

*На правах рукописи*

Михайлов Алексей Валерьевич

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

Специальность 05.09.01

Электромеханика и электрические аппараты

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Чебоксары – 2018

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: **Лобов Борис Николаевич**  
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», профессор;

**Нейман Владимир Юрьевич**  
доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет», кафедра «Теоретические основы электротехники», заведующий кафедрой.

Ведущая организация: ведущая организация - федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Защита состоится «06» апреля 2018 г. в 15 часов 30 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](http://www.chuvsu.ru).

Автореферат разослан « 3 » февраля 2018 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.301.06

Н.В. Руссова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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

**Степень разработанности темы исследования.** Значительный вклад в развитие теории и разработку методик синтеза магнитных систем в электромеханических преобразователях внесли работы Афанасьева А.А., Буля Б.К., Буля О.Б., Гордона А.В., Дергачева П.А., Иванова И.П., Клименко Б.В., Ковалева О.Ф., Коца Б.Э., Курбатова П.А., Лобова Б.Н., Любчика А.В., Нестерина В.А., Неймана В.Ю., Никитенко А.Г., Павленко А.В., Пеккера И.И., Ротерса Г.К., Свинцова Г.П., Сливинской А.Г., Шоффы В.Н. и др. Однако, многие методики проектного расчета базируются на приближенных моделях электромагнитных и тепловых полей, полученных методами теории цепей и в ряде случаев не соответствуют в полной мере современным требованиям, обеспечивающим необходимое качество проектных работ. Недостаточно внимания уделено методикам синтеза различных магнитных систем, форсировано управляемых приводных электромагнитов.

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

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

**Основные задачи, решаемые в работе.** Для достижения цели диссертационного исследования в работе поставлены и решены следующие задачи:

1. Краткий обзор и анализ существующих вакуумных, воздушных контакторов;
2. Определение исходных данных для расчета приводных электромагнитов низковольтных контакторов (ход якоря, усилие трогания и удержания,

кинематика, глубина форсировки электромагнита, обоснование перспективных схем форсированного управления);

3. Разработка методики проектного расчета форсированных П-образных электромагнитов с учетом условий питания и работы.

4. Минимизация объема, массы и стоимости активных материалов, габаритного объема, установочной площади электромагнита, при снижении потребляемой ими мощности.

5. Математическое описание результатов оптимизационных расчетов в форме удобной для решения проектных задач.

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

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

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

#### **Научная новизна диссертационной работы:**

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

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

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

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

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

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

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

### **Теоретическая и практическая ценность результатов работы.**

*Теоритическая ценность* заключается в следующем:

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

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

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

*Практическая ценность* состоит в том, что:

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

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

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

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

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

**Методология и методы исследования.** Методологической основой диссертационной работы является совокупность методов, базирующихся на теории подобия, планирования эксперимента, теории электрических и магнитных цепей, методов решения нелинейных уравнений, оптимального параметрического синтеза. При оптимизационных расчетах использовался метод двухразового сканирования области факторного пространства относительно геометрических соразмерностей в П-образной магнитной системе. Корректность принятых

допущений, заложенных в методики проектирования, оценивалась сопоставлением расчетных и экспериментальных данных.

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

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

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

3. Новые конструктивные решения, использованные при модернизации реле времени с часовым механизмом, разработке указательных реле и вакуумных контакторов, позволившие уменьшить их массо-габаритные показатели, а также расширить функциональные и эксплуатационные возможности контакторов, в частности, путем использования поляризованного электромагнита с блоком ручного возврата или электромагнитной защелки, обеспечивающих сохранение замкнутого положения контактов вакуумного контактора при потере напряжения питания.

**Достоверность результатов работы обеспечена:**

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

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

– *формуле специальности* (создание электрических аппаратов для коммутации электрических цепей и управления потоками энергии);

– *области исследования* (разработка методов синтеза электрических аппаратов);

– *отрасли наук* (технические науки).

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

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

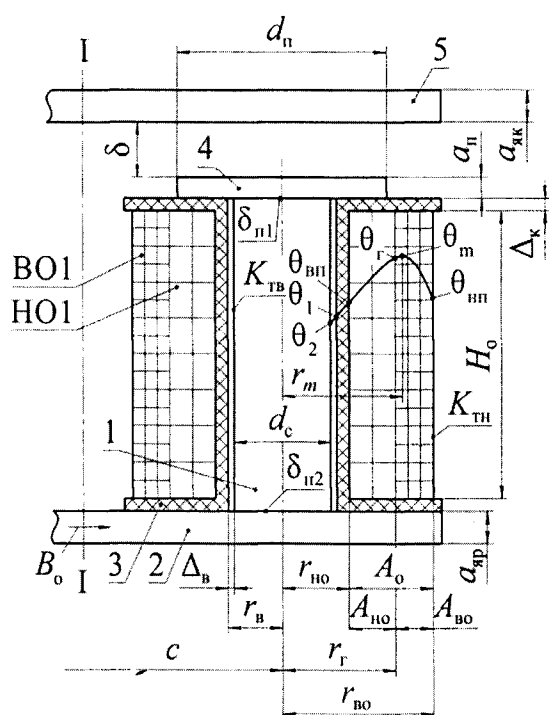


- Форум «Чебоксары – Центр наукоёмкого машиностроения России – 2013» 06.02.2013, г. Чебоксары, доклад «Низковольтная аппаратура управления и защиты на ЧЭАЗ»;
- Семинар «Новые решения для систем релейной защиты и автоматики» 21.03.2013, г. Москва, доклад «Разработка и модернизация электромеханических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

**Публикации.** По теме диссертационной работы опубликовано 17 научных работ, из них 3 – в изданиях из Перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук; 7 – патентов РФ на полезные модели и на изобретения; 7 – публикаций в других изданиях.

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

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ



Во введении обоснованы актуальность и степень разработанности темы диссертационного исследования, сформулированы: цель и задачи, объект, предмет и область исследований, научная новизна работы, теоретическая и практическая ценность результатов, методология и методы исследований, основные положения, выносимые на защиту, достоверность и апробация результатов, раскрыта структура и объем работы.

