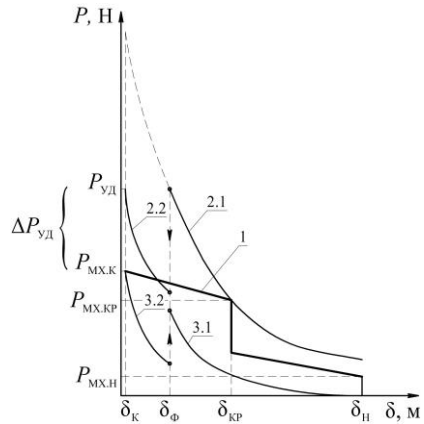


Рисунок 2 – Согласование характеристик:
1 – противодействующая характеристика; тяговые: 2.1 – $P_{эм}(\delta)$ при пуске; 2.2 – $P_{эм}$ при удержании; 3.1 – $P_{эм}$ при отпускании; 3.2 – $P_{эм}$ при срабатывании; δ_{ϕ} – зазор, при котором размыкается форсировочный контакт

Для двухобмоточных ВБЭМ:

$$P_* = f(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, a_j), \quad F_* = f(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, b_j),$$

$$B_{1*} = f(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, d_j); \quad B_{2*} = f(x_1, x_2, x_3, x_5, x_6, e_j);$$

$$B_{3*} = f(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, g_j); \quad \Theta_{m*} = f(x_1, x_{22}, x_{55}, x_8, x_9);$$

$$\Theta_{vy*} = f(x_1, x_{22}, x_{55}, x_8, x_9); \quad \Theta_{v\pi*} = f(x_1, x_{22}, x_{55}, x_8, x_9) - \text{относительное}$$

значение среднеобъемной температуры удерживающей и пусковой обмоток, размещенных коаксиально, соответственно;

$$x_1 = 1,272H_* - 3,181, \quad x_2 = 4,762A_{\pi*} - 2,857, \quad x_3 = 7,634H_{\text{ст}*} - 1,908,$$

$$x_4 = 12,723H_{\text{в}*} - 4,453, \quad x_5 = 5,456A_* - 3,273, \quad x_6 = 95,42v_* - 2,862,$$

$$x_7 = 4,237B_m - 5,508; \quad x_{22} = 10,22A_{\pi*} - 5,112; \quad x_8 = 0,05 T_0 - 3;$$

$$x_{55} = 5,464A_* - 3,279; \quad x_9 = 1,761q_{y*} - 4,401; \quad x_{10} = 8,183q_* - 2,046,$$

где $A_{\pi*} = A_{\pi} / A_0$; $q_{y*} = q_y \cdot d_{\text{як}} / (K_{\text{т.баз}} \cdot T_0)$ – относительная удельная объемная плотность мощности удерживающей обмотки,

$q_* = q_{\pi} / q_y$ – отношение удельных объемных плотностей мощности

пусковой и удерживающей обмоток. В качестве функций ограничений входит дополнительное неравенство $0,2 \leq A_{\pi*} \leq 0,7$.

Проведен анализ перспективных схем форсированного управления (рисунок 3) и выбраны распространенные в практике конструирования, форсировка которых достигается использованием балластного резистора, а также двухобмоточных ЭМ, отличающихся схемой соединения обмоток.

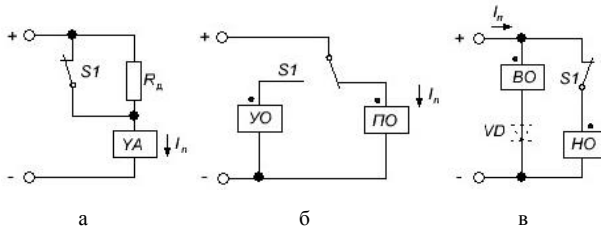


Рисунок 3 – Распространенные схемы форсированного управления ЭМ:
а – с балластным резистором;

б – с переключением с пусковой обмотки на удерживающую;

в – с параллельным соединением высокоомной и низкоомной обмоток

Проанализированы известные методики проектирования форсированных ВБЭМ. Отмечено, что: в методике, предложенной Коцем Б.Э. использовано приближенное выражение электромагнитной силы (в виде упрощенной формулы Максвелла), без должного обоснования выбирается индукция в рабочем воздушном зазоре, коэффициент потерь в стали и паразитных зазорах, коэффициент

форсировки по МДС, коэффициент теплоотдачи, отношение длины обмотки к толщине. Методика не определяет наилучшее проектное решение.

Методика проектирования, разработанная Клименко Б.В. построена на выборе допустимого тока, протекающего через форсировочный контакт. Для нахождения величины сопротивления балластного резистора и диаметра сердечника используется трудоемкий графоаналитический метод решения трех уравнений, не обеспечивающий необходимой точности их определения; не обосновывается выбор коэффициента теплоотдачи. Методика привязана к определенному номинальному значению напряжения питания.

