

На правах рукописи



**ЧЕРНОСКУТОВ ДМИТРИЙ ВЛАДИМИРОВИЧ**

**ПОВЫШЕНИЕ КОММУТАЦИОННОЙ СПОСОБНОСТИ  
ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ АППАРАТУРЫ**

05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2017

Работа выполнена на кафедре «Техника высоких напряжений»  
ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента  
России Б.Н. Ельцина»

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент  
**Черных Илья Викторович**

Официальные оппоненты: **Овсянников Александр Георгиевич**,  
доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный  
технический университет», профессор кафедры техники  
и электрофизики высоких напряжений;

**Тихончук Дмитрий Александрович**,  
кандидат технических наук, Производственное  
отделение «Уфимские городские электрические сети»  
ООО «Башкирские распределительные электрические  
сети», начальник отдела капитального строительства

Ведущая организация: ФГУП «Всероссийский электротехнический институт  
имени В.И. Ленина», г. Москва

Защита диссертации состоится 27 сентября 2017 года в 14:15 ч на заседании  
диссертационного совета Д 212.285.03 на базе ФГАОУ ВО «Уральский  
федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» по  
адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте  
ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России  
Б.Н. Ельцина», <http://lib.urfu.ru/mod/data/view.php?d=51&rid=269729>

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2017 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Зюзев Анатолий Михайлович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

**Актуальность темы.** За последние годы, в связи с вводом значительных мощностей в электроэнергетике интенсивным развитием электрификации, а также передачи электроэнергии на большие расстояния, увеличивается спрос на элегазовые выключатели высокого напряжения с высокими техническими характеристиками. На текущий момент высоковольтное оборудование подстанций РФ требует модернизации. В странах Европы, Северной Америки, странах Азии используются элегазовая коммутационная аппаратура с отключающей способностью порядка 63–80 кА и даже 90 кА. В настоящее время в России наблюдается спрос на выключатели, способные отключать токи КЗ порядка 50–63 кА. При этом отечественные производители, такие как ООО «Эльмаш УЭТМ» (г. Екатеринбург), ЗАО ЗЭТО (г. Великие Луки), ЗАО ЛенАппарат (Санкт-Петербург) предлагают элегазовые выключатели (ЭВ) с отключающей способностью 40–50 кА. Более того, отечественное коммутационное оборудование отстает от зарубежных аналогов по отключающей способности емкостных токов ненагруженных воздушных линий, конденсаторных батарей, кабельных линий. Достигнутый уровень отключающей способности ВВА отечественных производителей в данном режиме – С1 (с низкой вероятностью возникновения повторных пробоев). Элегазовые выключатели (ЭВ) производства таких компаний как АBB, Siemens, ALSTOM-Shneider Electric, Mitsubishi, Hitachi соответствуют классу С2 – с очень низкой вероятностью возникновения повторных пробоев. Разработка выключателей, исследование процессов, происходящих при коммутации малых реактивных токов, также как исследование процессов отключения больших токов и разработка инженерных методов, математических моделей, программ расчета является актуальной на сегодняшний день задачей. Представленные в диссертационной работе методики направлены на исследование и прогнозирование коммутационной и/или изолирующей способности на начальной стадии проектирования распределительной аппаратуры до изготовления дорогостоящих опытных образцов. В итоге снижается количество опытных макетов, времени и объема проводимых научно–исследовательских работ (НИОКР).

**Цель работы и задачи исследования.** Цель работы заключается в исследовании электрофизических процессов и явлений в элегазовой коммутационной аппаратуре, анализе, систематизации результатов, полученных в ходе разработки, предложении методик повышения коммутационной способности.

**Объектом исследования** являются электрофизические, газодинамические и механические процессы в высоковольтной коммутационной аппаратуре. Предметом исследования являются элегазовые выключатели автокомпрессионного типа, а также элегазонаполненные разъединители и заземлители.

### **Решаемые задачи:**

1. Исследование проблемы возникновения тока среза при отключении индуктивной нагрузки выключателями. Определение возникающих уровней перенапряжений и факторов, влияющих на величину перенапряжения. Ограничение перенапряжений за счет разработки системы управляемой коммутации.

2. Повышение отключающей способности при отключении емкостного тока. Разработка методики прогнозирования механической характеристики проектируемого выключателя с последующим приведением напряженности электрического поля при определенном межконтактном расстоянии (МР) к величине переходного восстанавливающегося напряжения (ПВН).

