

На правах рукописи



Квашнин Андрей Олегович

**Моделирование и разработка системы дугогашения
низковольтного автоматического выключателя**

Специальность 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2020

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт – Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Фролов Владимир Яковлевич

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой
электроэнергетики и автомобильного
транспорта автономной некоммерческой
организации высшего образования
«Северо-Западный открытый
технический университет», г. Санкт-
Петербург

Беляев Владимир Львович

кандидат физико-математических наук,
доцент, доцент кафедры радиофизики
федерального государственного
бюджетного образовательного
учреждения высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный
университет», г. Санкт-Петербург

Павлейно Михаил Анатольевич

Ведущая организация: Федеральное государственное унитарное предприятие «Крыловский государственный научный центр», г. Санкт-Петербург

Защита состоится «17» декабря 2020 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета У.05.09.01 федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, главный учебный корпус, аудитория 150).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте www.spbstu.ru федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Автореферат разослан «___» _____ 2020 г.

Ученый секретарь

Диссертационного совета У.05.09.01
кандидат технических наук, доцент



Иванов Дмитрий Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. В последние десятилетия электроэнергия стала необходимой для развития и благосостояния индустриальных обществ, а взаимосвязь инноваций в области электроэнергетики и экономического развития государства является общепризнанным фактом.

В наши дни электропотребление продолжает стремительный рост, в сложившейся ситуации возрастает ответственность энергосистемы по бесперебойной поставке и эффективному использованию электроэнергии. Таким образом, обслуживание и оптимизация всех её компонентов является важнейшей задачей. Одним из наиболее важных электротехнических устройств, определяющим устойчивую и безопасную работу энергосистемы, является коммутационный аппарат.

Первоначальный анализ безопасной работы энергосистемы приводит к выделению двух основных типов защитных устройств: автоматических выключателей и предохранителей. Автоматический выключатель может быть определен как электротехническое устройство, предназначенное для оперативных и защитных коммутаций электрической цепи. Защитные функции автоматического выключателя направлены на безопасность людей, а также на предотвращение повреждения электрической цепи от токов перегрузки или короткого замыкания. Автоматический выключатель также можно использовать для изменения конфигурации сети, удовлетворяя потребности в оптимизации или реконфигурации. Все автоматические выключатели имеют общие особенности, касающиеся описания режимов работы, хотя некоторые детали существенно варьируются в зависимости от диапазона напряжения или тока.

В последние годы анализ коммутационных процессов в автоматическом выключателе вызывает все больший интерес в исследовательском сообществе из-за потребности в повышении их коммутационной способности. В тоже время модернизация автоматических выключателей не может быть решена только экспериментальными исследованиями. В связи с чем, разработка математической модели переходных процессов в дугогасительной камере выключателя, отражающей основные закономерности горения и гашения электрической дуги, приобретает главенствующее значение. Тем не менее, в опубликованных научных работах отмечается недостаточная разработанность адаптивных расчетных моделей горения и гашения электрической дуги в автоматических выключателях.

В связи с вышесказанным и важностью низковольтных автоматических выключателей в энергосистеме вопрос о методике проектирования контактных, токоведущих систем, а также системы дугогашения является одним из наиболее актуальных вопросов в области разработки электротехнических устройств.

Описание переходных процессов может быть получено с помощью инструментов моделирования и экспериментальных исследований. Преимущество численного моделирования заключается в том, что оно позволяет получить эволюцию физических величин, которую было бы трудно измерить при лабораторных испытаниях. Таким образом, нестационарная математическая модель работы автоматического выключателя, описывающая физические явления в системе дугогашения, будет способствовать повышению эффективности проектирования низковольтных автоматических выключателей.

Объектом исследования является система дугогашения низковольтного автоматического выключателя.

Предметом исследования являются тепловые процессы при длительном протекании тока через контактную систему низковольтного автоматического выключателя и переходные процессы гашения электрической дуги в дугогасительной системе низковольтного автоматического выключателя.

Цель диссертационной работы заключается в повышении эффективности проектирования дугогасительной системы низковольтного автоматического выключателя путем разработки методики расчета перемещения и гашения электрической дуги в системе с электромагнитным дутьем с учетом конфигурации контактной системы и дугогасительной решетки.

Задачи исследований

1. Выполнить анализ состояния современных теории и практики в области проектирования системы дугогашения низковольтного автоматического выключателя.
2. Разработать математическую модель теплового состояния контактной и токоведущей систем автоматического выключателя и выполнить ее верификацию.

3. Разработать нестационарную математическую модель перемещения и гашения электрической дуги в процессе работы автоматического выключателя и выполнить ее верификацию.
4. Выполнить экспериментальные исследования теплового состояния контактной и токоведущей систем автоматического выключателя.
5. Разработать методику проведения и провести экспериментальные исследования коммутационной способности низковольтного автоматического выключателя.

Научная новизна

1. Разработана математическая модель теплового состояния контактной и токоведущей систем автоматического выключателя. Применение данной математической модели позволяет получить распределение температуры в элементах конструкции автоматического выключателя с абсолютной погрешностью, не превышающей 4°C в динамическом и 1°C в установившемся режимах.
2. Разработана нестационарная математическая модель с движущейся расчетной сеткой процесса коммутации низковольтного автоматического выключателя.
3. Разработана адаптивная модель, позволяющая выполнить анализ физических процессов в дугогасительной системе низковольтного автоматического выключателя и оценить влияние конструктивных элементов и свойств материалов на процесс дугогашения.

Теоретическая значимость работы заключается в разработке:

- методики численного анализа теплового состояния контактной токоведущей системы низковольтного автоматического выключателя;
- рекомендаций по проектированию контактной системы низковольтного автоматического выключателя с целью повышения эксплуатационного ресурса;
- методики анализа системы дугогашения автоматического выключателя на основе результатов численного моделирования;
- рекомендаций по проектированию Системы дугогашения автоматического выключателя.

