

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б.Н. Ельцина»

На правах рукописи



Поповцев Владислав Викторович

**СИНТЕЗ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДУГИ
ОТКЛЮЧЕНИЯ ПРИ КОММУТАЦИИ ЭЛЕГАЗОВЫХ
ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ**

2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Екатеринбург – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» на кафедре «Электротехника» Уральского энергетического института.

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент,
Хальясмаа Александра Ильмаровна

Официальные оппоненты: **Емельянов Владислав Николаевич**,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Балтийский
государственный технический
университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф.
Устинова», г. Санкт-Петербург,
профессор кафедры плазмогазодинамики
и теплотехники;

Манусов Вадим Зиновьевич,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Югорский государственный
университет», г. Ханты-Мансийск,
профессор Политехнической школы;

Самусенко Андрей Викторович,
кандидат технических наук, ФГБОУ ВО
«Санкт-Петербургский государственный
университет», доцент кафедры
радиофизики физического факультета

Защита диссертации состоится «11» апреля 2024 г. в 13-00 ч на заседании диссертационного совета УрФУ 2.4.09.23 по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, зал Ученого совета (ауд. И-420).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»: Адрес сайта, на котором размещена диссертация и автореферат: <https://dissovet2.urfu.ru/mod/data/view.php?d=12&rid=5737>.

Автореферат разослан «___» _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Хальясмаа Александра Ильмаровна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В Единой электроэнергетической системе (ЕЭС) России в эксплуатации находится более 9 000 элегазовых выключателей (около 40% от общего числа) на номинальное напряжение 110 кВ и выше. С 2017 по 2021 гг. на объекты ЕЭС России поставили более 1 500 элегазовых выключателей на напряжение 110 кВ и выше со средним темпом ввода в эксплуатацию около 200 выключателей в год. Интерес к элегазовым выключателям, с одной стороны, подкрепляется нормативными документами оператора электрических сетей в России – компании ПАО «ФСК–Россети»: технической политикой, где закреплено решение о преимущественном применении элегазовых выключателей на класс напряжения 110 кВ и цифровой политикой, в рамках которой диктуется переход от планово-предупредительных ремонтов к системам мониторинга и диагностики по фактическому техническому состоянию, в том числе коммутационного электрооборудования. С другой стороны, элегаз (SF₆) как газообразный диэлектрик обладает хорошими физико-химическими свойствами и зарекомендовал себя в качестве не только изолирующей среды, но и дугогасящей. На сегодняшний день, несмотря на активные поиски альтернатив SF₆ в силу ограничения выработки и использования парниковых газов (Киотский протокол 1997 г. и Парижское соглашение 2015 г.), к которым он относится, не найдено экологически безопасной и диэлектрически равноценной ему среды, и ведущие производители выключателей высокого напряжения в России и за рубежом в качестве дугогасящей и изоляционной среды продолжают применять именно SF₆.

Увеличение потребляемой мощности и плотности генерации в ЕЭС России непрерывно ведет к росту токов короткого замыкания в электрических сетях, в связи с чем к выключателям высокого напряжения 110–750 кВ предъявляются все более высокие требования по коммутационной способности в различных эксплуатационных режимах электрической сети. В частности, в циклах отключение–включение для режима коммутации шунтирующих реакторов коммутационная способность элегазовых выключателей изучена недостаточно несмотря на то, что это является штатной ситуацией в электрических сетях ЕЭС России.

Учитывая тот факт, что разработка новых элегазовых выключателей высокого напряжения или модернизация существующих под возрастающие требования к их коммутационной способности являются дорогостоящими мероприятиями, требующими дополнительных временных и материальных затрат, актуален вопрос разработки компьютерных моделей расчета физических процессов, происходящих в дугогасительном устройстве элегазового выключателя при отключении токов короткого замыкания. Между тем, существует проблема разработки автоматизированных систем мониторинга остаточного эксплуатационного ресурса коммутационного оборудования в связи со сложностью протекания физических процессов в дугогасительном устройстве элегазовых выключателей при коммутации в различных эксплуатационных режимах работы электроэнергетической системы.

Моделирование комплексных физических процессов гашения дуги,

происходящих в дугогасительном устройстве элегазового выключателя высокого напряжения при отключении токов короткого замыкания сопряжено в первую очередь со сложностью описания процессов взаимодействия дуги, представляющей плазменный канал и неизотермического потока элегаза, обдувающего ее. Дело не только в том, что гашение дуги в элегазе представляет собой самый сложный комплекс газодинамических, термодинамических, электродинамических, электрофизических и электрохимических процессов, но и в том, что во время горения дуги идут интенсивные процессы переноса массы, заряда, импульса, энергии и излучения наряду с вероятностными процессами ионизации. Кроме того, конструкция дугогасительного устройства элегазового выключателя устроена так, что сильно неизотермический поток элегаза высокого давления, охлаждающий дугу и обеспечивающий деионизацию ее столба в период прохождения переменного тока через ноль, приобретает сверхзвуковое течение (числа Маха > 1), что сильно усложняет описание взаимодействия потока элегаза с узким плазменным каналом дуги.

Физическое описание процессов взаимодействия направленного потока элегаза и плазменного канала дуги во время процесса дугогашения является сложным по двум причинам. Во-первых, аналитическое интегрирование системы уравнений Навье – Стокса, описывающее поведение потока элегаза возможно лишь в ограниченном числе случаев и большинство методов расчета уравнений газодинамики на сегодняшний день сводятся к численным. Основными численными методами решения уравнений газодинамики применительно к расчету течения элегаза под высоким давлением являются метод конечных объемов и метод конечных элементов. Во-вторых, не существует универсального подхода к математическому моделированию процессов взаимодействия дуги отключения с обдувающим ее потоком элегаза в дугогасительном устройстве элегазовых выключателей высокого напряжения при отключении токов короткого замыкания, который с одной стороны в достаточной мере описывает физику низкотемпературной плазмы дуги, а с другой является менее вычислительно затратным, чем модель, основанная на уравнениях физики плазмы. Все это приводит к тому, что необходимо совершенствовать и искать новые методы расчета системы уравнений газодинамики, а также адаптировать и совершенствовать математические модели, описывающие процессы взаимодействия дуги отключения и обдувающим ее потоком элегаза в дугогасительном устройстве элегазовых выключателей высокого напряжения при их коммутации.

Первые математические модели дуги, разработанные А. Cassie и О. Maug не универсальны и являются лишь параметрическими – они не отражают протекающие физические процессы в плазменном канале дуге отключения. Они имеют модификации — гибридные модели, позволяющие более точно описывать дугу отключения, например, модель Т. Browne, которая впоследствии была применена для анализа процесса после погасания дуги (процесс восстановления электрической прочности), характеризуемый балансом энергии. Вышеперечисленные модели имеют ограниченное применение, так как основаны на обыкновенных дифференциальных уравнениях.

Модель «КЕМА», представляющая собой модифицированную модель О. Маур, несмотря на экспериментальную основу, заключающейся в сборе данных по 79 коммутационным испытаниям в центре «КЕМА» (сейчас «CESI») выключателей на напряжение 110–500 кВ позволяет также описать лишь изменение основных параметров дуги – проводимость, ток и напряжение. Более того, в этом случае ограничивается моделирование процесса автогенерации и автокомпрессии, являющиеся основой не только процесса дугогашения в современных элегазовых выключателях (в том числе на номинальное напряжение 110 кВ), но и являющиеся основным средством повышения их коммутационной способности наряду со снижением мощности приводного механизма.

Математическая модель, основанная на учете дуги отключения через Джоулево тепловыделение, не обеспечивает учет силы Лоренца, т.е. движение проводящего газа, которым представляется плазменный канал дуги и определяется только тепловыми эффектами, что является хорошим приближением, но лишь для оценки возможности возникновения теплового пробоя без моделирования процесса восстановления электрической прочности.

Таким образом, остается актуальной задача математического моделирования физических процессов взаимодействия дуги отключения с обдувающим ее потоком элегаза с целью описания ее конкретного поведения при отключении токов короткого замыкания для разработки новых научных основ проектирования дугогасительного устройства элегазовых выключателей высокого напряжения при растущих требованиях к коммутационной способности. Кроме того, исследование работоспособности разработанной математической модели дуги отключения для оценки ее влияния на основные компоненты дугогасительного устройства является важнейшим аспектом при создании автоматизированных систем мониторинга остаточного коммутационного ресурса выключателей.

Объектом исследования является дугогасительное устройство элегазового выключателя 110 кВ, состоящее из дугогасительных малого и большого сопел, дугогасительного подвижного и неподвижного контактов, а также поршня и прилегающих к нему надпоршневого и подпоршневого объемов.

Предметом исследования являются комплексные физические процессы взаимодействия потока элегаза с дугой отключения, протекающие в дугогасительном устройстве элегазового выключателя 110 кВ при отключении токов короткого замыкания.