3. Решение проблемы оценки механической характеристики разрабатываемой конструкции выключателя автокомпрессионного типа (на ранней стадии проектирования) с учетом возникающей величины противодействия при отключении токов КЗ. Снижение величины обратного хода контактов. Оценка межконтактного расстояния к моменту отключения тока с применением ПВН и минимального МР при обратном ходе контактов после погасания дуги.

4. Разработка элегазонаполненного модуля разъединитель–заземлитель. Исследование изолирующей и дугогасительной способности модуля во всех режимах сети. Повышение компактности подстанций, снижение отчуждаемой территории в городских, промышленных зонах.

**Методы исследования.** Для анализа электрофизических, газодинамических характеристик применялись методы теории электрических аппаратов, методы численного моделирования в пакетах ELCUT, ANSYS. Трехмерное моделирование исследуемых объектов проводилось с применением пакета Unigraphics NX. Численное решение системы уравнений модели движения блока контактов проектируемого выключателя было реализовано в среде Visual Fortran. Для подтверждения рассчитанных параметров и получения новых данных проводились натурные эксперименты на поверенном испытательном оборудовании.

#### **Научная новизна:**

– объединено численное моделирование напряженности электрического поля дугогасительного устройства выключателя одновременно с ПВН и прогнозируемым межконтактным расстоянием (МР). МР определяется из вжима контактов и кривой хода контактов во времени, которую возможно с достаточной точностью спрогнозировать, исходя из выбираемых разработчиком силовых характеристик привода, кинематической схемы выключателя и конструктивно-геометрических характеристик дугогасительного устройства. Применено приведение напряженности ЭП в соответствующий момент времени к величине прикладываемого к контактам ПВН. Методика верифицирована проведенными высоковольтными и коммутационными испытаниями. Методика позволяет разработчикам и исследователям выбирать вариации механической и электростатической характеристик выключателя на ранней стадии проектирования выключателя, т.е. до изготовления опытного образца и проведения дорогостоящих испытаний.

– проведен натурный эксперимент по отключению тока короткого замыкания 50 кА разработанными в ходе написания диссертации выключателями классов напряжений 220-500 кВ с оценкой механической характеристики в трехфазном и однофазном режимах.

– произведена коррекция исходной математической модели процесса оценки кривой хода контактов с учетом исследованного в ходе натурального эксперимента термодинамического эффекта при отключении тока КЗ. Оценка произведена по нескольким выключателям. Разработан алгоритм оценки допустимого значения

межконтактного расстояния (МР) в момент гашения (в момент приложения ПВН) и достижения максимальной величины обратного хода (при приложении напряжения источника). **Впервые представлено совместное решение** задачи оценки кривой хода контактов в режиме отключения тока КЗ с целью снижения величины обратного хода (исключения возникновения обратного хода) контактов **с учетом величины давления заполнения**, необходимого для успешного отключения емкостного тока (без пробоев).

– проанализированы дуговые процессы при отключении тока короткого замыкания 50 кА. Исследована околонулевая область, определены напряжения погасания. Представлены вольт-амперные характеристики и аппроксимирующие выражения с временным шагом для воспроизведения полученных экспериментальных данных для анализа существующих моделей Майера и Касси;

– впервые произведен расчет и сравнительный анализ получаемых величин тока среза по двум методикам расчета при отключении шунтирующего реактора. Предложена оптимальная методика. Впервые выполнен нестандартный режим отключения тока шунтирующего реактора 40А, представлены величины перенапряжений. В качестве метода ограничения перенапряжений предложена разработанная в ходе исследования система управляемой коммутации с соответствующим данному режиму целевым временем горения дуги;

– исследовано явление предварительного пробоя для операций включения. Реализованы адаптивные функции параметров системы интеллектуальной управляемой (синхронной) коммутации.

– разработан газонаполненный модуль разъединитель-заземлитель (Р/З), исследованы электрофизические процессы во всех коммутационных режимах. Впервые исследован режим коммутации уравнивающего тока 1600 А при напряжении 20 и 100 В с оценкой требуемого коммутационного ресурса в 100 циклов В-О. Исследованы дуговые процессы, определены факторы, влияющие на отключающую способность. Представлены технология производства и зависимости свойств материала контактов, определяющие коммутационный ресурс аппарата.

**Практическая значимость исследований** заключается в следующем:

- разработана компьютерная программа для оценки отключающей способности ЭВ в режиме отключения емкостного тока, позволяющая выбрать оптимальное соотношение “скоростная характеристика / электростатическая характеристика” в режиме отключения емкостного тока. Результаты расчета хорошо согласуются с проведенными экспериментами.

