

На правах рукописи

Петров Виктор Николаевич

**УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫЕ МЕТОДИКИ
ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СИНТЕЗА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ
ПРИВОДОВ ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ
АППАРАТОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ**

Специальность 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Чебоксары – 2021

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: **Свинцов Геннадий Петрович**, доктор технических наук, доцент

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

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

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва

Защита состоится « 15 » октября 2021 г. в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.301.06, созданного 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» и на сайте www.chuvsu.ru.

Автореферат разослан « 12 » августа 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.301.06

Н.В. Руссова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Широкое применение в аппаратуре распределения и управления потоками электрической энергии получили электромагнитные приводы постоянного и выпрямленного напряжения. В последние годы особое внимание уделяется созданию форсированных электромагнитных приводов, обеспечивающих снижение массы, потребляемой мощности, габаритных размеров аппарата в целом.

На современном рынке электротехнической продукции одним из условий обеспечения конкурентоспособности является её высокое качество при приемлемой цене, что предопределяет необходимость улучшения характеристик и параметров продукции, в том числе оптимизацию по массогабаритным показателям и энергопотреблению, также необходимость снижения затрат на проектирование и производство.

Степень разработанности темы исследования. Большой вклад в разработке методик и методов расчета электромагнитных, электродинамических и электромеханических систем внесли ученые: Афанасьев А.А., Афанасьев А.Ю., Буль Б.К., Буль О.Б., Гордон А.В., Дмитренко А.М., Курбатов П.А., Лобов Б.Н., Любчик М.А., Нестерин В.А., Нейман В.Ю., Никитенко А.Г., Павленко А.В., Сливинская А.Г., Шоффа В.Н. и другие. Развитие теории электромеханики и электроаппаратостроения отражено также в работах Бугаева Г.А., Иванова И.П., Михайлова Н.М., Софронова Ю.В. и других.

Несмотря на большое количество опубликованных научных работ имеются «темные пятна» в теории и практике проектирования электромагнитных механизмов, электромагнитных приводов и схем управления ими.

В настоящее время недостаточно проработаны вопросы разработки методик проектного расчета, учитывающих ряд факторов, в том числе, влияние вихревых токов на динамические параметры и характеристики электромагнитных приводов постоянного напряжения, магнитных потоков рассеяния и выпучивания, магнитного сопротивления ферромагнитных элементов.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования являются электромагнитные приводы постоянного напряжения. Предметом исследования является совершенствование методик параметрического синтеза электромагнитных приводов.

Целью диссертационной работы является разработка и совершенствование алгоритмов проектирования форсированных электромагнитных приводов, позволяющих выполнить параметрический синтез в условиях статики по частным критериям оптимальности.

Для достижения поставленной цели **сформулированы и решены следующие задачи:**

1. Проведение сравнительной оценки магнитных систем и схемных решений для питания электромагнитных приводов, известных методик проектного расчета с учетом статических и динамических процессов.

2. Разработка усовершенствованных методик расчета электромагнитных приводов, позволяющих осуществить параметрический синтез по различным частным критериям оптимальности в статическом режиме.

3. Анализ результатов расчета по усовершенствованным методикам, содержащих обобщенные математические модели электромагнитных и тепловых характеристик.

4. Разработка математической модели динамических процессов в электромагнитной системе в форме решения дифференциальных уравнений. Расчет динамических параметров и характеристик электромагнитных приводов с учетом влияния вихревых токов в ферромагнитных элементах.

Научная новизна работы:

1. Разработаны усовершенствованные методики параметрического синтеза форсированных клапанных электромагнитных приводов, позволяющие снизить ресурсопотребление и повысить экономические показатели.

2. Получены полиномиальные функции, позволяющие определить оптимальные размеры и параметры форсированных клапанных одно- и двухобмоточных электромагнитных приводов с Г-образной скобой магнитопровода по схеме с балластным резистором и схеме с последовательным соединением низкоомной, высокоомной обмоток, и обеспечивающие минимум временных и финансовых затрат на их проектирование.

3. Предложены полиномиальные функции, позволяющие определить оптимальные размеры и параметры форсированных клапанных четырехобмоточных электромагнитных приводов с П-образным ярмом и прямоходовым якорем по схеме с последовательным соединением низкоомных и высокоомных обмоток при минимальной габаритной высоте приводов.

4. Выполнен анализ влияния исходных данных проектирования на динамические параметры и характеристики клапанного однообмоточного электромагнитного привода, полученных на основе решения дифференциальных уравнений с учетом влияния вихревых токов в ферромагнитных элементах и использования обобщенных электромагнитных характеристик.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Разработан новый алгоритм и создана вычислительная программа проектного расчета форсированных клапанных электромагнитных приводов постоянного напряжения с Г-образной скобой магнитопровода в схеме с балластным резистором и с последовательным соединением низкоомной и высокоомной обмоток.

2. Предложены выражения для магнитных систем различных конфигураций, позволяющие с небольшими затратами времени и финансов определять основные

размеры и производить компоновку конструкций форсированных электромагнитных приводов в зависимости от исходных данных без предъявления высоких требований к квалификации проектировщиков.

3. Проанализировано влияние исходных данных проектирования на размеры, динамические параметры и характеристики клапанного однообмоточного электромагнитного привода по схеме с балластным резистором.

4. Разработанные методики параметрического синтеза форсированных электромагнитных приводов, а также результаты расчета размеров, динамических параметров и характеристик используются в учебном процессе на кафедре электрических и электронных аппаратов ФГБОУ ВО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова».

5. Основные положения диссертационной работы использованы на АО «ЧЭАЗ» при разработке контакторов серии КЭЧ в рамках выполнения опытно-конструкторской работы «Разработка и освоение серийного производства на отечественном предприятии серии электромагнитных контакторов электродвигателями на токи от 6 до 150 А и номинальное напряжение до 690 В».

Методология и методы исследования. В ходе исследований использованы основные положения теорий подобия и моделирования, планирования эксперимента, методы расчета магнитных цепей, тепловых полей, решения нелинейных дифференциальных уравнений.

Положения диссертационной работы, выносимые на защиту:

1. Усовершенствованная методика проектного и оптимизационного расчета форсированного клапанного электромагнитного привода в схеме с балластным резистором, минимизированного по критериям качества «масса активных материалов» и «габаритный объем» по условиям динамики.

2. Анализ степени влияния исходных данных проектирования на размеры и динамические параметры клапанного электромагнитного привода, рассчитанных с учетом сопротивления короткозамкнутого контура на основе решения дифференциальных уравнений с использованием обобщенных электромагнитных характеристик.

3. Рекомендации по использованию полиномиальных зависимостей соразмерностей и параметров электромагнитных приводов, представленных в безразмерной критериальной форме (получены использованием методов теории подобия) и позволяющих в кратчайший срок выполнить проектирование с минимальными финансовыми затратами.