- 1 – сердечник; 2 – ярмо; 3 – каркас катушки;
- 4 – круглый полюсный наконечник; 5 – якорь;
- BO1 – высокоомная обмотка; HO1 – низкоомная обмотка

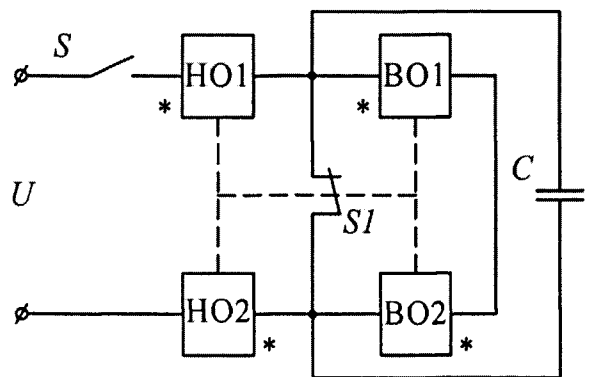
Рисунок 1 – Фрагмент эскиза симметричной П-образной магнитной системы с обозначением элементов и размеров

Приведены основные положения стандартов, в соответствии с которыми разрабатываются отечественными и зарубежными производителями низковольтные аппараты распределения и управления потоками электрической энергии.

В разделе 1 проведен краткий обзор и анализ конструктивных, технических и эксплуатационных параметров низковольтных контакторов отечественных и зарубежных компаний.

Дана сравнительная оценка перспективным схемам форсированного управления приводными электромагнитами. Выбрана четырехобмоточная форсированная магнитная система (рисунок 1) со схемой управления, изображенной на рисунке 2. Сформулированы основные технические требования к низковольтным контакторам. Определены исходные данные для разработки методики проектирования форсированных симметричных П-образных двухкатушечных четырехобмоточных приводных электромагнитов низковольтных контакторов.

В разделе 2 приводятся разработанные методики проектного и оптимизационных расчетов П-образных двухкатушечных четырехобмоточных электромагнитов постоянного тока с последовательно включенными пусковыми обмотками. Составлена система уравнений проектирования, включающая условие срабатывания (1), нагрева (2) и дополнительно возврата (отпускания) (3) форсированного электромагнита, управляемого по схеме, представленной на рисунке 2:



S1 – форсировочный контакт, механически связанный с якорем электромагнита;  
S – внешний контакт управления контактором;  
C – шунтирующий конденсатор

Рисунок 2 – Схема форсированного управления электромагнитом коммутационного аппарата

$$\left\{ \begin{aligned}
 F_{\text{ср}} &= \frac{U_{\text{ср}}}{2R_{\text{НО.г}}} \cdot 2N_{\text{НО}} = \frac{K_{U\text{min}}}{K_{U\text{ср}}} \cdot \frac{U_{\text{н}}}{R_{\text{НО.г}}} \cdot N_{\text{НО}}; & (1) \\
 \theta_m &= T_0 + \frac{q_{\text{ВО}}}{2\lambda_{\text{ВО}}} \left( \frac{r_{\text{ВО}}^2 - r_m^2}{2} - r_m^2 \cdot \ln \frac{r_{\text{ВО}}}{r_m} \right) + \frac{q_{\text{ВО}} (r_{\text{ВО}}^2 - r_m^2)}{2K_{\text{ТН}} r_{\text{ВО}}}; & (2) \\
 F_{\text{в}} &= \frac{U_{\text{в}} \cdot 2(N_{\text{НО}} + N_{\text{ВО}})}{2(R_{\text{НО.х}} + R_{\text{ВО.х}})} = \frac{K_{\text{отп}} K_{U\text{отп}} U_{\text{н}} N_{\text{НО}} \left( 1 + \frac{N_{\text{ВО}}}{N_{\text{НО}}} \right)}{R_{\text{НО.х}} \left( 1 + \frac{R_{\text{ВО.х}}}{R_{\text{НО.х}}} \right)}; & (3)
 \end{aligned} \right.$$



$$\begin{aligned}
\text{где } \beta &= \frac{\lambda_{\text{BO}}}{\lambda_{\text{K}}} \cdot \ln \left( 1 + \frac{\Delta_{\text{K}}}{\Delta_{\text{B}} + r_{\text{C}}} \right) + \frac{\lambda_{\text{BO}}}{\lambda_{\text{B}}} \cdot \ln \left( 1 + \frac{\Delta_{\text{B}}}{r_{\text{C}}} \right) + \frac{\lambda_{\text{BO}}}{r_{\text{C}} K_{\text{TB}}}, \\
\theta_{\text{НП}} &= \theta_m - \frac{q_{\text{BO}}}{2\lambda_{\text{BO}}} \left( \frac{r_{\text{BO}}^2 - r_m^2}{2} - r_m^2 \cdot \ln \frac{r_{\text{BO}}}{r_m} \right), \\
\theta_{\Gamma} &= \theta_m - \frac{q_{\text{BO}}}{2\lambda_{\text{BO}}} \left( -\frac{r_m^2 - r_{\Gamma}^2}{2} + r_m^2 \cdot \ln \frac{r_m}{r_{\Gamma}} \right) \quad (\text{см. рисунок 1}), \\
\theta_{\text{ВП}} &= \theta_{\Gamma} - \frac{1}{2\lambda_{\text{HO}}} \left\{ \left[ q_{\text{HO}} r_{\Gamma}^2 + q_{\text{BO}} (r_m^2 - r_{\Gamma}^2) \right] \cdot \ln \frac{r_{\Gamma}}{r_{\text{HO}}} - \frac{q_{\text{HO}}}{2} (r_{\Gamma}^2 - r_{\text{HO}}^2) \right\}, \\
\theta_1 &= \theta_{\text{ВП}} - \frac{1}{2\lambda_{\text{K}}} \left[ q_{\text{HO}} (r_{\Gamma}^2 - r_{\text{HO}}^2) + q_{\text{BO}} (r_m^2 - r_{\Gamma}^2) \right] \cdot \ln \left( 1 + \frac{\Delta_{\text{K}}}{r_{\text{B}}} \right), \\
\theta_2 &= \theta_1 - \frac{1}{2\lambda_{\text{B}}} \left[ q_{\text{HO}} (r_{\Gamma}^2 - r_{\text{HO}}^2) + q_{\text{BO}} (r_m^2 - r_{\Gamma}^2) \right] \cdot \ln \left( 1 + \frac{\Delta_{\text{B}}}{r_{\text{C}}} \right), \\
r_m &= \left( \frac{\frac{r_{\text{BO}} - r_{\Gamma}^2}{2} + r_{\Gamma}^2 \frac{\lambda_{\text{BO}}}{\lambda_{\text{HO}}} \left[ \left( 1 - \frac{q_{\text{HO}}}{q_{\text{BO}}} \right) \cdot \ln \frac{r_{\Gamma}}{r_{\text{HO}}} + \frac{q_{\text{HO}}}{2q_{\text{BO}}} \left( 1 - \frac{r_{\text{HO}}^2}{r_{\Gamma}^2} \right) \right]}{\ln \frac{r_{\text{BO}}}{r_{\Gamma}} + \frac{\lambda_{\text{BO}}}{\lambda_{\text{HO}}} \cdot \ln \frac{r_{\Gamma}}{r_{\text{HO}}} + \frac{\lambda_{\text{BO}}}{r_{\text{BO}} K_{\text{T.H}}} + \beta} + \right. \\
&\quad \left. + \frac{r_{\Gamma}^2 \left[ 1 - \frac{q_{\text{HO}}}{q_{\text{BO}}} \left( 1 - \frac{r_{\text{HO}}^2}{r_{\Gamma}^2} \right) \right] \beta + \frac{\lambda_{\text{BO}} r_{\text{BO}}}{K_{\text{T.H}}}}{\ln \frac{r_{\text{BO}}}{r_{\Gamma}} + \frac{\lambda_{\text{BO}}}{\lambda_{\text{HO}}} \cdot \ln \frac{r_{\Gamma}}{r_{\text{HO}}} + \frac{\lambda_{\text{BO}}}{r_{\text{BO}} K_{\text{T.H}}} + \beta} \right)^{1/2}. \quad (4)
\end{aligned}$$

