

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

На правах рукописи

Квашнин Андрей Олегович

МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ДУГОГАШЕНИЯ
НИЗКОВОЛЬТНОГО АВТОМАТИЧЕСКОГО ВЫКЛЮЧАТЕЛЯ

Направление 13.06.01 – Электро- и теплотехника

Направленность 13.06.01.01 – Электромеханика и электрические аппараты

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД

об основных результатах подготовленной научно-квалификационной работы
(диссертации)

Санкт-Петербург – 2020

Научно-квалификационная работа выполнена в Высшей школе электроэнергетических систем государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт – Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Директор ВШ:

Зверев Сергей Геннадьевич,
кандидат технических наук, доцент

Научный руководитель:

Фролов Владимир Яковлевич,
доктор технических наук, профессор

Рецензент:

Куклев Юрий Васильевич,
кандидат технических наук, доцент
АНО ВО «СЗТУ»

С научным докладом можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте Электронной библиотеки СПбПУ по адресу: <http://elib.spbstu.ru>.

Общая характеристика работы

Актуальность работы

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.

Цель и задачи исследования

Повышение эффективности проектирования дугогасительной системы низковольтного автоматического выключателя, путем разработки методики расчета перемещения и гашения электрической дуги в системе с электромагнитным дутьем с учетом конфигурации электродов и дугогасительной решетки, а также состава и свойств параметров плазмы электрической дуги.

Задачи исследований:

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

Научная новизна

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.

1. Разработана нестационарная математическая модель с движущейся расчетной сеткой процесса коммутации низковольтного автоматического выключателя. Результаты численного моделирования позволяют выполнить анализ физических процессов в дугогасительной системе 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;

- требований к конструкции контактной системы низковольтного автоматического выключателя с целью повышения эксплуатационного ресурса;
- методики анализа системы дугогашения автоматического выключателя на основе результатов численного моделирования;
- требований к конструкции системы дугогашения автоматического выключателя.

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

Объектом исследования является система дугогашения низковольтного автоматического выключателя.

Апробация работы

Основные результаты работы доложены на следующих научных конференциях:

- XXII Международная конференция «Physics of Switching Arcs» (Чехия, Нове-Место-на-Мораве, 2017).
- Международная конференция «2018 IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference» (Россия, Санкт-Петербург, 2018).
- XXIII Международная конференция «Physics of Switching Arcs» (Чехия, Нове-Место-на-Мораве, 2019).

Основные публикации автора по теме работы

- Murashov I. Investigation and numerical simulation of a high-current ac circuit breaker / Frolov, V., Kvashnin A., Valenta J., Simek D., Dostal L., Клоц Р. // 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)
- Frolov V.Y. Nonstationary mathematical model of a magnetic arc blast system / 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 (рекомендовано ВАК, индексируется в базе SCOPUS)

- Murashov I. Analysis of electromagnetic processes inside the arc interrupting system of a high-current circuit breaker / Frolov V., Ivanov D., Kvashnin A. // 22nd Symposium on Physics of Switching Arc. - 2017. - P. 161-164. doi: 10.14311/ppt.2017.2.161 (рекомендовано ВАК, индексируется в базе SCOPUS)
- Murashov Iu. Numerical simulation of heat transfer processes of the circuit breaker contact system / V. Frolov, A. Kvashnin // IOP conference series: materials science and engineering. - 2019. - V. 643. doi: 10.1088/1757-899X/643/1/012116
- Неёлов А.А. Решение задач координации электрических защит и диагностики состояния изоляции морских объектов при помощи электрооптических кабелей / Тихомиров М.П., Симакова Ю.В., Квашнин А.О. // Морской вестник. 2016. №2(58), С. 63-66 (рекомендовано ВАК)

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.

Представление научного доклада: основные положения

Математическая модель теплового состояния контактной и токоведущей систем автоматического выключателя.

Нестационарная математическая модель с двигающейся расчетной сеткой работы низковольтного автоматического выключателя.

Методика выполнения экспериментальных исследований теплового состояния контактной и токоведущей систем автоматического выключателя.

Методика выполнения экспериментальных исследований коммутационной способности низковольтного автоматического выключателя.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлена актуальность темы исследования, краткое описание проблем при проектировании автоматических выключателей, выявлены недостатки адаптивных расчетных моделей горения дуги в автоматических выключателях, сформулированы задачи и цели работы, отмечены научная новизна и практическая значимость.

Первая глава содержит описание разработки методики расчета теплового состояния токовводов и перемещения электрической дуги в низковольтном автоматическом выключателе.

Развитие современных вычислительных систем и программного обеспечения существенно изменило направление вектора проектирования новых технических решений в промышленности в сторону численного моделирования. В основе применения численного моделирования при проектировании новейших систем лежит снижение временных и денежных затрат, позволяя осуществить переход от эмпирических методов к теоретическим, при этом уменьшая (остается необходимость верификации результатов моделирования) или исключая экспериментальные исследования.

В основе описания физических процессов в электрическом аппарате заложены фундаментальные законы физики, которые представлены в виде дифференциальных уравнений (тем самым являя собой задачу математической физики), решение которых является затруднительны или не представляется вовсе при аналитическом подходе. Решение подобных задач математической физики основано на применении численных методов.

Описание математической модели работы автоматического выключателя низкого напряжения основано на применении фундаментальных физических законов: закон Джоуля-Ленца и Фурье, описывающих физические процессы в виде дифференциальных уравнений в частных производных. Наиболее распространенными являются методы контрольного объема и метод конечных элементов, получивший широкое распространение в современных программных продуктах таких, как ANSYS и Comsol Multiphysics.

При разработке математической модели использовалась геометрия существующих коммутирующих контактов главной цепи (см. рис. 1).

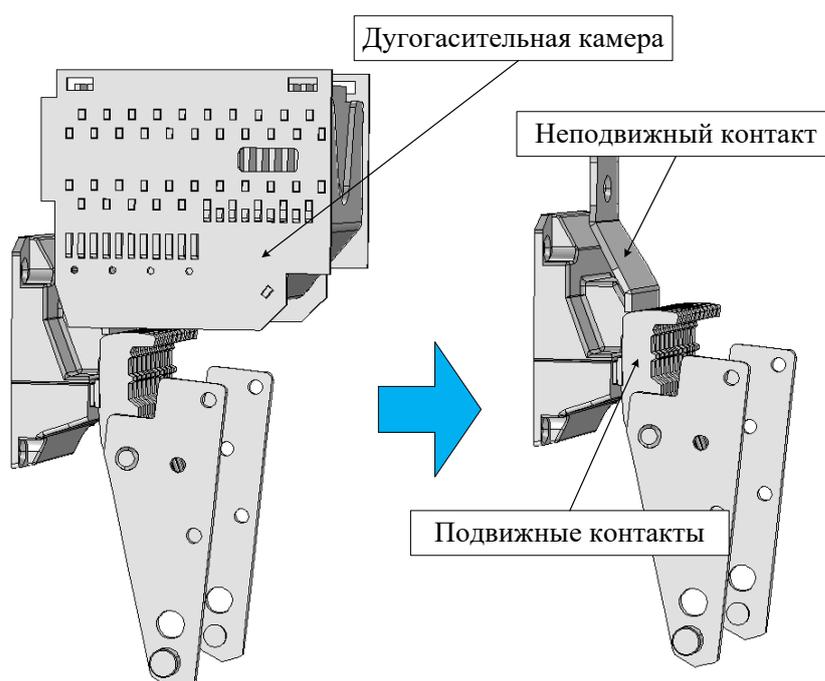


Рисунок 1 – Геометрия коммутирующих контактов главной цепи

Расчет производился с использованием программного обеспечения Comsol Multiphysics.

Площадь полной контактной поверхности подвижного контакта с неподвижным составляет $\approx 300 \text{ мм}^2$ (см. рис. 2).

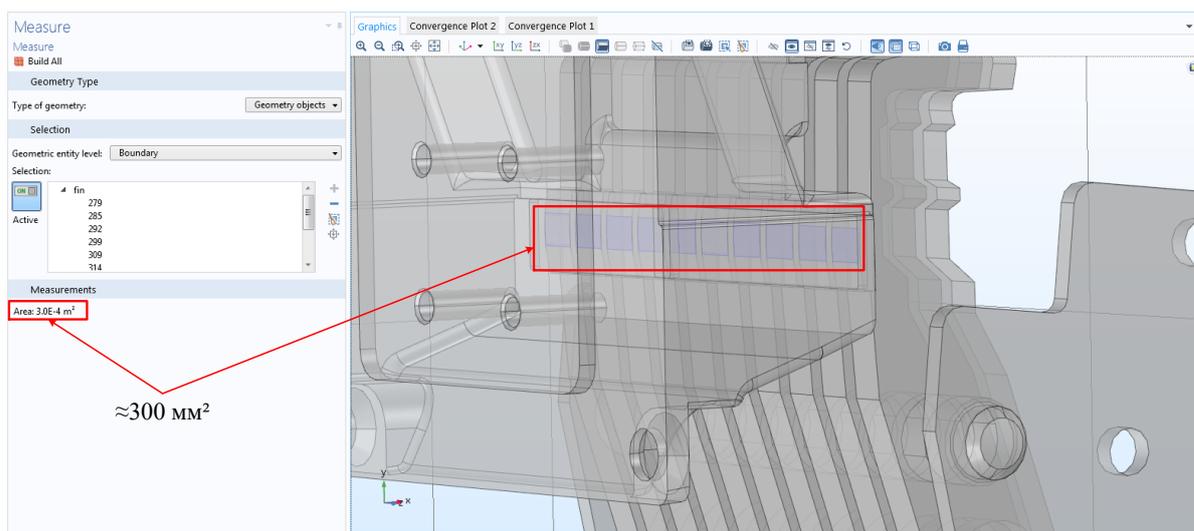


Рисунок 2 – Оценка площади полной контактной поверхности

Существует большое количество моделей, описывающих тепловую и электрическую проводимость контакта. Все эти модели являются эмпирическими и требуют дополнительной проверки. Корреляция Купера-Микича-Йовановича была выбрана для расчета тепловой и электрической проводимости контактной системы низковольтного автоматического выключателя (модель пластической деформации) 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 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.

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

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»):

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

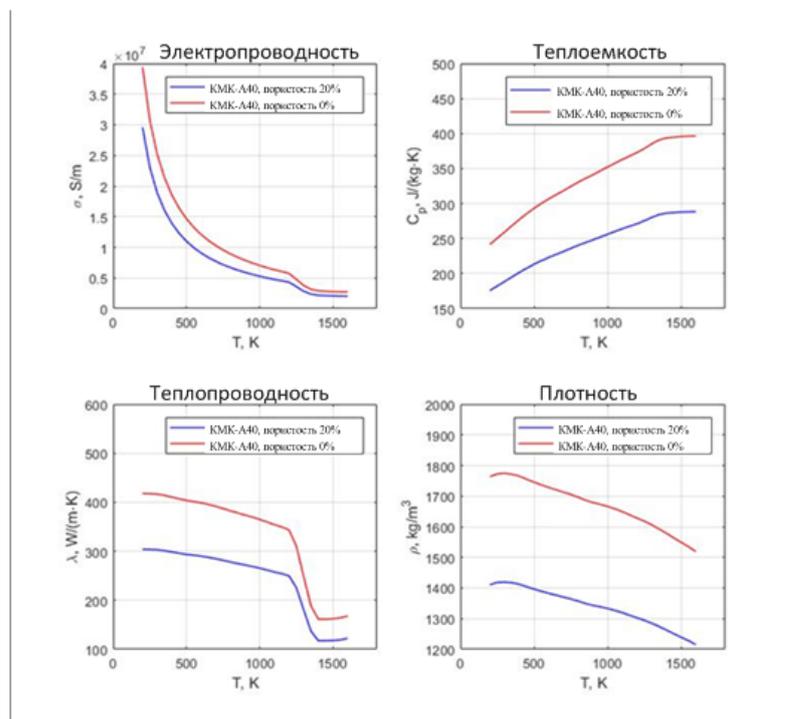


Рисунок 3 - Температурные зависимости свойств КМК-А40

Основные уравнения, 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 моделирования для изменяющейся температуры окружающей среды, полученной из результатов экспериментального исследования и заложенной в математическую модель, представлены на рисунке 4–6.