Степень достоверности результатов. Достоверность полученных результатов обеспечивается применением обобщенных нагрузочных характеристик, полученных в ходе экспериментального исследования электромагнитных характеристик клапанного электромагнитного привода; использованием методов теории подобия и планирования эксперимента и обработки его результатов; методов решения дифференциальных уравнений, описывающих динамические процессы; сопоставлением рас-

четной характеристики изменения тока в обмотке в процессе срабатывания с экспериментально снятой.

Соответствие паспорту специальности 05.09.01 – электромеханика и электрические аппараты.

Соответствие диссертации формуле специальности: 05.09.01 «Электромеханика и электрические аппараты» (технические науки): в диссертационной работе целью исследования является разработка и совершенствование методик проектирования форсированных электромагнитных приводов аппаратов распределения и управления, позволяющих снизить ресурсопотребление и повысить экономические показатели.

Соответствие диссертации области исследования: отраженные в диссертации научные положения соответствуют области исследования специальности 05.09.01, а именно «Разработка методов анализа и синтеза электрических аппаратов».

Апробация результатов работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на: II Международной научно-технической конференции «Энергетические системы» (г. Белгород, 2017 г.), Международной научно-технической конференции «Smart Energy Systems 2019» (г. Казань, 2019 г.), IV Межрегиональной конференции-фестивале научного творчества учащейся молодежи «Юность Большой Волги» (г. Чебоксары, 2013 г.) Региональном фестивале студентов и молодежи «Человек. Гражданин. Ученый» (г. Чебоксары, 2012, 2014, 2015, 2016 гг.), Всероссийской 47-й научной студенческой конференции (г. Чебоксары, 2013 г.), Всероссийской 48-й научной студенческой конференции (г. Чебоксары, 2014 г.), Всероссийской 49-й научной студенческой конференции (г. Чебоксары, 2015 г.), Всероссийской 50-й научной студенческой конференции (г. Чебоксары, 2016 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 23 работы, из них: 4 статьи опубликованы в журналах из перечня ВАК, 3 статьи проиндексированы в базе Scopus, 2 патента, 14 публикаций в других печатных изданиях.

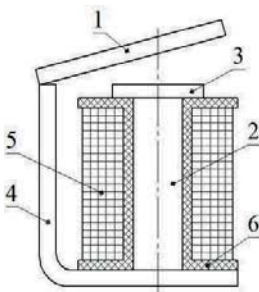
Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, 5 приложений, включает в себя 206 страниц машинописного текста, содержит 33 иллюстрации, 14 таблиц, перечень литературы из 172 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснованы актуальность, степень разработанности темы диссертационного исследования, приведены: цель и задачи, объект, предмет и область исследований, научная новизна работы, теоретическая и практическая ценность результатов, методология и методы исследований, основные положения, выносимые

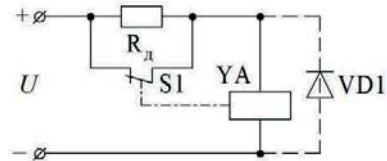
на защиту, достоверность и апробация результатов, раскрыты структура и объем работы.

В первой главе приведен обзор и анализ магнитных систем (МС) одно-, двух- и четырехобмоточных клапанных электромагнитных приводов (ЭМП) аппаратов распределения и управления, а также широко применяемых как в отечественной, так и в зарубежной практике схем форсированного управления (ФУ) ЭМП. В частности, для одной из выбранных МС – клапанного однообмоточного ЭМП с Г-образной скобой магнитопровода (рисунок 1) перспективной является схема ФУ с добавочным (балластным) резистором (рисунок 2).



- 1 – ярко; 2 – сердечник;
3 – полюсный наконечник;
4 – Г-образная скоба магнитопровода;
5 – обмотка; 6 – каркас катушки

Рисунок 1 – Эскиз МС клапанного ЭМП с Г-образной скобой магнитопровода



YA – обмотка; R_d – добавочный (балластный) резистор; VD1 – диод для ограничения перенапряжения в момент размыкания форсировочного контакта S1

Рисунок 2 – Схема форсированного управления клапанного ЭМП с напряжением питания U

Проведена аналитическая оценка известных методик синтеза одно- и двухобмоточных ЭМП по условиям статики с различными схемами ФУ, в том числе с балластным резистором. Также часто применяются схемы на основе широтно-импульсной модуляции напряжения на обмотке и схемы с последовательным, параллельным соединением обмоток.

В известных методиках проектирования принимается ряд допущений и ограничений, например, скачкообразное изменение тяговых усилий при включении, отключении (возврата) ЭМП. Полагается, что тепловое состояние обмоток в процессе срабатывания ЭМП остается неизменным. Выражение коэффициента теплоотдачи не учитывает отдельно долю отдачи тепла конвекцией и излучением. Не учтено условие возврата подвижного элемента ЭМП и определение оптимального варианта его выполнения.

Кроме того, в отдельных методиках не рассмотрен режим удержания якоря ЭМП, а также используется графоаналитический метод. Не выделена граница линейности МС. Необоснованно выбраны коэффициенты рассеяния, потерь в МС, форсировки, теплоотдачи, при которых нет уверенности не только об оптимальности геометрических размеров и параметров ЭМП, но и в его гарантированной работоспособности.

Отмеченные недостатки могут привести высокой трудоемкости и к повышенным погрешностям при выполнении проектного расчета.

Приведены апробированные экспериментальные обобщенные электромагнитные и тепловые характеристики клапанных одно- и двухобмоточных ЭМП, а также диапазоны изменения факторов в соответствующих функциях, использованные для разработки усовершенствованных методик синтеза. В частности, для клапанного ЭМП с Г-образной скобой магнитопровода нагрузочные характеристики описаны в параметрической форме:

$$\begin{cases} M_{\text{ЭМ}} = M_*(d_*, H_*, A_*, c_*, \varphi, B_0) \cdot M_{\text{баз}}; & (1) \\ F_{\text{ЭМ}} = F_*(d_*, H_*, A_*, c_*, \varphi, B_0) \cdot F_{\text{баз}}, & (2) \end{cases}$$

где M_* , F_* – безразмерные функции электромагнитного момента и магнитодвижущей силы (МДС) соответственно; d_* , H_* , A_* , c_* – относительные диаметр полюсного наконечника, высота окна обмотки, толщина окна обмотки и расстояние от оси сердечника до скобы магнитопровода; φ – угол поворота якоря; B_0 – усредненная магнитная индукция в основании сердечника; $M_{\text{баз}} = B_0^2 \cdot \pi \cdot d_c^3 / 8 \cdot \mu_0$, $F_{\text{баз}} = B_0 \cdot d_c / \mu_0$ – базисные значения электромагнитного момента и МДС соответственно; d_c – диаметр сердечника (базисный размер).