Степень разработанности темы. На сегодняшний день математическое моделирование физических процессов взаимодействия дуги отключения с обдувающим ее потоком элегаза реализуется в зависимости от целей исследования. Математическая модель взаимодействия дуги отключения с потоком элегаза может охватывать широкий диапазон ее сложности: от простой, позволяющей учесть дугу отключения аналитически с существенным количеством допущений, до более сложных с детальным моделированием возникновения стадий дугового разряда. Моделирование осложняется тем, что возникновение дуги в межконтактном промежутке напрямую связано

с движением контактной системы — подвижных частей (поршня, прилегающих к нему подпоршневого и надпоршневого объемов, дугогасительных подвижных контактов, малого и большого сопел), а ее движение, в свою очередь, определяется так называемой кривой хода контактов (зависимость хода подвижной системы контактов от времени). Большинство современных исследований, посвященных моделированию процессов дугогашения в элегазовых выключателях, не учитывают кривую хода, либо считается, что движение контактов является равномерным. Однако, кривая хода — нелинейная характеристика и, кроме того, при отключении токов короткого замыкания происходит замедление блока подвижных контактов (так называемое, «западание» кривой хода).

Существенный вклад в исследования процессов дугогашения при отключении токов короткого замыкания элегазовыми выключателями высокого напряжения в России внесли А. С. Ильин, С. А. Аверьянова, Д. В. Черноскутов, Е. Н. Тонконогов, А. Г. Овсянников, Г. А. Кукеков, А. А. Чунихин, М. А. Жаворонков, Р. Н. Шульга, Д. А. Глушков и др. Электрофизическими процессами формирования дугового разряда в газовых средах, в том числе изоляционных, занимались А. М. Залесский, М. Ф. Жуков, В. С. Энгельшт, А. Л. Куперштох, А. В. Самусенко и др. Первоначальная основа в области создания математических моделей дуги отключения и описания физических процессов в ней после первой половины XX в. была заложена следующими зарубежными авторами: J. Lowke, D. Tuma, W. Hermann, K. Ragaller, T. Browne, E. Schade, U. Kogelschatz, M. Claessens, A. Cassie, O. Mayr, B. Swanson, L. Niemeyer и др.

Ввиду актуальности тематики, в настоящее время, продолжают публиковаться работы в рамках функционирования Международного Совета по большим электрическим системам высокого напряжения — СИГРЭ (CIGRE), комитет А3 (High Voltage Equipment). Целый ряд зарубежных ученых публикует высокоуровневые работы по описанию дуги отключения: R. Smeets, C. Franck, M. Seeger, M. Kapetanovic, M. Muratovic и др.

Заметный прорыв в современных подходах к математическому моделированию процессов дугогашения при отключении токов короткого замыкания элегазовыми выключателями высокого напряжения сделан такими зарубежными авторами как J. Park, Y. Pei, J. Liu, T. Mori, Y. Tanaka, H. Luo и др. Отдельно, стоит отметить работы L. Zhong, реализовавшего так называемую гидрокинетическую модель электрической дуги в 1D-постановке.

В связи с необходимостью разработки методов оценки отключающей способности элегазовых выключателей до стадии изготовления дорогостоящих опытных образцов и стадии проведения, в первую очередь, коммутационных испытаний, в настоящее время ведутся исследования, посвященные созданию универсальной, адаптивной математической модели взаимодействия дуги отключения с обдувающим ее потоком элегаза. Такая модель должна в достаточной мере отражать динамику физических процессов в дугогасительном устройстве выключателя, что позволит заводам-изготовителям высоковольтной коммутационной аппаратуры уменьшить время на проведение исследований по повышению отключающей способности при проектировании современных

элегазовых выключателей.

Цель работы заключается в разработке математической модели взаимодействия потока элегаза с дугой отключения в виде источника температурного нагрева с использованием подвижной сетки для исследования процессов дугогашения в дугогасительном устройстве элегазового выключателя 110 кВ при отключении токов короткого замыкания.

Для достижения поставленной цели требуется решить следующие задачи:

1. Проанализировать существующие модели и подходы, описывающие течения, гасящие дугу в реальных дугогасительных устройствах при отключении токов короткого замыкания элегазовыми выключателями высокого напряжения.

2. Разработать расчетную численную модель взаимодействия дуги отключения с обдувающим ее потоком элегаза в автокомпрессионном дугогасительном устройстве элегазового выключателя 110 кВ с учетом турбулентных потоков по модели $k-\varepsilon$ с использованием Arbitrary Lagrangian – Eulerian (ALE)-подхода (подвижной сетки).

3. Разработать подход к численному моделированию динамических процессов взаимодействия дуги отключения с обдувающим ее потоком элегаза в автокомпрессионном дугогасительном устройстве элегазового выключателя 110 кВ, представленной в виде источника температурного нагрева, на основе экспериментальных данных по замеру температуры ствола дуги при отключении симметричного тока короткого замыкания с использованием подвижной сетки.

4. Произвести сравнение расчетно полученных газодинамических параметров (изменение давление в подпоршневой области) с экспериментальным исследованием по отключению тока короткого замыкания реальным автокомпрессионным дугогасительным устройством элегазового выключателя 110 кВ.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Предложен новый подход к моделированию взаимодействия потока газа с дугой отключения в дугогасительном устройстве элегазового выключателя при отключении токов короткого замыкания на основе подвижной сетки, позволяющий учитывать динамику изменения протекающих физических процессов.

2. Разработана математическая модель дуги в форме источника температурного нагрева в межконтактном промежутке автокомпрессионного дугогасительного устройства элегазового выключателя по замеру температуры ствола дуги при отключении симметричного тока короткого замыкания на основе ALE-подхода.

3. Разработанная математическая модель взаимодействия потока элегаза с дугой отключения в автокомпрессионном дугогасительном устройстве элегазового выключателя 110 кВ была применена для расчета остаточного коммутационного ресурса реального выключателя через определение массы абляции сопла после каждой коммутации.

Теоретическая значимость работы заключается в разработке подходов к созданию численных моделей с подвижной сеткой, которые учитывают динамические процессы взаимодействия потока элегаза с дугой отключения.

Практическая значимость результатов работы заключается в создании расчетной численной модели взаимодействия потока элегаза с дугой отключения в автокомпрессионном дугогасительном устройстве элегазового выключателя 110 кВ, в достаточной мере отражающей динамику физических процессов в нем, что позволит заводам-изготовителям высоковольтной коммутационной аппаратуры уменьшить время на проведение исследований по повышению отключающей способности при проектировании современных элегазовых выключателей, при этом не требующей больших вычислительных мощностей, что обеспечит создание передовых автоматизированных систем мониторинга остаточного эксплуатационного ресурса коммутационного оборудования.

Методология и методы исследования. В диссертации в качестве метода исследования используется численное моделирование методом конечных элементов на основе подвижной сетки — подхода Arbitrary Lagrangian – Eulerian (ALE), позволяющей изменять положение и форму сеточных элементов в близлежащих доменах пространственной системы координат, реализуемым в программном комплексе COMSOL Multiphysics 6.0.

Положения, выносимые на защиту:

1. Основные принципы формирования модели взаимодействия потока элегаза с дугой отключения в автокомпрессионном дугогасительном устройстве элегазового выключателя 110 кВ с подвижной сеткой.

2. Новая модель взаимодействия потока газа с плазменным каналом дуги отключения в автокомпрессионном дугогасительном устройстве элегазового выключателя 110 кВ, представленная в форме источника температурного нагрева, на основе экспериментальных данных по замеру температуры ствола дуги при отключении симметричного тока короткого замыкания с использованием подвижной сетки.

3. Основные требования к численным моделям динамических процессов взаимодействия потока элегаза с плазменным каналом дуги отключения в автокомпрессионном дугогасительном устройстве элегазового выключателя 110 кВ в реальных условиях с использованием подвижной сетки.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Диссертационная работа соответствует следующим пунктам паспорта специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы:

– п. 1 «Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, анализ системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем, включая электромеханические, электромагнитные преобразователи энергии и электрические аппараты, системы электропривода, электроснабжения и электрооборудования промышленного назначения»;

– п. 2 «Разработка научных основ проектирования, создания и эксплуатации электротехнических комплексов, систем и их компонентов»;

– п. 4 «Исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов, систем и их компонентов в различных

режимах, при разнообразных внешних воздействиях, диагностика электротехнических комплексов».

Обоснованность и достоверность. Результаты диссертационной работы получены при корректном и обоснованном применении разработанных математических моделей взаимодействия потока элегаза с плазменным каналом дуги отключения в автокомпрессионном дугогасительном устройстве элегазового выключателя 110 кВ и подтверждаются согласованностью с экспериментальными данными, полученными автором исследования.

Апробация работы. Положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на четырех международных и одной Российской научных и научно-практических конференциях, а именно: 2020 Ural Smart Energy Conference (Екатеринбург, Россия); CIGRE Virtual Centennial Session, 2021 (Париж, Франция); International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (Уфа, Россия); Ural Project of Energy Conference 2022 (Екатеринбург, Россия); VIII Международная научно-техническая конференция «Развитие и повышение надежности распределительных электрических сетей (Москва, Россия).

Диссертация выполнена в рамках конкурсной части государственного задания (FEUZ-2022-0030).

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 7 научных работах, 4 из которых опубликованы в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ, в том числе 3 статьи в изданиях, входящих в международные базы цитирования Scopus и WoS.

Структура и объем работы. Диссертационная работа включает в себя введение, 4 главы, заключение, список сокращений и условных обозначений, список литературы, состоящий из 237 библиографических ссылок. Общий объем работы составляет 118 страниц, в том числе 12 таблиц, 38 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы и дана ее общая характеристика. Приведено описание решаемой проблемы. Сформулированы цели и задачи работы. Произведен краткий научный обзор существующих методов и подходов по теме диссертации.