Здесь обозначено:

$F_{\text{CP}}$ ,  $F_{\text{B}}$  – значения магнитодвижущих сил срабатывания и возврата (рисунок 3) электромагнита;  $U_{\text{H}}$ ,  $U_{\text{CP}}$ ,  $U_{\text{B}}$  – номинальное напряжение источника питания, напряжения срабатывания и возврата электромагнита соответственно;  $K_{U_{\text{min}}}$  – отношение минимального значения напряжения источника питания к номинальному;  $K_{U_{\text{CP}}}$ ,  $K_{U_{\text{отп}}}$ , – коэффициенты запаса по напряжению срабатывания и возврата;  $K_{\text{отп}}$  – отношение напряжения отпадания (возврата) якоря к номинальному напряжению источника питания;  $R_{\text{HO.X}}$ ,  $R_{\text{BO.X}}$  – сопротивления холодных низкоомных и высокоомных обмоток при температуре  $T_0$  окружающей среды;  $\theta_{\text{НП}}$ ,  $\theta_m$ ,  $\theta_{\Gamma}$ ,  $\theta_{\text{ВП}}$  – температура наружной поверхности высокоомных обмоток; максимальная температура нагрева катушек, находящаяся в толще высокоомных обмоток; температура на границе раздела низкоомных и высокоомных обмоток; температура на поверхности соприкосновения низкоомной обмотки с каркасом катушки соответственно;  $q_{\text{HO}}$ ,  $q_{\text{BO}}$  – мощности тепловых потерь в низкоомных и высокоомных обмотках, отнесенные к их

геометрическим объемам;  $\lambda_{HO}, \lambda_{BO}, \lambda_K, \lambda_B$  – коэффициенты теплопроводности замещающего тела соответственно низкоомных и высокоомных обмоток, материала каркаса катушек, воздушного промежутка ( $\Delta_B$ ) между каркасом и сердечником;  $K_{TH}, K_{TB}$  – коэффициенты теплопередачи с наружных поверхностей высокоомных обмоток и с внутренних поверхностей низкоомных обмоток соответственно;  $N_{HO}, N_{BO}$  – числа витков в низко- и высокоомных обмотках соответственно.

Отношение чисел витков  $N_{BO}/N_{HO} = n$  получено решением уравнения (5) на основании преобразования выражений (1) и (3):

$$an^2 - bn + c = 0, \quad (5)$$

где  $a = \frac{l_{BO}}{l_{HO}} \cdot \frac{A_{HO*}}{1 - A_{HO*}} \cdot \frac{K_{3,HO}}{K_{3,BO}}$ ;  $b = \frac{K_{max} K}{K_B} \cdot \frac{\rho_{HO,Г}}{\rho_X}$ ;  $c = 1 - b$ ;  $K_{max} = \frac{K_{Ucp} K_{Umax}}{K_{Umin}}$ ;

$K = K_{Uотп} K_{отп} / K_{Umax}$ ;  $K_B = F_B / F_{cp}$  – коэффициент возврата;  $l_{BO} = \pi(d_c + 2\Delta_B + 2\Delta_K + 2A_{HO} + A_{BO})$ ;  $l_{HO} = \pi(d_c + 2\Delta_B + 2\Delta_K + A_{HO})$ ;  $l_{BO}/l_{HO} = 1 + A_{HO}/(1 + 2\Delta_B^* + 2\Delta_K^* + A_{HO})$ ;  $A_{HO}/(A_{HO} - A_{HO*}) = A_{HO*}/(1 - A_{HO*})$ ;  $\Delta_B^* = \Delta_B/d_c$ ;  $\Delta_K^* = \Delta_K/d_c$ ;  $A_{HO*} = A_{HO}/A_O$ .

Решение уравнения (5) записано в виде:

$$n_{1,2} = \left( b \pm \sqrt{b^2 - 4ac} \right) / 2a. \quad (6)$$

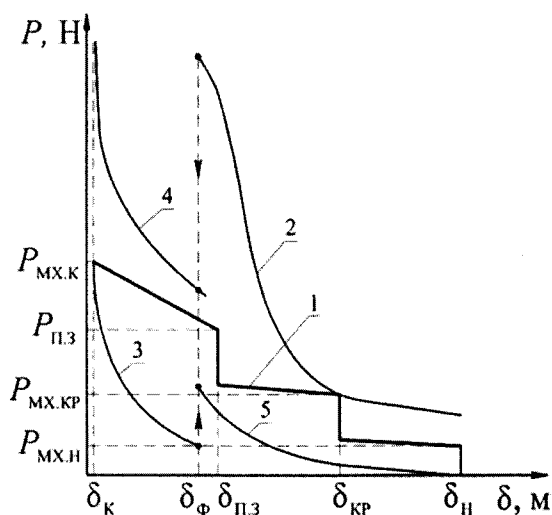


Рисунок 3 – Механическая (1) и тяговые характеристики приводного электромагнита:  
 2 – при напряжении и МДС срабатывания;  
 3 – при напряжении и МДС возврата;  
 4 – при напряжении срабатывания;  
 5 – при напряжении возврата