Кривые намагничивания описаны также в параметрической форме:

$$\begin{cases} \Psi = \Psi_*(d_*, H_*, A_*, c_*, \varphi, B_0) \cdot \Psi_{\text{баз}}; & (3) \\ F_{\text{ЭМ}} = F_*(d_*, H_*, A_*, c_*, \varphi, B_0) \cdot F_{\text{баз}}, & (4) \end{cases}$$

где Ψ_* , F_* – безразмерные функции потокоцепления и МДС соответственно; $\Psi_{\text{баз}} = B_0 \cdot \pi \cdot d_c^2 \cdot N / 4$ – базисное значение потокоцепления.

Обобщенные тепловые характеристики клапанного ЭМП с Г-образной скобой магнитопровода:

– среднеобъемная температура обмотки

$$\Theta_V = \Theta_{V^*} \cdot T_0 = (1,44 + 0,154 \cdot a_{55} - 0,184 \cdot a_{66} + 0,043 \cdot a_{66}^2 - 0,024 \cdot a_{55} a_{66})^2 \cdot T_0; (5)$$

– среднеповерхностная температура обмотки

$$\Theta_S = \Theta_{S^*} \cdot T_0 = (1,37 - 0,018 \cdot a_{22} + 0,130 \cdot a_{55} - 0,161 \cdot a_{66} + 0,039 \cdot a_{66}^2 - 0,021 \cdot a_{55} \cdot a_{66})^2 \cdot T_0; \quad (6)$$

– относительная теплоотдающая способность МС

$$K_* = (8,57 + 1,02 \cdot a_{11} + 0,399 \cdot a_{22} + 0,345 \cdot a_{55} + 0,459 \cdot a_{66} - 0,129 \cdot a_{66}^2)^2. \quad (7)$$

В выражениях (5)–(7) T_0 – температура окружающей среды; $a_{55} = 3,202 \cdot (0,01 \cdot \Theta_{\text{доп}}) - 4,163$; $a_{66} = 6,667 \cdot (0,01 \cdot T_0) - 3,667$; $\Theta_{\text{доп}}$ – допустимая температура в толще обмотки; $a_{11} = 1,003 \cdot H_* - 3,010$; $a_{22} = 7,044 \cdot A_* - 3,522$;

– выражение мощности, рассеиваемой МС до и после преобразований:

$$\tau_{\text{доп}} \cdot K_T \cdot S_{\text{охл}} = T_0 (\Theta_{S^*} - 1) \cdot K_* \cdot K_{\text{т.баз}} \cdot \frac{\pi \cdot d_c^2}{4}. \quad (8)$$

Здесь $K_{\text{т.баз}} = 5,67 \cdot (2,73 + 0,01 \cdot T_0)^4 / T_0$ – базисный коэффициент теплопередачи; $\tau_{\text{доп}}$ – допустимое превышение температуры нагрева обмотки; K_T – коэффициент теплоотдачи; $S_{\text{охл}}$ – площадь теплоотдающей поверхности обмотки;

Выбраны исходные данные для усовершенствования методики и для проведения вычислительных экспериментов.

В результате проведенного обзора и анализа магнитных систем выработаны рекомендации по обоснованному выбору кинематики и схем управления для усовершенствования методик проектного расчета электромагнитных приводов аппаратов распределения и управления, что, несомненно, способствует повышению конкурентоспособности отечественных контакторов, магнитных пускателей, силовых коммутационных реле.

Во второй главе предложены усовершенствованные методики параметрического синтеза клапанных ЭМП по различным схемам ФУ в условиях статики (первый этап расчета динамических параметров и характеристик ЭМП).

Отмечено, что для форсированных приводных ЭМП основным режимом работы является динамический, когда электромагнитные и другие процессы изменяются во времени при срабатывании и возврате подвижной системы (механизма) ЭМП. Однако, проектный расчет некоторых типов форсированных ЭМП постоянного напряжения при частоте их включения, не превышающих 1200 включений в час, допустимо проводить по статическим его характеристикам.

Для разработки методики проектного расчета клапанного ЭМП с балластным резистором использованы уточненная согласованность механической и тяговых характеристик (рисунок 3,а) и соответствующая нагрузочная характеристика ЭМП (рисунок 3,б).

Исходными данными также являются выражения (1)–(4).

Методика проектного расчета базируется на следующих уравнениях (9)–(12):

– уравнение срабатывания:

$$F_{\text{ср}} = (K_{U_{\text{min}}} \cdot U_{\text{н}} / K_{U_{\text{ср}}} \cdot R_{\Gamma}) \cdot N, \quad (9)$$

где $F_{\text{ср}}$ – МДС срабатывания; $K_{U_{\text{min}}}$ – кратность минимального напряжения; $K_{U_{\text{ср}}}$ – конструктивно-технологический запас по напряжению срабатывания; $U_{\text{н}}$ – номинальное напряжение питания; R_{Γ} – сопротивление обмотки в нагретом состоянии; N – количество витков обмотки.

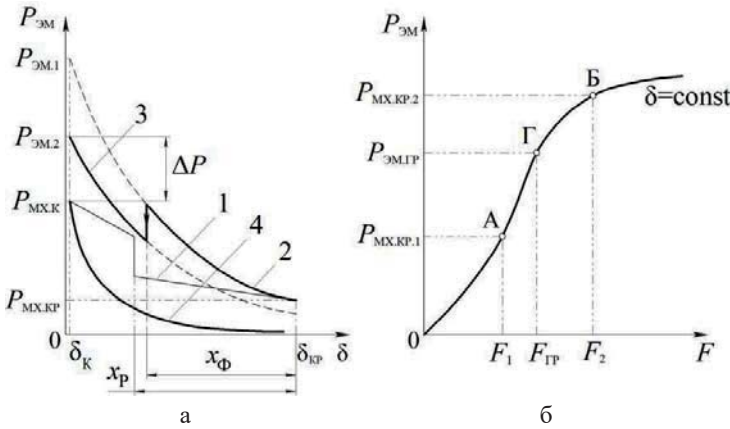


Рисунок 3 – Сопоставление механической (1) и тяговых (2, 3, 4) характеристик ЭМП (а) и нагрузочная характеристика ЭМП при $\delta = \delta_{\text{кр}}$ (б)

– уравнение возврата (отпускания) якоря:

$$F_{\text{отп}} = K_{U_{\text{отп}}} \cdot K_{\text{отп}} \cdot U_{\text{н}} \cdot N / (R_{\text{х}} + R_{\text{д}}). \quad (10)$$

Здесь $F_{\text{отп}}$ – МДС при возврате якоря; $K_{U_{\text{отп}}}$ – коэффициент запаса по напряжению отпускания, $K_{\text{отп}}$ – относительная величина напряжения отпускания; $R_{\text{х}}$ – сопротивление обмотки при температуре окружающей среды.