Первая глава посвящена анализу существующих математических моделей и подходов к моделированию процессов взаимодействия дуги отключения и обдуваемому ее потоку элегаза в различных режимах отключения токов короткого замыкания элегазовых выключателей 110 кВ.

При отключении токов короткого замыкания элегазовым выключателем в его дугогасительном устройстве между дугогасительными контактами возникает электрическая дуга, которая под действием потока элегаза высокого давления охлаждается и выдувается из межконтактного промежутка. Расчет газодинамических характеристик во время дугогашения сводится к учету дуги – использованию или разработке математической модели при условии, что тепловое и электромагнитное воздействия от дуги описывались однозначно в рамках решения совместной системы уравнений газодинамики Навье – Стокса и электромагнетизма Максвелла. Однако, электрическая дуга по своей сущности

является частным случаем четвертой формы состояния вещества – плазмы, которая включает в себя ионизированный и электрически квазинейтральный газы. Наличие заряженных частиц делает плазму электропроводящей, а динамика отдельных частиц и макроскопическое движение плазмы регулируются коллективными электромагнитными полями и очень чувствительны к внешним полям.

Чтобы полностью описать состояние плазмы, необходимо знать все положения и скорости частиц, которые определяют электромагнитное поле в области плазмы. Однако, отслеживание всех частиц с их основными параметрами нецелесообразно в виду существенных вычислительных затрат, поэтому используются упрощенные модели трех основных типов, представленных ниже.

Гидродинамическая модель. Жидкостные модели описывают плазму в терминах сглаженных величин, таких как плотность и усредненная скорость вокруг каждой позиции. Модель жидкости в магнитогидродинамическом (МГД) подходе рассматривает плазму как единую жидкость, описываемую системой уравнений Максвелла и Навье – Стокса. Более общим описанием является двухжидкостная плазма, где ионы и электроны описываются отдельно. Жидкостные модели часто точны, когда вероятность столкновений достаточно высока, чтобы сохранить распределение скорости плазмы близким к распределению Максвелла – Больцмана.

Газо-, термо- и электродинамику плазмы электрической дуги в дополнение к уравнению неразрывности (1), движения (2), энергии (3) и закона Ома (4) необходимо дополнить уравнениями Максвелла (5–8) и материальными соотношениями в случае изотропной среды:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \vartheta_z)}{\partial z} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial(r\rho \vartheta_r)}{\partial r} = 0, \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial \vartheta_z}{\partial t} + \rho \vartheta_z \frac{\partial \vartheta_z}{\partial z} + \rho \vartheta_r \frac{\partial \vartheta_z}{\partial r} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left[(\eta + \eta_t) \cdot r \frac{\partial \vartheta_z}{\partial r} \right], \quad (2)$$

$$\rho \frac{\partial h}{\partial t} + \rho \vartheta_z \frac{\partial h}{\partial z} + \rho \vartheta_r \frac{\partial h}{\partial r} = \sigma E^2 - U + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left[(k + k_t) \cdot r \frac{\partial T}{\partial r} \right], \quad (3)$$

$$\mathbf{I} = \mathbf{E} \int_0^{r_1} 2\pi r \sigma \cdot dr, \quad (4)$$

где ϑ_r и ϑ_z – радиальная и аксиальная скорости газа; ρ – плотность газа; p – давление газа, η – кинематическая вязкость; η_t – турбулентная вязкость; σ – электропроводность; \mathbf{E} – напряженность электрического поля; U – удельный коэффициент излучения; K – теплопроводность; K_t – турбулентная теплопроводность; h – удельная энтальпия; \mathbf{I} – ток.

$$\frac{\partial \mathbf{E}_r}{\partial z} - \frac{\partial \mathbf{E}_z}{\partial r} = 0, \quad (5)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial r \mathbf{H}_\varphi}{\partial r} = \mathbf{j}_z, \quad (6)$$

$$-\frac{\partial \mathbf{H}_\varphi}{\partial z} = \mathbf{j}_r, \quad (7)$$

$$\mathbf{j}_z = \sigma \mathbf{E}_z; \quad \mathbf{j}_r = \sigma \mathbf{E}_r; \quad (8)$$

где \mathbf{E}_r и \mathbf{E}_z – радиальная и аксиальная напряженности электрического поля; \mathbf{H}_φ – азимутальная напряженность магнитного поля; \mathbf{j}_r и \mathbf{j}_z – радиальная и аксиальная плотности электрического тока.

Вышеперечисленные уравнения дополняются следующими зависимостями:

$$\rho = \rho(T, p); \sigma = \sigma(T, p); \lambda = \lambda(T, p); \eta = \eta(T, p); c_p = c_p(T, p); \quad (9)$$

$$h = h(T, p); \psi = \psi(T, p). \quad (10)$$

где T – температура; λ – теплопроводность; c_p – удельная теплоемкость при постоянном давлении; ψ – излучательная способность.

Краевые условия при этом (в условиях осесимметрии – цилиндрические координаты) будут следующими:

$$r = 0, z > 0; \vartheta_r = 0; \mathbf{H}_\varphi = 0; \frac{\partial \vartheta_z}{\partial r} = 0; \frac{\partial T}{\partial r} = 0; \frac{\partial \mathbf{E}_z}{\partial r} = 0; \boldsymbol{\omega} = 0; \quad (11)$$

где $\boldsymbol{\omega}$ – азимутальная составляющая скорости.

Кинетическая модель. Сводится к описанию функций распределения скорости частиц в каждой точке плазмы и поэтому не должна предполагать распределение Максвелла – Больцмана. Кинетическое описание используется для описания бесстолкновительной плазмы (у которой плотность достаточно мала и/или ее температура достаточно высока, так что соударениями можно пренебречь).

В основном, при кинетическом описании плазмы используется подход, основанный на представлении сглаженной функции распределения (12) на сетке по скорости и положению:

$$f = f(t, \mathbf{r}', \mathbf{p}'), \quad (12)$$

где \mathbf{r}' – координаты центра масс частиц; \mathbf{p}' – импульсы центра масс частиц.

Функция (12) в состоянии локального термодинамического равновесия (ЛТР) имеет вид максвелловского распределения и в общем случае находится из уравнения Больцмана (13):

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \boldsymbol{\vartheta} \frac{\partial f}{\partial \mathbf{r}} + \mathbf{F} \frac{\partial f}{\partial \mathbf{p}} = C(f), \quad (13)$$

при этом внешняя сила, действующая на заряженную частицу, имеет вид:

$$\mathbf{F} = e\mathbf{E} + \left(\frac{e}{c}\right) [\boldsymbol{\vartheta}, \mathbf{B}], \quad (14)$$

где \mathbf{F} – является внешней силой, действующую на заряженную частицу; e – заряд электрона; c – скорость света; $C(f)$ – коэффициент, учитывающий взаимные столкновения частиц.

При рассмотрении быстрых движений частиц столкновениями часто можно пренебречь, полагая $C(f) \approx 0$. Тогда кинетическое уравнение называется бесстолкновительным уравнением Власова с самосогласованными полями \mathbf{E} и \mathbf{B} . Уравнение Власова может быть использовано для описания динамики системы заряженных частиц, взаимодействующих с электромагнитным полем.

Гидрокинетическая модель. В этой модели предполагается, что плазма дуги отключения находится в локальном термодинамическом равновесии (ЛТР) с цилиндрической симметрией. Существенное упрощение получается в одномерной

постановке. Такая постановка задачи в рамках гидрокинетической модели позволяет дать предварительное и достаточное описание затухающей дуги. Предполагая ЛТР и считая давление дуги постоянным, модель сводится к решению двух уравнений, а именно уравнения сохранения массы (1) и энергии (3) для получения изменяющейся во времени и пространстве температуры дуги.

Таким образом, наиболее подходящей математической моделью дуги отключения, которая с одной стороны учитывает в должной мере все проходящие физические процессы в плазменном канале, а с другой – оказывается вычислительно менее затратной, может являться магнитогидродинамическая, либо гибридная модель, так называемая гидрокинетическая.

Аналитические и экспериментальные модели. Несомненно, первые математические модели дуги А. М. Cassie и О. Mayr, Т. Е. Browne, W. Hermann, В. W. Swanson, К. Ragaller, J. J. Lowke и др. полезны, т. к. позволяют качественно производить расчеты, связанные с конструированием выключателей, однако, имеют серьезные ограничения. С их помощью невозможно детально исследовать физические процессы при гашении дуги, т. е. оценить взаимодействие с потоком элегаза, т. к. эти процессы описываются уравнениями газовой динамики, представляющими собой дифференциальные уравнения в частных производных.

Экспериментальная модель представляет собой модифицированную модель А. М. Cassie и О. Mayr и построена на данных взятых в процессе коммутационных испытаний выключателей на напряжение 110–500 кВ в центре КЕМА. Однако, модель основана на обыкновенных дифференциальных уравнениях и позволяет описать лишь изменение основных параметров дуги – проводимости, тока и напряжения.

Во второй главе разработана и представлена математическая модель взаимодействия дуги с потоком элегаза в автокомпрессионном дугогасительном устройстве элегазового выключателя 110 кВ с двусторонним дутьем при отключении токов короткого замыкания. Модель представляет собой источник температурного нагрева на основе экспериментальных данных замера температуры ствола дуги при отключении симметричного тока короткого замыкания 10 кА. Также приведено описание методов численного решения уравнений газовой динамики, входящих в описание математической модели дуги отключения в программном комплексе численного моделирования Comsol Multiphysics 6.0 с использованием подвижной сетки.