- разработана компьютерная программа для оценки отключающей способности элегазового выключателя в режиме отключения тока КЗ с оценкой допустимого расстояния к моменту отключения тока КЗ и допустимой для данного выключателя величины противохода. Отключающая способность выключателя оценивается как в режиме коммутации емкостного тока, так и в режиме коммутации тока КЗ с оценкой величины обратного хода при величине давления заполнения и получаемом перепаде давления, а также необходимом давлении заполнения для режима коммутации емкостного тока.

- Исследованы дуговые процессы с получаемыми газодинамическими характеристиками при отключении тока короткого замыкания 50 кА. Исследована

околонулевая область, определены напряжения погасания. Представлены вольт-амперные характеристики

- проведены расчеты конструкций, на основе которых в ООО «Эльмаш (УЭТМ)» разработаны выключатели: баковый выключатель ВЭБ-220 и колонковый выключатель серии ВГТ-500/750. Получена достаточная корреляция расчетных данных с полученными результатами коммутационных испытаний; применение разработанного расчетного инструментария позволило сократить количество проводимых НИОКР и успешно пройти испытания в соответствии с требованиями стандартов ГОСТ/МЭК.

- разработан, исследован и аттестован газонаполненный модуль разъединитель-заземлитель в составе распределительного устройства на 110 кВ. Первая поставка распределительного устройства РУЭН-УЭТМ-110 с газонаполненным модулем разъединитель-заземлитель произведена на подстанцию Намыв (Якутия) в 2016 г. Применение распределительного устройства РУЭН-УЭТМ-110 позволяет снизить площадь подстанции на 35–40 % относительно классической подстанции с отдельно стоящими разъединителями и заземлителями. Повышена коммутационная способность газонаполненного разъединителя в самом тяжелом режиме – режиме отключения уравнительного тока с параметрами, нормируемыми для воздушного разъединителя. Достигнута коммутационная способность разъединителя при отключении тока 1600 А при повышенном напряжении 100 В в требуемом количестве 100 циклов включение-отключение. Исследованы стадии дугового процесса при отключении уравнительного тока. Подтверждена коммутационная способность во всех режимах. Предложена новая технология производства материала дугогасительных контактов, обеспечивающая повышенный коммутационный ресурс. Представлены результаты коммутационных испытаний разъединителя с розеточным и торцевым типом контактов. Экспериментально определено, что износ контактов имеет место только в режиме коммутации тока 1600 А при 100 В. В остальных режимах массовый износ контактов отсутствовал.

- разработанные методики проектирования коммутационных аппаратов и оценки их отключающей способности применены в образовательном теоретическом и лабораторно–исследовательском курсе учащихся ВУЗов, предложена методика исследования эффекта среза тока при отключении индуктивной нагрузки на упрощенной установке.

- на основе проведенных исследований внесены предложения по методикам испытаний в новую редакцию стандарта ГОСТ52565-2006. Внесены предложения по методикам испытаний газонаполненных разъединителей в комитеты МЭК/СИГРЭ.

### **Основные положения и результаты, выносимые на защиту:**

1. Математическая модель оценки и повышения отключающей способности ЭВ в режиме коммутации емкостного тока.
2. Математическая модель оценки и повышения отключающей способности ЭВ в режиме отключения тока КЗ с учетом требуемой (для успешного отключения) величины давления заполнения **в режиме коммутации емкостного тока** и получаемой кривой хода контактов в режиме отключения

тока КЗ. **Совместное решение задачи успешного отключения выключателем тока КЗ и емкостного тока.** Оценка отключающей способности по величине развиваемого межконтактного расстояния, давления, температуры газа и электростатической характеристике.

3. Проведение исследований по отключению тока КЗ в 50 кА (в трехфазном режиме) в двух вариантах конструктивного исполнения. Определение падения напряжения на дуге, проводимости, выделяемых энергий. Выражения для воспроизведения тока и напряжения на дуге.
4. Разработка и исследование характеристик газонаполненного модуля разъединитель–заземлитель на 110 кВ с подтверждением коммутационной способности и требуемого коммутационного ресурса.
5. Разработка системы управляемой коммутации. Ограничение перенапряжений при отключении различных величин тока ШР. Реализация синхронного включения, синхронного отключения.

**Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций.** Расчеты на основе метода конечных элементов были проведены на лицензированном ПО. Точность расчета предлагаемых методов подтверждена результатами эксперимента. Испытательное оборудование в ходе проведения экспериментов было поверено соответствующими метрологическими службами. Эксперименты были проведены в соответствии с требованиями стандартов ГОСТ 52565-2006, ГОСТ 55195-2012, МЭК62271-100, МЭК62271-110. Погрешность результатов расчетов предложенных методов и результатов экспериментов составила менее 6–9 %.