– баланс мощностей в режиме удержания якоря в притянутом положении:

$$n_{\text{р}} \cdot \tau_{\text{дог}} \cdot K_{\text{т}} \cdot S_{\text{охл}} = (U_{\text{max}} / (R_{\Gamma} + R_{\text{д}}))^2 \cdot R_{\Gamma}. \quad (11)$$

В уравнении (11): $n_{\text{р}}$ – коэффициент перегрузки по мощности; U_{max} – максимальное напряжение питания;

– уравнение удержания якоря:

$$F_{\text{уд}} = (K_{U_{\text{min}}} \cdot U_{\text{н}} / K_{U_{\text{ср}}} \cdot (R_{\Gamma} + R_{\text{д}})) \cdot N, \quad (12)$$

где $F_{\text{уд}}$ – МДС при удержании якоря. Последнее уравнение обусловлено необходимостью обеспечения надежного удержания якоря ЭМП при воздействии внешних

механических факторов. Это достигается дополнительным увеличением электромагнитной силы (ΔP) над противодействующим усилием в конечном притянутом положении якоря (рисунок 3,а).

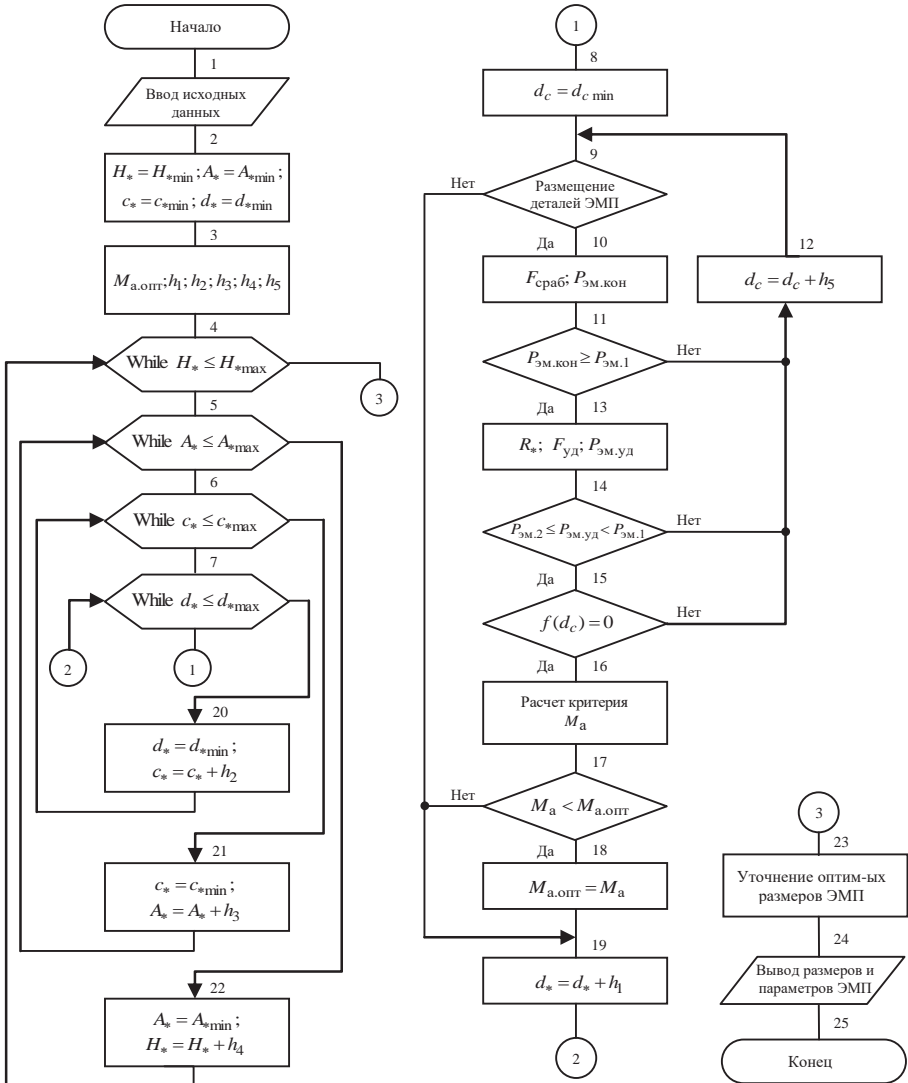


Рисунок 4 – Блок-схема алгоритма проектного оптимизационного расчета форсированного клапанного ЭМП по схеме с балластным резистором

После преобразований уравнения (9)–(12) с учетом выражений (5)–(8) сведены к одному нелинейному:

$$d_c^3 - m \cdot F_{уд}^2 = 0, \quad (13)$$

где $m = \frac{4 \cdot K_{\max}^2 \cdot \rho_{\text{гор}} \cdot (1 + 2 \cdot \Delta_{в*} + 2 \cdot \Delta_{к*} + A_*)}{H_* \cdot A_* \cdot K_3 \cdot n_p \cdot T_0 \cdot (\Theta_{s*} - 1) \cdot K_* \cdot K_{т.газ}}$; K_{\max} – кратность максимального на-

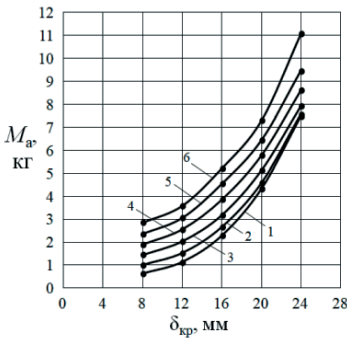
пряжения питания; $\rho_{\text{гор}}$ – удельное электрическое сопротивление меди в нагретом состоянии; $\Delta_{в*}$ – относительная толщина воздушной прослойки между каркасом катушки и сердечником; $\Delta_{к*}$ – относительная толщина каркаса катушки; K_3 – коэффициент заполнения окна обмотки по меди.

Решение уравнения (13) относительно диаметра сердечника позволяет определить все размеры ЭМП. После выполнения оптимизационного расчета ЭМП по минимизации критерия качества (функции цели) производится вывод уточненных размеров и параметров ЭМП.

Блок-схема алгоритма проектного расчета по усовершенствованной методике с оптимизацией на примере минимизации массы активных материалов ЭМП приведена на рисунке 4.

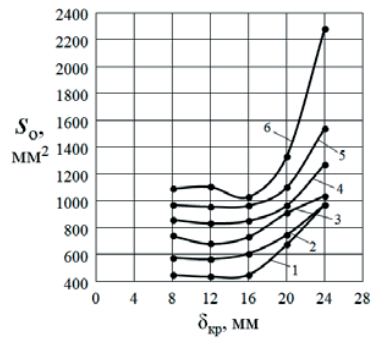
В третьей главе представлены результаты оптимизационных расчетов ЭМП по усовершенствованным методикам.