Первоначально реализация численной модели проводилась на бездуговой коммутации элегазового выключателя. Данный этап необходим для настройки сетки расчетной области, правильного выбора параметров ее перестройки в условиях постановки задачи с подвижной сеткой, а также для правильной настройки решателя задачи газовой динамики с учетом турбулентности.

Для дополнительного подтверждения эффективности численного расчета газовой динамики с подвижной сеткой представлен аналитический расчет газодинамических параметров автокомпрессионного дугогасительного устройства элегазового выключателя 110 кВ. В результате аналитического расчета оценивается перепад давлений обеспечивающий надкритический режим истечения газа – отношение p_0/p_i , где i – шаг расчета; p_0 – начальное давление в

подпоршневой области. Основные допущения аналитического расчета следующие: нет подвода и отвода тепла при истечении газа (адиабатический процесс); процесс истечения газа имеет установившийся характер; потери на трение отсутствуют; газ считается идеальным; не учитывается взаимодействие газа с дугой.

Для аналитического расчета газодинамики необходимы следующие данные: полный ход поршня (контактов), скорость движения поршня от хода $V = f(l)$ – Рис. 1, сечение поршня, а также характеристики зависимости сечения выхода элегаза от хода контактов $S = f(l)$ – Рис. 2. Эти параметры взяты на основе размеров автокомпрессионного дугогасительного устройства элегазового выключателя 110 кВ с двусторонним дутьем.

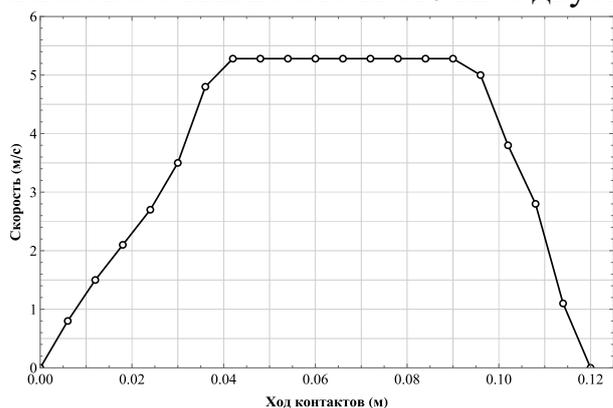


Рисунок 1 – График зависимости скорости движения поршня от хода

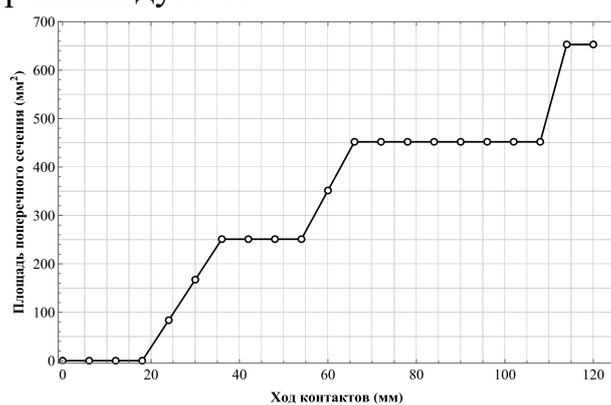


Рисунок 2 – График зависимости поперечного сечения выхода элегаза от хода поршня

На Рис. 3 представлен график зависимости хода контактов от времени при бездуговой коммутации, взятый из протокола типовых испытаний на механическую работоспособность исследуемого выключателя. Эта зависимость также используется в разработанном автором данного исследования численном решении газодинамической задачи с подвижной сеткой. Полное время отключения принято равным 55 мс (при этом время расхождения контактов 45 мс).

Путь протекания тока в дугогасительном устройстве выбранного выключателя приведен на Рис. 4: в закрытом состоянии большая часть тока протекает с токоведущей части ввода через розеточный контакт на трубу 10, переходя на главные контакты 1 и 3.

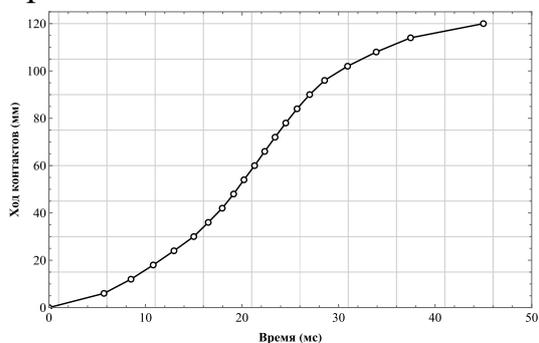


Рисунок 3 – График зависимости хода контактов от времени

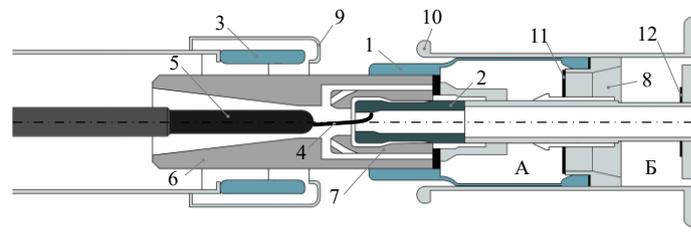


Рисунок 4 – Дугогасительное устройство элегазового выключателя 110 кВ

При размыкании главных контактов 1 и 9 ток течет также через трубу, но посредством проводящих частей проходит в дугогасительные контакты 2 и 5,

между которыми горит дуга 4, обдуваемая продольным потоком через малое сопло 7 и поперечным потоком через большое сопло 6. При отключении больших токов (>4 кА) в дутье в основном участвует большое сопло 6. Вследствие движения надпоршневой области неизменного объема А вместе с поршнем 8 возникает автокомпрессия подпоршневой области Б. В какой-то момент клапан 11 закрывается, интенсифицируя процесс дутья в область межконтактного промежутка.

Для реализации численного моделирования газа была выбрана модель турбулентности $k - \varepsilon$, которая в основном используется для моделирования дуги, горящей в сопле. Учитывая, что течение потока, гасящего дугу нестационарное, то система уравнений для вязкой и сжимаемой жидкости записывается в виде:

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \\ \rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} = -\nabla p + \nabla \cdot \left(\mu (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) - \frac{2}{3} \mu (\nabla \cdot \mathbf{u}) \mathbf{I} \right) + \mathbf{F}, \end{cases} \quad (15)$$

где ρ – плотность; \mathbf{u} – скорость газа м/с; t – время, с; p – давление, Па; \mathbf{F} – вектор объемной силы Н/м³; \mathbf{I} – интенсивность турбулентности.

Турбулентная кинематическая вязкость для модели $k-\varepsilon$: μ_T определяется:

$$\mu_T = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (16)$$

где ε – скорость турбулентного рассеивания (диссипация), м²/с³; C_μ – коэффициент турбулентной модели $k - \varepsilon$; k – турбулентная кинетическая энергия, м²/с².

Результирующие выражения $k - \varepsilon$ модели имеют следующий вид:

Уравнение переноса для турбулентной кинетической энергии k :

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho (\mathbf{u} \cdot \nabla) k = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho \varepsilon, \quad (17)$$

где P_k – параметр модели, константа.

Уравнение переноса для диссипации ε :

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho (\mathbf{u} \cdot \nabla) \varepsilon = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{1.3} \right) \nabla \varepsilon \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}, \quad (18)$$

где ε – параметр модели, константа, $C_{\varepsilon 1}, C_{\varepsilon 2}$ – константы интегрирования.

При этом компонент скорости деформации P_k вычисляется как:

$$P_k = \mu_T \left[\nabla \mathbf{u} : (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \mathbf{u})^2 \right] - \frac{2}{3} \rho k \nabla \cdot \mathbf{u}, \quad (19)$$

где «:» означает свертку тензоров.

В качестве граничных условий использовался учет вязких эффектов на стенке скольжения и, следовательно, наличие пограничного слоя. Отсутствие проскальзывания является граничным условием по умолчанию для моделирования сплошных стен. Нескользящая стенка – это стенка, в которой скорость жидкости относительно скорости стенки равна нулю. Для неподвижной стенки это означает, что $\mathbf{u} = 0$. С учетом того, что задача реализована с подвижными границами расчетной области (*moving wall*) математическое ограничение можно сформулировать так:

$$\mathbf{u}_{rel} \cdot \mathbf{n} = 0, \quad (20)$$

$$\mathbf{u}_{rel} = \mathbf{u} - \mathbf{u}_{tr}, \quad (21)$$

$$\mathbf{K} - (\mathbf{K} \cdot \mathbf{n})\mathbf{n} = 0, \quad (22)$$

$$\mathbf{K} = \mu(\nabla \mathbf{u}_{rel} + (\nabla \mathbf{u}_{rel})^T)\mathbf{n} \quad (23)$$

где \mathbf{u}_{rel} – относительная скорость; \mathbf{u}_{tr} – поступательная скорость.

Для турбулентного потока переменные турбулентности k и ε подчиняются однородным граничным условиям Неймана:

$$\nabla k \cdot \mathbf{n} = 0 \quad (24)$$

$$\nabla \varepsilon \cdot \mathbf{n} = 0 \quad (25)$$

В зависимости от геометрии канала спутного потока элегаза, обдувающего дугу и давления элегаза в дугогасительной камере числа Рейнольдса варьируются в пределах $(0,4 - 10) \cdot 10^6$. Реальный физический процесс дутья в дугогасительных устройствах выключателя сопровождается сверхзвуковыми течениями в пиковую фазу дугогашения. Поэтому физически выбор данной модели турбулентности объясняется принятием допущений о малых числах Маха (сжимаемый поток $Ma < 0,3$).

