

## ОТЗЫВ

официального оппонента Самусенко Андрея Викторовича на диссертацию Поповцева Владислава Викторовича на тему «Синтез математических моделей дуги отключения при коммутации элегазовых выключателей высокого напряжения», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

### На отзыв представлены:

- Диссертация «Синтез математических моделей дуги отключения при коммутации элегазовых выключателей высокого напряжения», содержащая введение, четыре главы, заключение, перечень сокращений и условных обозначений, список литературы из 237 наименований, общим объемом 118 страниц, включая 38 рисунков и 12 таблиц.
- Автореферат диссертации.

### Актуальность темы диссертации

В настоящее время компьютерное моделирование физических процессов широко используется в разработке технических устройств, позволяя сократить число циклов натурных испытаний, ускорить перебор вариантов конструкции. Моделирование дуговых явлений – сложная задача. В современной научной литературе широко представлены работы, тематика которых связана с поиском новых подходов к расчету дуговых явлений.

**Цель диссертации** – разработка 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

При решении поставленных в диссертации **задач** использованы современные методы исследований. Для разработки расчетной численной модели взаимодействия дуги отключения с обдувающим ее потоком элегаза в автокомпрессионном дугогасительном устройстве элегазового выключателя 110 кВ использовался программный комплекс численного моделирования Comsol Multiphysics 6.0 с учетом турбулентных потоков по модели  $k-\varepsilon$  с использованием

Arbitrary Lagrangian – Eulerian (ALE)-подхода (подвижной сетки). Разработан подход к численному моделированию динамических процессов (с учетом кривой хода контактов) взаимодействия дуги отключения с обдувающим ее потоком элегаза в автокомпрессионном дугогасительном устройстве элегазового выключателя 110 кВ, представленной в виде источника температурного нагрева.

### **Оценка содержания и оформления диссертации**

Диссертация написана ясно, использованная терминология и стиль соответствуют общепринятым нормам. Структура диссертации традиционная, имеет внутреннее единство, по каждой главе и диссертации в целом сделаны выводы, которые отражают результаты работы. При использовании в тексте диссертации результатов других авторов сделаны соответствующие ссылки.

**Во введении** обоснована актуальность темы и приведено описание решаемой проблемы. Сформулированы цели и задачи работы.

**В первой главе** («обзор литературы») проведен анализ существующих математических моделей и подходов к моделированию процессов взаимодействия дуги отключения и обдувающему ее потоку элегаза в различных режимах отключения токов короткого замыкания элегазовых выключателей 110 кВ.

**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.

**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.

**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 с помощью программного обеспечения анализа аварийных осциллограмм ЭКРА Waves.

**В заключении** изложены основные результаты работы, а также перспективные направления исследований в области математического моделирования дуги отключения при коммутации элегазовых выключателей высокого напряжения.

### **Научная новизна**

Заключается прежде всего в новом подходе к моделированию взаимодействия потока газа с дугой отключения в дугогасительном устройстве элегазового выключателя при отключении токов короткого замыкания на основе подвижной сетки, в рамках которого влияние дуги на поток газа учитывается при помощи фиксации температуры на линии предполагаемого замыкания.

**Теоретическая и практическая значимость работы** заключается в создании расчетной численной модели взаимодействия потока элегаза с дугой отключения в автокомпрессионном дугогасительном устройстве элегазового выключателя 110 кВ, в достаточной (для решения задачи оптимизации конструкции) мере, отражающей динамику физических процессов.

**Достоверность основных выводов и результатов работы** получена при корректном и обоснованном применении разработанной математической модели взаимодействия потока элегаза с дугой отключения в автокомпрессионном дугогасительном устройстве элегазового выключателя 110 кВ и подтверждаются согласованностью с экспериментальными данными.

**Соответствие диссертации паспорту научной 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».

**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.

**Соответствие автореферата содержанию диссертации.** Автореферат в полной мере отражает содержание и основные положения диссертации.

Среди сильных сторон диссертационной работы следует назвать анализ факторов, влияющих на течение газа в процессе отключения, позволивший объяснить особенности зависимости давления в подпоршневой области от времени. Следует отметить, что достигнутое отклонение расчетной величины давления от экспериментальной свидетельствует о хорошей точности модели (если сопоставлять с аналогичными по сложности задачами в современной литературе). Также необходимо отметить тщательно проведенный обзор литературы – список литературы содержит 237 библиографических ссылок.

Вместе с тем есть **замечания** к работе:

1. На стр. 14 диссертации указано: «Другими словами, к выключателю одновременно предъявляются противоречивые требования: с одной стороны, в аварийных режимах при протекании ТКЗ выключатель должен их отключать и обеспечивать бесконечно большое сопротивление между дугогасительными контактами [193–195]. С другой стороны, в нормальных режимах через его контактную систему протекают рабочие токи и его сопротивление должно быть бесконечно малым, чтобы избежать излишних потерь электроэнергии [193].». Поскольку «бесконечно» малых и больших сопротивлений на практике не бывает, возможно, корректнее было бы сформулировать, например, «должно быть по возможности малым».

2. На стр. 85 диссертации в разделе «4.4. Выводы по четвертой главе» дан вывод: «Полученные результаты подтверждают, что разработанная модель может быть использована для моделирования взаимодействия потока газа с плазменным каналом дуги отключения в ДУ элегазового выключателя при отключении ТКЗ с учетом подвижных границ расчетных областей (подвижной сетки) для дальнейшего расчета остаточного коммутационного ресурса элегазовых выключателей.». Насколько широк диапазон конструкций, в которых можно опираться на экспериментально измеренную зависимость температуры по [179], которая заложена в модель (Глава 3)?