В методике, предложенной Никитенко А.Г., не обосновывается выбор коэффициента теплоотдачи равного в режиме срабатывания и удержания для длительного режима работы, что искажает конечный результат проектирования.

Методика Казакова Л.А. сопряжена с использованием большого количества кривых и коэффициентов, что также затрудняет использовать машинные методы проектирования.

Проведенный анализ показал необходимость разработки усовершенствованной методики, которая бы учитывала условие срабатывания и возврата ЭМ, тепловые характеристики, особенности схемной реализации форсированного управления и обеспечивала бы погрешности при выполнении проектных расчетов в пределах 6 %.

Во втором разделе предложена усовершенствованная методика оптимизационного расчета форсированных ВБЭМ в схеме с балластным резистором (рисунок 3, а). В основу разработанной методики заложены обобщенные электромагнитные нагрузочные и тепловые характеристики в виде трех уравнений (4) ÷ (6) и предварительно выбраны относительные геометрические соизмерности в ЭМ и кратности изменения напряжения источника питания:

$$\text{срабатывания ЭМ} \quad F_{\text{ср}} = \frac{U_{\text{ср}}}{R_{\Gamma}} N = \frac{K_{U_{\text{min}}} U_{\text{ном}}}{K_{U_{\text{ср}}} R_{\Gamma}} N; \quad (4)$$

$$\text{отпускания (возврата) ЭМ} \quad F_{\text{отп}} = \frac{U_{\text{отп}}}{R_{\text{x}} + R_{\text{д}}} N = \frac{K_{\text{отп}} K_{U_{\text{отп}}} U_{\text{ном}}}{R_{\text{x}} + R_{\text{д}}} N; \quad (5)$$

$$\text{нагрева ЭМ} \quad \Theta_{\text{м}^*} = f(x_1, x_4, x_7, x_8); \quad (6)$$

где $U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение источника питания; $U_{\text{ср}}$ – напряжение срабатывания ЭМ; $U_{\text{в}}$ – напряжение возврата ЭМ; $R_{\text{д}}$, R_{Γ} , R_{x} – сопротивление балластного резистора, обмотки в горячем и холодном состоянии соответственно; N – число витков обмотки;

$K_{U_{\min}}$ – отношение минимального значения напряжения источника питания к номинальному; $K_{U_{\text{ср}}}$, $K_{U_{\text{отп}}}$ – коэффициенты запаса по напряжению срабатывания и отпускания; $K_{\text{отп}}$ – отношение напряжения отпускания якоря к номинальному напряжению источника питания.

Принимаются основные геометрические соизмерности в ЭМ в долях диаметра якоря (исключение составляет $H_{\text{ст}^*}$): относительные $H_* = H_0 / d_{\text{як}}$ – высота обмотки; $A_* = A_0 / d_{\text{як}}$ – толщина обмотки; $H_{\text{ст}^*} = H_{\text{ст}} / H_0$ – высота стопа; $H_{\text{в}^*} = H_{\text{в}} / d_{\text{як}}$ – высота воротничка; $v_* = v_{\text{в}} / d_{\text{як}}$ – воздушный зазор в воротничке; $\Delta_* = \Delta_{\text{к}} / d_{\text{як}}$ – толщина каркаса катушки; $\delta_* = \delta / d_{\text{як}}$ – рабочий зазор.

Путем математических преобразований в выражениях (4) ÷ (6) $F_{\text{ср}}$, $F_{\text{отп}}$, N , R_{Γ} , $R_{\text{д}}$ заменяются через параметры механической и нагрузочной характеристик. При этом система уравнений (4) ÷ (6) сведена к одному нелинейному уравнению (7), не содержащему номинального значения напряжения питания, числа витков и сопротивления обмотки.

Методика проектного расчета дополнена возможностью определения наилучшего варианта решения проектной задачи (минимизированное значение функции качества).

$$f(d_{\text{як}}) = F_{\text{ср}} - \sqrt{\frac{qK_3}{\rho_{\Gamma}} \frac{(1 + R_{\text{д}^*})}{K_{\text{max}}}} H_* A_* \pi d_{\text{як}}^2 = 0 \quad (7)$$

где $R_{\text{д}^*} = \frac{F_{\text{ср}}}{F_{\text{отп}}} K_{\text{max}} K - \frac{\rho_{\text{х}}}{\rho_{\Gamma}}$; $K = \frac{K_{\text{отп}} K_{U_{\text{отп}}}}{K_{U_{\text{max}}}}$; K_{max} – кратность максимально возможного напряжения источника питания относительно напряжения срабатывания; $\rho_{\text{х}}$, ρ_{Γ} – удельные сопротивления обмоток в холодном и горячем состоянии соответственно; q – мощность, рассеиваемая обмоткой, отнесенная к ее объему.