Методы исследования. Теоретические исследования основаны на разработке как стационарных (установившийся режим), так и нестационарных математических моделей работы автоматического выключателя низкого напряжения с применением численных методов моделирования в обеспечении Comsol Multiphysics. Лицензированное

программное обеспечение Comsol Multiphysics основано на использовании метода конечных элементов. Экспериментальные исследования базируются на изучении теплового состояния контактной и токоведущей систем на основе применения методов нестационарной прикладной теплотметрии, а также коммутационной способности низковольтного автоматического выключателя с использованием высокоскоростной съемки и синхронной системы регистрации электрических параметров. Верификация результатов численного моделирования осуществлена на основе полученных экспериментальных данных.

Обоснованность и достоверность научных положений, изложенных в диссертации, основана на применении фундаментальных законов физики и общеизвестных положений МГД и термодинамики. Расчет работы автоматического выключателя низкого напряжения основан на применении методов численного моделирования в программном продукте Comsol Multiphysics для моделирования физических процессов и верификации результатов моделирования с использованием экспериментальных данных.

Практическая значимость работы заключается в применении результатов диссертационного исследования при проектировании новых и модернизации существующих конструкций низковольтных автоматических выключателей.

Положения, выносимые на защиту:

1. Математическая модель теплового состояния контактной и токоведущей систем автоматического выключателя.
2. Нестационарная математическая модель с двигающейся расчетной сеткой процесса коммутации низковольтного автоматического выключателя.
3. Методика выполнения экспериментальных исследований теплового состояния контактной и токоведущей систем автоматического выключателя.
4. Методика выполнения экспериментальных исследований коммутационной способности низковольтного автоматического выключателя.

Апробация работы. Основные результаты работы доложены на следующих научных конференциях:

1. XXII Международная конференция «Physics of Switching Arcs» (Чехия, Нове-Место-на-Мораве, 2017).

2. Международная конференция «2018 IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference» (Россия, Санкт-Петербург, 2018).
3. XXIII Международная конференция «Physics of Switching Arcs» (Чехия, Нове-Место-на-Мораве, 2019).

Личный вклад. На всех этапах работы автор непосредственно принимал участие в постановке задачи и методах исследования, разработке математических моделей работы автоматического выключателя низкого напряжения, разработке методик экспериментальных исследований, проектировании и изготовлении опытного образца и методов диагностики, монтаже экспериментального оборудования, обработке результатов численного моделирования и экспериментальных исследований работы автоматического выключателя.

Структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 71 наименование и двух приложений. Полный объем диссертации – 106 страниц, в том числе рисунков – 71, таблиц – 8.

Публикации. Основные теоретические и практические результаты диссертации опубликованы в 4 печатных работах, включенных в Перечень ВАК.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлены актуальность выбранной темы, краткое состояние проблем проектирования низковольтных автоматических выключателей, отмечена недостаточная разработанность адаптивных расчетных моделей горения дуги в автоматических выключателях, сформулированы цели и задачи работы, отмечены научная новизна и практическая значимость.

Первая глава посвящена обзору современного состояния исследований в области проектирования и численного моделирования низковольтных автоматических выключателей. На данный момент модели, представленные лабораторией электрической изоляции и электротехники Сианьского Транспортного университета, наиболее близко описывают работу автоматического выключателя. Кроме того, публикационная активность сотрудников данной лаборатории является самой высокой (см. рис. 1), даже в сравнении с промышленными гигантами индустрии по производству

автоматических выключателей (данные актуальны на 8.11.2019г. в соответствии с базой SCOPUS).

Лидирующую позицию в направлении развития воздушных автоматических выключателей в энергетическом оборудовании занимают компании: Schneider Electric, Siemens, ABB, о чем также свидетельствует анализ публикационной активности в период с 1974г. по 2019г.

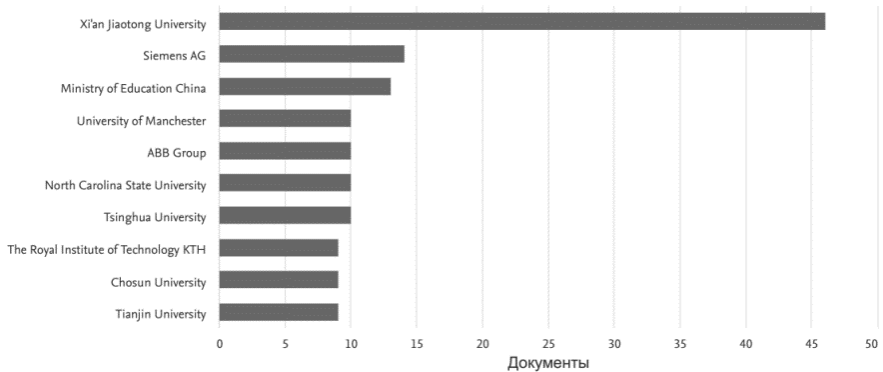


Рисунок 1 - Публикационная активность в области проектирования автоматических выключателей в период 2014-2019гг.

В первой главе представлены патентные исследования элементов дугогасительной системы, а именно: контактной части (подвижные контакты, неподвижные контакты, токоподводы) и дугогасительной камеры (дугогасительная решетка, пламягасительная часть) низковольтных автоматических выключателей. В соответствии с результатами патентного исследования наиболее близким по технической сущности к предлагаемому решению в диссертации является дугогасительное устройство низковольтного автоматического выключателя с параллельными контактами Патент Европейский EP0957500A1, 29.04.1999 Schneider Electric – низковольтный автоматический выключатель с параллельными контактами, содержащее вспомогательные ферромагнитные пластины, закрепленные с двух сторон дугогасительной решетки.

На основании критического анализа в области проектирования и численного моделирования низковольтных автоматических выключателей, патентных исследований и тенденций развития выявлены основные направления разработки и определения характеристик объекта исследования как в целом, так и его отдельных составных частей.

В связи с вышеизложенным, были сформулированы цель и задачи исследования.