**Практическая ценность работы.** Предложенные математические модели, программы и алгоритмы позволяют существенно сократить время и затраты, необходимые для выбора оптимальных конструктивных решений проектируемого коммутационного оборудования с точки зрения требуемых газодинамических, электростатических и механических характеристик. Разработанный модуль разъединитель–заземлитель (Р/З) в составе распределительного устройства на 110 кВ решает вопрос повышения компактности подстанций, снижает отчуждаемую площадь подстанции на 35–40% по сравнению с комплектом отдельно стоящего оборудования выключатель-разъединитель-заземлитель-измерительные трансформаторы классической воздушной подстанции (AIS). Разработанный с учетом использованием классических воздушных подводящих шин распределительное устройство с модулем разъединитель–заземлитель не требует принципиального перестроения подстанции по типу газоизолированных подстанций (GIS). Исследованные свойства материала контактов позволяют повысить ресурс разъединителя до требуемого количества циклов включение–отключение равное 100. Востребованность коммутационного аппарата с данными техническими параметрами подтверждается запросами сетевых компаний, а также известными данными организации СИГРЭ о росте величин уравнительного тока.

**Реализация и внедрение результатов работы.** Примененная методика оценки кривой хода контактов и оценки отключающей способности в режиме коммутации емкостного тока и тока КЗ внедрена в инжиниринговый процесс разработки высоковольтной коммутационной аппаратуры отдела главного

конструктора ВВА ООО «Эльмаш (УЭТМ)» г. Екатеринбург. Методика направлена на разработку выключателей на классы напряжения 220–750 кВ с током отключения 50–63 кА. Разработан, исследован и аттестован газонаполненный модуль разъединитель–заземлитель в составе распределительного устройства на 110 кВ, с учетом исследованных процессов дугогашения в аппарате на 110 кВ сформирована научно-техническая база для разработки модуля Р/З на 220 кВ.

**Апробация работы.** Основные теоретические положения, результаты и выводы диссертационной работы докладывались и обсуждались на ежегодных практических конференциях: международная научно-практическая конференция Энерго-и ресурсосбережение (УрФУ, Екатеринбург, 2013); международная научно-практическая конференции Наука и образование XXI века (Уфа 2013 г.); международная научно-практическая конференция Energy Quest (УрФУ, Екатеринбург, 2014); международная IEEE конференция по управлению и связи - SIBCONFERENCE (Омск, 2015г.); международная конференция Пром-Инжинииринг-2016, 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing 2016, ICIEAM–2016 (Челябинск, 2016).

**Публикации.** По результатам исследования опубликовано 13 научных трудов, из них 4 статьи опубликованы в рецензируемых научных журналах, определенных ВАК РФ; 5 статей вошли в научную базу SCOPUS, 4 – в РИНЦ.

**Личный вклад автора** состоит в постановке задач исследования, разработке математических моделей, методик оценки и повышения коммутационной способности аппаратуры, обоснования необходимости разработки аппаратов в нескольких исполнениях с целью сравнения получаемых в ходе эксперимента данных, руководстве проведения опытно–конструкторских исследований разработанных изделий, подготовке публикаций к печати и апробации результатов.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы. Содержит 227 с. основного текста, 221 иллюстраций, 36 таблицы, 14 с. списка литературы из 123 наименований. Общий объем работы составляет 245 с.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** сформулирована текущая проблематика коммутационных процессов при разработке и эксплуатации высоковольтного оборудования, обоснована актуальность работы, сформулированы ее цели и задачи по теме диссертации.

**В первой главе** проведена постановка задачи исследования процессов при отключении индуктивной нагрузки, показаны проблемы возникающих перенапряжений в разрабатываемых ЭВ. Поставлена задача повышения отключающей способности при отключении емкостного тока, снижения вероятности появления повторных зажиганий и пробоев межконтактного промежутка. Описана проблема появления обратного хода контактов при отключении токов короткого замыкания.

**Во второй главе** детально исследован процесс отключения тока шунтирующего реактора. Произведен расчет тока среза по методикам стандартов МЭК62271-306 и IEEE C37.015.-2009, проанализированы погрешности, предложена

оптимальная методика. Проведен анализ влияния газодинамических характеристик на величину перенапряжения. Экспериментально установлено, что на рост величины тока среза влияет интенсивность обдувающего дугу элегаза (перепад давления) и скорость расхождения контактов. Определены коэффициенты перенапряжений при отключении тока реактора 300 и 100, 40 А. Экспериментально доказано, что при расчете величины тока среза для выключателей всех классов напряжений следует применять двухпараметрическую формулу, учитывающую падение напряжения на дуге в процессе отключения (Рисунок 1).