Зависимость температуры в толще обмоток интерполируем квадратичным трехчленом:

$$\theta = Ar^2 + Br + C. \quad (7)$$

Расчет среднеобъемной температуры  $\theta_{v,HO}$  низкоомной обмотки выполняется по выражению (8):

$$\theta_{v,HO} = \frac{1}{r_\Gamma - r_{HO}} \int_{r_{HO}}^{r_\Gamma} (Ar^2 + Br + C) dr = \frac{A}{3} (r_\Gamma^2 + r_\Gamma r_{HO} + r_{HO}^2) + \frac{B}{2} (r_\Gamma + r_{HO}) + C, \quad (8)$$

где  $A = A_{HO} = -\frac{1}{r_m - r_{HO}} \left[ \frac{\theta_\Gamma - \theta_{в.п}}{r_\Gamma - r_{HO}} - \frac{\theta_m - \theta_\Gamma}{r_m - r_\Gamma} \right]$ ;  $B = B_{HO} = \frac{\theta_\Gamma - \theta_{в.п}}{r_\Gamma - r_{HO}} - A_{HO} (r_\Gamma + r_{HO})$ ;

$C = C_{HO} = \theta_{в.п} - A_{HO} r_{HO}^2 - B_{HO} r_{HO}$ .

Удельное электрическое сопротивление нагретой низкоомной обмотки:

$$\rho_{HO,Г} = 1,62 \cdot 10^{-8} (1 + 0,0043 \cdot \theta_{v,HO}). \quad (9)$$

Среднеобъемная температура нагрева  $\theta_{v,bo}$  высокоомной обмотки рассчитывается аналогично в соответствии с выражением (10):

$$\theta_{v,bo} = \frac{A_{bo}}{3}(r_{bo}^2 + r_{bo}r_{\Gamma} + r_{bo}^2) + \frac{B_{bo}}{2}(r_{bo} + r_{\Gamma}) + C_{bo}, \quad (10)$$

где  $A_{bo} = -\frac{1}{r_{bo} - r_m} \left[ \frac{\theta_m - \theta_{\Gamma}}{r_m - r_{\Gamma}} - \frac{\theta_{н.п} - \theta_{\Gamma}}{r_{bo} - r_m} \right]; B_{bo} = \frac{\theta_m - \theta_{\Gamma}}{r_m - r_{\Gamma}} - A_{bo}(r_m + r_{\Gamma});$

$$C_{bo} = \theta_{в.п} - A_{bo}r_{bo}^2 - B_{bo}r_{bo}.$$

Удельное электрическое сопротивление обмоточной меди высокоомной обмотки рассчитывается по выражению (11):

$$\rho_{во.г} = 1,62 \cdot 10^{-8} (1 + 0,0043 \cdot \theta_{v,bo}). \quad (11)$$

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

$$P_{уд} = \frac{U_{max}^2}{2(R_{но.г} + R_{во.г})}, \quad (12)$$

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

Выражение (12) очевидным образом может быть представлено в виде:

$$P_{уд} = \frac{P_{п}}{1 + R_{во.г} / R_{но.г}}, \quad (13)$$

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

Преобразуем выражение (13) к виду:

$$P_{п} = \left( \frac{U_{н}}{2R_{но.г}} 2N_{но} \right)^2 \frac{2R_{но.г}}{(2N_{но})^2} K_{U_{max}}^2 = (K_{max} F_{cp})^2 \frac{\rho_{но.г} l_{но}}{2H_{о} A_{но} K_{3.но}}; \quad (14)$$

$$1 + \frac{R_{во.г}}{R_{но.г}} = 1 + an^2 \rho_{во.г} / \rho_{но.г}. \quad (15)$$

С учетом (14) и (15) выражение (13) примет вид (16):

$$P_{уд} = \frac{\pi}{2} (K_{max} F_{cp})^2 \frac{\rho_{но.г}}{d_c H_{*} A_{*} A_{но*} K_{3.но} (1 + an^2 \rho_{во.г} / \rho_{но.г})}. \quad (16)$$

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

$$P_{уд.о} = 0,5 P_{уд}. \quad (17)$$

С другой стороны

$$P_{уд.о} = q_{во} V_{во} + q_{но} V_{но}, \quad (18)$$

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

Следовательно,

$$q_{во} V_{во} = \frac{(K_{U_{max}} U_{н})^2 R_{во.г} / R_{но.г}}{4R_{но.г} (1 + R_{во.г} / R_{но.г})} = 0,5 P_{п} \frac{an^2 \rho_{во.г} / \rho_{но.г}}{(1 + an^2 \rho_{во.г} / \rho_{но.г})^2}; \quad (19)$$

$$q_{\text{HO}} V_{\text{HO}} = \frac{(K_{U \max} U_{\text{H}})^2}{4R_{\text{HO.Г}}(1 + R_{\text{BO.Г}}/R_{\text{HO.Г}})} = 0,5P_{\text{П}} \frac{1}{(1 + an^2 \rho_{\text{BO.Г}}/\rho_{\text{HO.Г}})^2}. \quad (20)$$

На основании двух последних выражений получим:

$$\frac{q_{\text{HO}}}{q_{\text{BO}}} = \frac{V_{\text{BO}}/V_{\text{HO}}}{an^2 \rho_{\text{BO.Г}}/\rho_{\text{HO.Г}}}, \quad (21)$$

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

$V_{\text{HO}} = \pi d_c^3 H_* A_* A_{\text{HO}*}(1 + 2\Delta_{\text{B}*} + 2\Delta_* + A_* A_{\text{HO}*})$  – геометрические объемы высокоомных и низкоомных обмоток соответственно;

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

Расчет МДС срабатывания ( $F_{\text{CP}}$ ) производится на основе экспериментальной нагрузочной характеристики, описанной в параметрической форме и приведенной в разделе 1 диссертации:

$$\begin{cases} P_{\text{ЭМ}} = P_* \cdot P_{\text{баз}}, \\ F = F_* \cdot F_{\text{баз}}, \end{cases} \quad (22)$$

$$(23)$$

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

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

$H_*, A_*, d_*, C_*, A_{\text{HO}*}, \delta_{\text{кр}*}$  – относительные геометрические размеры магнитной системы (рисунок 1);

$B_0$  – усредненное значение магнитной индукции по поперечному сечению ярма, расположенного в поперечной плоскости I–I симметрии (рисунок 1) магнитной системы приводного электромагнита.