Зависимости суммарной массы активных материалов M_a от величины воздушного рабочего зазора $\delta_{кр}$ при различных начальных (критических) значениях механического усилия $P_{мх.кр}$ изображены на рисунке 5.



Значения $P_{мх.кр}$: 1 – 5 Н; 2 – 10 Н; 3 – 15 Н;
4 – 20 Н; 5 – 25 Н; 6 – 30 Н

Рисунок 5 – Зависимость суммарной массы активных материалов M_a от $\delta_{кр}$



Значения $P_{мх.кр}$: 1 – 5 Н; 2 – 10 Н;
3 – 15 Н; 4 – 20 Н; 5 – 25 Н; 6 – 30 Н

Рисунок 6 – Зависимость площади окна обмотки S_o от $\delta_{кр}$

Из графических зависимостей видно, что с увеличением $\delta_{кр}$ возрастает масса активных материалов ЭМП. При этом масса активных материалов ЭМП также возрастает и при увеличении $P_{мх.кр}$. Характер изменения величин соответствует физическому толкованию анализируемых зависимостей.

Зависимость площади окна обмотки от величины начального рабочего зазора $\delta_{кр}$ изображена на рисунке 6. Площадь окна S_o ($S_o = H_o \cdot A_o$), занимаемого обмоточным проводом, преимущественно имеет тенденцию к нарастанию, как при увеличении $\delta_{кр}$, так и $P_{мх.кр}$. Следует отметить более интенсивное возрастание площади окна при максимальном $P_{мх.кр}$ (30 Н). Графики по рисункам 5 и 6 построены при $T_0 = 40 \text{ }^\circ\text{C}$; $\Theta_{доп} = 110 \text{ }^\circ\text{C}$; $P_{мх*}=4$; $K_{max} = 1,5$; $K_3 = 0,45$.

Проведен вычислительный эксперимент, после обработки результатов которого, получены полиномиальные зависимости (14)–(29) основных соизмерностей и параметров клапанного ЭМП по схеме с балластным резистором при минимизации функции «габаритный объем ЭМП»:

$$V_{г*} = 10^{-8} (500,3 - 77,6z_1 + 49z_2 + 7,1z_3 - 6,84z_4 + 8,0z_5 - 12,7z_6 + 25,1z_1^2 - 5,92z_2^2 - 14,2 \cdot z_1 \cdot z_2 + 6,3 \cdot z_1 \cdot z_6)^4, \quad (14)$$

$$\delta_{*V_T} = 10^{-4} \cdot (57,84 - 5,2 \cdot z_1 - 3,72 \cdot z_2 - z_1^2 + 0,7 \cdot z_2^2)^2, \quad (15)$$

$$H_{*V_T} = 10^{-8} \cdot (108,1 - 3,32 \cdot z_1 + 1,5 \cdot z_3 - 1,43 \cdot z_4 - 1,77 \cdot z_5 - 2,73 \cdot z_6)^4, \quad (16)$$

$$A_{*V_T} = 10^{-4} \cdot (79,3 - 1,4 \cdot z_1 - 1,37 \cdot z_6)^2, \quad (17)$$

$$c_{*V_T} = 1,598 + 0,1369z_1 - 0,0655z_2 - 0,0163z_3 - 0,0166z_5 + 0,0279z_6 + 0,0247z_2^2, \quad (18)$$

$$d_{*V_T} = 1,647 + 0,0358 \cdot z_1 - 0,0246 \cdot z_2, \quad (19)$$

$$F_{cp*V_T} = 10^{-2} \cdot (6,69 + 0,244 \cdot z_1 - 0,279 \cdot z_2 - 0,075 \cdot z_1^2 + 0,093 \cdot z_2^2)^2, \quad (20)$$

$$F_{yд*V_T} = 10^{-2} \cdot (22,41 + 0,279 \cdot z_1 - 0,248 \cdot z_5 + 0,367 \cdot z_6 + 0,415 \cdot z_1^2 + 0,256 \cdot z_6^2 - 0,417 \cdot z_1 \cdot z_2 + 0,245 \cdot z_1 \cdot z_4 - 0,282 \cdot z_1 \cdot z_5 + 0,431 \cdot z_1 \cdot z_6 - 0,248 \cdot z_3 \cdot z_6 + 0,273 \cdot z_4 \cdot z_6 - 0,357 \cdot z_5 \cdot z_6 + 0,262 \cdot z_1 \cdot z_4 \cdot z_6 - 0,331 \cdot z_1 \cdot z_5 \cdot z_6), \quad (21)$$

$$F_{отг*V_T} = 10^{-2} \cdot (2,968 - 0,195 \cdot z_1 - 0,33 \cdot z_2 + 0,068 \cdot z_2^2 + 0,079 \cdot z_1 \cdot z_2), \quad (22)$$

$$B_{o,cpV_T} = 1,178 - 0,019 \cdot z_1 - 0,018 \cdot z_1^2 + 0,016 \cdot z_1 \cdot z_2 - 0,015 \cdot z_1 \cdot z_2 \cdot z_6, \quad (23)$$

$$B_{o,отгV_T} = 0,511 - 0,037 \cdot z_1 + 0,035 \cdot z_2 + 0,006 \cdot z_6 - 0,012 \cdot z_2^2 + 0,008 \cdot z_1 \cdot z_2, \quad (24)$$

$$B_{\delta, V_T} = 0,31 - 0,029 \cdot z_1 + 0,026 \cdot z_2 - 0,007 \cdot z_2^2 - 0,005 \cdot z_1 \cdot z_6, \quad (25)$$

$$P_{\Pi^* V_T} = 10^{-8} \cdot (132,8 + 15,6 \cdot z_1 - 9,94 \cdot z_2 - 1,75 \cdot z_3 + 2,46 \cdot z_4 + 2,5 \cdot z_5 - 4,2 \cdot z_6 - \\ - 2,2 \cdot z_1^2 + 3,2 \cdot z_2^2)^4, \quad (26)$$

$$P_{\text{уд.о}^* V_T} = 10^{-4} \cdot (88,1 + 15,9 \cdot z_1 - 6,7 \cdot z_2 - 3,7 \cdot z_3 + 4,8 \cdot z_4 + 1,9 \cdot z_5 - 3 \cdot z_6 + \\ + 2,5 \cdot z_2^2 - 2,6 \cdot z_1 \cdot z_2 - 1 \cdot z_1 \cdot z_3 + 1,4 \cdot z_1 \cdot z_4)^2, \quad (27)$$

$$P_{\text{уд.р}^* V_T} = 10^{-8} (93 + 11,2 z_1 - 7,2 z_2 - 1,2 z_3 + 1,7 z_4 + 1,8 z_5 - 2,9 z_6 - 1,9 z_1^2 + 2,2 z_2^2)^4, \quad (28)$$

$$R_{* V_T} = 10^{-8} \cdot (99,6 + 3,25 z_1 - 4,05 z_2 - 1,23 z_6 - 2,41 z_1^2 + 1,2 z_1 z_2 - 1,22 z_1 z_6)^4. \quad (29)$$

Погрешность аппроксимации полиномами результатов вычислительного эксперимента составила менее 3%. В выражениях (14) – (29) переменные $z_1 \div z_6$ являются кодированными значениями факторов вычислительного эксперимента, в качестве которых приняты $\delta_{\text{кр}}$, $P_{\text{мх.кр}}$, T_0 , $\Theta_{\text{доп}}$, $K_{\text{мах}}$ и K_3 соответственно.