Во второй главе представлены математические модели теплообменных процессов контактной системы автоматического выключателя и дугогасительной системы автоматического выключателя. На основании разработанных моделей выполнено численное моделирование в программном продукте Comsol Multiphysics.

Анализ теплообменных процессов контактной системы автоматического выключателя выполняется на основе разработанных математических моделей (результатов численного моделирования) и экспериментальных исследований.

При разработке математической модели теплообменных процессов контактной системы автоматического выключателя использовалась геометрия существующих коммутирующих контактов главной цепи низковольтного автоматического выключателя серии «Патриот» производства АО «Новая ЭРА» (см. рисунок 2).

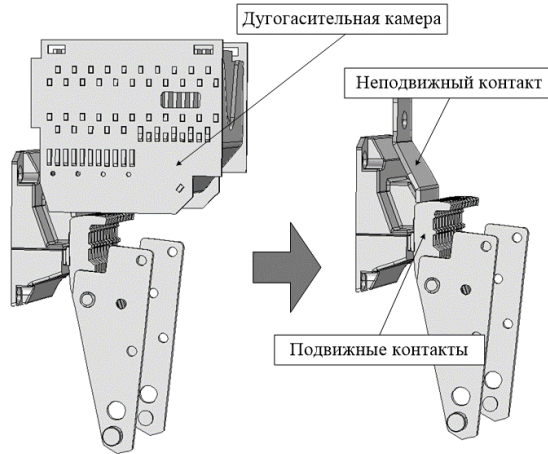


Рисунок 2 - Геометрия коммутирующих контактов главной цепи низковольтного автоматического выключателя серии «Патриот» производства АО «Новая ЭРА»

Для расчета тепловой и электрической проводимости контактной системы низковольтного автоматического выключателя (модель пластической деформации) выбрана корреляция Купера-Микича-Йовановича, которая описывается следующими уравнениями:

$$h_c = 1.25 \sigma_{contact} \frac{m_{asp}}{\sigma_{asp}} \left(\frac{p}{H_c} \right)^{0.95}, \quad (1)$$

$$\sigma_{contact} = \frac{2\sigma_u\sigma_d}{\sigma_u + \sigma_d}, \quad (2)$$

где h_c – коэффициент теплопередачи контактной пары, m_{asp} – шероховатость поверхности (ГОСТ 3884-77); σ_{asp} – шероховатость поверхности, усредненная по высоте (ГОСТ 3884-77); p – контактное давление; H_c – микротвердость; σ_u , σ_d – электропроводности контактных материалов.

Композитный материал КМК-А40 используется в качестве материала контактной площадки (накладки на токоведущих контактах). Этот композитный материал изготовлен в соответствии с техническими условиями ТУ 16-685.020-85.

На основании представленной в диссертации методики расчета свойств композиционного материала получены температурные зависимости свойств КМК-А40 (см. рис. 3).

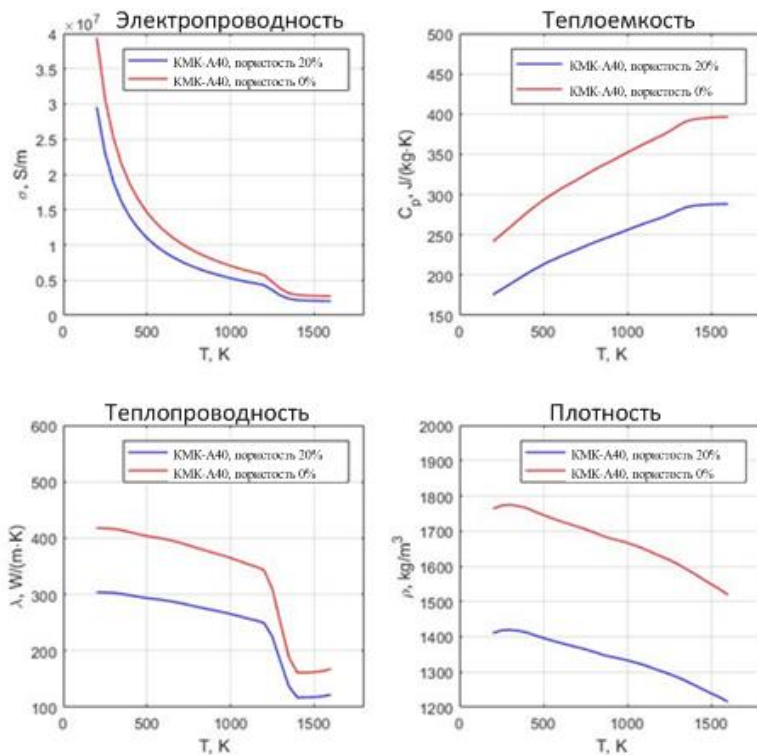


Рисунок 3 - Температурные зависимости свойств КМК-А40

При построении математической модели в программном продукте Comsol Multiphysics для численного моделирования теплообменных процессов контактной системы автоматического выключателя использованы модули «AC/DC» и «Heat Transfer in Solids».

Основные уравнения, описывающую электрическую часть задачи (модуль «AC/DC»):

$$\begin{cases} \nabla \cdot J = Q_j \\ J = \left(\sigma + \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{\partial}{\partial t} \right) E + J_e \\ E = -\nabla V \end{cases} \quad (3)$$

Основное уравнение, описывающую тепловую часть задачи (модуль «Heat Transfer in Solids»):

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-\lambda \nabla T) = Q \quad (4)$$

Конвективное теплоотведение с поверхности описывается с помощью уравнения:

$$q_0 = h(T_{ext} - T) \quad (5)$$

В уравнении (5) переменная h – коэффициент теплопередачи, численное значение коэффициента зависит от свойств и параметров конвективного потока. В соответствии с экспериментальными данными при верификации математической модели было определено значение коэффициента теплопередачи, которое составило 6 Вт/(м²·К).

Результаты численного моделирования тепловых процессов для установившегося режима при протекающем токе в 1 кА представлены на рисунке 4.