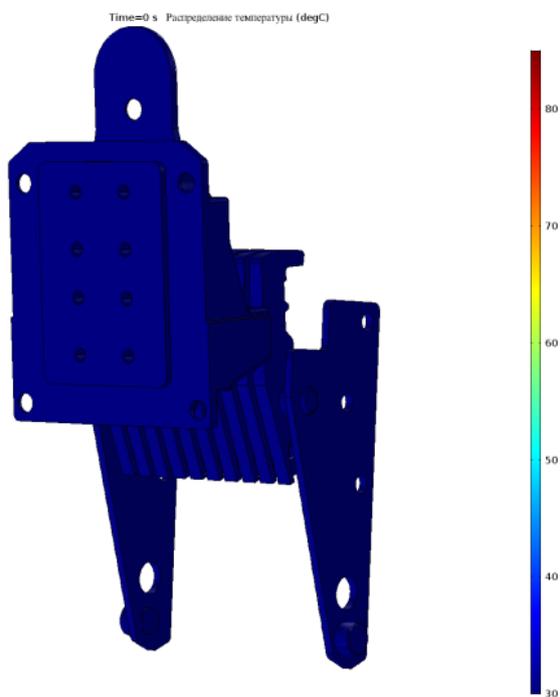


Рисунок 4 - Распределение температуры в момент времени $t = 0$ с при температуре окружающей среды $T=var$

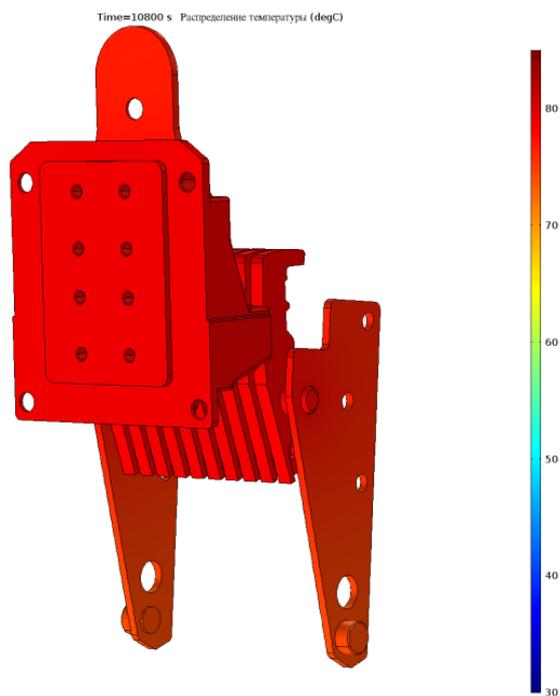


Рисунок 5 - Распределение температуры в момент времени $t = 3$ ч при температуре окружающей среды $T=var$

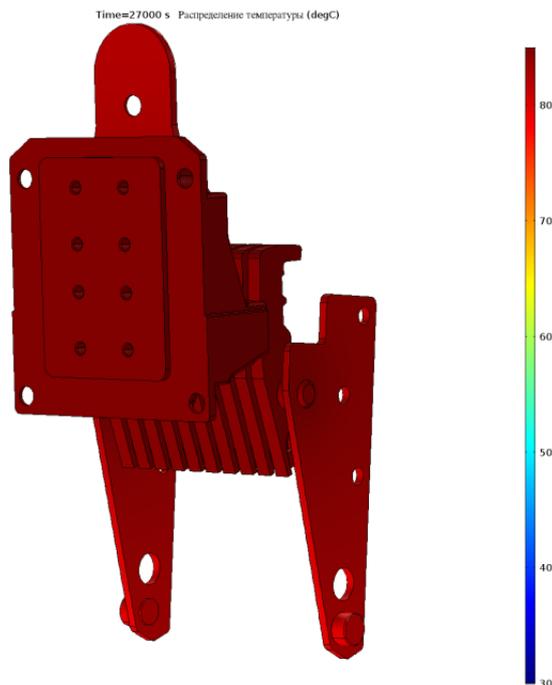


Рисунок 6 - Распределение температуры в момент времени $t = 7$ ч 30 мин при температуре окружающей среды $T=var$

Максимальная температура нагрева по результатам моделирования составляет 85°C .

В качестве исходных данных математической модели дугогасительной системы автоматического выключателя заложены реальная геометрия и функция тока от времени из результатов экспериментальных исследований (возможно задание аналитической функции тока короткого замыкания).

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):

$$\rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \rho(\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{u} + \vec{f}, \quad (6)$$

где I – единичная матрица; F – силы, действующие на поток (сила Лоренца); ρ – плотность потока плазмы, зависящая от температуры; μ – динамическая вязкость потока плазмы, зависящая от температуры; p – давление; u – скорость; t – время.

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

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

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:

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

где T – температура плазмы; ρ – плотность плазмы, зависящая от температуры; C_p – теплоемкость плазмы, зависящая от температуры; u – скорость потока плазмы; λ – теплопроводность плазмы, зависящая от температуры; Q_s – функция источника; Q_{rad} – удельная мощность излучения, зависящая от температуры.

Расчет электромагнитного поля осуществляется с использованием системы уравнений Максвелла:

$$\begin{cases} \nabla \cdot \vec{E} = \rho_{ext} \\ \nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \\ \nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \vec{J}_{ext} \\ \nabla \cdot \vec{B} = 0 \end{cases} \quad (9)$$

где J – плотность тока; σ – электропроводность плазменного потока, зависящая от температуры; J_e – плотность тока извне; E – напряженность электрического поля; A – векторный потенциал магнитного поля; H – напряженность магнитного поля; B – магнитная индукция.

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

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

Разработанная математическая модель также позволяет осуществлять численное моделирование автоматического выключателя переменного тока без учета и с учетом абляции материалов конструкции разработана библиотека материалов пользователя.

За основу алгоритма расчета нестационарной математической модели низковольтного автоматического выключателя выбран отдельный подход. Отдельный подход предъявляет более низкие требования к вычислительным характеристикам ПК по сравнению с взаимосвязанным подходом, кроме того, обеспечивает устойчивую сходимость решения.

Алгоритм отдельного подхода решения дифференциальных уравнений, описывающих нестационарную математическую модель работы автоматического выключателя постоянного тока представлен на рисунке 7.

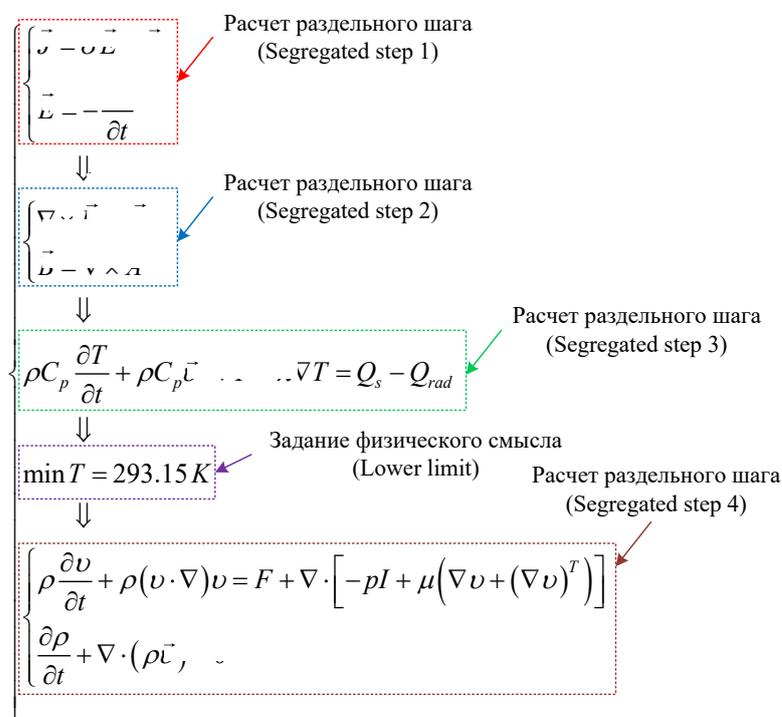


Рисунок 7 – Реализация отдельного подхода на примере дифференциальных уравнений математической модели работы автоматического выключателя

Геометрия расчетной области реализована с возможностью дополнения физических интерфейсов (например, нагрева и эрозии контактной системы) и возможностью изменения положения отдельных компонентов конструкции электрического аппарата в программном обеспечении COMSOL Multiphysics.

Деформация расчетной области подвижного контакта задается относительно недеформированных координат X_g и Y_g с использованием следующих уравнений:

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

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

где X_0, Y_0 – исходные координаты; t – время моделирования; f определяется скоростью движения контакта (из данных высокоскоростной съемки).

В модели учтены свойства ферромагнитных материалов, применяемых в конструкции.

Электрическая дуга перемещается под действием электродинамических сил на ферромагнитные пластины, что позволяет снизить эрозию дугогасительных контактов.

Модуль «AC/DC» позволяет учитывать при моделировании все виды типичного поведения магнитных материалов, а также позволяет задавать так называемые внешние материалы (*external material*) при помощи пользовательских настроек. Слабомагнитные материалы обычно описываются с помощью первой опции, *Relative permeability* (Относительная проницаемость), которая выбрана по умолчанию в программном пакете COMSOL Multiphysics®.

В среде численного моделирования COMSOL Multiphysics используется соотношение:

$$p_{sat}(T) = 610,7 \cdot Pa \cdot 10^{7,5 \frac{T-273,15K}{T-35,85K}} \quad (13)$$

Одним из важных параметров, которые также учитываются при расчете, является концентрация паров, например, в случае идеальных газов концентрация

паров воды, при которой относительная влажность достигает 100%, легко определяется из формулы 14.

$$c_{sat}(T) = \frac{P_{sat}(T)}{RT} \quad (14)$$

Для расчета термодинамических свойств в зависимости от состава используется соответствующая формула. В приближении идеального газа плотность смеси равна:

$$\rho_m = \frac{P}{RT} (M_a X_a + M_v X_v) \quad (15)$$

Для расчета поля температуры, добавляется в модель интерфейс «*Heat Transfer in Fluids*» (Теплопередача в текучих средах), после чего в модели появляется узел «*Multiphysics*» (Мультифизика).

Испарение с поверхности происходит за счет тепла жидкости. Теплота испарения зависит от температуры, но здесь допустимо использовать постоянное значение. Количество теплоты зависит от того, сколько пара переходит с поверхности в воздух. Таким образом, источник теплоты связан с интерфейсом «*Transport of Diluted Species*» (Перенос растворенных веществ) через величину полного потока массы по нормали к поверхности, которую можно интерпретировать как результирующий поток пара по направлению в воздух. В итоге моделируется несколько сильно связанных явлений.

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

Распределение температуры для действующего значения тока короткого замыкания $I_{кз}=19$ кА в различные моменты времени показаны на рисунках 8-20.