В качестве расчетной модели для численного расчета была разработана осесимметричная модель автокомпрессионного дугогасительного устройства элегазового бакового выключателя 110 кВ (Рис. 5).

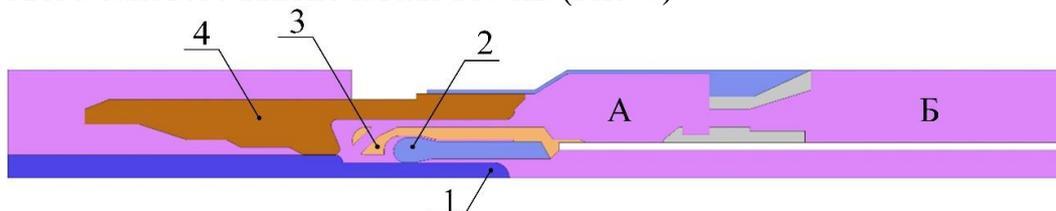


Рисунок 5 – Расчетная модель дугогасительного устройства:

- 1 – неподвижный дугогасительный контакт; 2 – подвижный дугогасительный контакт; 3 – малое сопло; 4 – большое сопло; А – надпоршневая область; Б – подпоршневая область

Численное моделирование производилось методом конечных элементов на основе подхода ALE (подвижная сетка), позволяющего решать уравнения, описывающие физический процесс в сеточной системе координат. Параметры приведены в Табл. 1, 2.

Таблица 1 – Параметры сетки расчетной модели (метод триангуляции)

Количество элементов	Количество вершин	Количество граничных элементов	Минимальная точность сетки	Средняя точность сетки
322 692	90	8 324	0,1030	0,8653

Таблица 2 – Параметры решателя расчетной модели на основе ALE-подхода

Качество сетки для запуска автоматической перестройки сетки	Время шага	Параметр остановки расчета	Максимальное число итераций	Допустимое отклонение
0,004	Стандартно	Допустимое отклонение	20	1

С помощью подвижной сетки можно изменять положение и форму сеточных элементов в близлежащих доменах пространственной системы

координат. Для решения уравнений газовой динамики с учетом движения подвижных частей (поршень и подпоршневава область, блок подвижного контакта, система сопел) используется расчетный модуль *Moving Mesh* в Comsol Multiphysics 6.0. В некоторых областях расчетной модели параметры сетки сильно различаются, поэтому было принято решение использовать функцию *Automatic Remeshing*, которая перестраивает расчетную сетку при достижения ее критически низкого качества. Необходимые постоянные и параметры для численного расчета приведены в Табл. 3.

Таблица 3 – Параметры модели численного расчета газодинамики

Описание параметра	Обозначение	Значение
Давление среды внутри аппарата	p	0,42 МПа
Начальная скорость потока	u	0 м/с
Температура окружающей среды	T	313 К
Константа интегрирования 1 ($k-\varepsilon$ модель)	$C_{\varepsilon 1}$	1,44
Константа интегрирования 2 ($k-\varepsilon$ модель)	$C_{\varepsilon 2}$	1,92
Коэффициент турбулентной модели $k-\varepsilon$	C_{μ}	0,09
Параметр $k-\varepsilon$ модели (турбулентная кинетическая энергия)	σ_k	1
Параметр $k-\varepsilon$ модели (скорость турбулентного рассеивания)	σ_{ε}	1,3
Постоянная фон Кармана	k_v	0,41

Третья глава посвящена описанию и анализу результатов численного моделирования с использованием подвижной сетки процессов коммутации автокомпрессионного элегазового выключателя 110 кВ с двусторонним дутьем при взаимодействии дуги отключения с потоком элегаза и без его учета.

Результаты расчетов представляются в виде полей профилей скоростей, давлений и температуры по мере движения контактной системы дугогасительного устройства при отключении токов короткого замыкания.

На Рис. 6 и 7 в цвете показан элегаз и соответствующее изменение зависимых переменных (скорость, давление, температура), а белым цветом показаны твердые элементы дугогасительного устройства, участвующие в движении (сопла, дугогасительный подвижный контакт, предпоршневые области). Также приведены графики изменения давления и массового расхода в подпоршневой области как численно, так и аналитически. Последнее используется для анализа истечения газа при бездуговой коммутации выключателя (режим «холостого хода»).

На Рис. 6 представлено поле скоростей газа без учета дуги (модель турбулентности $k - \varepsilon$) по мере расхождения контактов. В некоторые моменты скорость газа внутри полости подвижного контакта превышает скорость газа в большом сопле. Но даже в этом случае основной объем газа вытекает через сопло, т.к. площадь сечения сопла больше площади сечения области внутри подвижного контакта. На Рис. 7 представлено поле давления газа без учета воздействия дуги. Можно заметить увеличение давления в подпоршневой и надпоршневой областях (считается, что клапан между ними отсутствует). При действительном отключении тока короткого замыкания клапан между областями в какой-то момент закрывается, и гашение дуги, в основном, осуществляется дутьем из надпоршневой области. Также на Рис. 7 видно, что в основном давление в

межконтактном промежутке нагнетается после открытия большого сопла (ход контактов 90 мм).

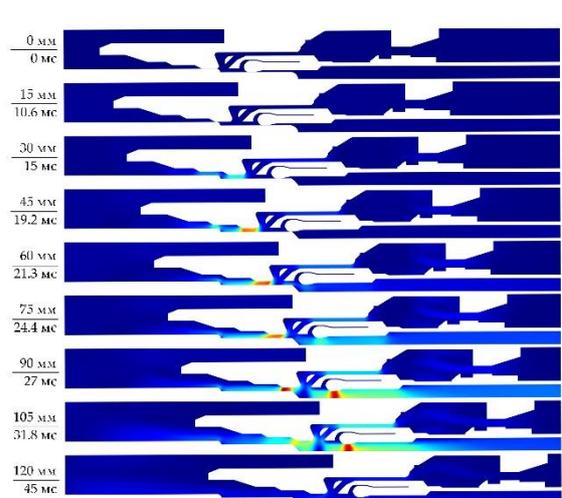


Рисунок 6 – Поле скоростей (м/с) без учета дуги (слева – ход и время расхождения контактов)

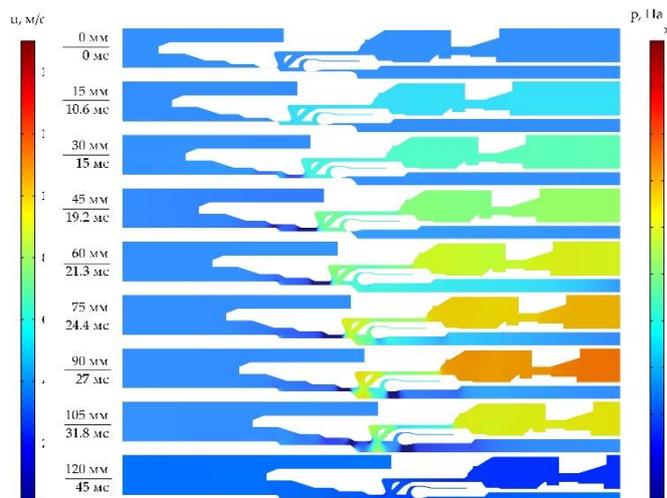


Рисунок 7 – Поле давлений (Па) без учета дуги (слева – ход и время расхождения контактов)

Реализация численной модели дуги через задание источника температурного нагрева основывается на создании дополнительного элемента – линии (в осесимметричной постановке) в области с газом межконтактного промежутка (Рис. 8) с температурными характеристиками ствола дуги (Рис. 9), полученными из эксперимента отключения симметричного тока короткого замыкания 10 кА согласно работе S. Bai и др. «Arc Shape and Arc Temperature Measurements in SF6 High-Voltage Circuit Breakers Using a Transparent Nozzle» (2018 г.). Параметры графика использовались в качестве исходных данных для верификации разработанной автором модели.

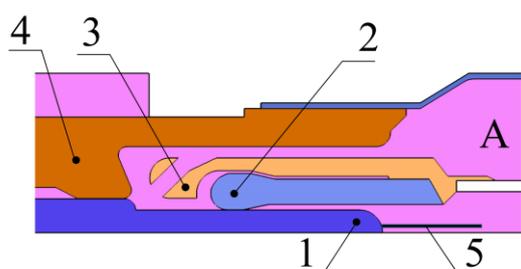


Рисунок 8 – Дополнительная линия для учета адаптивного тепловыделения

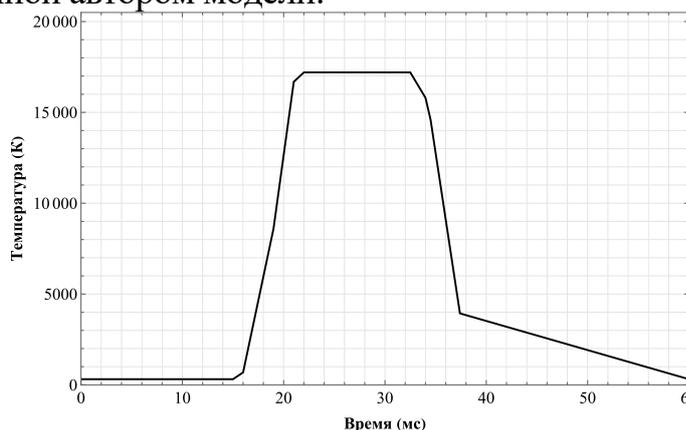


Рисунок 9 – График изменения температуры ствола дуги от времени (симметричный ток 10 кА)

Длительность прикладывания температуры к подвижной линии задана с предположением о том, что дуга горела 2 полупериода промышленной частоты (т. е. 20 мс). При этом использовалось допущение – изменением температуры в окрестности нуля тока было решено пренебречь. В данном диссертационном исследовании акцент сделан на моделирование процессов

дугогашения до момента погасания дуги и процессы восстановления электрической прочности не рассматривались.