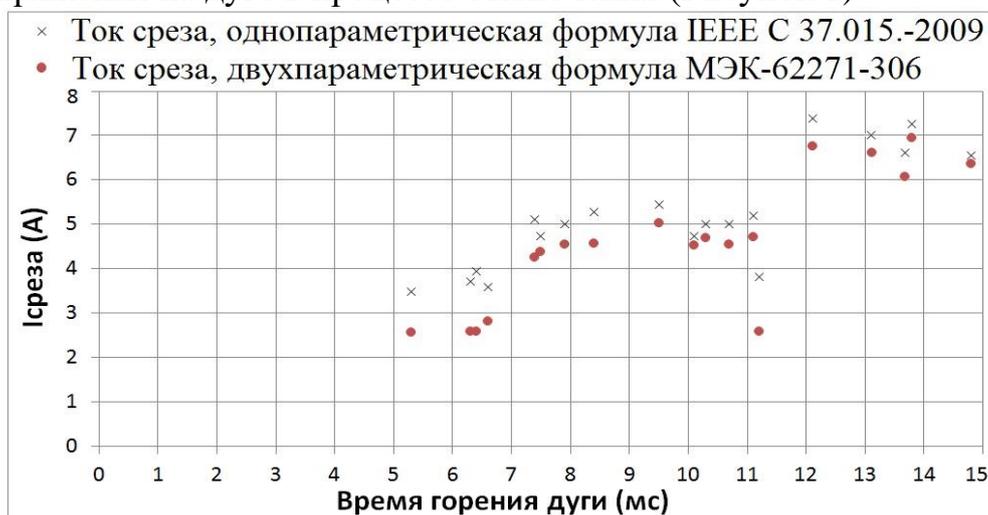
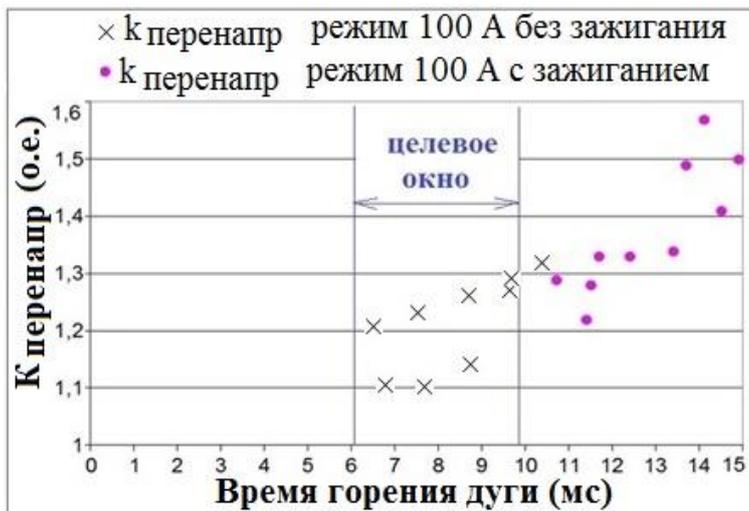


Рисунок 1 – Токи среза выключателя ВГТ-УЭТМ-500 по методикам МЭК-62271-306 и IEEE C 37.015.-2009 (режим 300 А)

В стандарте IEEE C37.015.-2009 утверждается, что однопараметрическая формула E2 не учитывает влияние падения напряжения на дуге и действительна для выключателей класса напряжений 60 кВ и выше. Проведенное же сравнение рассчитываемых величин тока среза на основе проведенного эксперимента на разработанном выключателе 500 кВ говорит об обратном. Величина падения напряжения на дуге в процессе отключения индуктивного тока в выключателях автокомпрессионного типа 220–500 кВ существенно влияет на конечную расчетную величину тока среза. Погрешность расчета при использовании методики стандарта IEEE C37.015.-2009 в режиме отключения 300А достигает до 32%. Обоснована необходимость использования двухпараметрической формулы МЭК62271-306 при расчете величины тока среза для выключателей всех классов напряжений. В качестве средства ограничения перенапряжений предложена разработанная система управляемой коммутации (Рисунок 2а), определены целевые окна времени горения дуги. Впервые исследован нестандартный режим отключения малой величины индуктивного тока 40 А. Получены повышенные значения коэффициентов перенапряжений, обоснована необходимость применения системы управляемой коммутации, представлены коэффициенты перенапряжений и целевое время горения дуги.