Time=0 s

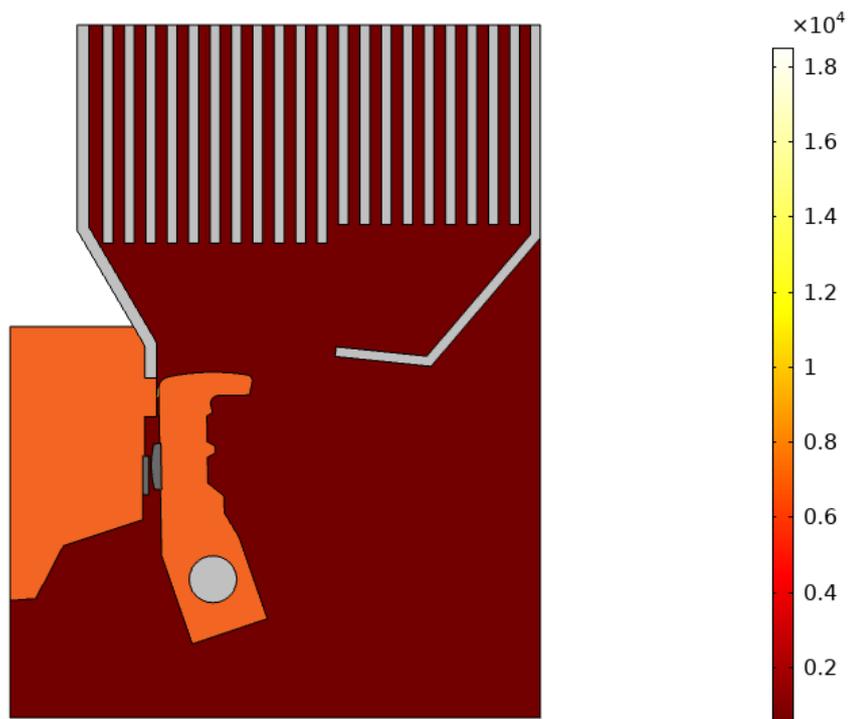


Рисунок 8 – Исходное распределение температуры T [K] (результаты моделирования в момент времени $t=0$ с)

Time=3.996E-4 s

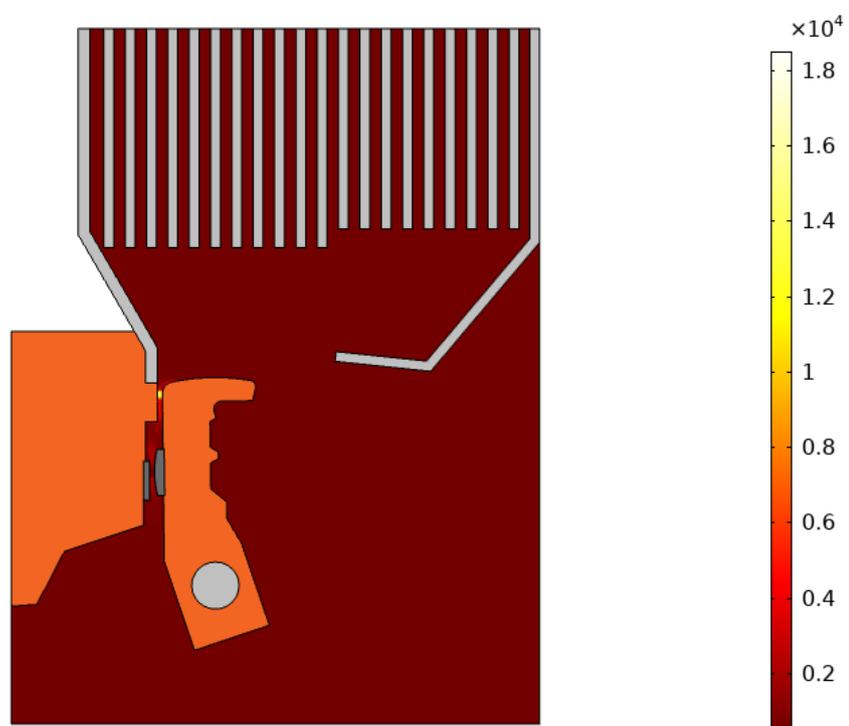


Рисунок 9 – Распределение температуры T [K] (результаты моделирования в момент времени $t=0,3996$ мс)

Time=0.001 s

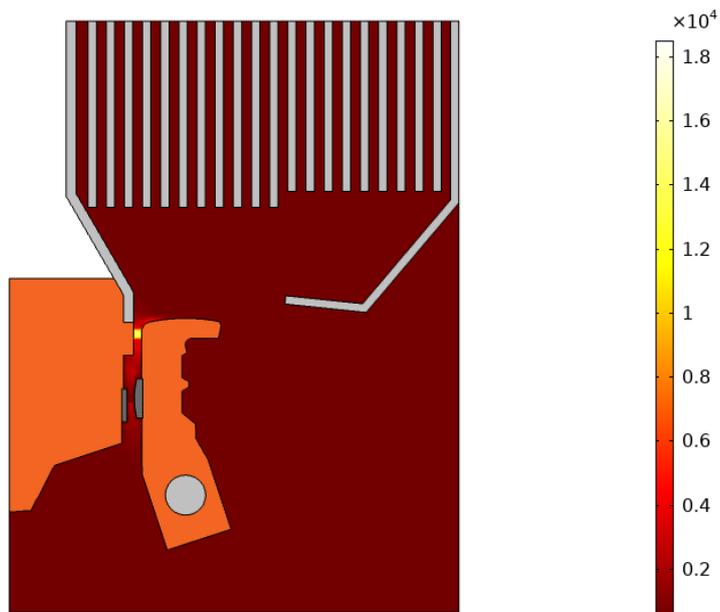


Рисунок 10 – Распределение температуры T [K] (результаты моделирования в момент времени $t=1,0$ мс)

Визуально различимое движение электрической дуги в направлении дугогасительной решетки начинается спустя 1,5 мс с момента начала разведения дугогасительных контактов (см. рис. 11).

Time=0.0015 s

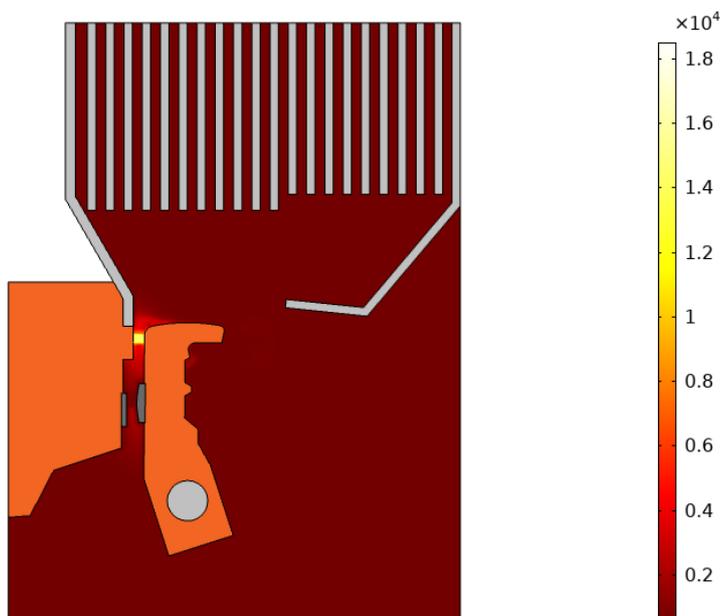


Рисунок 11 – Распределение температуры T [K] (результаты моделирования в момент времени $t=1,5$ мс)

Точка привязки электрической дуги формируется на контакте дугогасительной решетки через 1,8 мс с момента начала разведения дугогасительных контактов (см. рис. 12). Под воздействием электродвижущей силы происходит удлинение электрической дуги с уменьшением средней интегральной температуры токопроводящей области (см. рис. 12-14).

Time=0.0018 s

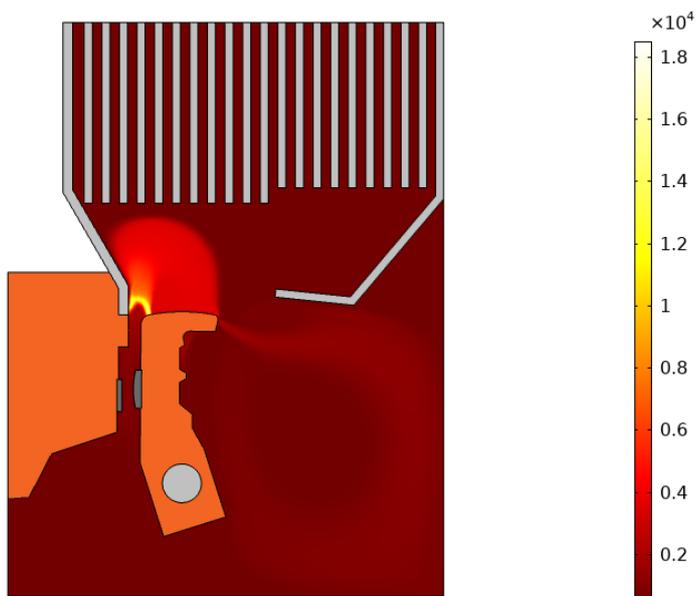


Рисунок 12 – Распределение температуры T [K] (результаты моделирования в момент времени $t=1,8$ мс)

Time=0.001834 s

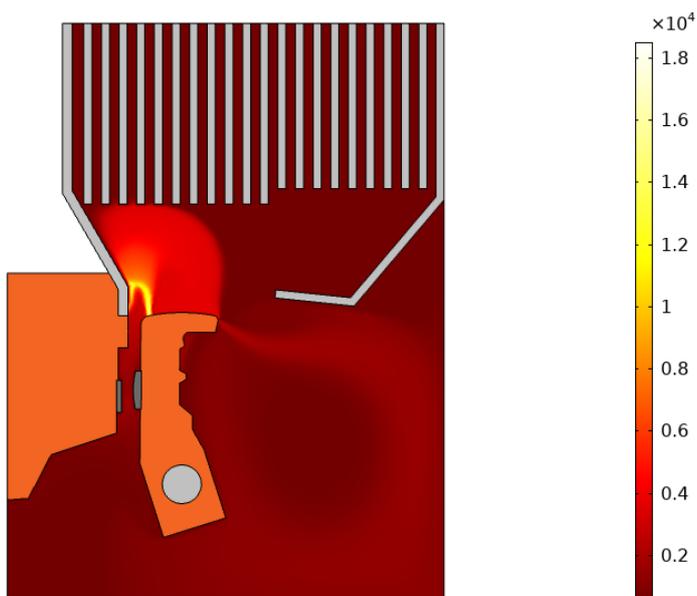


Рисунок 13– Распределение температуры T [K] (результаты моделирования в момент времени $t=1,834$ мс)

Time=0.0018404 s

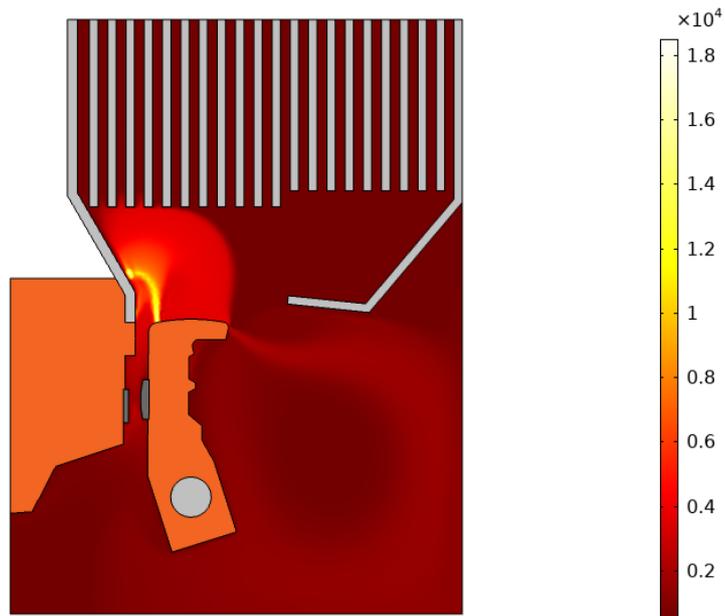


Рисунок 14 – Распределение температуры T [K] (результаты моделирования в момент времени $t=1,8404$ мс)

При значительном удлинении электрической дуги наблюдается формирование новой точки привязки на поверхности контакта дугогасительной решетки (см. рис. 15), происходит перераспределение плотности тока, приводящее к шунтированию электрической дуги и уменьшению падения напряжения на дуге.

Time=0.0018408 s

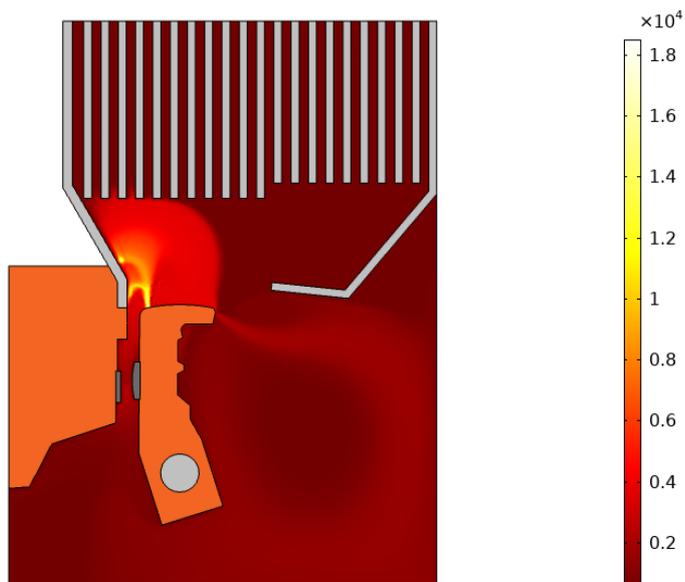


Рисунок 15 – Распределение температуры T [K] (результаты моделирования в момент времени $t=1,8408$ мс)

Процесс вытягивания электрической дуги под действием электродинамической силы в направлении дугогасительной решетки повторяется (см. рис. 16-20).