На границах линии 5 (Рис. 8) задается температура ствола дуги. Особенностью разработанной модели является тот факт, что линия движется вместе с подвижным контактом до момента размыкания контактов (подвижная сетка). После размыкания контактов верхняя точка линии фиксируется, и она удлиняется вслед за подвижным контактом. В трехмерной картине данная линия представляется цилиндрической дугой, на поверхности которой, экспериментально задана температура. Таким образом, реализуется нагрев газа в межконтактном промежутке, т.к. между линией и газом вокруг будет совершаться теплообмен по мере расхождения контактов.

При добавлении источников нагрева в модель к решению уравнений для газодинамики добавляется уравнение теплового баланса:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot \mathbf{q} = Q + Q_p + Q_{vd}, \quad (26)$$

где C_p – удельная теплоемкость при постоянном давлении, Дж/(кг·К); \mathbf{q} – тепловой поток за счет теплопроводности, Вт/м²; Q – источник тепла отличный от вязкого рассеивания, Вт/м³; Q_p – работа, выполняемая изменением давления, является результатом нагрева при адиабатическом сжатии, а также некоторых термоакустических эффектов, Вт/м³; Q_{vd} – вязкая диссипация в жидкости, Вт/м³.

$$Q_p = \alpha_T T \left(\frac{\partial p}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla p \right), \quad (27)$$

где α_T – коэффициент теплового расширения, 1/К:

$$\alpha_T = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial T}, \quad Q_{vd} = \tau: \nabla p, \quad \mathbf{q} = -k \nabla T. \quad (28)$$

где τ – тензор вязких напряжений, Па.

На Рис. 10 представлены графики изменения давления в подпоршневой области от хода контактов для аналитического и численного расчетов. Численный расчет велся с учетом турбулентной модели $k - \varepsilon$ как с влиянием дуги (модель температурного нагрева, отключение симметричного тока 10 кА), так и без нее. Видно, что пик давления приходится на момент торможения хода контактов $t = 27$ мс. Снижение давления можно объяснить тем, что скорость сжатия газа замедляется, в то время как массовый расход продолжает увеличиваться. Графики массового расхода через сечение подпоршневой области представлен на Рис. 11.

Можно заметить, что кривая расхода привязана к поперечному сечению областей, которые элегаз проходит на пути к межконтактному промежутку, как и в аналитической модели. Различия обуславливаются менее линейными переходами при увеличении площади поперечного сечения движения элегаза по ходу движения контактной системы вследствие учета турбулентности. Увеличение массового секундного расхода по ходу контактов обуславливается постепенным увеличением суммарной площади поперечного сечения движения элегаза при гашении из подпоршневой области, т. е. предполагается, что элегаз в зону гашения дуги движется беспрепятственно и его скорость зависит только от площади поперечного сечения проходимых областей.

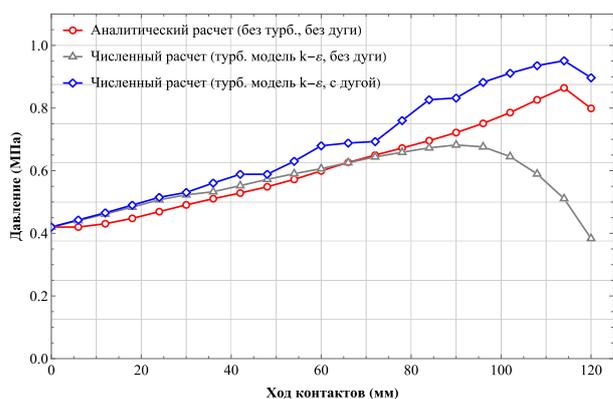


Рисунок 10 – Графики изменения давления в подпоршневой области от хода контактов

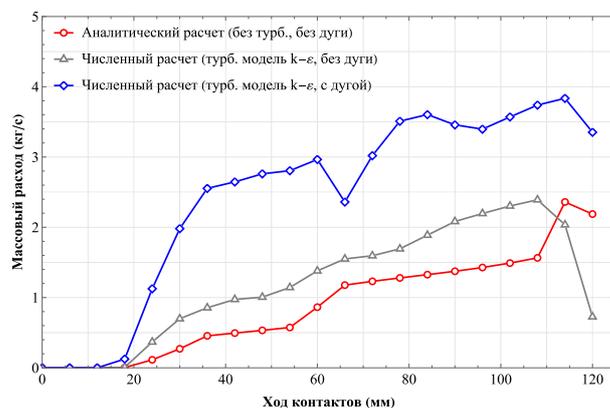


Рисунок 11 – Графики изменения массового расхода через сечение подпоршневой области

На Рис. 12 представлены графики изменения скорости газа в сопле, а именно в самой узкой его части (зона открытия контактов). До определенного момента времени ($t_{\text{крит}} = 19,13$ мс) скорость газа растет, затем становится стабильной и можно считать, что скорость достигла своего критического значения. Принимаем $t_{\text{крит}}$ – критической точкой, промежуток времени до этой точки – подкритическим режимом истечения газа, после этой точки – надкритическим. Колебания скорости происходят из-за дополнительного истечения газа в область открывшегося сечения внутри подвижного контакта.

На Рис. 13 представлено поле скоростей газа с учетом задания дуги в форме источника температурного нагрева. Скорость газа при размыкании достигает сверхзвуковых значений (скорость звука в элегазе в нормальных условиях 130–135 м/с, а при повышении давления среды увеличивается). Для процесса дугогашения это является благоприятным фактором, т. к. происходит интенсификация охлаждения плазменного канала дуги отключения. Однако, образуется локальная область вдоль неподвижного дугогасительного контакта, где скорости превалируют, что обусловлено сделанным допущением в расчетной модели – была исключена основная часть дугогасительного подвижного контакта. Таким образом считается, что основное дутье направлено через большое сопло (отключение токов короткого замыкания >4 кА).

На Рис. 14 представлено поле давлений газа с учетом задания дуги в форме источника температурного нагрева. При отключении такого тока давление повышается примерно в 2,0–2,5 раза от номинального значения (0,5 МПа) и достигает примерно 1,0–1,5 МПа для дугогасительных устройств автокомпрессионного типа.

На Рис. 15 представлена картина изменения температурного профиля в дугогасительном устройстве при отключении. В отличие от бездугового режима здесь происходит явное изменение потока элегаза в межконтактном промежутке вследствие возникновения областей стагнации потока. Локальный нагрев области вдоль неподвижного дугогасительного контакта происходит из-за сделанного допущения, описанного выше.

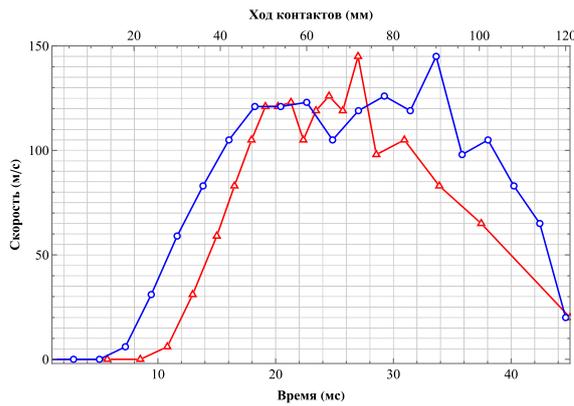


Рисунок 12 – Графики изменения скорости в наименьшем сечении сопла от времени и от хода контактов

Для сравнения с экспериментальными данными отключения симметричного тока 25 кА произведена адаптация изменения температуры с 10 кА согласно диссертационной работе Y. Pei «Computer Simulation of Fundamental Processes in High Voltage Circuit Breakers Based on an Automated Modelling Platform» (2014 г.) для времени горения дуги равного 20 мс.