В зависимости от соотношения электромагнитной силы в граничной точке (максимальной индукции, соответствующей $B_{\text{м}\Gamma} = 1,20$ Тл) и критического значения механической характеристики ($P_{\text{мх кр}}$) при ($P_{\text{эм}\Gamma} \geq P_{\text{мх кр}}$) расчет выражения P_* ведется при $B_{\text{м}} = 1,20$ Тл, в противном случае определяется численным методом.

Расчет магнитодвижущей силы срабатывания осуществляется путем решения уравнения $P_{\text{эм}} - P_{\text{мх кр}} = 0$ при $\delta = \delta_{\text{кр}}$, определения $B_{\text{м}}$ и

подстановкой этого значения в выражение (2), аналогично находится магнитодвижущая сила возврата при $\delta = \delta_k$, $P_{ЭМ} = P_{мкк}$.

В качестве критериев оптимальности однообмоточного ВБЭМ выбраны:

- 1) объем активных материалов (V_a) ЭМ

$$V_a = V_c + V_m; \quad (8)$$

где V_c – объем ферромагнитной стали ЭМ; V_m – объем меди ЭМ,

- 2) масса активных материалов (m_a)

$$m_a = m_c + m_m; \quad (9)$$

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

$m_m = 8900 \cdot V_m$ – масса меди в ЭМ;

- 3) стоимость активных материалов

$$C_a = m_c \Pi_c + m_m \Pi_m, \quad (10)$$

где Π_c, Π_m – цена стали и меди соответственно.

- 4) установочная площадь ЭМ

$$S_y = D_n^2, \quad (11)$$

где $D_n = D_{вн} + 2a_k = d_{як} + 2\Delta_k + 2A_0 + 2\Delta_k + 2a_k$.

- 5) высота ЭМ

$$H_{ЭМ} = 0,25d_{як} + H_0 + 2\Delta_k + H_B + 0,25d_{як}. \quad (12)$$

- 6) габаритный объем ЭМ

$$V_g = S_y (0,25d_{як} + H_0 + 2\Delta_k + H_B + 0,25d_{як}). \quad (13)$$

Оптимизационные расчеты проводятся путем перебора возможных значений относительной высоты обмотки, толщины намотки, высоты воротничка, задаваемых в долях диаметра якоря, и относительной высоты стопа, задаваемых в долях высоты обмотки, методом двухразового сканирования области исходных данных проектирования (рисунок 4).

После первоначального определения точки минимума расширяется область этой «точки» на «шаг влево» и «шаг вправо» для каждой из варьируемых переменных. В этой усеченной области проводится повторное сканирование с более мелким шагом, что позволяет точно определить оптимальные геометрические соизмерности и параметры ЭМ. Выбирается те сочетания, которые обеспечивают минимальные значения критерия оптимальности в блоках 17-18.