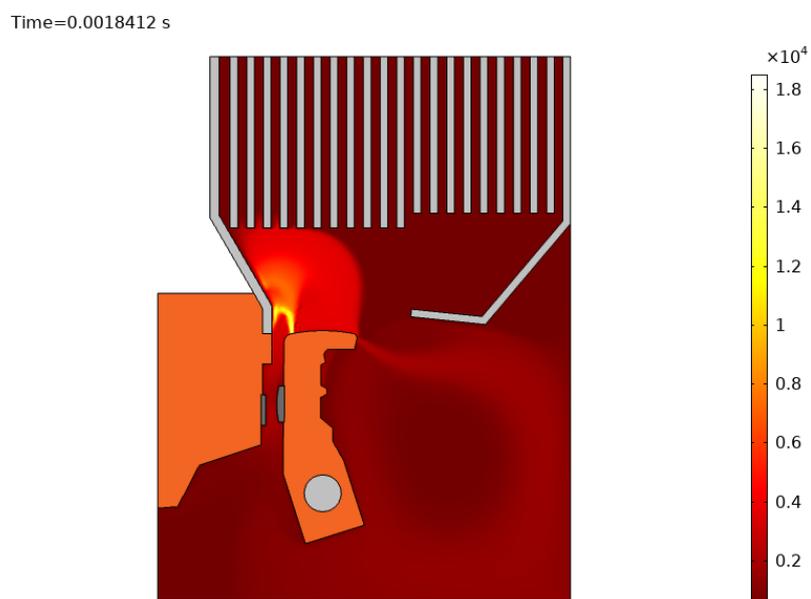


Рисунок 16 – Распределение температуры T [K] (результаты моделирования в момент времени $t=1,8412$ мс)

Необходимо отметить многократное формирование новой точки привязки электрической дуги на неподвижном контакте (например, см. рис. 17-19).

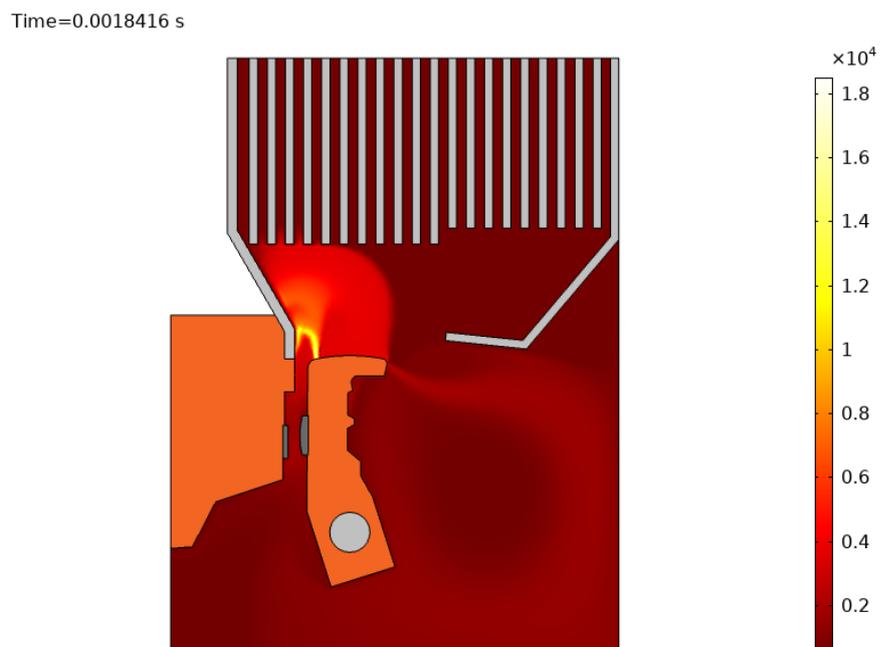


Рисунок 17 – Распределение температуры T [K] (результаты моделирования в момент времени $t=1,8416$ мс)

Процесс шунтирования электрической дуги приводит к уменьшению падения напряжения на дуге и ухудшению условий дугогашения.

Time=0.0018476 s

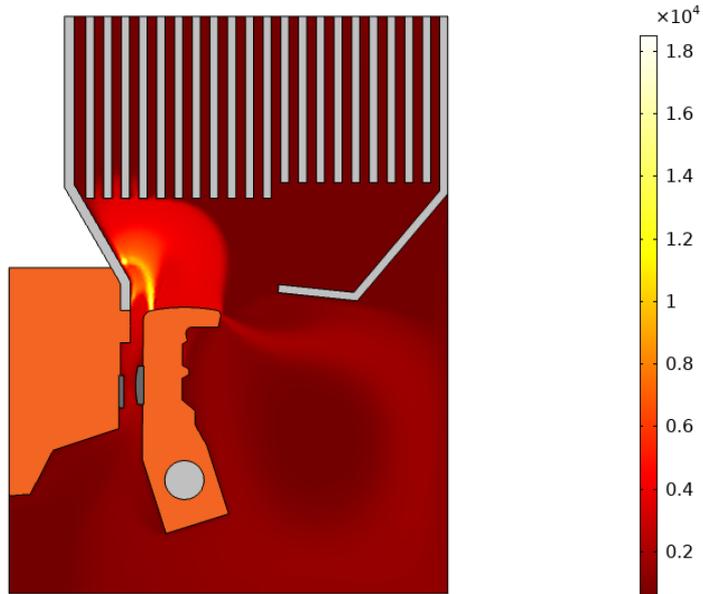


Рисунок 18 – Распределение температуры T [K] (результаты моделирования в момент времени $t=1,8476$ мс)

Среднее время формирования новой точки привязки электрической дуги и её шунтирования составляет примерно 0,0008 мс.

Time=0.001848 s

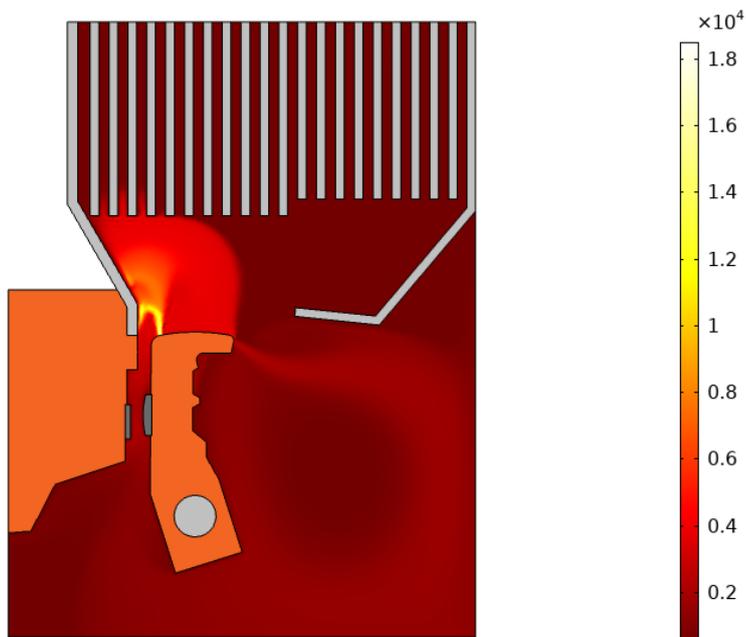


Рисунок 19 – Распределение температуры T [K] (результаты моделирования в момент времени $t=1,848$ мс)

В момент времени 2 мс с момента начала разведения контактов наблюдается гашение дуги, о чем свидетельствует распределение температуры (см. рис. 19) и плотности тока (см. рис. 21).

Time=0.002 s

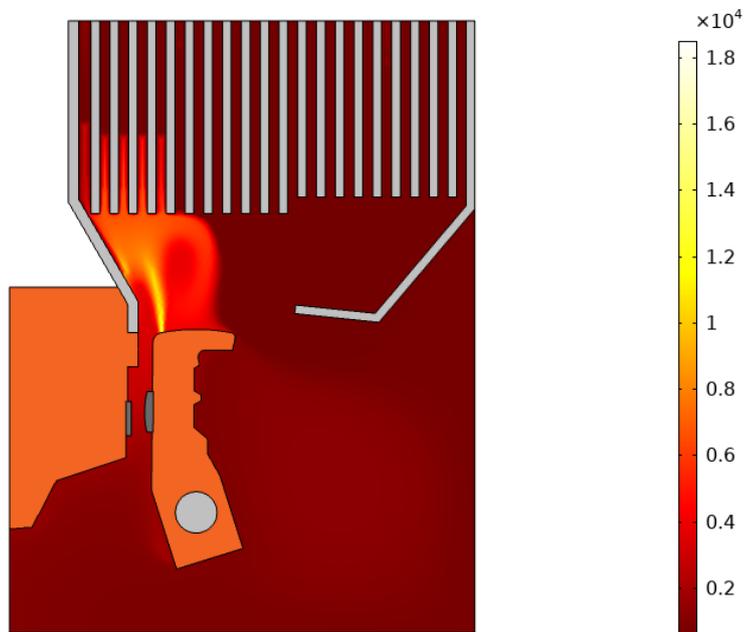


Рисунок 20 – Распределение температуры T [K] (результаты моделирования в момент времени $t=2,0$ мс)

Time=0.002 s

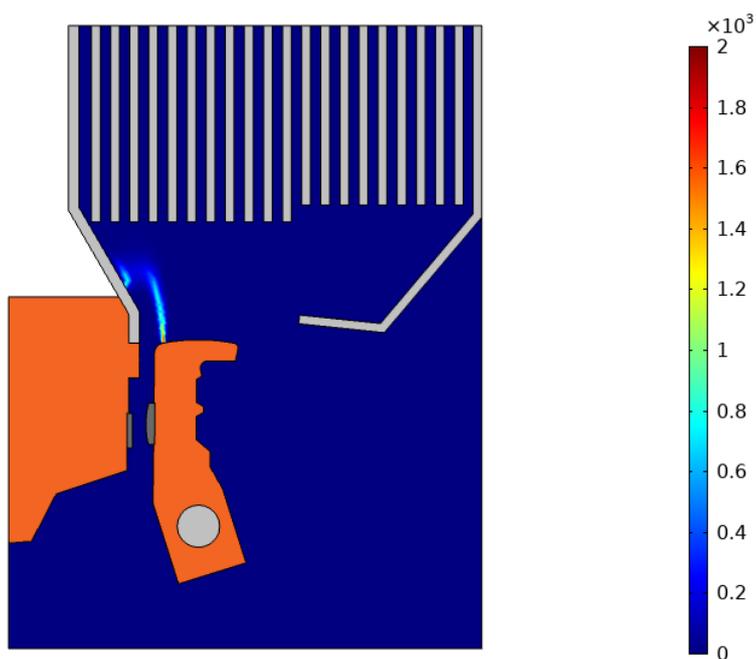


Рисунок 21 – Распределение плотности тока (A/mm^2) в момент дугогашения

Вторая глава содержит описание экспериментальных исследований низковольтного автоматического выключателя.

Экспериментальные исследования теплового состояния контактной системы и отключающей способности низковольтного автоматического выключателя необходимы для верификации разработанных математических моделей и последующей адаптации к решению прикладных инженерных задач при модернизации существующих и созданию новых конструкций низковольтных электрических аппаратов. Современные методы диагностики плазменных процессов такие, как высокоскоростная съемка, регистрация электрических параметров разряда и возможность их синхронизации, позволяют получить качественные результаты экспериментального исследования необходимые для верификации результатов численного моделирования. Методика экспериментальных исследований согласуется с методами испытания в соответствии с ГОСТ 9098-78 (действующий).

Контрольные точки размещения термоэлектрических преобразователей при испытании на нагревание номинальным током при температуре окружающей среды 20°C (Опыт №1):

1. t_0 – окружающая среда;
2. t_1 – шина верхнего положительного полюса выключателя;
3. t_2 – шина нижнего положительного полюса выключателя;
4. t_3 – шина верхнего отрицательного полюса выключателя;
5. t_4 – шина нижнего отрицательного полюса выключателя;
6. t_5 – кнопка управления на лицевой панели выключателя.

Контрольные точки размещения термоэлектрических преобразователей при испытании на нагревание при повышенной температуре окружающей среды (Опыт №2):

1. t_1 – шина верхнего положительного полюса выключателя;
2. t_2 – шина нижнего положительного полюса выключателя;
3. t_3 – шина верхнего отрицательного полюса выключателя;
4. t_4 – шина нижнего отрицательного полюса выключателя;

5. t_5 – окружающая среда в верхней части выключателя;
6. t_6 – окружающая среда в средней части выключателя.
7. t_7 – кнопка управления на лицевой панели выключателя.