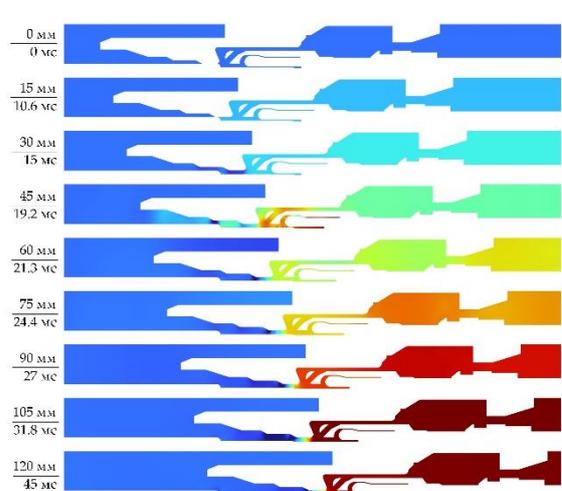


Рисунок 14 – Поле давлений (Па) с учетом дуги – отключение симметричного тока 10 кА (слева – ход и время расхождения контактов)

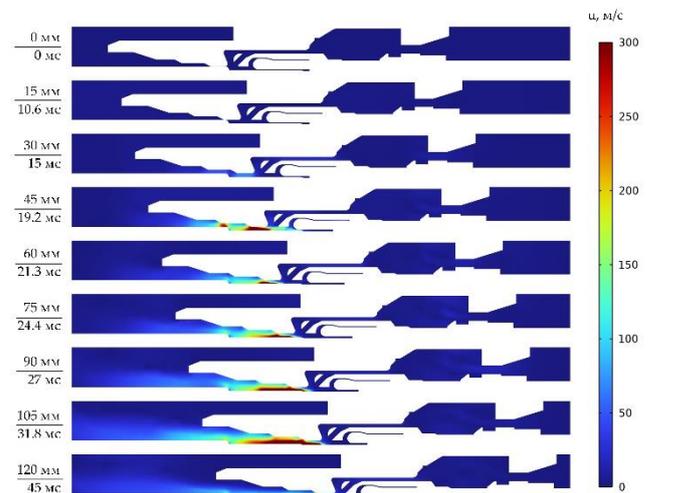


Рисунок 13 – Поле скоростей (м/с) с учетом дуги – отключение симметричного тока 10 кА (слева – ход и время расхождения контактов)

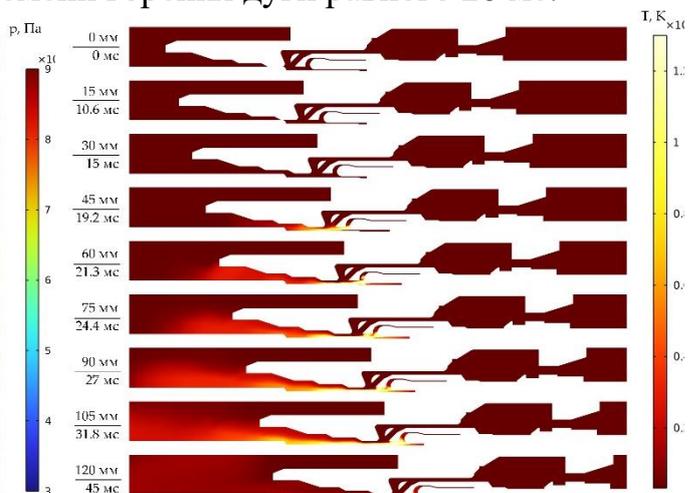


Рисунок 15 – Поле температур (К) газа с учетом дуги – отключение симметричного тока 10 кА (слева – ход и время расхождения контактов)

Точность разработанной модели определялась в сравнении с экспериментом по отключению симметричного тока 25 кА автокомпрессионным дугогасительным устройством 110 кВ из исследования J. J. Gonzalez и др. «PTFE Vapor Contribution to Pressure Changes in High-Voltage Circuit Breakers» (2015 г.) через определение коэффициента детерминации R^2 по изменению давления в подпоршневой области. Из Рис. 16 видно, что разработанная модель в форме источника температурного нагрева

имеет хорошее качество в сравнении с экспериментом J. J. Gonzalez ($R^2 = 0,997$). На Рис. 17 представлена экспериментально полученная вольт-амперная характеристика (ВАХ) электрической дуги при отключении симметричного тока 25 кА.

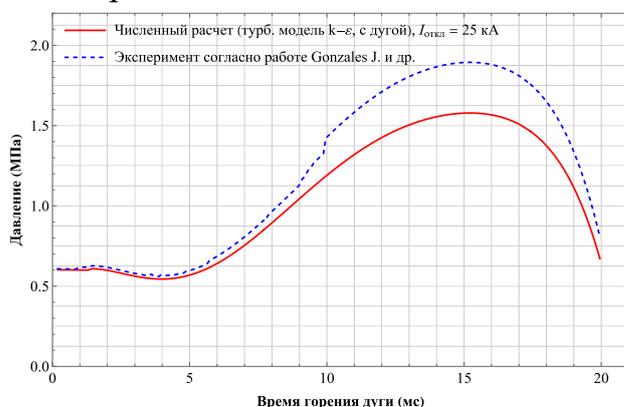


Рисунок 16 – График изменения давления в подпоршневой области

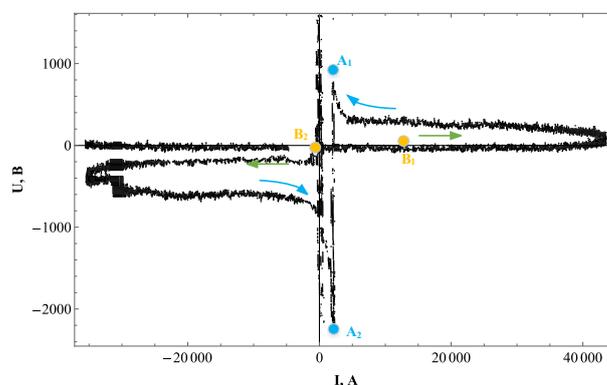


Рисунок 17 – ВАХ дуги при отключении симметричного тока 25 кА

В четвертой главе представлены результаты использования разработанной математической модели процесса дугогашения на примере расчета остаточного коммутационного ресурса во время отключения элегазового выключателя 110 кВ на основе записанных осциллограмм тока и сигнала с электромагнита отключения (ЭМО) с помощью программного обеспечения анализа аварийных осциллограмм ЭКРА Waves.

Наличие записи сигнала с ЭМО позволяет наложить осциллограммы тока отключения на дискретные сигналы с моментом срабатывания электромагнита, тем самым оценить время горения дуги для каждой коммутации выключателя.

В случае отсутствия терминала ЭКРА с выведенными дискретными сигналами для ЭМО исследовались записанные данные с регистратора аварийных событий (РАС) «АУРА». В этом случае время горения дуги приблизительно оценивалось как разница между «реле положения включено – РПВ» (выключатель включен) и «реле положения отключено – РПО» (выключатель отключен), что свидетельствует о наличии или отсутствии КЗ.

Объектом исследования являлся выключатель ВЭБ-110П-40/2500 (2014 г. выпуска), установленный на ОРУ 110 кВ реальной подстанции. В Табл. 4 приведены данные, записанные с регистратора аварийных событий за период 2015–2023 гг. (в период 2021–2023 гг. срабатываний не было) при отключении токов короткого замыкания исследуемым выключателем. Рассматривалось отключение фазы С за выбранный период.

Расчет остаточного ресурса выключателя велся по 2-м методикам:

Методика 1. Согласно работе M. Claessens и др. «A computational fluid dynamics simulation of high- and low-current arcs in self-blast circuit breakers» (1997 г.). Суть методики заключается в расчете скорости массовой абляции фторопластового сопла в соответствии со следующим выражением:

$$\frac{dm}{dt} = \delta \cdot u \cdot i \quad (29)$$

где u – напряжение дуги, i – ток дуги, δ – масса абляции на единицу энергии, равная 15 мг/кДж при отключении симметричного тока 25 кА.

Таблица 4 – Данные с РАС за период 2015–2023 гг.

Дата аварийного события		Вид КЗ	$t_{кз}$, мс	I_A , кА	I_B , кА	I_C , кА	$3I_0$, кА	t_0 , мс
2015	апрель	С-0	161,5	0,044	0,0252	8,301	8,438	14,8
	ноябрь	С-0	162,7	0,0407	0,0157	9,076	9,203	14,8
2018	октябрь	С-0	160,6	0,0416	0,0139	8,838	8,969	29,4
2020	май	В-С	138,1	0,0467	12,65	12,54	0,0234	15,6
	июль	А-0	164,1	10,61	0,07	2,307	8,923	16,5

Напряжение u и ток i дуги определяются согласно экспериментально снятой ВАХ дуги при отключении симметричного тока 25 кА автокомпрессионным дугогасительным устройством 110 кВ (Рис. 17). Чтобы произвести пересчет массы абляции на единицу энергии δ при отключении различных токов используется предположение (что показано на Рис. 18 и 19):

$$\delta(T_{\text{дуги}}) \sim \delta(T_{\text{исп}}), \quad (30)$$

где $T_{\text{дуги}}$ – температура ствола дуги, $T_{\text{исп}}$ – температура испарения поверхности фторопластового сопла.