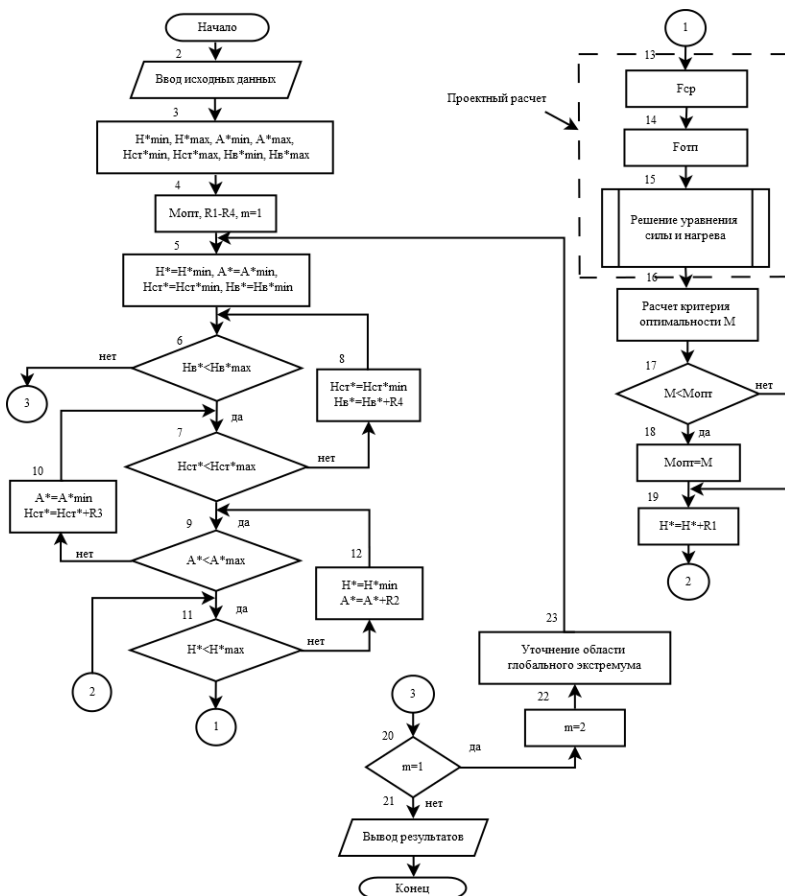


Рисунок 4 – Блок-схема оптимизации однообмоточного ВБЭМ

В результате оптимизационных расчетов, выполненных методами теории подобия и планирования эксперимента, диссертантом получены математические описания в виде полиномиальных зависимостей с минимизацией значения функции качества. Ниже в качестве примера приведены результаты оптимизации массы активных материалов.

Геометрические соизмерности:

$$\delta_{\text{опт}}^* = 10^{-4} (64,9 + 7,75z_1 - 4,01z_2 - 1,35z_3 - 1,09z_4 + 1,02z_5 + 1,52z_7 + 0,68z_8 - 0,7z_1^2 + 1,28z_2^2)^2; \quad (14)$$

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

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

Параметры ЭМ:

$$R_{\text{д.онт}}^* = 10^{-8} (103 + 5,66z_1 - 1,07z_2 - 4,17z_3 - 4,79z_4 + 1,99z_5 + 2,24z_6 + 4,84z_7 - 1,27z_4^2 + 1,24z_4z_5)^4; \quad (15)$$

$$B_{\text{м.ср}} = 10^{-4} (109 + 2,12z_1 + 2,61z_2 - 1,89z_3 + 1,30z_5 + 2,20z_7 + 1,15z_8 - 1,56z_2^2); \quad (16)$$

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

$$F_{\text{ср}}^* = 10^{-4} (75,7 + 6,35z_1 - 3,30z_2 - 1,78z_3 - 2,53z_4 + 1,49z_5 + 2,05z_7 + 1,04z_8 + 1,53z_2^2)^2; \quad (17)$$

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

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

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

Критерий оптимальности:

$$\ln m_a^* = 5,51 - 0,73z_1 + 0,36z_2 + 0,13z_3 + 0,15z_4 - 0,10z_5 - 0,15z_7 + 0,11z_1^2 - 0,11z_2^2; \quad (19)$$

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

$2 \text{ Н} \leq P_{\text{мх.кр}} \leq 28 \text{ Н}$; $z_3 = 1,364P_{\text{мх}^*} - 5,457$; $2,5 \leq P_{\text{мх}^*} = P_{\text{мх.к}} / P_{\text{мх.кр}} \leq 5,5$;

$z_4 = 0,0682T_0 - 3,749$; $25 \text{ °C} \leq T_0 \leq 85 \text{ °C}$; $z_5 = 0,051\Theta_{\text{доп}} - 7,398$;

$105 \text{ °C} \leq \Theta_{\text{доп}} \leq 185 \text{ °C}$; $z_6 = 10,2K_{\text{мах}} - 15,31$; $1,30 \leq K_{\text{мах}} \leq 1,70$;

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

$0,30 \leq K_3 \leq 0,70$; $P_{\text{п}}^*$ – потребляемая мощность ЭМ при пуске;

$P_{\text{уд}}^*$ – мощность, потребляемая ЭМ в режиме удержания; $P_{\text{удо}}^*$ – мощность, потребляемая обмоткой ЭМ в режиме удержания.

Порядок расчета полученных оптимальных значений по полиномиальным зависимостям показан в центре факторного пространства ($z_i = 0$):

$$\delta_{\text{опт}}^* = 0,421; d_{\text{як опт}} = 8/0,421 = 19,0 \text{ мм}; H_{\text{опт}}^* = 4,17;$$

$$H_{\text{опт}} = 4,17 \cdot 19 = 79,2 \text{ мм}; A_{\text{опт}}^* = 0,695; A_{\text{опт}} = 0,695 \cdot 19 = 13,2 \text{ мм};$$

$$H_{\text{ст опт}}^* = 0,48; H_{\text{ст опт}} = 79,2 \cdot 0,48 = 38,0 \text{ мм}; H_{\text{в, опт}}^* = 0,438;$$

$$H_{\text{в опт}} = 0,438 \cdot 19 = 8,32 \text{ мм}; \Delta_* = \Delta_{\text{к опт}} / d_{\text{як опт}} = 0,1; \Delta_{\text{к опт}} = 1,9 \text{ мм};$$

$$v_* = v_{\text{опт}} / d_{\text{як опт}} = 0,012; v_{\text{опт}} = 0,012 \cdot d_{\text{як}} = 0,23 \text{ мм}; \ln m_a^* = 5,51;$$

$$m_a^* = 248; m_a / \delta_{\text{кр}}^3 \cdot 7800 = 248; m_a = (8 \cdot 10^{-3})^3 \cdot 7,8 \cdot 10^3 \cdot 248 = 0,990 \text{ кг}.$$

На рисунке 5 приведена зависимость оптимальной массы активных материалов в ЭМ от критического рабочего зазора при различных значениях факторов z_1 и z_2 .