а)

б)

Рисунок 2 – Коэффициенты перенапряжения при отключении тока 100А (а), комплексная система управляемой коммутации ЭВ (б)

В третьей главе решается проблема отключения емкостного тока без повторных пробоев. Представлена методика прогнозирования кривой хода контактов проектируемого выключателя на ранней стадии разработки в зависимости от силовой характеристики привода (пружины отключающего устройства) и кинематической схемы. Далее кинематическая характеристики – кривая хода контактов (Рисунок 3а) одновременно приводится (синхронизируется) и с величиной напряженности ЭП (рассчитанной численными методами в пакетах ANSYS и ELCUT в статическом режиме для выбранной конфигурации контактов Рисунок 5), и с разностью потенциалов между контактами – переходному восстанавливаемому напряжению (ПВН, Рисунок 3б) в режиме отключения емкостного тока. На рисунке 5 представлены расчеты напряженности ЭП на подвижном (ПДК) и неподвижном дугогасительных контактах (НДК) при подаче 1 В. На начальной стадии выбора конструкции выключателя моделирование кривой хода производится исходя из уравнения движения блока подвижных контактов на основании второго закона Ньютона:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = F(x) - \Delta p \cdot S - f_{\text{буф}}$$

где  $m$  – масса подвижных частей,  $x$  – перемещение,  $t$  – время;  $F(x)$  – приведенная к перемещению поршня сумма сил пружины отключающего устройства и трения,  $f_{\text{буф}}$  – усилие буфера отключения;  $S$  – разность площадей поршня и штока.

Метод позволяет оценить и подобрать кривую хода контактов (Рисунок 4) в зависимости от характеристик применяемой пружины отключающего устройства и функции передачи движения от тяги привода к контактам по задаваемому разработчиком закону (линейное/криволинейное движение). Далее рассчитанная в статическом режиме при разности потенциалов между контактами в 1 В напряженность ЭП (Рисунок 5) выбранной конфигурации ДУ должна быть приведена к прикладываемой разности потенциалов между контактами, т.е. ПВН в режиме коммутации емкостного тока. ПВН описывается следующим выражением:

$$U_{ПВН} = U_{конд.б.} - U_{ист}$$

$$U_{ПВН} = U_{конд.б.} - U_m * \cos 2\pi (t_i/T)$$

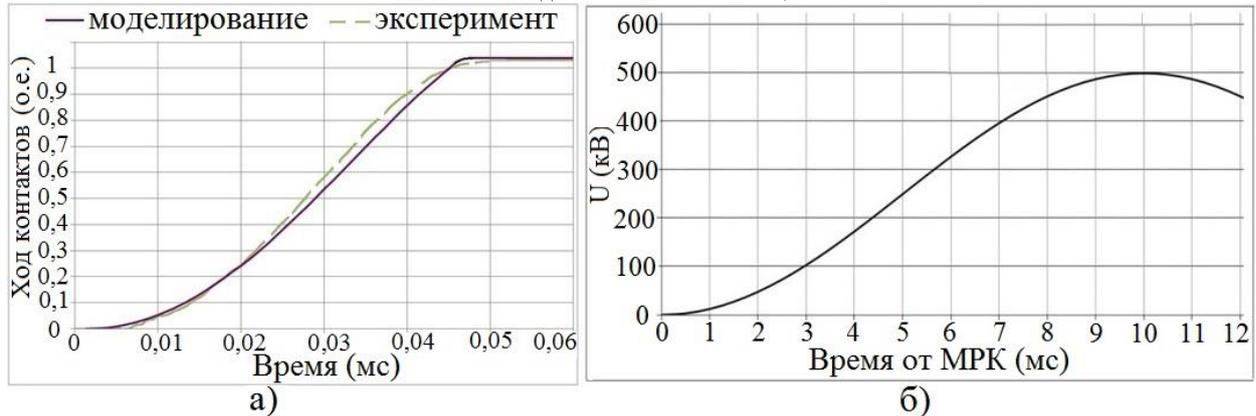


Рисунок 3 – Сравнение механических характеристик (а), ПВН для выключателя на класс 750 кВ (б)