Параметры оборудования, входящего в состав испытательной системы представлены в таблице 1.

Таблица 1

Параметры оборудования

Наименование	Тип	Инвентарный номер	Дата очередной поверки
Комплект источников постоянного тока регулируемых	ГОРН-К	-	-
Вольтамперметр	M2044	зав.№ 7244 свид. №0060834 от 03.05.2017 г.	02.05.2018
Прибор для измерения температуры ТЕРМОДАТ	25M5	зав.№ ТВ10Х14804 свид. первичное от 27.10.2016 г.	27.10.2018

В таблице 2 представлены результаты измерения температуры в контрольных точках, температуры окружающей среды (t_0) и тока в каждом полюсе при испытании на нагревании номинальным током. Испытания выполнялись в течение 4 часов до достижения установившейся температуры.

Графики зависимостей температуры от времени показаны на рисунке 22.

Таблица 2

Результаты измерения температуры при температуре окружающей среды 20°C

Время нагрева	Температура в контрольных точках, °C						Ток, кА
	t_0	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	
0	18	20	20	20	20	19	1
20 мин.	20	23	23	23	23	20	1
40 мин.	20	26	26	25	26	20	1

1 ч.	20	28	28	27	27	20	1
1 ч.30 мин.	20	30	30	28	30	21	1
2 ч.	21	32	31	30	31	21	1
2 ч.30 мин.	21	33	33	32	32	21	1
3 ч.	21	34	33	32	33	22	1
3 ч.30 мин.	22	34	34	33	33	22	1
4 ч.	22	34	34	33	34	22	1

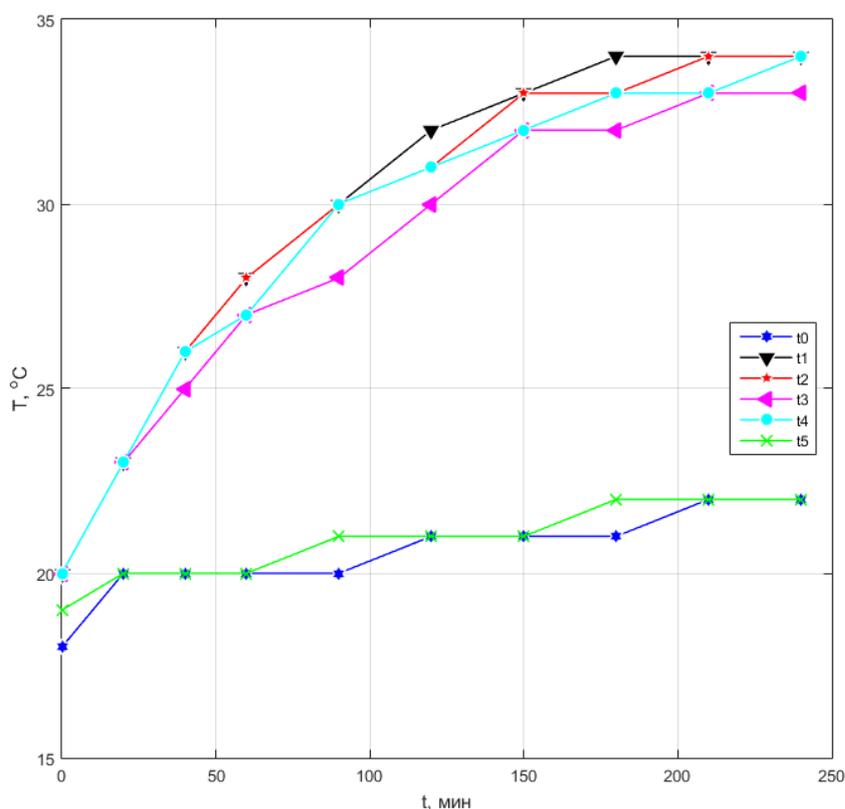


Рисунок 22 – Результаты измерения температуры ($T_{\text{окр. ср.}}=20^{\circ}\text{C}$)

Результаты измерений 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. Максимальное установившееся значение температуры кнопки управления

лицевой панели выключателя соответствует максимальному установившемуся значению температуры окружающей среды.

В таблице 3 представлены результаты измерения температуры в контрольных точках, температуры окружающей среды (t_5 и t_6) и тока в каждом полюсе при испытании на нагревание при повышенной температуре окружающей среды.

Таблица 3

Результаты измерения температуры при повышенной температуре окружающей среды

Время нагрева	Температура в контрольных точках, °С							Ток, кА
	t1	t2	t3	t4	t5	t6	t7	
0	34	29	34	29	46	40	43	1
30 мин.	42	37	42	37	53	47	50	1
1 ч.	51	43	51	43	58	53	56	1
1 ч.30 мин.	57	47	56	47	62	56	59	1
2 ч.	62	52	61	51	64	58	61	1
2 ч.30 мин.	65	55	64	54	65	60	63	1
3 ч.	68	57	67	56	66	61	64	1
3 ч.30 мин.	71	60	71	59	67	62	65	1
4 ч.	72	61	72	60	68	63	66	1
4 ч.30 мин.	73	62	73	61	69	64	67	1
5 ч.	74	63	74	62	70	64	69	1
5 ч.30 мин.	75	64	75	63	70	64	70	1
6 ч.30 мин.	76	64	76	64	70	64	70	1
7 ч.30 мин.	76	64	76	64	70	64	70	1

Графики зависимостей температуры от времени при повышенной температуре окружающей среды показаны на рисунке 22. Результаты измерений в контрольных точках показывают, что максимальное установившееся значение температуры на шинах верхних полюсов выключателя (t_1 и t_3) составило 76°С; максимальное установившееся значение температуры на шинах нижних полюсов выключателя (t_2 и t_4) составило 64°С. Для верхних и нижних полюсов выключателя перегрев относительно окружающей среды составил 6°С, что не превышает допустимых значений. Максимальное установившееся значение

температуры кнопки управления лицевой панели выключателя соответствует максимальному установившемуся значению температуры окружающей среды.

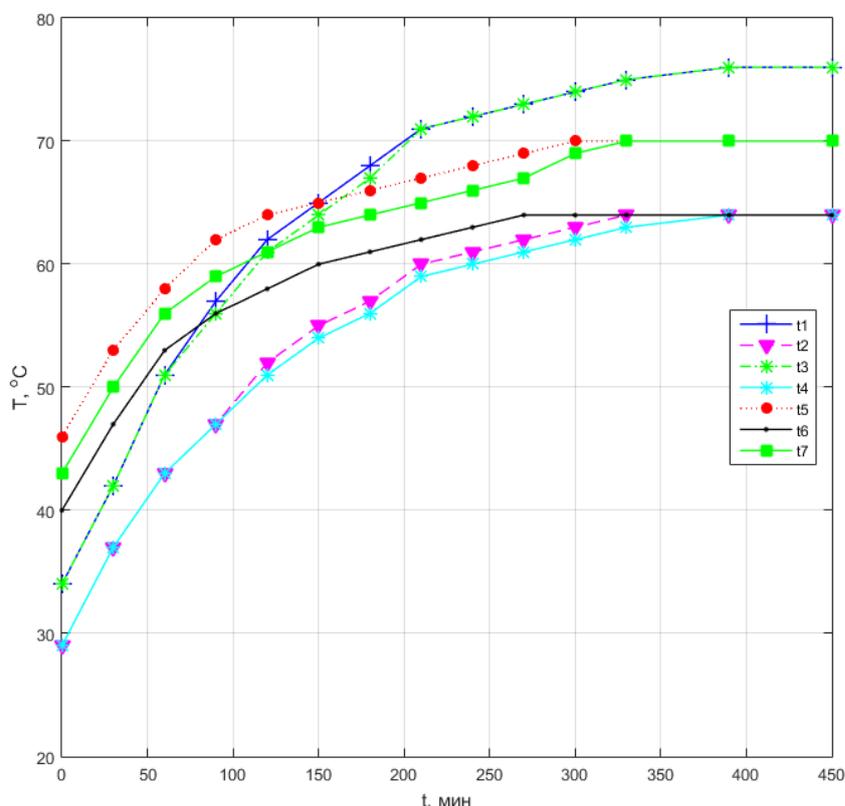


Рисунок 22 – Результаты измерения температуры (при повышенной температуре окружающей среды)

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. 23) и различных значений токов короткого замыкания (см. таблицу 4).

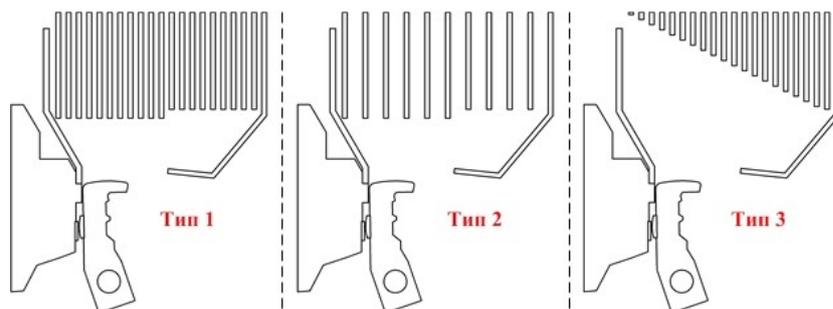


Рисунок 23 – Конструкции исследуемых дугогасительных решеток

Принципиальная электрическая схема для исследования отключающей способности автоматического выключателя представлена на рисунке 24.

Следующие параметры зафиксированы в протоколах экспериментальных исследований по отключающей способности автоматического выключателя:

- осциллограммы токов;
- осциллограммы напряжений на дуге;
- выделяемая в дуге тепловая энергия;
- время гашения.

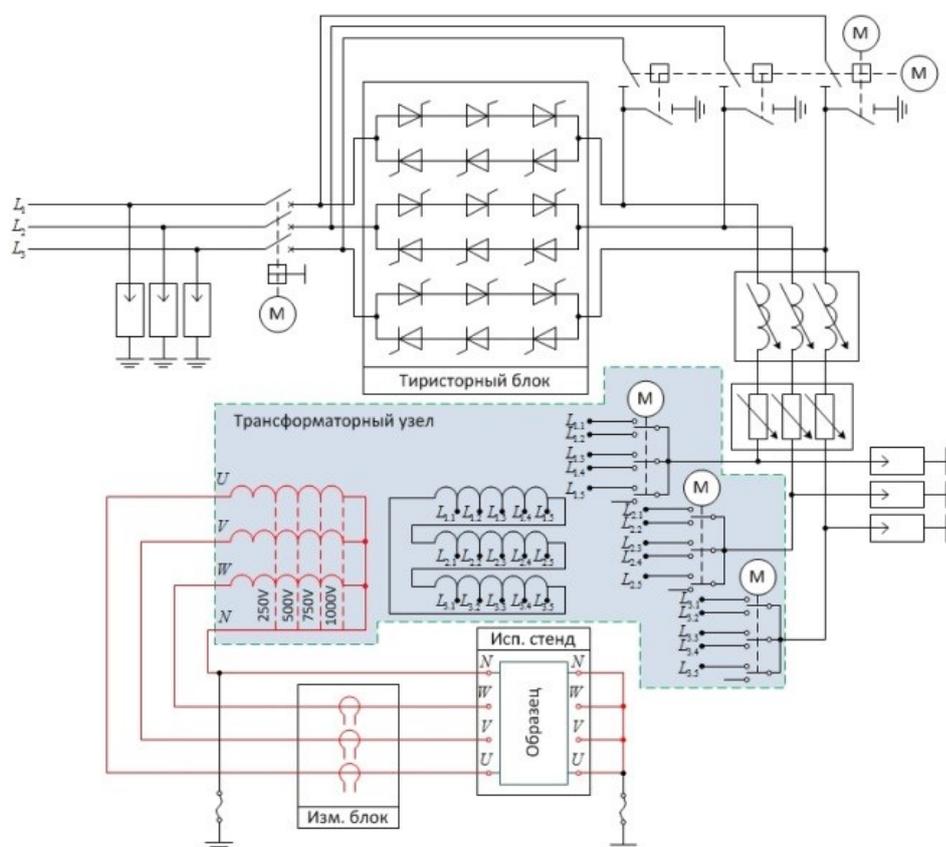


Рисунок 24 – Принципиальная электрическая схема экспериментальной установки



Рисунок 25 – Пневмопривод для активации автоматического выключателя дистанционно



Рисунок 26 – Смотровые окна для высокоскоростной съемки

Таблица 4

Сводная таблица результатов экспериментального исследования

№	Тип камеры (см. рис. 3.3)	$I_{кз}$, кА (дейст. зн.)	$t_{ком.}$, мс	$\cos\phi$	$Q_{дуги}$, кДж	$t_{гашения.}$, мс	Примечание
1	1	4	6,78	0,80	0,49	3,28	Отстройка
2	1	4	9,00	0,80	2,17	8,46	Отстройка
3	2	4	9,00	0,80	2,38	9,16	Отстройка
4	2	4	4,72	0,80	1,46	4,98	Отстройка
5	2	10	4,72	0,47	3,35	10,32	Перегрев конт-в. Гаш-е во II нуле тока