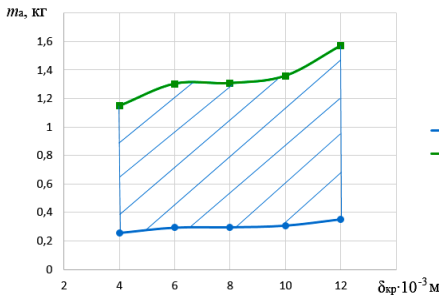


Рисунок 5 – Влияние критического рабочего воздушного зазора на оптимальную массу активных материалов в ЭМ при $z_3 + z_8 = 0$: 1 – при $P_{\text{мх. кр}} = 2 \text{ Н}$; 2 – при $P_{\text{мх. кр}} = 28 \text{ Н}$

В третьем разделе изложена разработанная методика синтеза форсированных двухобмоточных ВБЭМ с переключением обмоток (рисунок 3, б). Методика основана на трех уравнениях:

$$F_{\text{ср}} = \frac{U_{\text{ср}}}{R_{\text{пог}}} N_{\text{по}} = \frac{K_{U \text{ мин}} U_{\text{ном}}}{K_{U \text{ ср}} R_{\text{пог}}} N_{\text{по}}; \quad (20)$$

$$F_{\text{отп}} = \frac{U_{\text{отп}}}{R_{\text{уох}}} N_{\text{уо}} = \frac{K_{\text{отп}} K_{U \text{ отп}} U_{\text{ном}}}{R_{\text{уох}}} N_{\text{уо}}; \quad (21)$$

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

$N_{\text{по}}$, $N_{\text{уо}}$ – число витков пусковой и удерживающей обмоток соответственно; $R_{\text{пог}}$ – сопротивление пусковой обмотки в горячем

состоянии; R_{yox} – сопротивление удерживающей обмотки в холодном состоянии.

Путем преобразования системы уравнений (20) ÷ (22) получено уравнение проектирования:

$$f(d_{як}) = d_{як}^2 H_* A_* (1 - A_{п*}) \sqrt{\frac{q_{yo} K_{3yo}}{\rho_{yог}}} - \frac{\rho_x}{\rho_{yог}} \cdot \frac{F_{отп} K_{U_{max}}}{K_{отп} K_{Uотп}} = 0, \quad (23)$$

где $A_{п*}$ – относительная толщина пусковой обмотки; q_{yo} – удельная мощность тепловых потерь на единицу объема удерживающей обмотки; K_{3yo} – коэффициент заполнения удерживающей обмотки; $\rho_{yог}$ – удельное сопротивление удерживающей обмотки в горячем состоянии.

В отличие от методик, рассмотренных в 1 разделе, кратность числа витков обмоток находится на этапе проектного расчета и рекомендуется использовать при оценке перенапряжения при включении двухобмоточных ЭМ.

Кратность числа витков $n = N_{yo} / N_{по}$ в рассматриваемом случае определяется по следующей формуле:

$$n = \frac{\left(\frac{F_{ср}}{F_{в}} K_{max} K \right)}{\frac{\rho_x}{\rho_{пог}} \cdot \frac{l_{ср yo}}{l_{ср по}} \cdot \frac{K_{3 по}}{K_{3 yo}} \cdot \frac{A_{п*}}{1 - A_{п*}}}, \quad (24)$$

где $K_{3по}$ – коэффициент заполнения пусковой обмотки; $\rho_{пог}$ – удельное сопротивление пусковой обмотки в горячем состоянии; $l_{ср по}, l_{ср yo}$ – средняя длина витка пусковой и удерживающей обмоток соответственно.

Оптимизационный расчет также осуществляется двухразовым сканированием факторного пространства и к варьируемым параметрам добавляется толщина пусковой обмотки. Результаты оптимизации представлены в виде полиномиальных зависимостей.

При решении задачи оптимального проектирования двухобмоточных ВБЭМ в схеме с параллельным соединением низкоомной и высокоомной обмоток (рисунок 3, в) было установлено совпадение результатов расчетов со схемой с пусковой и удерживающими обмотками с погрешностью в 2-3 %. Уравнение проектирования, полученное для схемы с параллельным соединением низкоомной и высокоомной обмоток, подобно уравнению (23).