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

Граничное значение электромагнитного усилия ( $P_{\text{ЭМ.Г}}$ ), соответствующее  $B_{0.Г} \approx 1,1$  Тл, определяется (рисунок 4) по выражению:

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

Таким образом, если  $P_{\text{мх.кр}} < P_{\text{ЭМ.Г}}$  (рисунок 4), то магнитная система линейна. Тогда

$$P_{\text{ЭМ}} = P_{\text{мх.кр}} = P_*(B_{0.Г}) \cdot B_{0.Г}^2 \pi d_c^2 / (4\mu_0). \quad (24)$$

В противном случае

$$P_{\text{ЭМ}} = P_{\text{мх.кр}} = P_*(B_0) \cdot B_0^2 \pi d_c^2 / (4\mu_0). \quad (25)$$

На основании (23) и (24) получим:

$$B_{0.сп} = \frac{2}{d_c} \sqrt{\frac{\mu_0 P_{\text{мх.кр}}}{\pi P_*(B_{0.Г})}}, \quad F_{\text{сп}} = F_*(B_{0.Г}) \cdot B_{0.сп} d_c / \mu_0.$$

Индукция  $B_{0.сп}$  из выражения (25) определяется одним из методов численного решения нелинейного уравнения. Тогда получим:

$$F_{\text{сп}} = F_*(B_{0.сп}) \cdot B_{0.сп} d_c / \mu_0.$$

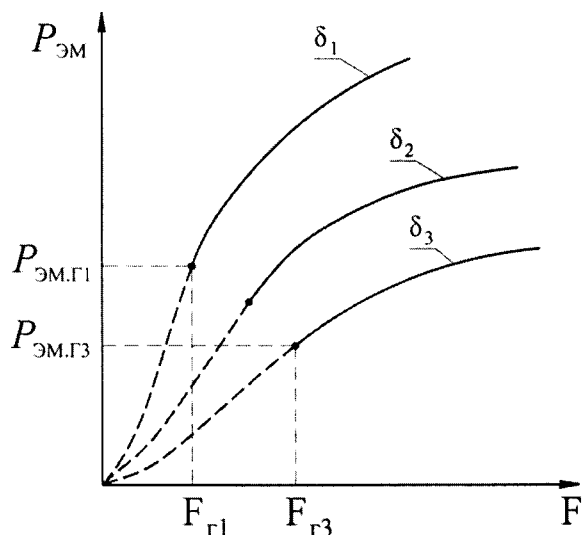


Рисунок 4 – Нагрузочные характеристики электромагнита ( $\delta_1 < \delta_2 < \delta_3$ )

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

$$P_{\text{мх.к}} = (B_{\delta})_{\text{отп}}^2 S_{\text{п}} / \mu_0, \quad (26)$$

где  $(B_{\delta})_{\text{отп}}$  – магнитная индукция в рабочих воздушных зазорах при отпадании (возврате) якоря (рисунок 3);  $S_{\text{п}} = \pi d_{\text{п}}^2 / 4$  – площадь поперечного сечения полюсных наконечников.

Магнитный поток в поперечных сечениях ( $S_c$ ) (рисунок 1) якоря, ярма, сердечников, в паразитных зазорах  $\delta_{\text{п1}}$ ,  $\delta_{\text{п2}}$  определяется выражением

$$(B_o)_{\text{отп}} S_c = (B_{\delta})_{\text{отп}} S_{\text{п}}. \quad (27)$$

На основании выражений (26) и (27) получено

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

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

В соответствии с кривой намагничивания стали рассчитываются напряженности магнитного поля и падения магнитных напряжений на стальных элементах, в воздушных зазорах. Сумма последних и определяет  $F_B$ .

Преобразуем уравнение (2). Принимая во внимание выражения (14) и (19), после преобразований получим

$$d_c = \left\{ \frac{1}{8} \cdot \frac{K_{\text{max}} F_{\text{ср}}}{K_{\text{з.во}}} \cdot \frac{1}{H_*^2 A_*^2 (1 - A_{\text{но}*})^2} \cdot \frac{n^2 \rho_{\text{во.г}}}{(1 + a n^2 \rho_{\text{во.г}} / \rho_{\text{но.г}})^2} \cdot \frac{1}{(\theta_m - T_0)} \cdot \left[ \frac{1}{\lambda_{\text{во}}} \cdot \left( \frac{r_{\text{во}}^2 - r_m^2}{2} - r_m^2 \cdot \ln \left( \frac{r_{\text{во}}}{r_m} \right) \right) + \frac{r_{\text{во}}^2 - r_m^2}{r_{\text{во}} K_{\text{тн}}} \right]^{1/4} \right\}. \quad (28)$$

Таким образом, система уравнений проектного расчета (1), (2), (3) сведена к нелинейному уравнению (28), правая часть которого в неявной форме зависит от диаметра сердечника ( $d_c$ ). Определение численным методом корня уравнения (28) равносильно определению всех размеров и параметров электромагнита.

Удельные электрические сопротивления  $\rho_{\text{но.г}}$ ,  $\rho_{\text{во.г}}$ , нагретых обмоток рассчитываются по выражениям:  $\rho_{\text{но.г}} = 1,65 \cdot 10^{-8} (1 + 0,0043 \Theta_{\text{v но}})$ , Ом·м;  $\rho_{\text{во.г}} = 1,65 \cdot 10^{-8} (1 + 0,0043 \Theta_{\text{v во}})$ , Ом·м. Удельное электрическое сопротивление холодной обмотки рассчитывается по формуле:  $\rho_x = 1,65 \cdot 10^{-8} (1 + 0,0043 T_0)$ , Ом·м.

Суть методики расчета оптимального электромагнита состоит не только в определении работоспособных вариантов конструкции, но и в выборе из них,

обладающего наилучшим показателем качества, например, минимального габаритного объема.