№	Тип камеры (см. рис. 3.3)	$I_{кз}$, кА (дейст. зн.)	$t_{ком.}$, мс	$\cos\varphi$	$Q_{дуги}$, кДж	$t_{гашения.}$, мс	Примечание
6	2	10	5,20	0,47	1,25	3,64	Успешное гаш-е См. рис. 3.7
7	2	10	5,90	0,47	0,98	2,96	Успешное гаш-е
8	2	10	6,62	0,47	0,28	2,24	Успешное гаш-е
9	1	10	6,62	0,47	3,66	9,30	Успешное гаш-е
10	1	10	4,72	0,47	3,53	5,50	Успешное гаш-е
11	1	10	5,20	0,47	1,67	3,42	Успешное гаш-е См. рис. 3.8
12	1	13	4,56	0,26	12,28	12,44	Успешное гаш-е
13	1	13	5,26	0,26	5,37	8,94	Гаш-е во II нуле тока
14	1	13	6,96	0,26	7,13	8,64	Гаш-е во II нуле тока
15	2	13	6,96	0,26	8,93	9,16	Гаш-е во II нуле тока
16	2	13	5,26	0,26	1,47	3,60	Успешное гаш-е
17	2	13	4,02	0,26	6,34	5,98	Успешное гаш-е
18	2	16	5,62	0,30	3,69	7,82	Гаш-е во II нуле тока
19	2	16	1,46	0,30	9,33	6,96	Успешное гаш-е
20	2	16	5,03	0,30	5,39	9,04	Гаш-е во II нуле тока
21	1	19	7,01	0,26	6,19	9,44	Гаш-е во II нуле тока
22	1	19	3,49	0,26	17,96	12,68	Гаш-е во II нуле тока
23	1	19	1,47	0,26	12,04	5,86	Успешное гаш-е
24	2	19	2,70	0,26	18,56	13,08	Гаш-е во II нуле тока
25	2	19	5,00	0,26	11,36	11,02	Гаш-е во II нуле тока
26	2	19	6,23	0,26	14,34	18,86	Гаш-е в III нуле

№	Тип камеры (см. рис. 3.3)	I _{кз} , кА (дейст. зн.)	t _{ком.} , мс	cosφ	Q _{дуги} , кДж	t _{гашения.} , мс	Примечание
							тока
27	2	26	7,04	0,22	17,69	9,08	Гаш-е во II нуле тока
28	2	26	4,51	0,22	4,43	5,36	Успешное гаш-е
29	3	4	5,34	0,80	2,85	12,72	Гаш-е во II нуле тока
30	3	4	8,73	0,80	2,39	9,02	Гаш-е во II нуле тока
31	3	4	1,96	0,80	1,98	6,92	Успешное гаш-е
32	3	10	1,98	0,47	4,31	6,66	Успешное гаш-е
33	3	10	4,02	0,47	7,13	14,04	Гаш-е во II нуле тока См. рис. 3.9
34	3	10	6,52	0,47	5,29	10,44	Гаш-е во II нуле тока
35	3	12	4,48	0,26	11,32	12,16	Гаш-е во II нуле тока
36	3	12	7,06	0,26	>34,07	>40,48	Нет гашения
37	3	13	1,07	0,26	6,85	6,58	Успешное гаш-е
38	3	13	4,27	0,26	>22,23	>22,14	Нет гашения
39	3	13	6,49	0,26	8,39	10,46	Гаш-е во II нуле тока
40	3	16	7,36	0,30	9,56	9,76	Гаш-е во II нуле тока
41	3	16	3,27	0,30	13,45	12,62	Гаш-е во II нуле тока
42	3	16	0,17	0,30	9,25	7,22	Успешное гаш-е
Дополнительные испытания*							
43	1 (модерн.)	19	7,46	0,26	13,22	9,2	Гаш-е во II нуле тока
44	1 (модерн.)	19	4,49	0,26	4,10	4,38	Успешное гаш-е
45	1 (модерн.)	19	2,17	0,26	9,56	5,62	Успешное гаш-е

№	Тип камеры (см. рис. 3.3)	$I_{кз}$, кА (дейст. зн.)	$t_{ком.}$, мс	$\cos\varphi$	$Q_{дуги}$, кДж	$t_{гашения.}$, мс	Примечание
46	1 (модерн.)	26	9,89	0,22	25,64	15,76	Гаш-е в III нуле тока
47	1 (модерн.)	26	1,56	0,22	16,40	5,54	Успешное гаш-е
48	1 (модерн.)	26	7,04	0,22	15,51	9,16	Гаш-е во II нуле тока

*Используется модернизированная дугогасительная решетка с приложенным потенциалом.

Кадры с высокоскоростной камеры, синхронизированные с осциллограммами тока и напряжения, для опыта №23 (см. таблицу 4) представлены на рисунках 27-32 (масштаб по току: 100 кА/В; масштаб по напряжению: 1,1 кВ/В).

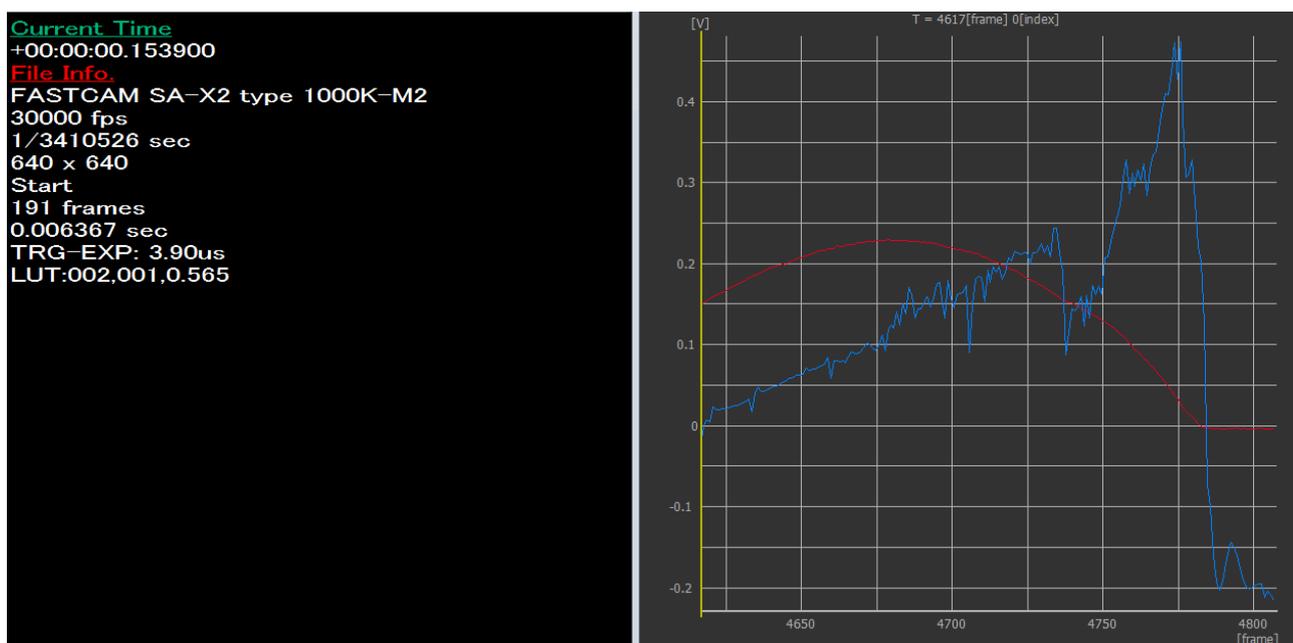


Рисунок 27 – Результаты высокоскоростной съемки, кадр 4617 (опыт №23, см. таблицу 4)

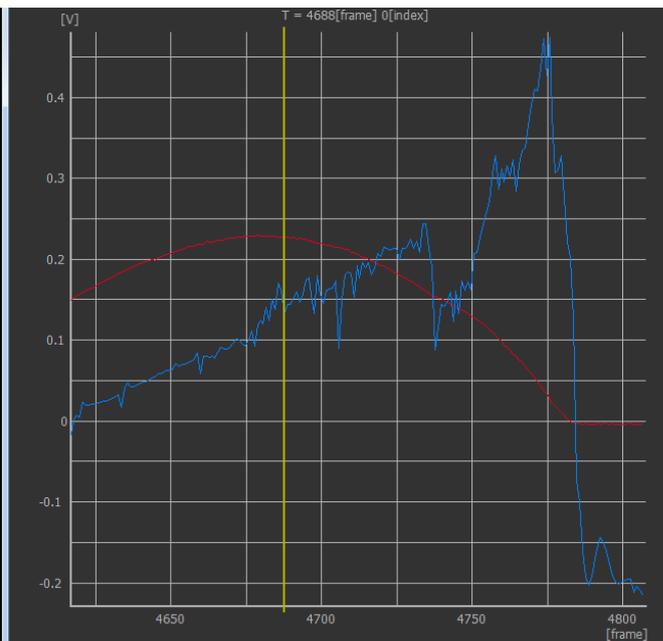


Рисунок 28– Результаты высокоскоростной съемки, кадр 4688 (опыт №23, см. таблицу 4)

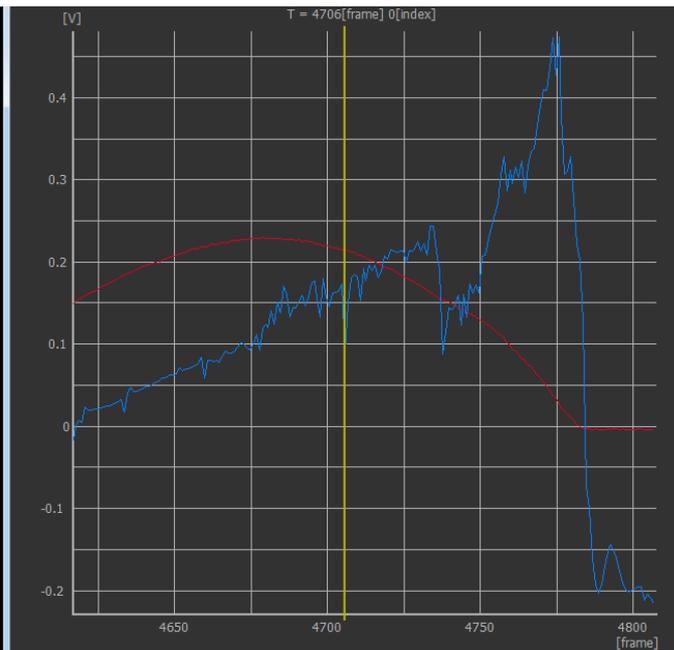


Рисунок 29 – Результаты высокоскоростной съемки, кадр 4706 (опыт №23, см. таблицу 4)