3. В монографии [Базелян Э.М., Райзер Ю.П. Искровой разряд. М.: изд-во МФТИ, 1997. 320 с.] В разделе «2.8 Температура и вольт-амперная характеристика столба равновесной плазмы с током» рассматривается модельная задача об «одномерном плазменном столбе, стационарное состояние в котором поддерживается благодаря компенсации выделения джоулева тепла тока,  $W = iE$  на единицу длины, теплоотводом в охлаждаемую коаксиальную трубку радиусом  $R$  .». В данном рассмотрении установившаяся температура в центре плазменного столба определяется не только током и напряжением на дуге, но и тепловым сопротивлением окружающей дугу среды (в модельной задаче оно определяется радиусом охлаждаемой трубки, в которую помещена дуга). Поскольку в модели, описанной в диссертации, дуга горит не в большом объеме газа, а в существенно ограниченном стенками камеры объеме, не будет ли температура дуги зависеть и от расстояния от дуги до стенки?

4. На стр. 61 диссертации указано: «При численном расчете с учетом движения контактной системы ДУ сложно реализовать цилиндрическую имитацию дуги, так как ее геометрические размеры должны изменяться во времени. С целью упрощения построения модели было решено не создавать дополнительный замкнутый геометрический элемент, а добавить источник адаптивного тепловыделения внутри области с газом с температурными характеристиками ствола дуги, полученными по результатам эксперимента отключения симметричного ТКЗ 10 кА согласно работе [179]». При том что в Главе 1 обсуждаются разные подходы к моделированию дуги, при вводе в модель адаптивного тепловыделения в Главе 3 не дается комментариев, почему допустимо использовать выбранный подход. Представляется, что допустимость той или иной модели существенно зависит от того, расчет каких свойств для нас важен.

5. На стр. 81 диссертации указано: «Методика 1. Суть методики [112] заключается в расчете скорости массовой абляции фторопластового сопла в соответствии со следующим выражением:  $dm/dt = \delta \cdot u \cdot i$ ». Если принимается данная формула, то для расчёта массы абляции (а значит и ресурса) достаточно измеренной ВАХ. Если так, какую роль в расчете по этой методике играет модель дуги, рассмотренная в Главе 3?

6. Сравняется ли предложенная модель с известными моделями осесимметричной дуги, описанными в Главе 1 – в простых конфигурациях, где осесимметричное приближение применимо? Представляется интересным сравнить погрешность этих моделей по основным расчетным параметрам.

7. Учтен ли в модели теплоперенос за счет излучения, который может быть существенен в дуге? Если нет, какие можно высказать соображения о пределах применимости такого допущения (допущения о том, что теплопереносом за счет излучения можно пренебречь)?

8. На стр. 62 диссертации указано: «На Рисунке 21 приведена расчетная модель с учетом адаптивного тепловыделения. На границах линии 5 задается температура ствола дуги согласно работе [179] (отключение тока 10 кА), адаптированная под отключение симметричного тока 25 кА согласно работе [174].». Задается ли на линии условие фиксированной температуры? Если все же на линии задается условие линейной плотности тепловыделения – какой формулой она описана?

9. На стр. 59 диссертации сформулирован вывод по Главе 1: «Реализована численная модель работы автокомпрессионного ДУ элегазового выключателя 110 кВ в ПК Comsol Multiphysics 6.0 без учета взаимодействия с дугой отключения (режим «холостой ход»). Произведен учет турбулентных течений газа по моделям  $k - \varepsilon$  и  $k - \omega$ . По результатам расчетов для дальнейшего анализа процесса взаимодействия потока элегаза с дугой отключения принята модель  $k - \varepsilon$ ». Из текста диссертации осталось неясным, чем обоснован выбор  $k - \varepsilon$  модели?

Перечисленные замечания и вопросы не носят принципиального характера и не умаляют достоинств и положительного впечатления от диссертации.

### **Заключение**

Опираясь на актуальность выбранной темы, степень обоснованности научных положений, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, их достоверность и новизну, рассматриваемая диссертационная работа «Синтез

математических моделей дуги отключения при коммутации элегазовых выключателей высокого напряжения» соответствует паспорту научной специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы.

Представленная диссертация производит хорошее впечатление, написана логически грамотно и понятным научным языком. Исследования проведены на высоком научном уровне и соответствуют передовым современным исследованиям в области физики дугового разряда. Выводы, сделанные диссертантом в заключении, обоснованы в тексте диссертации.

Диссертация удовлетворяет всем требованиям, установленным в пункте 9 Положения о присуждении ученых степеней в ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Поповцев Владислав Викторович заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы.

### Официальный оппонент

кандидат технических наук (кандидатская диссертация защищена по специальности 2.4.4. Электротехнология и электрофизика), доцент кафедры радиофизики Физического факультета федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет»

 Самусенко Андрей Викторович

Дата составления отзыва «13» марта 2024 г.

199034, г. Санкт-Петербург, Университетская набережная, д. 7/9

Телефон: +7-911-117-59-96

e-mail: a.samusenko@spbu.ru

Я, Самусенко Андрей Викторович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой Диссертационного совета, и их дальнейшую обработку

Подпись Самусенко А. В. заверяю:

И.о. начальника  
отдела кадров № 3  
И.И. Константинова



«13» марта 2024 г.

Документ подготовлен  
в порядке исполнения  
трудовых обязанностей

Текст документа размещен  
в открытом доступе  
на сайте СПбГУ по адресу  
<http://spbu.ru/science/expert.htm>