Задача нахождения наилучшего варианта решается методом перебора возможных сочетаний соразмерностей в магнитной системе с определенным шагом по каждой переменной. Ядром алгоритма в этом случае является методика проектного расчета электромагнита, рассмотренная выше. Ядро вложено во внутренний цикл. При каждом сочетании относительных размеров подсчитывается величина критерия качества, которая сравнивается с предыдущим значением. Если текущее значение критерия меньше предыдущего оно запоминается как лучшее (оптимальное); при этом в качестве оптимальных запоминаются и текущие значения кратности размеров и параметров.

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

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

Результаты проведенного исследования с использованием методов теории подобия и планирования эксперимента представлены в полиномиальном, графическом и табличном видах. Ниже в качестве примера практического использования результатов приведены полиномиальные зависимости оптимальных соразмерностей и параметров форсированного электромагнита, минимизированного по габаритному объему.

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

$$V_{\Gamma} = \pi d_c^3 (1,25 + c_* + 2A_*) (0,9 + H_*). \quad (29)$$

Полиномиальные зависимости оптимальных соразмерностей электромагнита и его параметра  $n_{V_{\Gamma}}$  записаны ниже:

$$\delta_{V_{\Gamma}}^* = \delta_{кр}/d_{с.опт.V_{\Gamma}} = 10^{-2} (37,6 + 6,26Z_1 - 3,78Z_2 - 1,85Z_3 - 0,5Z_4 + 0,39Z_5 + 0,7Z_2^2 + 0,39Z_1Z_2 - 0,47Z_2Z_3); \quad (30)$$

$$H_{V_{\Gamma}}^* = H_{0.опт.V_{\Gamma}}/d_{с.опт.V_{\Gamma}} = 10^{-4} (158,8 - 5,93Z_1 - 4,79Z_2 + 5,61Z_3 + 7,91Z_4 - 4,40Z_5 - 3,59Z_3^2 + 1,78Z_1Z_2 + 2,72Z_1Z_3 - 2,72Z_2Z_3 + 2,57Z_1Z_2Z_3)^2; \quad (31)$$

$$A_{V_{\Gamma}}^* = A_{0.опт.V_{\Gamma}}/d_{с.опт.V_{\Gamma}} = 10^{-4} (77,63 + 0,88Z_1Z_2 - 0,83Z_1Z_2Z_3)^2; \quad (32)$$

$$A_{НО.V_{\Gamma}}^* = A_{НО.опт.V_{\Gamma}}/A_{0.опт.V_{\Gamma}} = 0,405; \quad (33)$$

$$d_{V_{\Gamma}}^* = d_{п.опт.V_{\Gamma}}/d_{с.опт.V_{\Gamma}} = 1,26; \quad (34)$$

$$C_{V_{\Gamma}}^* = C_{опт.V_{\Gamma}}/d_{с.опт.V_{\Gamma}} = 2,521 - 0,033 Z_3; \quad (35)$$

$$n_{V_T} = 10^{-8}(134 + 6,96Z_1 - 7,65Z_3 - 2,05Z_7 + 2,76Z_8)^4, \quad (36)$$

где  $z_1 = 0,682\delta_{кр} - 4,772$ ;  $z_2 = 0,1364P_{мх.кр} - 3,411$ ;  $z_3 = 0,3408P_{мх}^* - 3,067$ ;  
 $z_4 = 0,0682T_0 - 3,749$ ;  $z_5 = 0,1022\theta_{доп} - 13,80$ ;  $z_6 = 20,41K_{max} - 34,69$ ;  
 $z_7 = 27,03K_{з.но} - 14,19$ ;  $z_8 = 29,15K_{з.во} - 11,08$ ;  
 $4\text{мм} \leq \delta_{кр} \leq 10\text{мм}$ ;  $10\text{Н} \leq P_{мх.кр} \leq 40\text{Н}$ ;  $3 \leq P_{мх}^* \leq 15$ ;  $25^\circ\text{C} \leq T_0 \leq 85^\circ\text{C}$ ;  $115^\circ\text{C} \leq \theta_{доп} \leq 155^\circ\text{C}$ ;  
 $1,60 \leq K_{max} \leq 1,80$ ;  $0,45 \leq K_{з.но} \leq 0,60$ ;  $0,31 \leq K_{з.во} \leq 0,45$ .

При известной совокупности исходных данных ( $\delta_{кр}$ ,  $P_{мх.кр}$ ,  $P_{мх.к}$ ,  $T_0$ ,  $\theta_{доп}$  и др.) рассчитываются кодированные значения факторов  $z_i$ ; по значению функции  $\delta_{V_T}^*$  определяется оптимальный диаметр сердечника  $d_{с.опт.V_T} = \delta_{кр} / \delta_{V_T}^*$  при оптимизации по критерию «габаритный объем электромагнита» (индекс  $V_T$  свидетельствует об оптимизации габаритного объема).

Зависимость  $n_{V_T}$  (36) позволяет на стадии выполнения проектного расчета оценить величину перенапряжения при последовательном соединении обмоток (рисунок 2) в долях напряжения  $U$  источника питания:

$$U_{\text{макс}} = U \cdot n_{V_T}.$$

Часть функций относительных геометрических размеров при определенных критериях оптимальности не зависит от исходных данных проектирования. В качестве примера приведем:

$$A_{но.V_T}^* = 0,405; \quad d_{V_T}^* = 1,26.$$

Здесь записаны «зависимости» относительных значений оптимальной ширины окна низкоомной обмотки в долях  $A_0$ ; диаметра полюсных наконечников  $d_{п.опт.V_T}$  в долях  $d_{с.опт.V_T}$ .