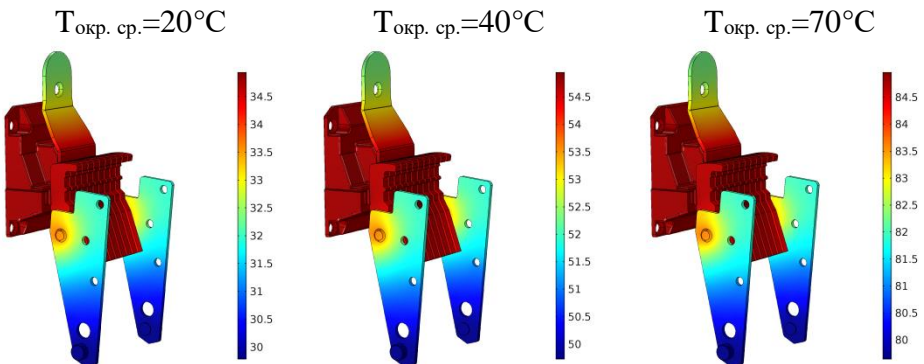


Рисунок 4 – Результаты параметрического численного исследования при токе в 1 кА и различной температуре окружающей среды

Численное моделирование плазменных процессов нуждается в решении мультифизической задачи, включающей в себя гидродинамику, теплопередачу и электромагнетизм. Соответствующие уравнения связаны термодинамическими и транспортными свойствами в неявном виде, а также в явном виде через джоулев нагрев в случае уравнения баланса энергии и системы уравнений Максвелла.

Распределение скорости может быть получено из решения уравнения движения для ламинарного потока (уравнение Навье-Стокса):

$$\rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \rho (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} = \vec{F} + \nabla \cdot \left[-pI + \mu (\nabla \vec{v} + (\nabla \vec{v})^T) \right], \quad (6)$$

Уравнение движения дополняется уравнением неразрывности (7), образуя разрешенную систему дифференциальных уравнений.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (7)$$

Уравнение теплового баланса является одним из основных уравнений при теоретическом описании и численном моделировании математической модели теплообменных процессов в плазме и при нестационарном случае имеет следующий вид:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \vec{v} \cdot \nabla T - \nabla \cdot (\lambda \nabla T) = Q_s - Q_{rad}, \quad (8)$$

Расчет электромагнитного поля осуществляется с использованием системы уравнений Максвелла:

$$\begin{cases} \nabla \vec{D} = \rho \\ \nabla \vec{B} = 0 \\ \nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \vec{B} = \mu_0 \left(\vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) \end{cases} \quad (9)$$

Функция источника $Q_s(t)$ (в данном случае важно отметить динамическую зависимость выделяемой энергии от времени) определяет удельную мощность джоулевого нагрева, согласно выражению (10).

$$Q_s(t) = \sigma(t, T) E(t)^2 \quad (10)$$

Реализация движения подвижного контакта в процессе дугогашения основана на применении метода сглаживания Лапласа, а поворот контакта

задается относительно недеформированных координат X_g и Y_g с использованием следующих уравнений:

$$X_r = (X_g - X_0) \cos(2\pi ft) - (Y_g - Y_0) \sin(2\pi ft) + X_0, \quad (11)$$

$$Y_r = (X_g - X_0) \sin(2\pi ft) - (Y_g - Y_0) \cos(2\pi ft) + Y_0, \quad (12)$$

Одним из основных результатов моделирования является распределение температуры внутри дугогасительной камеры низковольтного автоматического выключателя.

Распределение температуры для действующего значения тока короткого замыкания $I_{k3}=19$ кА в различные моменты времени показаны на рисунках 5-6.

На рисунке 5 показано начальное распределение температуры в момент времени $t=0$ с, на котором виден инициированный токопроводящий канал между дугогасительными контактами автоматического выключателя.

Time=0 s

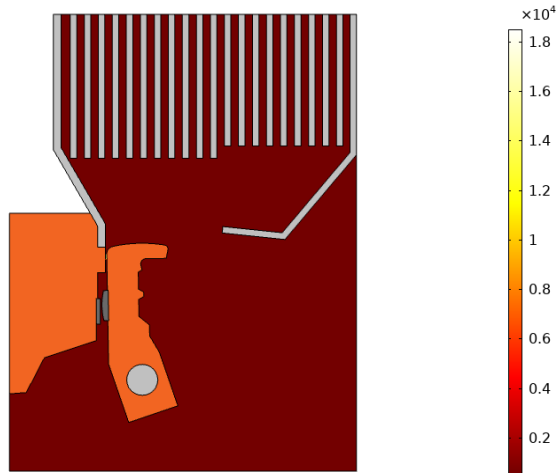
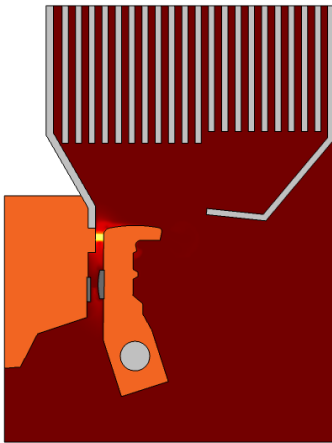


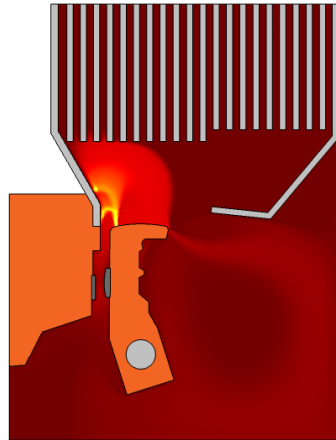
Рисунок 5 - Исходное распределение температуры, Т [K]

Визуально различимое движение электрической дуги в направлении дугогасительной решетки начинается спустя 1,5 мс с момента начала разведения дугогасительных контактов (см. рисунок 6). В момент времени 1,8 мс при значительном удлинении электрической дуги наблюдается формирование новой точки привязки на поверхности контакта дугогасительной решетки, происходит перераспределение плотности тока (см. рис. 7), приводящее к шунтированию электрической дуги и уменьшению падения напряжения на дуге. В момент времени 2 мс с момента

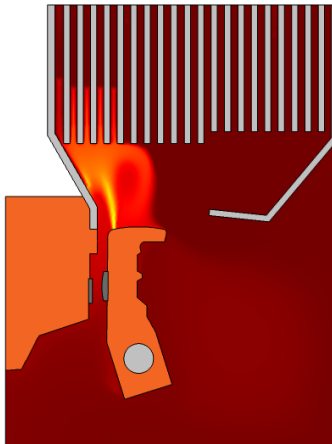
начала разведения контактов наблюдается гашение дуги, о чем свидетельствует распределение температуры.