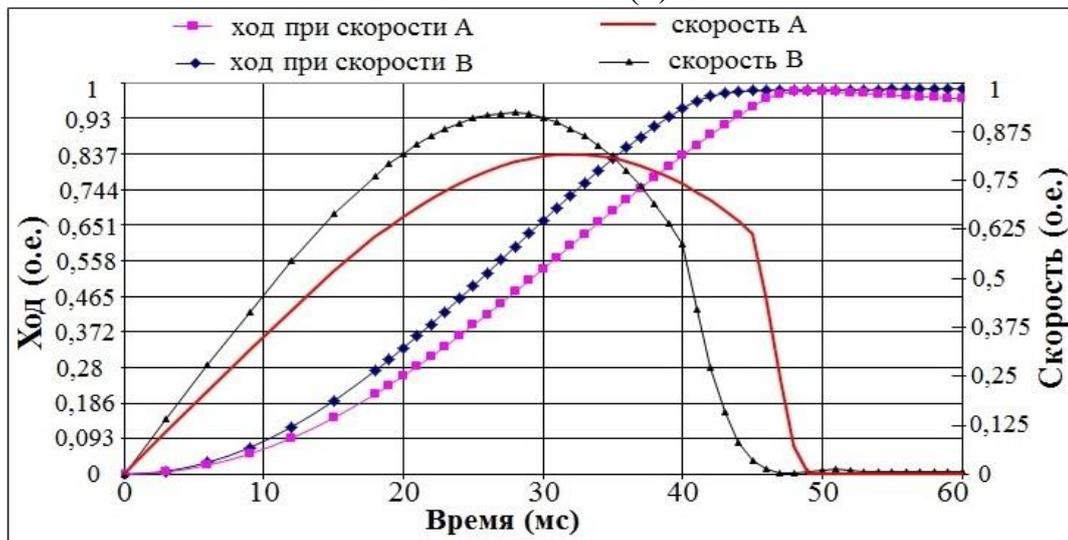


Рисунок 4 – Моделируемые кривые хода контактов

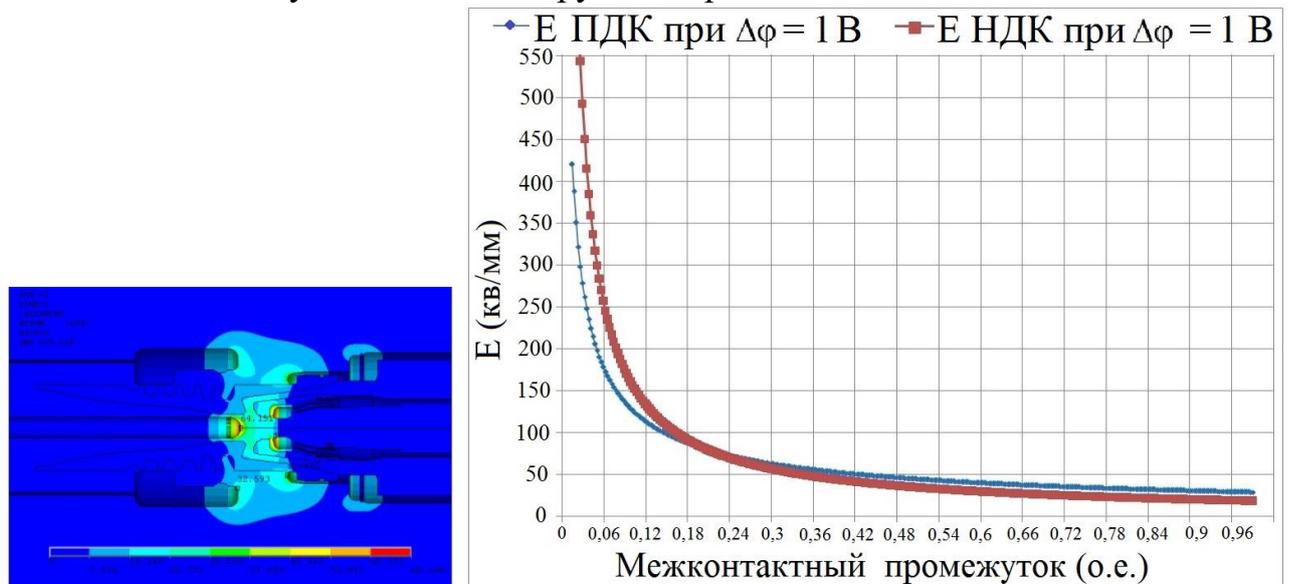


Рисунок 5 – Расчет напряженности ЭП

Величины приведенной к ПВН напряженности ЭП исходной конструкции приведены на рисунке 6 (кривые 1–2); конструкции, оптимизированной по электростатической характеристике (Рисунок 6, кривые 3–4). Критерием

успешности отключения является то, больше или меньше значение приведенной к разности потенциалов (ПВН) напряженности ЭП на одном из контактов ДУ чем значение нижнего предела электрической прочности, определяемого величиной давления заполнения (горизонтальные линии, рисунок 6). Проведенный натурный эксперимент показал, что повторные зажигания и пробои происходили при подаче напряжения на ПДК исходной конструкции ДУ (кривая 1, рисунок 6).