В четвертом разделе проведен анализ результатов оптимизационных расчетов. Для наглядности результаты представлены в размерном виде, в табличной либо графической форме для однообмоточного ЭМ в схеме с балластным резистором.

Оптимальные размеры ($d_{як}$, A_0), составляющие «ядро» ЭМ, представлены в таблицах 1, 2 в зависимости от координат ($\delta_{кр}$, $P_{мх.кр}$) критической точки на механической характеристике приводного ЭМ коммутационного аппарата, температуры (T_0) окружающего воздуха, и допустимой ($\Theta_{доп}$) температуры нагрева обмотки. Зависимость высоты ЭМ H_0 имеет схожий характер изменения, что и зависимость диаметра якоря. Зависимости МДС срабатывания и отпускания приведены соответственно на рисунках 6 и 7.

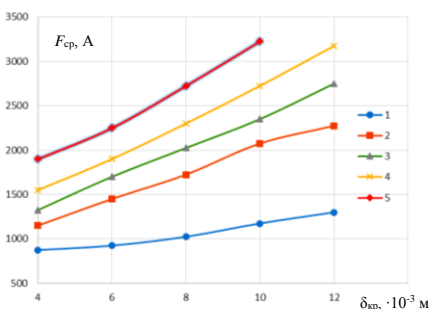


Рисунок 6 – Зависимость МДС срабатывания ЭМ от величины критического значения рабочего воздушного зазора при $P_{мх.кр}$: 2Н (1); 8,5 Н (2); 15 Н (3) 21,5 Н (4); 28 Н (5); $P_{мх*} = 4$; $K_{max} = 1,50$; $K = 0,45$; $K_3 = 0,50$; $T_0 = 40$ °С; $\Theta_{доп} = 115$ °С

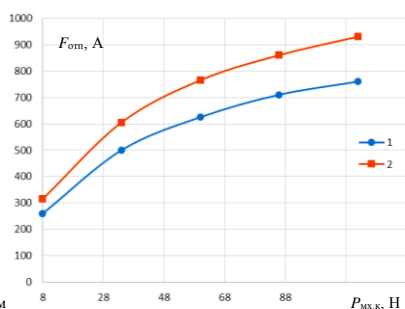


Рисунок 7 – Зависимость МДС отпускания от величины конечного значения механического усилия при $\delta_{к} = 0,0001$ м, $\delta_{пi} = 0,0001$ м; $v^* = 0,002$; $K_{max} = 1,50$; $K = 0,45$; $K_3 = 0,50$; $\Theta_{доп} = 115$ °С; 1 – при $T_0 = 40$ °С; 2 – при $T_0 = 70$ °С

МДС, необходимая для срабатывания, практически линейно возрастает с увеличением значения критического рабочего зазора, МДС отпускания монотонно увеличивается с ростом конечного значения механического усилия ($P_{мх.к}$).

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

$\Theta_{\text{доп}}, ^\circ\text{C}$	$T_0, ^\circ\text{C}$	$P_{\text{мх.кр}}, \text{H}$	$\delta_{\text{кр}} \cdot 10^{-3}, \text{M}$				
			4	6	8	10	12
			$d_{\text{як}} \cdot 10^{-3}, \text{M}$				
115	40	2	11,4	12,5	13,2	13,8	14,5
		8,5	15,3	16,0	16,4	16,8	17,5
		15	19,2	19,3	19,3	19,5	20,1
		21,5	21,7	21,3	21,0	21,1	21,6
		28	21,8	21,4	21,1	21,2	21,6
	70	2	12,3	13,3	13,9	14,5	15,3
		8,5	16,7	17,2	17,5	17,9	18,5
		15	21,2	20,9	20,7	20,8	21,3
		21,5	24,1	23,2	22,6	22,5	22,9
		28	24,2	23,3	22,7	22,6	23,0
155	40	2	10,6	11,8	12,5	13,1	13,9
		8,5	14,1	15,0	15,5	16,0	16,7
		15	17,5	17,9	18,1	18,4	19,0
		21,5	19,7	19,8	19,7	19,9	20,4
		28	19,8	19,8	19,7	19,9	20,5
	70	2	11,5	12,5	13,2	13,8	14,6
		8,5	15,4	16,1	16,5	16,9	17,6
		15	19,3	19,4	19,4	19,6	20,1
		21,5	21,8	21,5	21,1	21,2	21,7
		28	21,9	21,5	21,2	21,2	21,7

Полученные данные позволяют сделать следующие выводы:

1) С ростом температуры окружающей среды увеличиваются значения необходимых диаметра якоря, высоты обмотки и уменьшается толщина обмотки.

2) С ростом допустимой температуры нагрева уменьшаются оптимальные диаметр якоря, высота и толщина обмотки.