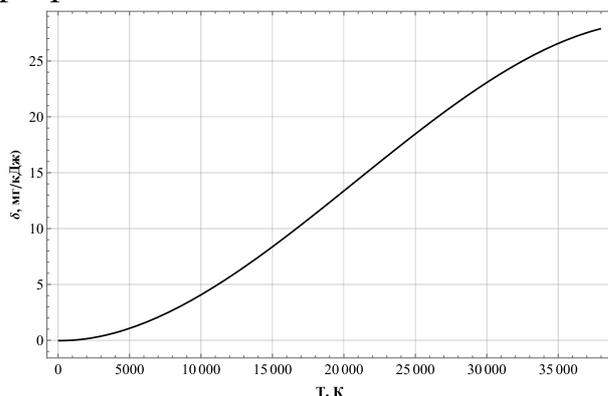


Рисунок 18 – График изменения массы абляции на единицу энергии от температуры ствола дуги

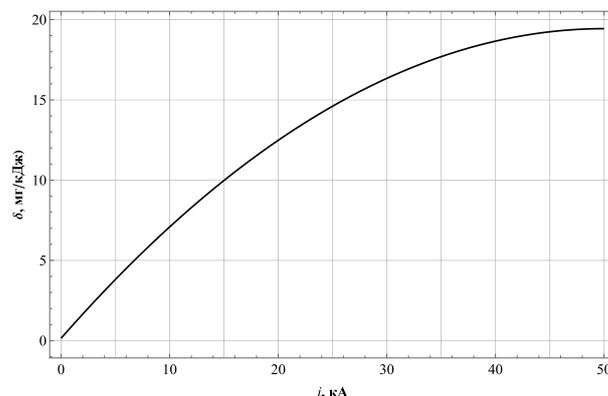


Рисунок 19 – График изменения массы абляции на единицу энергии от симметричного тока отключения

При расчетах по данной методике используется только периодическая составляющая тока отключения (симметричный ток). Расчет остаточного коммутационного ресурса исследуемого выключателя (один полюс – фаза С) через фактическое время горения дуги ведется по формуле:

$$R_{\text{ост1}} = \left[1 - \sum_{i=1}^m \frac{n_i}{N_i} \right] \cdot 100\%, \quad (31)$$

где dm_i – масса абляции по (29); m_i – максимальная масса абляции (масса большого сопла в мг).

Методика 2. Расчеты по данной методике ведутся согласно руководству по эксплуатации выключателя ВЭБ-110П-40/2500 (раздел «Определение коммутационной стойкости $N(I)$ и коммутационного ресурса

выключателей»). На основании фиксации текущего значения тока коммутации I_t , для каждой фазы и последующем вычислении величины текущего сработавшего ресурса каждой фазы выключателя P_t при этой коммутации. Вычисленная величина текущего сработавшего ресурса P_t суммируется с ранее накопленным сработанным ресурсом P_c для каждой из фаз и получается пофазная величина отработавшего ресурса:

$$N(I) = \frac{24\,500}{(I - 0,94)^2} + 4, \text{ при } 2\,500 \text{ А} < I < 40\,000 \text{ А}; \quad (32)$$

$$N(I) = 5\,000 \text{ при } I < 2\,500 \text{ А}; \quad (33)$$

где $N(I)$ – количество операций отключения I , которое может выполнить полюс выключателя без ремонта его контактной системы до полного исчерпания им своего коммутационного ресурса; I – текущее действующее значение тока отключения полюсом выключателя, кА.

Расчет остаточного коммутационного ресурса исследуемого выключателя (один полюс – фаза С) через среднее время горения дуги ведется по формуле из руководства по эксплуатации данного выключателя:

$$R_{\text{ост1}} = \left[1 - \sum_{i=1}^m \frac{n_i}{N_i} \right] \cdot 100\%, \quad (34)$$

где n_i – количество выполненных полюсом выключателя операций отключения тока I_i ; N_i – допустимое количество отключений тока I , которое может выполнить полюс выключателя согласно (32) и (33).

В Табл. 5 представлены результаты расчета остаточного ресурса анализируемого выключателя.

Таблица 5 – Результаты расчета остаточного ресурса

Дата аварийного события		I_c , кА	t_{∂} , мс	$R_{\text{ост1}}$, %	$R_{\text{ост2}}$, %
2015	апрель	8,301	14,8	99,986	99,781
	ноябрь	9,076	14,8	99,976	99,513
2018	октябрь	8,838	29,4	99,965	99,261
2020	май	12,54	15,6	99,960	98,724
	июль	2,307	16,5	99,622	98,704
2023	–	–	–	99,622	98,704

Полученные результаты в рамках диссертационного исследования подтверждают, что разработанная модель может быть использована для моделирования взаимодействия потока элегаза с дугой отключения в дугогасительном устройстве элегазового выключателя при отключении токов короткого замыкания с учетом подвижных границ расчетных областей (ALE - подход).

В качестве возможного применения разработанной модели представлен расчет остаточного коммутационного ресурса выключателя. Преимущество использования представленной модели в этом случае заключается в привязке выделяемого тепла, воздействующего на сопло к времени горения дуги, и в возможности детально проследить за физическим процессом гашения дуги в дугогасительном устройстве.

В заключении изложены основные результаты работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. Произведен анализ существующих моделей и подходов, описывающих течения, гасящего дугу элегаза в дугогасительном устройстве при отключении токов короткого замыкания, и выявлено, что не существует универсального подхода к математическому моделированию процессов взаимодействия дуги отключения с обдувающим ее неизотермическим потоком газа в элегазовых выключателях высокого напряжения, который, с одной стороны, в достаточной мере описывает физику низкотемпературной плазмы в дуге отключения, а, с другой – является минимально затратным с вычислительной точки зрения.

2. Предложен новый подход к моделированию взаимодействия потока элегаза с дугой отключения в дугогасительном устройстве элегазового выключателя при отключении токов короткого замыкания с учетом подвижных границ расчетных областей – на основе ALE-подхода.

3. Впервые разработана модель взаимодействия дуги отключения с обдувающим ее неизотермическим потоком элегаза в автокомпрессионном дугогасительном устройстве элегазового выключателя 110 кВ, представленная в виде источника температурного нагрева, на основе экспериментальных данных по замеру температуры ствола дуги при отключении симметричного тока короткого замыкания с использованием ALE-подхода.

4. Произведено сравнение разработанной модели взаимодействия потока элегаза с дугой отключения в виде источника температурного нагрева с экспериментальными измерениями давления в дугогасительном устройстве автокомпрессионного элегазового выключателя 110 кВ при отключении симметричного тока короткого замыкания 25 кА и выявлено, что разработанная модель имеет высокую точность, поскольку коэффициент детерминации R^2 при сравнении с экспериментальными данными составил 0,997.

5. Показано, что разработанную математическую модель взаимодействия потока элегаза с дугой отключения, заданную в виде источника температурного нагрева по экспериментальным замерам ствола дуги, можно использовать для расчета остаточного коммутационного ресурса выключателя. Преимущество использования данной модели в этом случае заключается в привязке выделяемого тепла, воздействующего на сопло, к времени горения дуги и в возможности детально проследить за физическим процессом гашения дуги в дугогасительном устройстве.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ:

1. Chernskutov, D. Analysis of SF6 circuit breakers failures related to missing current zero. part II / D. Chernskutov, V. Popovtsev, S. Sarapulov // Proceedings of the 2020 Ural Smart Energy Conference, USEC 2020, Ekaterinburg, 13–15 ноября 2020 года. – Ekaterinburg, 2020. – P. 55–58. 0,25 п.л. / 0,10 п.л. (Scopus).

2. Chernskutov, D. Analysis of SF6 circuit breakers failures related to

missing current zero. part I / D. Chernoskutov, **V. Popovtsev**, S. Sarapulov // Proceedings of the 2020 Ural Smart Energy Conference, USEC 2020, Ekaterinburg, 13–15 ноября 2020 года. – Ekaterinburg, 2020. – P. 51–54. 0,25 п.л. / 0,10 п.л. (Scopus).

3. **Popovtsev, V.** Fluid Dynamics Calculation in SF6 Circuit Breaker During Breaking as a Prerequisite for the Digital Twin Creation. / **Popovtsev, V.**, Khalyasmaa, A.; Patrakov, Y. // *Axioms* 2023, Vol. 12, № 7, 623. 0,9 п.л. / 0,30 п.л. (Scopus, WoS).

4. **Поповцев, В. В.** Численное моделирование взаимодействия дуги отключения с потоком элегаза в автокомпрессионном дугогасительном устройстве элегазового выключателя 110 кВ. / **Поповцев, В. В.**, Хальясмаа, А. И., Патраков, Ю. В. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2023. Т. 23. № 2. С. 106–118. 0,40 п.л. / 0,30 п.л.

Другие публикации:

5. Патраков, Ю. В. Моделирование мультифизических процессов при коммутации элегазового выключателя как предпосылка к созданию цифрового двойника / Ю. В. Патраков, **В. В. Поповцев** // Актуальные проблемы развития технических наук: Сборник статей участников XXV Областного конкурса научно-исследовательских работ «Научный Олимп» по направлению «Технические науки». – Екатеринбург: УрФУ, 2022. – С. 28–33. 0,2 п.л. / 0,1 п.л.

6. Демкович, В. В. Исследование альтернативных экологичных дугогасящих сред в качестве замены элегазу в коммутационных высоковольтных аппаратах / В. В. Демкович, **В. В. Поповцев** // Актуальные проблемы развития технических наук: Сборник статей участников XXV Областного конкурса научно-исследовательских работ «Научный Олимп» по направлению «Технические науки». – Екатеринбург: УрФУ, 2022. – С. 46–51. 0,30 п.л. / 0,20 п.л.

7. **Поповцев В.В.** Моделирование газодинамических процессов при отключении элегазового выключателя / Поповцев В., Патраков Ю., Демкович В. // Электротехнические комплексы и системы: материалы Международной научно-практической конференции: в 2 томах [Электронный ресурс] / Уфимск. ун-т науки и технологий. – Уфа: УУНиТ, 2022. – С. 327–341. 0,40 п.л. / 0,25 п.л.

Поповцев Владислав Викторович

Синтез математических моделей дуги отключения при коммутации элегазовых выключателей высокого напряжения

Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук

Подписано в печать ____ . ____ . ____ . Заказ № ____

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.

Типография _____