Несмотря на громоздкие выражения, расчеты по ним выполняются в кратчайший срок и с минимальными финансовыми затратами, обеспечивая конкурентоспособность для применения в различных аппаратах распределения и управления.

Выполненный параметрический синтез форсированного электромагнита по различным критериям оптимальности («масса активных материалов», «объем активных материалов») позволили достичь высокой износостойкости электромагнитных приводов.

Результаты проектного расчета по усовершенствованной методике в условиях статики позволили выработать алгоритм построения модели динамики электромагнитных приводов с учетом влияния сопротивления короткозамкнутого контура, магнитных потоков выпучивания и рассеяния.

В четвертой главе изложен обзор известных методик моделирования и расчета динамических параметров и характеристик ЭМП: методик последовательных интервалов и приближенных уравнений динамики, методики по известному закону движения якоря и др.

Выполнены расчеты динамических характеристик и параметров ЭМП (в рамках второго этапа решения проектной задачи) на основе решения системы дифференциальных уравнений (30)–(33) и использования обобщенных электромагнитных характеристик (1)–(4) с учетом сопротивления короткозамкнутого контура при обоснованном утверждении о полной магнитной связи обмотки управления и эквивалентного вихревого контура:

$$\left\{ \begin{array}{l} U = i \cdot R + N \frac{d\Phi_{\Psi}}{dt}, \\ 0 = i_{\text{вихр}} \cdot R_{\text{вихр}} + N_{\text{вихр}} \frac{d\Phi_{\Psi}}{dt}, \\ m_{\text{пр}} \frac{dv}{dt} = P_{\text{эм}} - P_{\text{мх}}, \\ \frac{dx}{dt} = v. \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} (30) \\ (31) \\ (32) \\ (33) \end{array}$$

Здесь U – напряжение, приложенное к обмотке управления; R, i, N – сопротивление, ток, число витков обмотки управления; $R_{\text{вихр}}, i_{\text{вихр}}, N_{\text{вихр}}$ – сопротивление, ток, число витков эквивалентного вихревого контура; Φ_{Ψ} – магнитный поток, приведенный по потокоцеплению обмотки управления; $m_{\text{пр}}$ – приведенная масса подвижной системы ЭМП; v – приведенная скорость подвижной системы; $P_{\text{эм}}$ – электромагнитное усилие; $P_{\text{мх}}$ – усилие механической характеристики, зависящей от положения якоря и его скорости перемещения.

Проанализировано влияние исходных данных проектирования на основные динамические параметры клапанного электромагнитного привода.

Результаты (пример) расчета основных динамических параметров ЭМП приведены в таблице 1.

Таблица 1 – К оценке влияния исходных данных проектирования на основные динамические параметры ЭМП

$\Theta_{\text{доп}},$ °С	$T_0,$ °С	$P_{\text{мх.кр}},$ Н	$\delta_{\text{кр}},$ мм	$I_{\text{обм.д}},$ А	$I_{\text{вихр.д}},$ А	$i_{\text{обм.тр}},$ А	$t_{\text{тр}},$ мс	$i_{\text{обм.ср}},$ А	$t_{\text{ср}},$ мс	$\tau_3,$ мс
110	40	5	8	0,069	50,57	0,096	48,3	0,064	80,3	77,1
			12	0,132	65,19	0,188	52,1	0,111	107,2	85,9
		15	8	0,110	81,65	0,155	79,5	0,103	114,9	133,7
			12	0,154	95,77	0,226	80,0	0,140	128,9	158,7
	70	5	8	0,046	36,25	0,067	111,8	0,042	168,0	101,8
			12	0,078	57,75	0,113	94,3	0,071	156,6	117,1
		15	8	0,084	54,36	0,112	276,6	0,068	351,7	163,7
			12	0,096	74,76	0,145	152,7	0,089	211,8	206,0

Результаты оценки, в том числе по таблице 1, показывают, что действующие значения тока в обмотке $I_{\text{обм.д}}$ и тока в вихревом контуре $I_{\text{вихр.д}}$, мгновенные значения тока трогания в обмотке $i_{\text{обм.тр}}$ и тока в обмотке в момент замыкания главных контактов $i_{\text{обм.ср}}$ имеют тенденцию к возрастанию при увеличении начального (критического) рабочего зазора $\delta_{\text{кр}}$, начального (критического) усилия $P_{\text{мх.кр}}$ механической характеристики и температуры окружающей среды T_0 . Значения временных параметров (время трогания якоря $t_{\text{тр}}$, время срабатывания $t_{\text{ср}}$, электромагнитная

постоянная времени τ_3) возрастают с увеличением начального (критического) усилия $P_{\text{мх.кр}}$ и температуры окружающей среды T_0 .

Рассчитаны и построены графики переходных процессов при срабатывании ЭМП. В качестве примера на рисунке 7 приведена расчетная зависимость тока в обмотке ЭМП от времени, характер изменения которой подтвержден экспериментально снятой осциллограммой тока в обмотке (рисунок 8) при срабатывании воздушного контактора типа LC1D40AFD на номинальный ток 40 А производства Schneider Electric.

Представленные зависимости позволили наглядно показать характер влияния силовых характеристик ЭМП на его динамические параметры и характеристики. При этом временные и скоростные параметры находятся в диапазонах, соответствующим реальным значениям электромагнитных контакторов и силовых ЭМП.

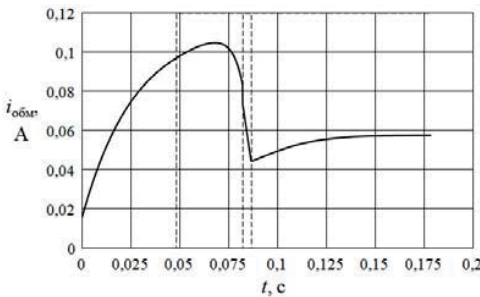


Рисунок 7 – Расчетная зависимость тока в обмотке ЭМП от времени

Рисунок 8 – Экспериментально снятая осциллограмма изменения тока в обмотке

Расчетные значения сопротивления вторичного контура при различных значениях критического рабочего зазора и механического усилия подтвердили несущественное влияние вихревых контуров на динамику процесса срабатывания, а также на нагрев сплошных ферромагнитных деталей ЭМП и его обмотки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научно-технические результаты, полученные в рамках диссертационного исследования:

1. Выявлено, что наиболее широкое применение в конструкции контакторов нашли магнитные системы с П, Ш, Г-образным ярмом в основном с внешним притягивающимся якорем. Исключение составляют контакторы переменного тока с номинальными токами 400-630 А и выше, которые выполняются в виде шихтованных систем для облегчения технологии изготовления.