Таблица 2 – Зависимость толщины обмотки при принятых относительных $P_{\text{мх}*} = 4$; $K_{\text{пмх}} = 1,50$; $K = 0,45$; $K_3 = 0,50$ в случае минимизации суммарной массы обмоточной меди и ферромагнитной стали, используемой в конструкции форсированного ВБЭМ

$\Theta_{\text{доп}}, ^\circ\text{C}$	$T_0, ^\circ\text{C}$	$P_{\text{мх.кр}}, \text{H}$	$\delta_{\text{кр}} \cdot 10^{-3}, \text{м}$				
			4	6	8	10	12
			$A_0 \cdot 10^{-3}, \text{м}$				
115	40	2	8,38	9,17	9,67	10,1	10,7
		8,5	11,3	11,8	12,1	12,4	12,9
		15	14,1	14,2	14,2	14,3	17,8
		21,5	16,0	15,7	15,5	15,5	15,9
		28	16,0	15,7	15,5	15,6	15,9
	70	2	7,6	8,3	8,7	9,0	9,5
		8,5	10,4	10,7	10,9	11,1	11,5
		15	13,1	13,0	12,8	12,9	13,2
		21,5	15,0	14,4	14,1	14,0	14,2
		28	15,0	14,5	14,1	14,0	14,3
155	40	2	8,2	9,1	9,6	10,1	10,7
		8,5	10,9	11,5	11,9	12,3	12,8
		15	13,5	13,8	13,9	14,2	14,7
		21,5	15,2	15,2	15,2	15,3	15,7
		28	15,3	15,3	15,2	15,3	15,8
	70	2	7,5	8,2	8,7	9,1	9,6
		8,5	10,1	10,5	10,8	11,1	11,5
		15	12,6	12,7	12,7	12,8	13,2
		21,5	14,3	14,1	13,9	13,9	14,2
		28	14,4	14,1	13,9	13,9	14,2

Основные выводы и результаты работы

В работе усовершенствованы методики проектирования форсированных одно- и двухобмоточных ВБЭМ с различными схемами управления и получены следующие результаты:

1. Проведенный анализ существующих методик проектирования форсированных ВБЭМ подтвердил необходимость разработки и усовершенствования методик их синтеза, которые адекватно отражали бы особенности их конструкций и режимов работы, обеспечивая при этом высокую точность расчетов.

2. Предложен общий подход к синтезу форсированных ВБЭМ и разработаны методики оптимизационного проектирования одно- и двухобмоточных ВБЭМ по определенному критерию. Они учитывают условия срабатывания, возврата и нагрева, а также критические сочетания параметров цепи управления ЭМ.

3. Полиномиальные зависимости при различных критериях качества: активных объема, массы, стоимости материалов, габаритного объема, установочной площади и высоты оптимальных соразмерностей и параметров ЭМ получены путем вычислительного эксперимента на основе синтеза форсированных ВБЭМ однообмоточного в схеме с балластным резистором и двухобмоточных с переключением пусковой и удерживающей обмоток и параллельным соединением низкоомной и высокоомной обмоток.

4. Дана оценка степени влияния исходных данных проектирования на соразмерности и параметры ЭМ на основе полиномиальных зависимостей. Это позволяет заранее объективно выбрать оптимальный вариант конструкции:

– наиболее существенное влияние на основные размеры (диаметр якоря, высота и толщина обмоток), как и нефорсированных ЭМ, оказывают координаты критической точки механической характеристики;

– при всех рассмотренных критериях качества оптимальные относительные высота стопа и воротничка не зависят от условий проектирования и составляют для однообмоточного 0,48 высоты обмотки и 0,45 диаметра якоря соответственно, а для двухобмоточных ВБЭМ эти соразмерности составляют 0,5.

5. Практическую ценность для проектировщиков представляют полученные результаты оптимизации, представленные в полиномиальной, табличной и графической форме.

6. Представленные в диссертации результаты проектных расчетов, полученные с использованием усовершенствованных и разработанных методик, позволяют улучшить характеристики модернизируемых и вновь разрабатываемых изделий, что в итоге повышает их качество.

На основе разработанных алгоритмов и методик, построенных на базе статических характеристик, в дальнейшем открывается возможность создания улучшенных методик синтеза с учетом динамических параметров.

Список основных работ, опубликованных по теме диссертации В изданиях из перечня ВАК:

1. Никитина, О. А. Синтез минимизированного по высоте форсированного броневое электромагнита постоянного напряжения с внедряющимся якорем в схеме управления с балластным резистором / О. А. Никитина // Вестник Чувашского университета. – 2016. – № 3. – С. 94-99.

2. Никитина, О. А. Синтез минимизированного по массе активных материалов форсированного броневое электромагнита постоянного напряжения, питаемого по схеме с балластным резистором /

О. А. Никитина, В. В. Афанасьев, Ю. М. Зайцев, Н. В. Руссова, Г. П. Свинцов // Электротехника. – 2017. – № 7. – С. 24-27.