$t=1,5 \text{ мс}$



$t=1,8408 \text{ мс}$



$t=2,0 \text{ мс}$

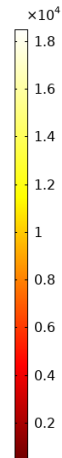


Рисунок 6 - Распределение температуры в различные моменты времени t , T [K]

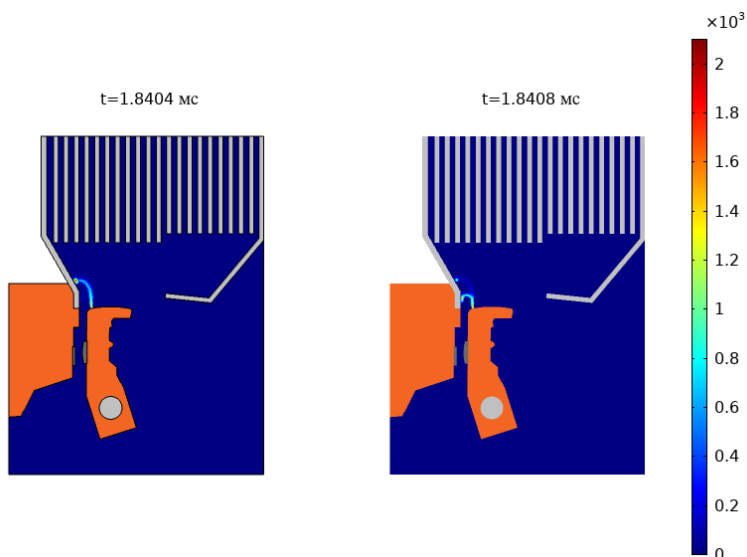


Рисунок 7 - Распределение плотности тока ($\text{A}/\text{мм}^2$) в различные моменты времени

Разработанная математическая модель позволяет варьировать значение тока короткого замыкания, момент коммутации и геометрию дугогасительной решетки, для анализа влияния дугогасительной решетки на электродинамические усилия, действующие на электрическую дугу.

Анализ результатов моделирования показал, что критическое значение плотности тока, не позволяющее в объеме выделить достаточно тепловой энергии для поддержания процесса горения дуги, составляет $2 \text{ кА}/\text{мм}^2$.

В третьей главе приведены методики проведения экспериментальных исследований, целью которых является верификация разработанных математических моделей.

В качестве объекта для проведения экспериментальных исследований был взят низковольтный автоматический выключатель серии «Патриот» производства АО «Новая ЭРА».

Экспериментальные исследования по нагреву контактной системы автоматического выключателя выполнены в соответствии с ГОСТ 2933-83. Результатом испытаний являются графики зависимостей температуры от времени при 20°C (см. рис. 8) и повышенной температуре окружающей среды (см. рис. 9).

Измерение тока при испытаниях на нагревание проводилось с использованием вольтамперметра М2044. Регистрация изменения температуры осуществлялась с помощью прибора для измерения температуры «Термодат-25М5» с комплектом термопар.

Результаты измерений при температуре окружающей среды 20°C в контрольных точках показывают, что максимальное установившееся значение температуры на шинах полюсов выключателя ($t1-t4$) составило 34°C ; максимальное установившееся значение температуры на кнопке управления лицевой панели выключателя ($t5$) составило 22°C . Для верхних и нижних полюсов выключателя перегрев относительно окружающей среды составил 12°C , что не превышает допустимых значений.

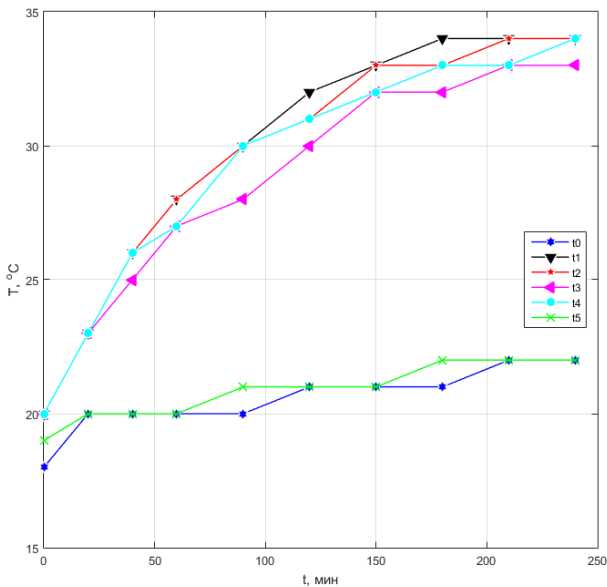


Рисунок 8 - Результаты измерения температуры (Токр. ср.= 20°C)

Результаты измерений при повышенной температуре окружающей среды в контрольных точках показывают, что максимальное установившееся значение температуры на шинах верхних полюсов выключателя ($t1$ и $t3$) составило 76°C ; максимальное установившееся значение температуры на шинах нижних полюсов выключателя ($t2$ и $t4$) составило 64°C . Для верхних и нижних полюсов выключателя перегрев относительно окружающей среды составил 6°C , что не превышает допустимых значений. Максимальное установившееся значение температуры кнопки управления лицевой панели

выключателя соответствует максимальному установившемуся значению температуры окружающей среды.