2. Установлено, что современные контакторы в основном изготавливаются в однообмоточном исполнении с простой и экономически выгодной схемой с балластными резисторами. Ряд производителей используют схемы управления с широтно-импульсной модуляцией напряжения, реализуемой на универсальной обмотке, управляемой различными уровнями номинального напряжения. Также применяются широко известные схемы форсированного управления однокатушечными двухобмоточными электромагнитными приводами с последовательным (в режиме удержания) и параллельным (в режиме включения) соединением обмоток.

3. Разработана усовершенствованная методика параметрического синтеза клапанных электромагнитных приводов постоянного напряжения с применением электромагнитных и тепловых характеристик, полученных соответственно экспериментальным и расчетным путем (раздельным учетом нагрева конвекцией, лучеиспусканием и методом Фурье для электромагнитных приводов с двумя коаксиально размещенными обмотками).

4. Предложен алгоритм и разработана вычислительная программа проектного расчета электромагнитных приводов, которая позволяет определить оптимальные значения размеров и параметров, обеспечивающих минимальное значение функций цели (критериев качества).

5. В результате обработки данных с применением вычислительного эксперимента получены полиномиальные функции основных соразмерностей и параметров форсированных электромагнитных приводов с одной, двумя и четырьмя обмотками.

6. Сформулирована оценка степени влияния исходных данных на размеры и параметры (магнитодвижущая сила срабатывания, удержания и возврата, магнитная индукция в основании сердечника, мощность в режиме включения и удержания) электромагнитного привода.

7. Составлена и исследована модель динамического процесса срабатывания форсированного электромагнитного привода на основе решения дифференциальных уравнений с учетом влияния вихревых токов в ферромагнитных элементах, магнитных потоков рассеяния, выпучивания и сопротивления ферромагнитных элементов.

8. Разработана усовершенствованная методика расчета динамических параметров, позволяющая учесть степень влияния исходных данных на динамические и статические характеристики при проектировании современных быстродействующих электромагнитных приводов аппаратов распределения и управления.

9. Результаты диссертационного исследования используются на АО «ЧЭАЗ» при проведении проектных работ по совершенствованию существующих и разработке новых аппаратов распределения и управления, а также в учебном процессе на кафедре электрических и электронных аппаратов ФГБОУ ВО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова».

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из перечня ВАК

1. **Петров, В. Н.** Методика синтеза форсированного клапанного электромагнита постоянного напряжения в схеме с балластным резистором / **В. Н. Петров,**

Ю. М. Зайцев, Н. В. Руссова, Г. П. Свинцов // Вестник Чувашского университета. – 2017. – № 1. – С. 103–112 (0,5 п.л./0,125 п.л.).

2. **Петров, В. Н.** Влияние размеров, соразмерностей, условий питания и функционирования двухобмоточного клапанного электромагнита постоянного напряжения на минимизированную массу его активных материалов / **В. Н. Петров**, Н. В. Руссова, Д. В. Самуилов, Г. П. Свинцов // Вестник Чувашского университета. – 2018. – № 3. – С. 114–125 (0,687 п.л./0,225 п.л.).

3. **Петров, В. Н.** Результаты проектирования форсированного клапанного электромагнита постоянного напряжения в схеме с балластным резистором / **В. Н. Петров**, Н. В. Руссова, Д. В. Самуилов, Г. П. Свинцов // Вестник Чувашского университета. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та. – 2019. – №1. – С. 91–101 (0,625 п.л./0,156 п.л.).

4. **Петров, В. Н.** Способ управления электромагнитными приводами контакторов / **В. Н. Петров**, А. Ю. Гаврилов, Ю. М. Зайцев, И. П. Иванов, Г. П. Свинцов // Известия вузов. Электромеханика. – 2015. – № 4. – С. 32–36 (0,312 п.л./0,0625 п.л.).

Публикации в изданиях, входящих в базу цитирования Scopus

5. **Petrov, V. N.** On modeling on a single-winding forced valve electromagnet in a circuit with a ballast resistor / **V. N. Petrov**, E.I. Gracheva, N.V. Russova, D.V. Samuilov, G.P. Svintsov, I.V. Protosovitski // E3S Web of Conferences. – 2019. Vol.124. – doi:10.1051/e3sconf/201912402012 (0,312 п.л./0,0625 п.л.).

6. **Petrov, V. N.** A Design of a Minimized Shell-Type Plunger Constant-Voltage Electromagnet / **V. N. Petrov**, Yu. M. Zaitsev, E. N. Kadyshev, N. V. Russova, G. P. Svintsov // Russian Electrical Engineering. – 2018. – vol. 89, no. 8, pp. 473–476 (0,25 п.л./0,05 п.л.).

7. **Petrov, V. N.** Calculation and Assessment of Dynamic Parameters of Electromagnetic Elements of Circuit Breakers / **V. N. Petrov**, S. A. Vasiliev, E. N. Kadyshev, A. V. Mikhailov, G. P. Svintsov, N. N. Sorokin // Russian Electrical Engineering. – 2020. – vol. 91, no. 8, pp. 475–477 (0,187 п.л./0,031 п.л.).

Патенты

8. Пат. 2626408 Российская Федерация, МПК H01F 7/08. Клапанный приводной электромагнит постоянного напряжения [Текст] / **В. Н. Петров**, Ю. М. Зайцев, Н. В. Руссова, Г. П. Свинцов; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО "ЧГУ им. И.Н. Ульянова". – № 2015154206; заявл. 16.12.15; опубл. 27.07.17, Бюл. № 21. – 7 с. : ил. (0,437 п.л./0,106 п.л.)

9. Пат. 2636052 Российская Федерация, МПК H01F 7/18. Устройство управления электромагнитом постоянного напряжения [Текст] / **В. Н. Петров**, А. Ю. Гаврилов, М. Ю. Зайцев, Г. П. Свинцов; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО "ЧГУ им. И.Н. Ульянова". – № 2016148989; заявл. 13.12.16; опубл. 20.11.17, Бюл. № 32. – 7 с. : ил. (0,437 п.л./0,106 п.л.)