3. Никитина, О. А. Проектирование двухобмоточных броневых электромагнитов с форсированным управлением на основе их обобщенных характеристик / О. А. Никитина, И. П. Иванов, Н. В. Руссова, Г. П. Свинцов // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2017. – № 4. – С. 26-33.

4. Никитина, О. А. Расчет размеров, минимизирующих стоимость активных материалов, форсированного броневое электромагнита, управляемого по схеме с балластным резистором / О. А. Никитина, Н. В. Руссова, Г. П. Свинцов, В. А. Нестерин // Вестник Чувашского университета. – 2017. – № 1. – С. 156-161.

5. Никитина, О. А. Расчет размеров форсированного броневое электромагнита постоянного напряжения с внедряющимся якорем в схеме с балластным резистором, минимизирующих массу его активных материалов // О. А. Никитина, В. В. Ашмарин, Н. В. Руссова, Г. П. Свинцов // Вестник Чувашского университета. – 2016. – № 3. – С. 13-20.

6. Никитина, О. А. Методика синтеза форсированного броневое электромагнита постоянного напряжения с внедряющимся якорем в схеме с балластным резистором / О. А. Никитина, Ю. М. Зайцев, И. П. Иванов, Н. В. Руссова, Г. П. Свинцов // Вестник Чувашского университета. – 2015. – № 3. – С. 52-61.

Публикации в других изданиях:

7. Никитина, О. А. Минимизация втяжных форсированных электромагнитов по массогабаритным показателям / О. А. Никитина, Е. В. Архипова // Труды Академии электротехнических наук Чувашской Республики. – 2014. – № 1. – С. 26-28.

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

9. Никитина, О. А. Расчеты и исследование тепловых процессов магнитного пускателя в оболочке / О. А. Никитина, О. Е. Алексеева, А. Г. Васильева, Э. В. Брильц., А. А. Коробкова, А. Г. Судаков, проф. Ю. В. Софронов // Человек. Гражданин. Ученый (ЧГУ-2011). Сборник трудов Регионального фестиваля студентов и молодежи. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та. – 2012. – С. 10-11.

10. Никитина, О. А. Методика оптимизационных расчетов форсированного втяжного броневоегo электромагнита постоянного напряжения в схеме с балластным резистором / О. А. Никитина, Г. П. Свинцов // Победа в науке. Сборник трудов Всероссийской 49-й научной студенческой конференции. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та. – 2015. – С. 38-39.

11. Никитина, О. А. Расчет форсированного броневоегo электромагнита в схеме с балластным резистором, минимизированного по стоимости активных материалов / О. А. Никитина, Г. П. Свинцов // Студент-Наука-Развитие: сб. тр. Всерос. 50-й научн. студ. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2016 – С. 24-26.

12. Никитина, О. А. Минимизация масс активных материалов форсированно управляемых броневых электромагнитов с пусковой и удерживающей обмотками / О. А. Никитина, Г. П. Свинцов // Человек. Гражданин. Ученый (ЧГУ-2016). Сборник трудов Регионального фестиваля студентов и молодежи. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та. – 2016. – С. 125-127.

Патенты

13. Патент на полезную модель 167449 РФ, МПК H01H 9/02. Электромагнитный контактор / Афанасьева М. М., Васильев Е. Г., Иванов И. П., Никитина О. А., Митрофанов О. Н., Сагарадзе Е. В., Петров О. А., Романов В. В., Свинцов Г. П.; патентообладатель Министерство промышленности и торговли РФ. – № 2016121781; заявл. 01.06.2016; опубл. 10.01.2017. Бюл. № 1. – 7 с.

14. Патент на изобретение 2624659 РФ, МПК H01F 7/18. Устройство форсированного управления двухкатушечным электромагнитным приводом / Афанасьева М. М., Васильев Е. Г., Иванов И. П., Митрофанов О. Н., Никитина О. А., Петров О. А., Романов В. В., Свинцов Г. П.; патентообладатель ОАО «ВНИИР-Прогресс». – № 2015137344; заявл. 01.09.2015; опубл. 05.07.2017. Бюл. № 19. – 7 с.

15. Патент на полезную модель 173844 РФ, МПК H01H 50/00. Приводной электромагнит / Афанасьева М. М., Васильев Е. Г., Иванов И. П., Митрофанов О. Н., Никитина О. А., Петров О. А., Романов В. В., Сагарадзе Е. В., Свинцов Г. П., Филатов А. Е.; патентообладатель ОАО «ВНИИР-Прогресс». – № 2017104609; заявл. 13.02.2017; опубл. 14.09.2017. Бюл. № 26. – 6 с.