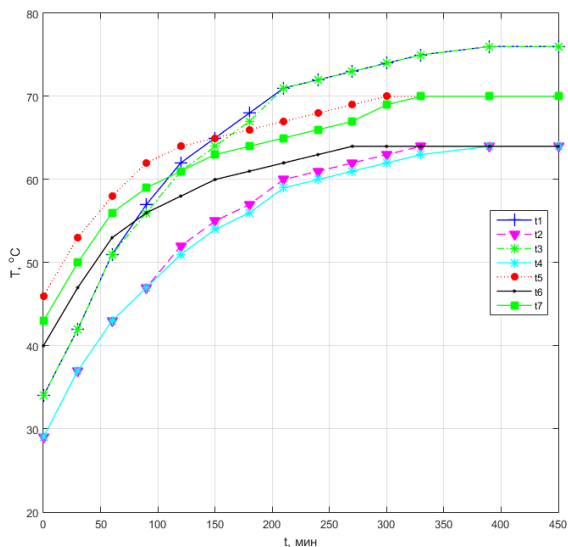


Рисунок 9 - Результаты измерения температуры (при повышенной температуре окружающей среды)

Экспериментальные исследования отключающей способности низковольтного автоматического выключателя были выполнены на установке Брненского технического университета (г. Брно, Чехия). Для верификации математической модели разработана методика экспериментальных исследований, включающая в себя исследования с тремя типами дугогасительной решетки (см. рис. 10) и различных значений токов короткого замыкания.

Принципиальная электрическая схема для исследования отключающей способности автоматического выключателя представлена на рисунке 11. Измерение электрических параметров (временных зависимостей тока и напряжения) автоматического выключателя синхронизировано с высокоскоростной съемкой. Измерение тока осуществлялось с использованием пояса Роговского. Подключение автоматического выключателя осуществлялось на испытательном стенде (см. рис. 11) между фазным и нейтральным проводами для реализации однофазного короткого замыкания. Активация автоматического выключателя реализована с применением пневмопривода. Управление пневмоприводом синхронизировано с сетью для возможности коммутации в различные

моменты времени относительно начала периода синусоидального напряжения. Блоки переменных индуктивностей и резисторов позволяют регулировать коэффициент мощности и величину коммутируемого тока. Прототип низковольтного автоматического выключателя разработан со специализированными смотровыми окнами для высокоскоростной съемки. Испытания проводились при температуре окружающей среды $23,5^{\circ}\text{C}$ и относительной влажности 30%.

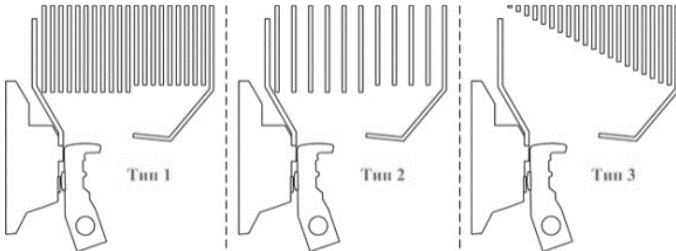


Рисунок 10 - Конструкции исследуемых дугогасительных решеток

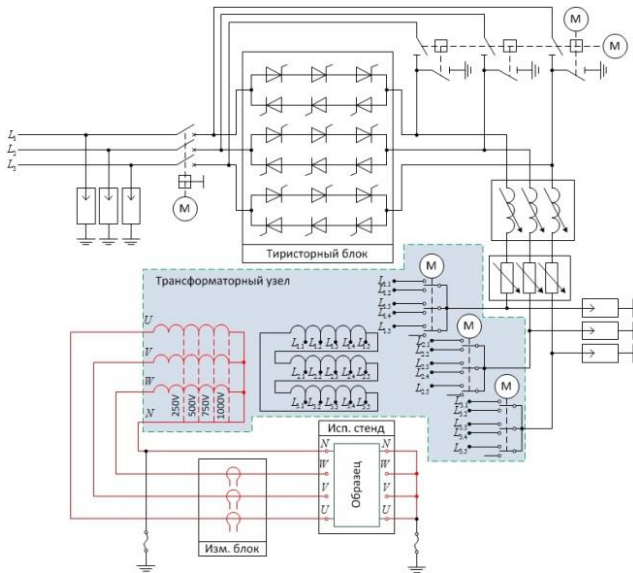


Рисунок 11 – Электрическая схема испытательного стенда

Осциллограммы тока и напряжения для различных типов дугогасительной решетки при токе короткого замыкания 10 кА и моменте коммутации ≈ 5 мс показаны на рисунках 12-14.

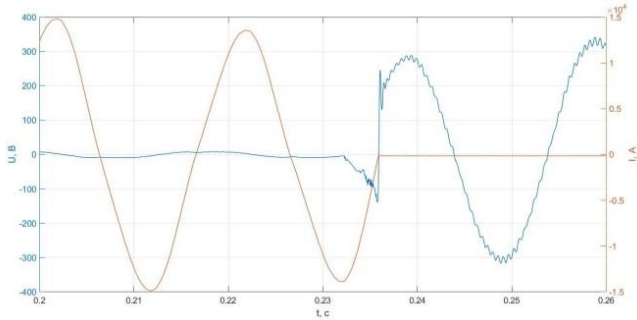


Рисунок 12- Осциллограммы тока и напряжения (для дугогасительной решетки первого типа)

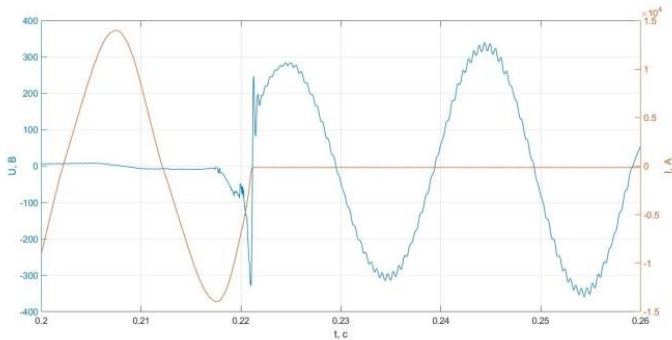


Рисунок 13 - Осциллограммы тока и напряжения (для дугогасительной решетки второго типа)