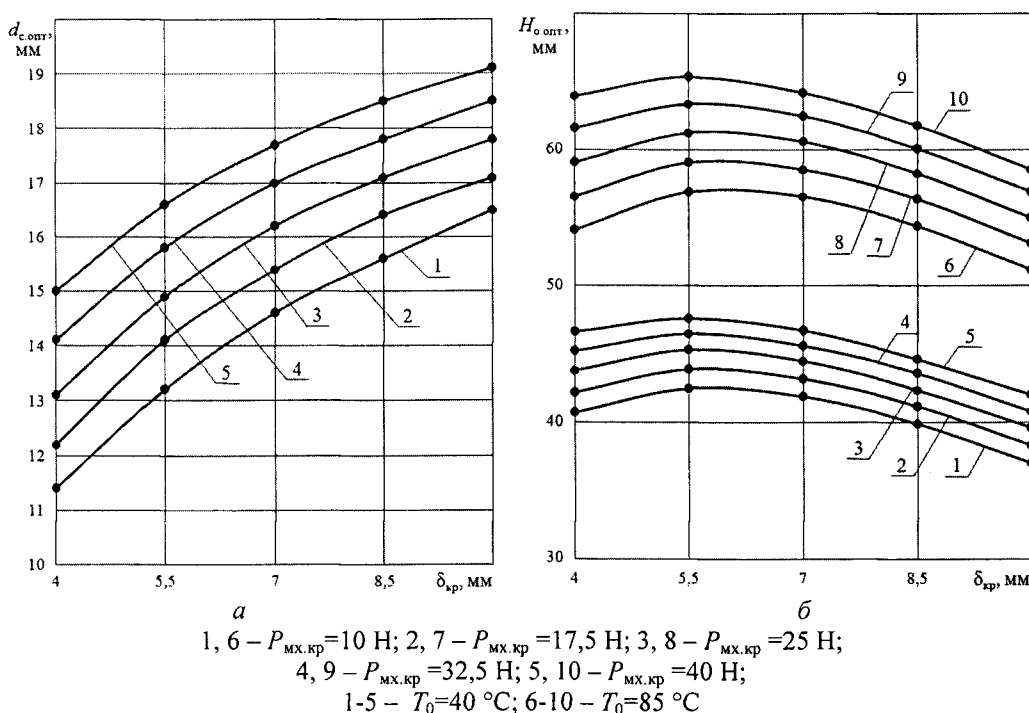


Рисунок 5 – Зависимости оптимальных диаметров сердечников (а) и высоты обмотки электромагнита (б), минимизированные по критерию «габаритный объем» при  $\theta_{доп} = 115^\circ\text{C}$ ;  $P_{мх}^* = 9$ ;  $K_{max} = 1,80$ ;  $K = 0,30$ ;  $K_{з.но} = 0,525$ ;  $K_{з.во} = 0,38$



Из семейства зависимостей, представленных на рисунке 5,а, видно, что при больших значениях критического рабочего воздушного зазора и механического усилия необходимо выбирать бóльшие диаметры сердечников. Причем рост критического значения механического усилия приводит к необходимости практически пропорционального увеличения диаметра сердечников независимо от величины критического значения рабочего воздушного зазора.

Семейство зависимостей (рисунок 5,б) позволяет обоснованно выбрать необходимую высоту обмотки в зависимости от координат критической точки механической характеристики и температуры окружающей среды. Зависимости имеют явно выраженный экстремум. При этом оптимальная высота обмоток электромагнита должна быть увеличена пропорционально критическому значению механического усилия.

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

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

**В разделе 3** рассмотрено использование некоторых результатов выполненных исследований. Полиномиальные зависимости оптимальных соразмерностей и параметров форсированного П-образного двухкатушечного четырехобмоточного электромагнита, полученные в разделе 2, использованы при выборе геометрии и оценке параметров приводных электромагнитов.

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

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

С целью повышения надежности функционирования и увеличения срока службы реле снабжено пневматическим демпфером и снижена потребляемая мощность по результатам расчетно-экспериментального исследования влияния угла конусности рабочего полюса электромагнита.

Разработанные указательные реле серии РУ31 и РУ32 имеют повышенную визуализацию состояния реле «взведено»/«сработало» и обеспечивают возможность быстрой замены ранее снятых с производства реле РУ-1 и РЭУ11 за счет сохранения установочных и присоединительных размеров. Реле имеют уравновешенные якорь, обеспечивающий повышение устойчивости реле к ударам и вибрациям, что исключило самопроизвольное их срабатывание, а также обеспечено удобство ручного переключения.

Вакуумный контактор с прямоходовой траверсой, связанной с якорем электромагнита через рычаг позволяет исключить затираание, возможное заклинивание подвижного токоввода внутри вакуумной камеры и в дальнейшем выход ее из строя. Устранить установленный недостаток можно исключением непосредственного воздействия рычага на подвижный токоввод вакуумной камеры. Один из вариантов подобного решения – это введение прямоходовой траверсы, обеспечивающей соосное перемещение подвижного токоввода вакуумной камеры.

Другой вариант кинематики вакуумного контактора – с прямоходовой траверсой непосредственно связанной с якорем электромагнита. В этом случае якорь электромагнита перемещается по направлению подвижного токоввода вакуумной камеры, а ход якоря электромагнита равен суммарной величине раствора и провала контактов вакуумной камеры.

Для исключения потребления мощности в длительном режиме работы вакуумный контактор снабжен устройством с функцией ручного возврата. Альтернативным вариантом решения обеспечения работы контактора в продолжительном режиме при полном снятии питания является модификация контактора с электромагнитной защелкой, позволяющая отключить его дистанционно.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

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

В результате выполненных исследований:

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

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

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

4. Методами теорий подобия и планирования эксперимента проведено исследование с целью количественного описания результатов оптимизационных

расчетов. Установлено, что функции оптимальных соизмерностей: 1) критического рабочего воздушного зазора, и высоты обмоток в долях диаметра сердечника независимо при минимизации по разным частным критериям оптимальности зависят от критического значения рабочего воздушного зазора, критического значения механической силы, кратности механического усилия в конечном положении якоря в долях ее критического значения, температуры окружающей среды, максимальной температуры в толще высоковольтной обмотки (исключение составляет функция относительной высоты обмотки при минимизации по критерию «стоимость активных материалов», которая не зависит от критического значения механической силы); 2) относительной суммарной ширины низковольтной и высоковольтной обмоток, относительной ширины низковольтной обмотки, относительного диаметра полюсного наконечника при минимизации объема и стоимости активных материалов соответственно равные 0,45, 0,40 и 1,26; относительного диаметра полюсного наконечника при минимизации установочной площади, равного 1,26; относительной ширины низковольтной обмотки, относительного диаметра полюсного наконечника при минимизации габаритного объема, равные 0,405 и 1,26 являются постоянными в выбранной области факторного пространства.

5. Путем изменения угла конусности рабочего полюса втяжного электромагнита обеспечено согласование тяговой и механической характеристик электромеханического реле времени серий РВ100 и РВ200. Конструкция дополнительно снабжена пневматическим демпфером, обеспечивающим безударный взвод часового механизма и нефорсированное управление электромагнитным приводом, что позволило исключить перегрев его обмотки.