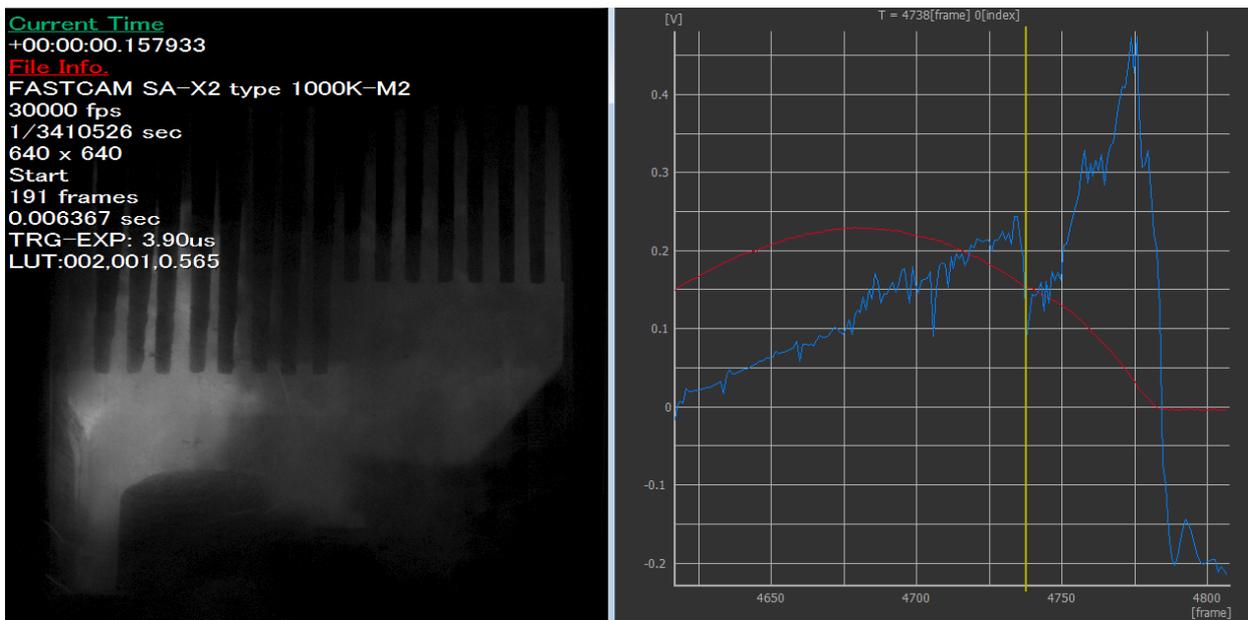


Рисунок 30 – Результаты высокоскоростной съемки, кадр 4738 (опыт №23, см. таблицу 4)

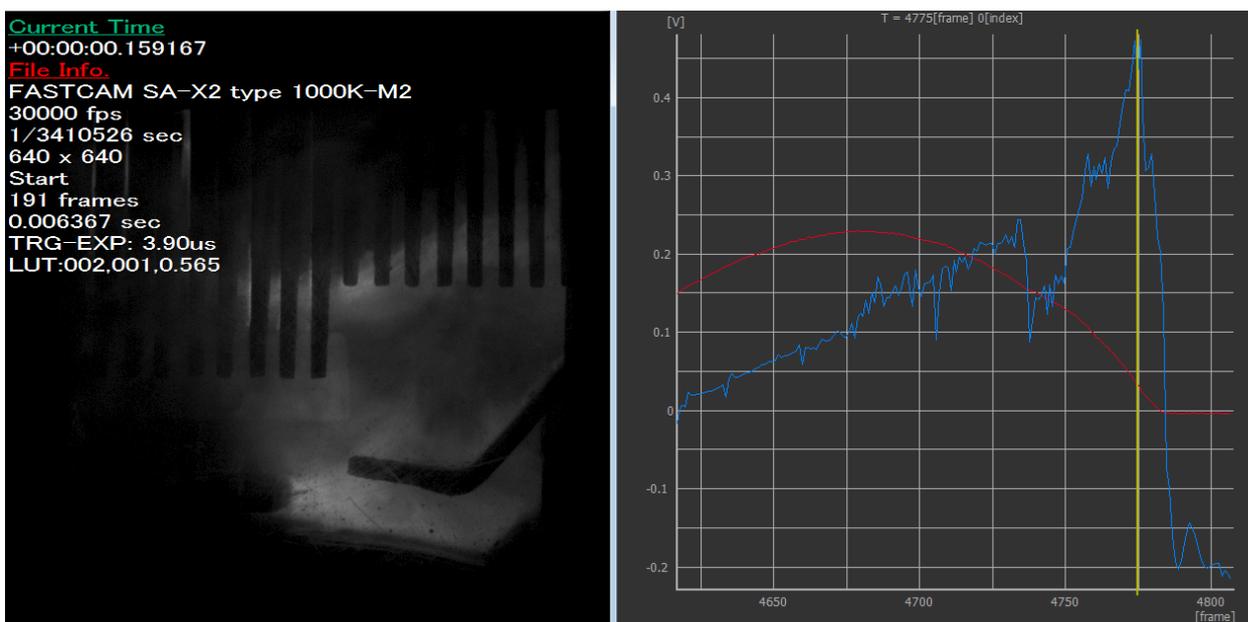


Рисунок 31 – Результаты высокоскоростной съемки, кадр 4775 (опыт №23, см. таблицу 4)

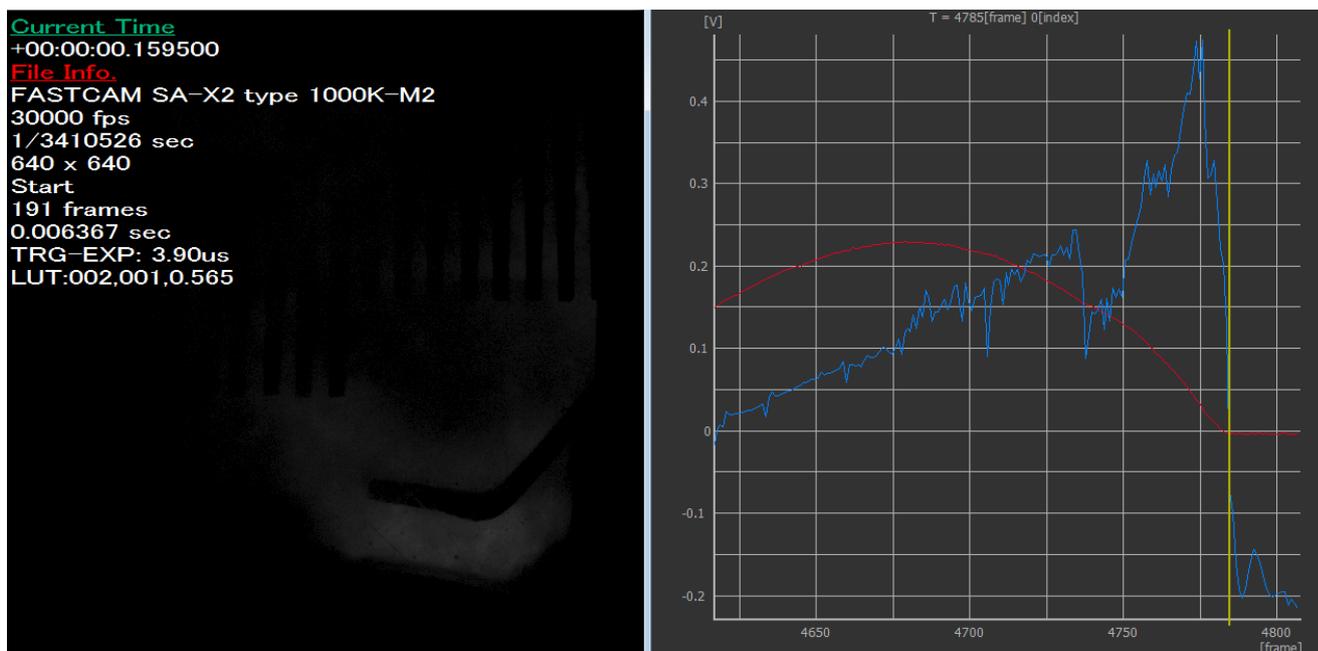


Рисунок 32 – Результаты высокоскоростной съемки, кадр 4785 (опыт №23, см. таблицу 4)

Третья глава содержит описание верификации математических моделей работы низковольтного автоматического выключателя.

Верификация математической модели осуществляется по сопоставлению с результатами экспериментальных исследований, выполненных при схожих с моделируемыми режимах.

На рисунке 33 приведены графики зависимостей максимальной температуре на поверхности с заданным граничным условием «*Terminal*», максимальное значение температуры контактной системы выключателя в установившемся режиме и экспериментальные данные в зависимости от времени.

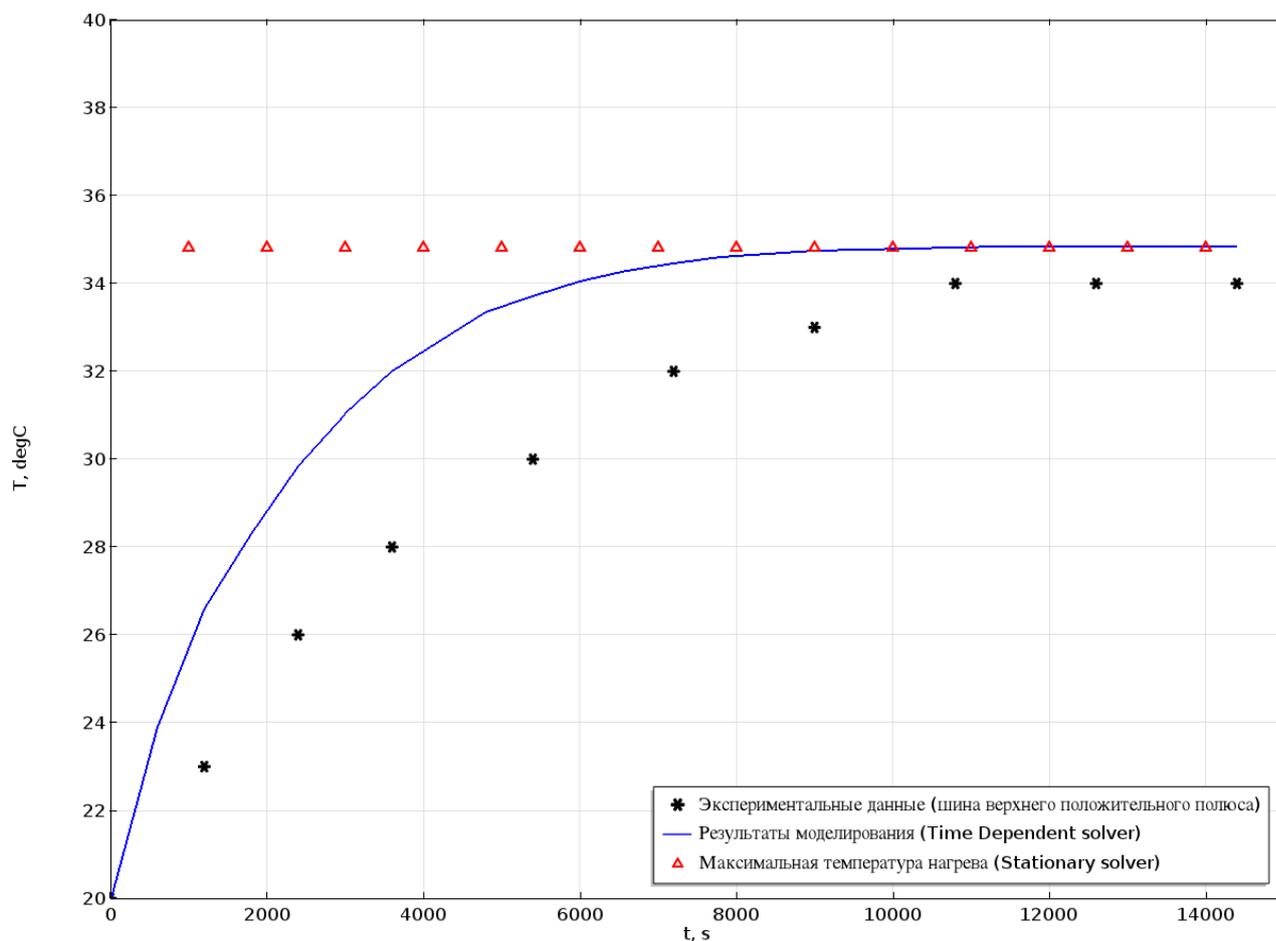


Рисунок 33 – Графики зависимости температуры от времени при температуре окружающей среды 20°C

Из рисунка 33 видно, что абсолютная погрешность не превышает 4°C, а в установившемся режиме не превышает 1°C, с учетом упрощения математической модели и принятых допущений результаты моделирования в достаточной мере согласуются с результатами экспериментального исследования.

Графики зависимостей температуры от времени при повышенной температуре окружающей среды представлены на рисунке 34.