Публикации в других изданиях

10. **Петров, В. Н.** Проектный расчет форсированного электромагнита постоянного напряжения с последовательно соединенными обмотками / **В.Н. Петров**, Г. П. Свинцов, Ю. М. Зайцев, Н. В. Руссова, А.В. Михайлов, О. А. Никитина, Д. С. Сазанов // Энергетические системы: сб. тр. II Междунар. науч.-техн. конференции (Бел-

город, 23-24 ноября 2017 г.). – Белгород: Изд-во БГТУ, 2017. – С. 219–224 (0,437 п.л./0,0625 п.л.).

11. **Петров, В. Н.** Методика проектного расчета форсированного приводного клапанного электромагнита постоянного напряжения в схеме с последовательным соединением обмоток. Влияние условий функционирования и параметров механической характеристики контактора на диаметр сердечника электромагнита и его показатели качества / **В. Н. Петров**, Ю. М. Зайцев, Д. В. Иванов, И. П. Иванов, Н. В. Руссова, Г. П. Свинцов // Региональная энергетика и электротехника: проблемы и решения: сб. науч. тр. Вып. XI. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2015. – С. 299–310 (0,625 п.л./0,1 п.л.).

12. **Петров, В. Н.** Сравнительная оценка расчета силовых характеристик магнитной системы с втяжным якорем с коническим полюсом / **В. Н. Петров**, Е. В. Архипова, 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 (0,281 п.л./0,0937 п.л.).

13. **Петров, В. Н.** Теоретические и экспериментальные исследования электромагнитного привода реле времени серии РВ-100 / **В. Н. Петров**, А. С. Комарова // Юность Большой Волги: сборник статей лауреатов XV Межрегиональной конференции-фестиваля научного творчества учащейся молодежи «Юность Большой Волги». – Чебоксары, 2013. – С. 144–147 (0,25 п.л./0,125 п.л.).

14. **Петров, В. Н.** Вакуумный контактор КВ2-250-3 с поляризованным приводом / **В. Н. Петров**, Ю. М. Зайцев, А. В. Михайлов, Г. П. Свинцов, А. С. Семенова // Человек. Гражданин. Ученый: сб. тр. Регион. Фестиваля студ. и молодежи (Чуваш. гос. ун-т им. И.Н. Ульянова, 25-29 ноября 2014 г.). – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2015. – С. 27 (0,0625 п.л./0,0125 п.л.).

15. **Петров, В. Н.** Исследование втяжного электромагнита с различными формами полюсов для реле времени с часовым механизмом / **В. Н. Петров**, Ю. М. Зайцев, А. Б. Измакова, А. С. Комарова // Человек. Гражданин. Ученый: сб. тр. Регион. Фестиваля студ. и молодежи (Чуваш. гос. ун-т им. И.Н. Ульянова, 3–7 декабря 2012 г.). – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2013. – С. 41 (0,0625 п.л./0,0156 п.л.).

16. **Петров, В. Н.** Теоретические и экспериментальные исследования электромагнитного привода реле времени серии РВ-100 / **В. Н. Петров**, Ю. М. Зайцев, А. Б. Измакова, А. С. Комарова, Г. П. Свинцов // Природа. Наука. Победа: сб. тр. Всерос. 47-й науч. студ. конф. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2013. – С. 20–21 (0,125 п.л./0,025 п.л.).

17. **Петров, В. Н.** Усовершенствованный спусковой электромагнит для реле времени с часовым механизмом / **В. Н. Петров**, Ю. М. Зайцев, А. С. Комарова // Человек. Гражданин. Ученый: сб. тр. Регион. Фестиваля студ. и молодежи (Чуваш. гос. ун-т им. И.Н. Ульянова, 25–30 ноября 2013 г.). – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2014. – С. 31–32 (0,125 п.л./0,0375 п.л.).

18. **Петров, В. Н.** Результаты сравнительных испытаний модернизированных и серийных образцов реле времени серии РВ-100 / **В. Н. Петров**, Ю. М. Зайцев, А. С. Комарова // Россия. Культура. Наука: сб. тр. Всерос. 48-й науч. студ. конф. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2014. – С. 153–154 (0,125 п.л./0,0375 п.л.).

19. **Петров, В. Н.** Методика проектного расчёта форсированного двухобмоточного клапанного электромагнита постоянного напряжения в схеме последовательного включения / **В. Н. Петров**, Д. В. Иванов, Г. П. Свинцов // Победа – в науке: сб. тр. Всерос. 49-й науч. студ. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2015. – С. 31–33 (0,0937 п.л./0,031 п.л.).

20. **Петров, В. Н.** Методика оптимизационного расчёта форсированного двухобмоточного клапанного электромагнита постоянного напряжения / **В. Н. Петров**, Д. В. Иванов, Г. П. Свинцов // Человек. Гражданин. Ученый: сб. тр. Регион. Фестиваля студ. и молодежи (Чуваш. гос. ун-т им. И.Н. Ульянова, 05–12 декабря 2015 г.). – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2016. – С. 30–32 (0,125 п.л./0,0375 п.л.).

21. **Петров, В. Н.** Методика проектного расчёта форсированного двухобмоточного клапанного электромагнита постоянного напряжения / **В. Н. Петров**, Д. В. Иванов, Г. П. Свинцов // Человек. Гражданин. Ученый: сб. тр. Регион. Фестиваля студ. и молодежи (Чуваш. гос. ун-т им. И.Н. Ульянова, 05–12 декабря 2015 г.). – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2016. – С. 33–35 (0,125 п.л./0,0375 п.л.).

22. **Петров, В. Н.** Устройство широтно-импульсного управления электромагнитными приводами контакторов / **В. Н. Петров**, Ю. М. Зайцев, Р. В. Григорьев, С. В. Григорьев // Студент – Наука – Развитие: сб. тр. Всерос. 50-й науч. студ. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2016. – С. 16–17 (0,0937 п.л./0,023 п.л.).

23. **Петров, В. Н.** Организация питания в схемах широтно-импульсного управления электромагнитными приводами коммутационных аппаратов / **В. Н. Петров**, А. Ю. Гаврилов, Ю. М. Зайцев, Г. П. Свинцов // Человек. Гражданин. Ученый: сб. тр. Регион. Фестиваля студ. и молодежи (Чуваш. гос. ун-т им. И.Н. Ульянова, 21–26 ноября 2016 г.). – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2017. – С. 109–110 (0,0625 п.л./0,0156 п.л.).

Петров Виктор Николаевич

**УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫЕ МЕТОДИКИ
ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СИНТЕЗА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ
ПРИВОДОВ ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ
АППАРАТОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ**

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 22.07.2021 г. Формат 60×84/16.

Бумага офсетная. Печать оперативная.

Печ. л. 1,25. Тираж 100 экз. Заказ № 816.

Отпечатано с готового оригинал-макета
в типографии ФГБОУ ВО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова»
428015, г. Чебоксары, Московский просп., 15