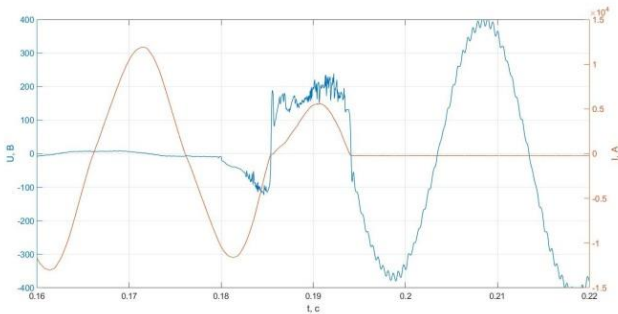


Рисунок 14 - Осциллограммы тока и напряжения (для дугогасительной решетки третьего типа)

В результате экспериментальных исследований установлено, что третий тип дугогасительной решетки не осуществляет дугогашение при токах короткого замыкания от 10 кА и выше. При малых значениях тока короткого

замыкания (до 19 кА) процесс дугогашения более эффективно происходил при использовании второго типа дугогасительной решетки, значение выделяемой тепловой мощности при дугогашении в случае второго типа дугогасительной решетки значительно меньше, чем первого типа. С уменьшением значения коэффициента мощности значительно снижается отключающая способность автоматического выключателя. С увеличением времени задержки коммутации отключающая способность автоматического выключателя снижается, при коммутации автоматического выключателя во второй половине полупериода синусоидального тока короткого замыкания гашение в первом нуле тока не происходило. При модернизации дугогасительной решетки путем приложения потенциала на крайнюю пластину решетки в области подвижного контакта наблюдается повышение отключающей способности автоматического выключателя.

В четвертой главе представлен сравнительный анализ результатов численного моделирования и экспериментального исследования низковольтного автоматического выключателя.

Верификация теплообменных процессов контактной системы автоматического выключателя осуществляется по сопоставлению с результатами экспериментальных исследований, выполненных при схожих с моделируемыми режимах. На рисунке 15 приведены графики зависимостей максимальной температуры в соответствии с результатами численного моделирования и экспериментальных данных в зависимости от времени.

Из результатов сравнительного анализа видно, что абсолютная погрешность не превышает 4°C , а в установившемся режиме не превышает 1°C , с учетом упрощений математической модели и принятых допущений результаты моделирования в достаточной мере согласуются с результатами экспериментального исследования. Полученные результаты позволяют верифицировать математическую модель контактной системы автоматического выключателя.

Анализ результатов численного моделирования теплообменных процессов при повышенной температуре окружающей среды и данных экспериментального исследования показал незначительное расхождение в значениях максимальной температуры. Разница между результатами моделирования и экспериментального исследования обусловлена допущением о постоянном значении коэффициента теплопередачи. Для адаптации математической модели и уменьшения ошибки при моделировании необходимо использовать динамический коэффициент теплопередачи, изменяющийся при изменении градиента температуры.

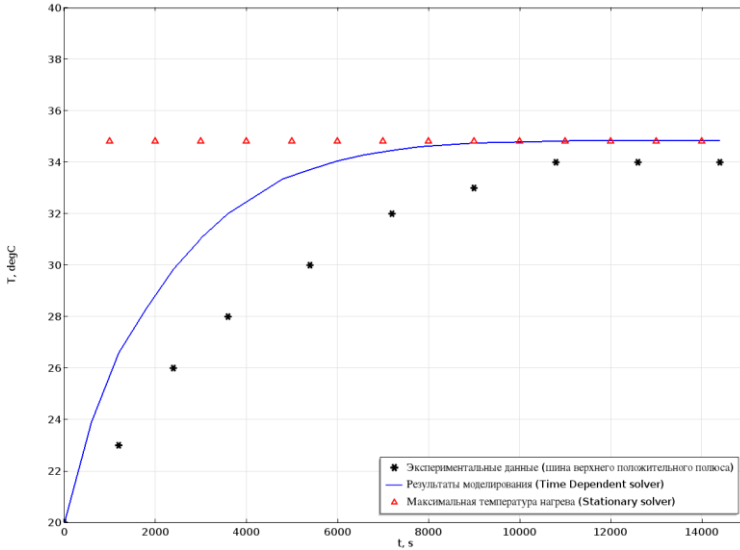


Рисунок 15 - Графики зависимости температуры от времени при температуре окружающей среды 20°C

В качестве исходных данных для построения и верификации математической модели перемещения и гашения дуги принимается временная зависимость тока и время разведения контактов, полученные из экспериментальных данных. Для моделирования использована временная зависимость тока опыта №23, приведенная в диссертационном исследовании ($I_{кз} = 19$ кА, 1 тип дугогасительной решетки). Время разведения контактов, установленное камерой высокоскоростной съемки, составляет 20 мс.

На рисунке 17 представлен результат верификации разработанной математической модели путем наложения осциллограмм напряжения, полученных расчетным и экспериментальным методами. Кривая напряжения красного цвета получена экспериментально, кривая напряжения синего цвета получена в результате численного моделирования процесса коммутации в разработанной нестационарной математической модели с подвижной расчетной сеткой. Результаты моделирования практически идентичны экспериментальным данным в том числе на участке шунтирования дуги, сопровождающегося падением напряжения, что подтверждает адекватность разработанной модели.