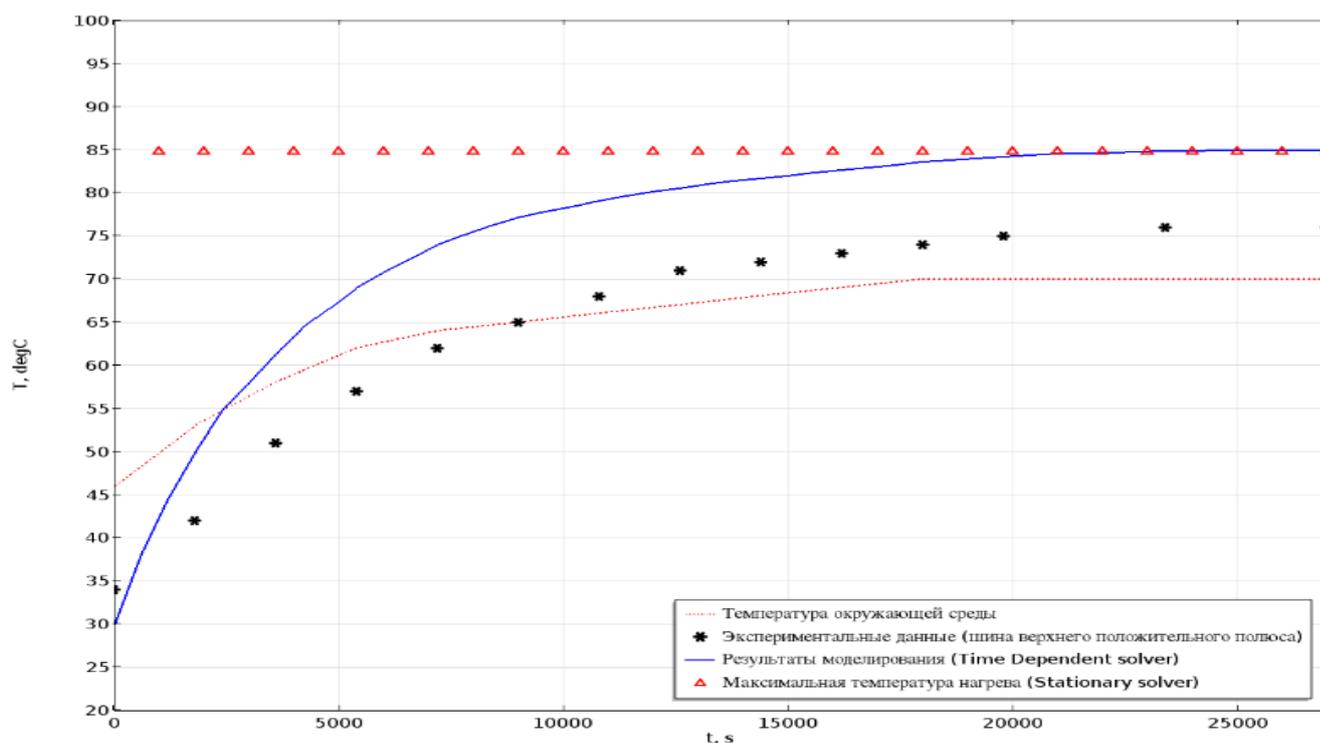


Рисунок 34 – Графики зависимости температуры от времени при температуре окружающей среды 45°C

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.

Результаты моделирования, совмещенные с результатами экспериментальных исследований, представлены на рисунке 36.

Одним из важнейших данных для построения математической модели является время разведения контактов, которое было установлено в ходе экспериментальных исследований с использованием высокоскоростной камеры (см. рис. 35). В соответствии с результатами экспериментальных исследований время разведения контактов составляет 20 мс. В качестве исходных данных для моделирования использована временная зависимость тока (опыт №23, см. таблицу 4).

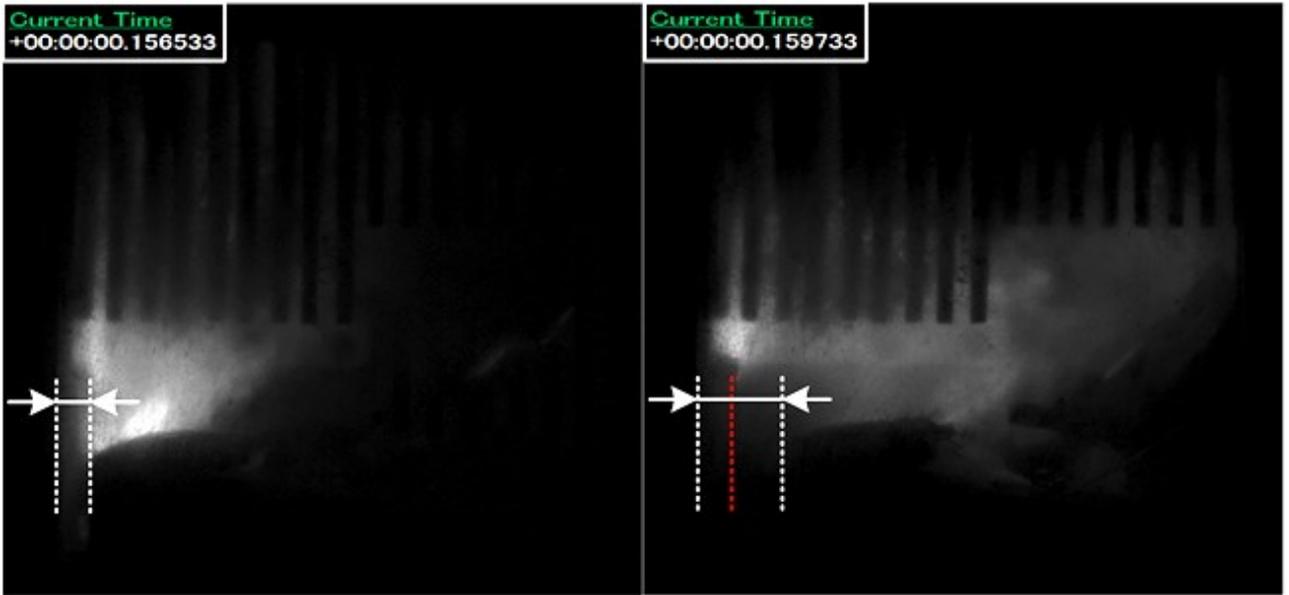


Рисунок 35 – Идентификация скорости разведения контактов

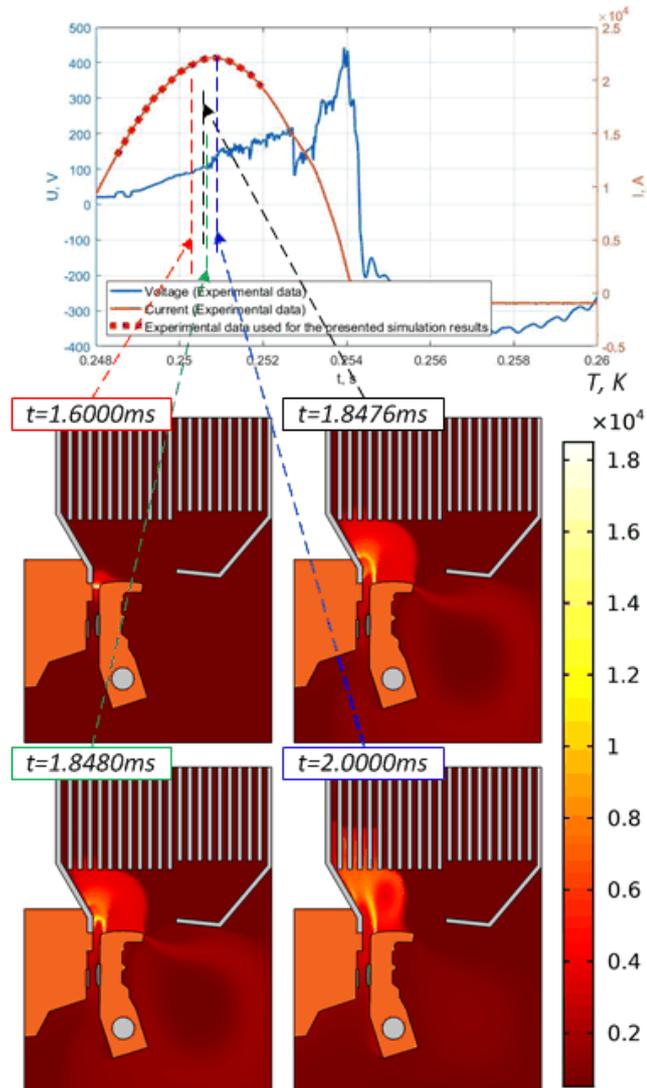


Рисунок 36– Распределение температуры (результаты численного моделирования) и осциллограммы тока и напряжения (опыт №23, см. таблицу 3.5)

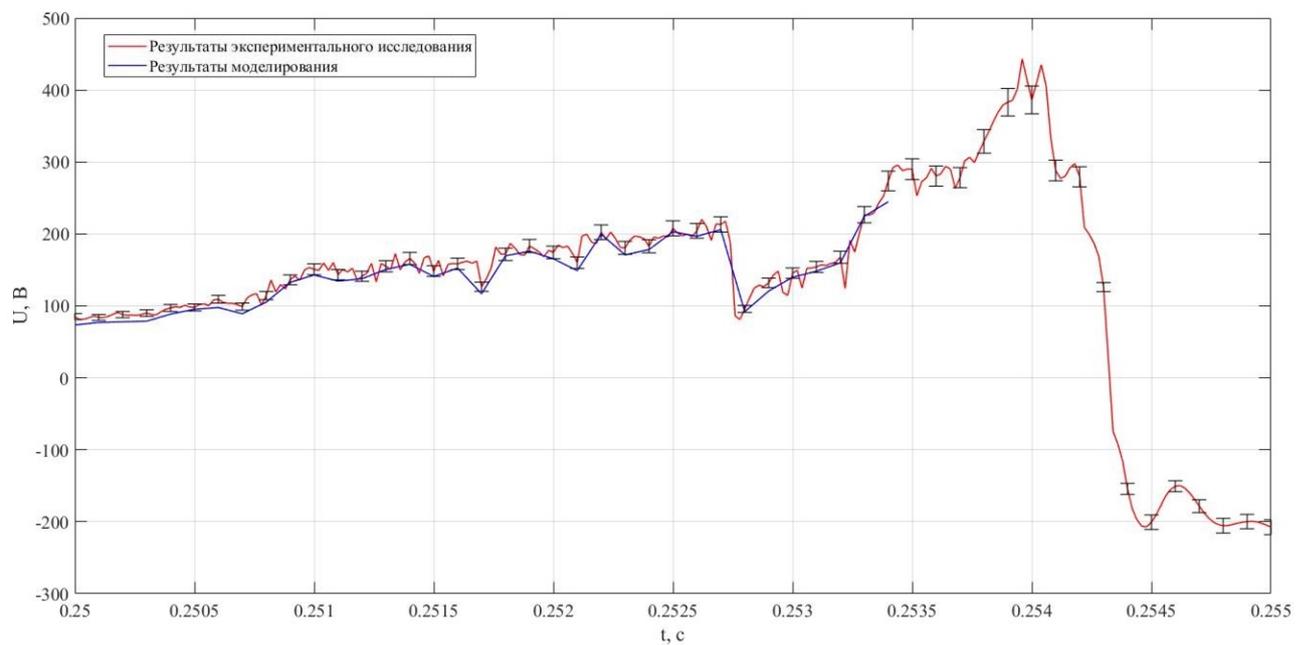


Рисунок 37– Осциллограмма напряжения по результатам численного моделирования и данных опыта №23 (см. таблицу 3.5)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выполнен анализ состояния современных теории и практики в области проектирования системы дугогашения низковольтного автоматического выключателя. 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. 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.

4. Выполнены экспериментальные исследования теплового состояния контактной и токоведущей систем автоматического выключателя. Результатом испытаний являются графики зависимостей температуры от времени.

5. Разработана методика и проведены экспериментальные исследования отключающей способности низковольтного автоматического выключателя.

6. Выполнена верификация математической модели теплового состояния контактной и токоведущей систем автоматического выключателя. Верификация выполнена на основе результатов экспериментальных данных.

7. Выполнена верификация математической модели дугогасительной системы автоматического выключателя на основе экспериментальных исследований.

8. Результаты диссертационного исследования внедрены в рамках опытно-конструкторских работ по созданию низковольтных автоматических выключателей серии «Патриот».

Аспирант Квашнин Андрей Олегович