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

Спроектированные вакуумные контакторы КВ2-250, КВ2-400, КВ2-630 на номинальные токи 250, 400, 630 А соответственно выполненные на основе П-образной форсированной четырехобмоточной магнитной системы с последовательным соединением обмоток обеспечат их конкурентоспособность на рынке низковольтной электротехнической аппаратуры. Исполнения вакуумных контакторов с электромагнитной защелкой и магнитной памятью с функцией ручного возврата позволят исключить потребление электроэнергии во включенном состоянии контакторов.

#### **Рекомендуется:**

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

– к внедрению в серийное производство разработанные модернизированное электромеханическое реле времени с часовым механизмом; указательные реле

РУ31 и РУ32; контактор с магнитной памятью и функцией ручного возврата; контактор с электромагнитной защелкой и функцией ручного возврата.

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

## **ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Публикации в ведущих научных журналах из списка ВАК**

1. Архипова, Е. В. Анализ статических тяговых характеристик броневой магнитной системы с втяжным конусообразным якорем / Е. В. Архипова, Ю. М. Зайцев, **А. В. Михайлов**, Н. В. Руссова, Г. П. Свинцов // Электротехника. – 2013. – № 12. – С. 11-14.

2. Зайцев, Ю. М. Методика параметрического синтеза форсированных четырехобмоточных П-образных электромагнитов постоянного напряжения в схеме последовательного соединения обмоток / Ю. М. Зайцев, **А. В. Михайлов**, Н.В. Руссова, Г.П. Свинцов // Вестник Чувашского университета. – 2017. – № 3. – С. 38-46.

3. **Михайлов, А. В.** Минимизация массы стали и меди форсированного П-образного электромагнита с последовательно соединенными обмотками / **А. В. Михайлов**, Н. В. Руссова, Д. В. Самуилов, Г. П. Свинцов // Вестник Чувашского университета. – 2017. – № 3. – С. 99-108.

### **Патенты**

4. Патент на изобретение 2566533 РФ, МПК Н01Н 43/12. Электромеханическое реле времени / М. Г. Линт, **А. В. Михайлов**, О. С. Черненко; патентообладатель ОАО «МРСК Центра и Приволжья». – № 2014110573/28; заявл. 19.03.2014; опубл. 27.10.2015. Бюл. № 30. – 7 с.

5. Патент на изобретение 2574956 РФ, МПК Н01Н 43/12. Электромеханическое реле времени / М. Г. Линт, **А. В. Михайлов**, О. С. Черненко; патентообладатель ОАО «МРСК Центра и Приволжья». – № 2014122222/12; заявл. 30.05.2014; опубл. 10.02.2016. Бюл. № 4. – 8 с.

6. Патент на изобретение 2581040 РФ, МПК Н01F 7/16. Втяжной электромагнит / М. Г. Линт, **А. В. Михайлов**, О. С. Черненко; патентообладатель ОАО «МРСК Центра и Приволжья». – № 2014122130/07; заявл. 30.05.2014; опубл. 10.04.2016. Бюл. № 10. – 6 с.

7. Патент на изобретение 2581046 РФ, МПК Н01Н 51/04. Указательное электромагнитное реле / М. Г. Линт, **А. В. Михайлов**, О. С. Черненко; патентообладатель ОАО «МРСК Центра и Приволжья». – № 2014110571/07; заявл. 19.03.2014; опубл. 10.04.2016. Бюл. № 10. – 13 с.

8. Патент на изобретение 2588606 РФ, МПК Н01Н 33/66. Вакуумный выключатель / **А. В. Михайлов**, М. А. Калинин; патентообладатель ЗАО «ЧЭАЗ». – № 2015107650/07; заявл. 04.03.2015; опубл. 10.07.2016. Бюл. № 19. – 7 с.

9. Патент на полезную модель 49356 РФ, МПК Н01Н 33/66. Вакуумный выключатель / **А. В. Михайлов**; патентообладатель ОАО «ЧЭАЗ». – № 2005114690/22; заявл. 13.05.2005; опубл. 10.11.2005. Бюл. № 31. – 2 с.

10. Патент на полезную модель 82065 РФ, МПК Н01Н 33/66. Вакуумный выключатель / **А. В. Михайлов**; патентообладатель ЗАО «ЧЭАЗ». – № 2008136644/22; заявл. 11.09.2008; опубл. 10.04.2009. Бюл. № 10. – 2 с.

#### **Статьи, материалы конференций и другие издания**

11. Андреев, Д. Обновление электромеханических устройств РЗА / Д. Андреев, Е. Киркова, П. Кузьмин, М. Линт, В. Матисон, **А. Михайлов** // Электроэнергия. – 2013. – № 6(21). – С. 114-117.

12. 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.

13. Зайцев, Ю. М. Вакуумный контактор серии КВ2-250-3 с поляризованным приводом / Ю. М. Зайцев, **А. В. Михайлов**, В. Н. Петров, Г. П. Свинцов, А. С. Семёнова // Человек. Гражданин. Учёный: сб. тр. Регион. фестиваля студ. и молодежи. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2015. – С. 27.

14. Куликов, А. Л. Современное состояние и перспективы электромеханических устройств РЗА / А. Л. Куликов, М. Г. Линт, В. А. Матисон, **А. В. Михайлов** // Сборник тезисов докладов II международной научно-практической конференции и выставки "Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем России – 2013" ("РЭЛАФ Экспо 2013") г. Чебоксары. – Чебоксары: РИЦ "СРЗАУ", 2013. – С. 96.

15. Линт, М. Г. Современное состояние и перспективы электромеханических устройств РЗА / М. Г. Линт, В. А. Матисон, **А. В. Михайлов** // Релейная защита и автоматизация. – 2013. – № 2. – С. 38-40.

16. **Михайлов, А. В.** Вакуумные контакторы напряжением до 1140 В / **А. В. Михайлов** // Региональная энергетика и электротехника: проблемы и решения: сб. науч. тр. Вып. IX. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2013. – С. 157-161.

17. **Михайлов, А. В.** Разработка современных электромеханических реле / **А. В. Михайлов** // Энергия. – 2013. – № 4. – С. 24-26.

**Михайлов Алексей Валерьевич**

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

##### **Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Подписано в печать 30.01.2018 г. Формат 60×84 1/16.

Бумага офсетная. Печать оперативная.

Печ. л. 1,25. Тираж 100 экз. Заказ № 482

Отпечатано с готового оригинал-макета в типографии «Крона-2» в форме ООО