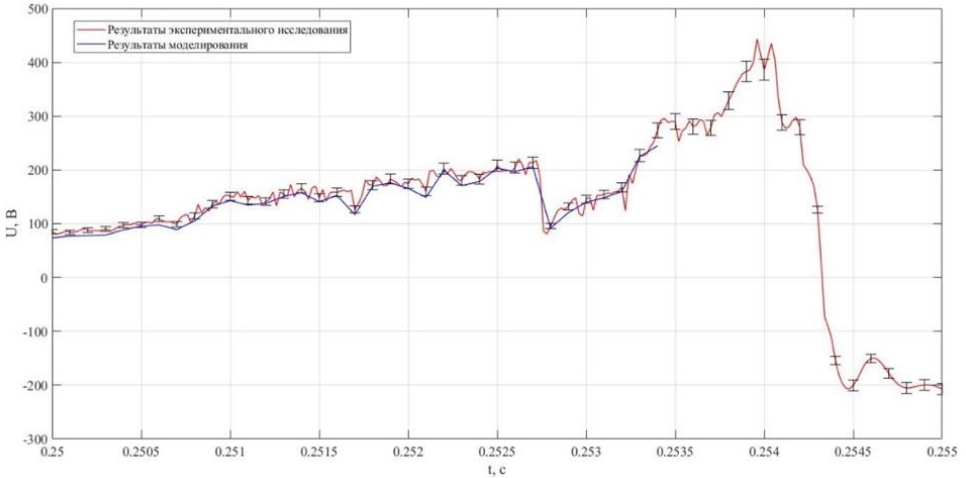


Рисунок 17– Верификация результатов численного моделирования

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выполнен анализ состояния современных теории и практики в области проектирования системы дугогашения низковольтного автоматического выключателя. При анализе привлекалась информация об изобретениях, раскрытая в охранных документах. Основным трендом технического развития в области проектирования низковольтных автоматических выключателей является численное моделирование. Ключевыми недостатками существующих моделей являются отсутствие учета влияния дугогасительной решетки, отведения тепла за счет теплопроводности окружающих материалов и статичное положение контактов (оказывает существенное влияние на динамические характеристики электрической дуги).

2. Разработана математическая модель теплового состояния контактной и токоведущей систем автоматического выключателя. Математическая модель включает корреляцию Купера-Микича-Йовановича. Представлена методика расчета свойств металлокерамического материала КМК-А40. На основе разработанной математической модели теплообменных процессов контактной системы электрического аппарата выполнено численное параметрическое исследование, позволяющее идентифицировать максимальную установившуюся температуру при различных условиях и режимах работы низковольтного автоматического выключателя.

3. Разработана нестационарная математическая модель (с подвижной сеткой) перемещения и гашения электрической дуги в процессе работы автоматического выключателя. Модель учитывает влияние испарения на охлаждение и ферромагнитные свойств дугогасительной решетки.

4. Выполнены экспериментальные исследования теплового состояния контактной и токоведущей систем автоматического выключателя. Результатом испытаний являются графики зависимостей температуры от времени при 20°C и повышенной температуре окружающей среды. Данные результаты позволяют верифицировать разработанную математическую модель теплового состояния контактной системы автоматического выключателя.

5. Разработана методика экспериментальных исследований отключающей способности низковольтного автоматического выключателя. Исследование выполнено с использованием методов высокоскоростной съемки. Выполнен анализ влияния конструкции дугогасительной решетки на процесс дугогашения. Также выполнено параметрическое исследование влияния коэффициента мощности, величины коммутируемого тока и момента коммутации на гашение электрической дуги в дугогасительной системе автоматического выключателя. С уменьшением значения коэффициента мощности значительно снижается отключающая способность автоматического выключателя. С увеличением времени задержки коммутации отключающая способность автоматического выключателя снижается, при коммутации автоматического выключателя во второй половине полупериода синусоидального тока короткого замыкания гашение в первом нуле тока не происходило.

6. Выполнена верификация математической модели теплового состояния контактной и токоведущей систем автоматического выключателя. Верификация выполнена на основе результатов экспериментальных данных. Разница между результатами моделирования и экспериментального исследования обусловлена допущением о постоянном значении коэффициента теплопередачи. Абсолютная погрешность не превышает 4°C в динамическом режиме, и 1°C в установившемся режиме.

7. Верификация математической модели дугогасительной системы автоматического выключателя выполнена на основе экспериментальных исследований совместно с Брненским техническим университетом. Результаты моделирования подтверждаются результатами экспериментального исследования. Во время моделирования наблюдается многократное образование новой точки привязки дуги на неподвижном контакте, что соответствует флуктуации напряжения на дуге (из экспериментальных исследований).

8. Результаты диссертационного исследования планируются к внедрению и апробации в рамках опытно-конструкторских работ по созданию низковольтных автоматических выключателей серии «Патриот».

Основные публикации, в которых отражены результаты диссертации

1. Murashov I. Investigation and numerical simulation of a high-current ac circuit breaker / Murashov I., Frolov, V., Kvashnin A., Valenta J., Simek D., Dostal L., Kloc P. // *Plasma Physics and Technology*. - 2017. V. 6(3). - P. 235-238. doi: <https://doi.org/10.14311/ppt.2019.3.235> (рекомендовано ВАК, индексируется в базе SCOPUS)
2. Frolov V.Y. Nonstationary mathematical model of a magnetic arc blast system / Frolov V.Y., Kvashnin A.O., Murashov I.V. // *Proceedings of the 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2018*. - 2018. - P. 622-625. doi: [10.1109/ElConRus.2018.8317173](https://doi.org/10.1109/ElConRus.2018.8317173) (рекомендовано ВАК, индексируется в базе SCOPUS)
3. Murashov I. Analysis of electromagnetic processes inside the arc interrupting system of a high-current circuit breaker / Murashov I., Frolov V., Ivanov D., Kvashnin A. // *22nd Symposium on Physics of Switching Arc*. 2017. P. 161-164. doi: [10.14311/ppt.2017.2.161](https://doi.org/10.14311/ppt.2017.2.161) (рекомендовано ВАК, индексируется в базе SCOPUS)
4. Murashov Iu. Numerical simulation of heat transfer processes of the circuit breaker contact system / Murashov Iu., V. Frolov, A. Kvashnin // *IOP conference series: materials science and engineering*. - 2019. - V. 643. doi: [10.1088/1757-899X/643/1/012116](https://doi.org/10.1088/1757-899X/643/1/012116)