Метод позволяет исследователю до изготовления опытного образца и проведения дорогостоящих испытаний выбрать вариацию “развиваемая скорость блока контактов/зависимость максимальной напряженности ЭП”.

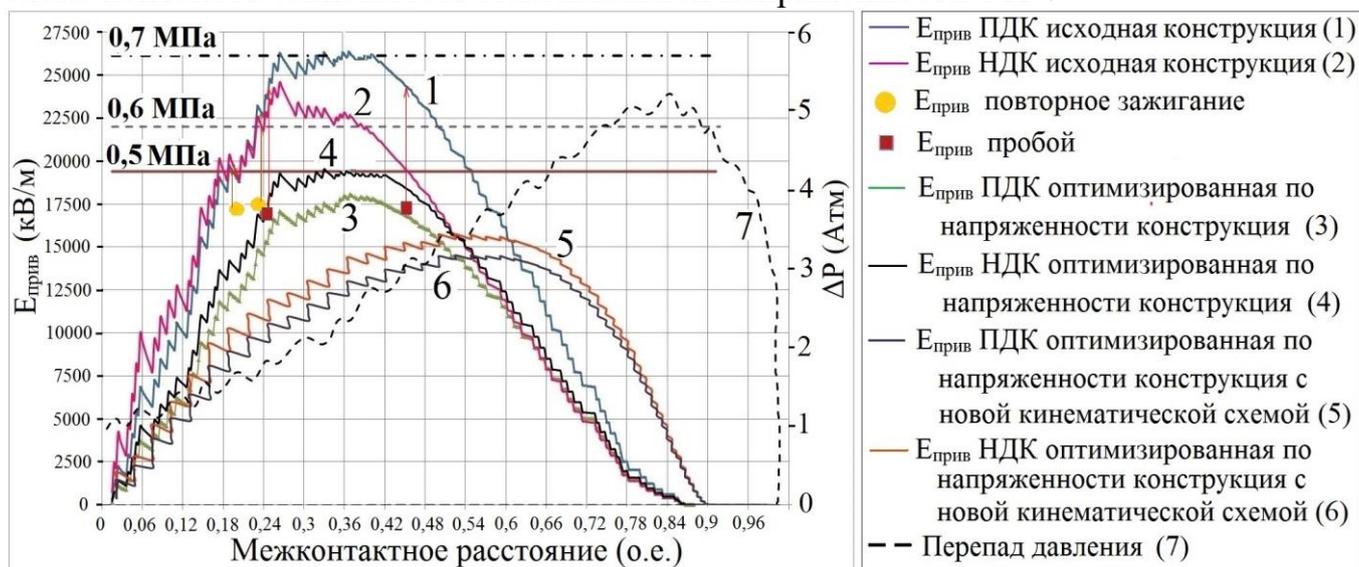




Рисунок 7 – Алгоритм оценки отключающей способности ЭВ

В случае, если не выполняется условия шага 9, алгоритм предлагает произвести оптимизацию напряженности ЭП (Рисунок 7, шаг 1) и/или изменить кинематическую характеристику шаг 5). Возможно также увеличение давления заполнения – предел электрической прочности (шаг 3), но в таком случае должен быть произведен анализ характеристики кривой хода контактов при отключении тока КЗ при такой величине давления заполнения.

Учет воздействия величины отключаемого емкостного тока в зависимости от класса напряжения выключателя задается введением соответствующим коэффициентом запаса  $K_3$  (Рисунок 7).

**В четвертой главе** представлены результаты разработки системы синхронной (управляемой) коммутации выключателей. В частности, исследовано явление предварительного пробоя при включении емкостной нагрузки. На рисунке 8 представлены сравнения длительности предварительного пробоя при величинах давления заполнения 0,5 МПа (номинальное) и 0,42 МПа (минимальное) выключателя 110 кВ с напряжением источника. Из рисунка 8 видно, что при меньшем давлении заполнения межконтактный промежуток (МП) обладает меньшей электрической прочностью. При этом полученные коэффициенты, характеризующие электрическую прочность при включении больше, чем максимальный угловой коэффициент сигнала номинального линейного напряжения (МУК). МУК равен 1 о.е., определяется как:  $U_m \cdot \omega = 1$  о.е.  $U_m$  – амплитудное значение напряжения,  $U_m = 102,86$  кВ,  $\omega$  (цикл. частота, 0,314 рад/мс). МУК = 32,3 кВ/мс.

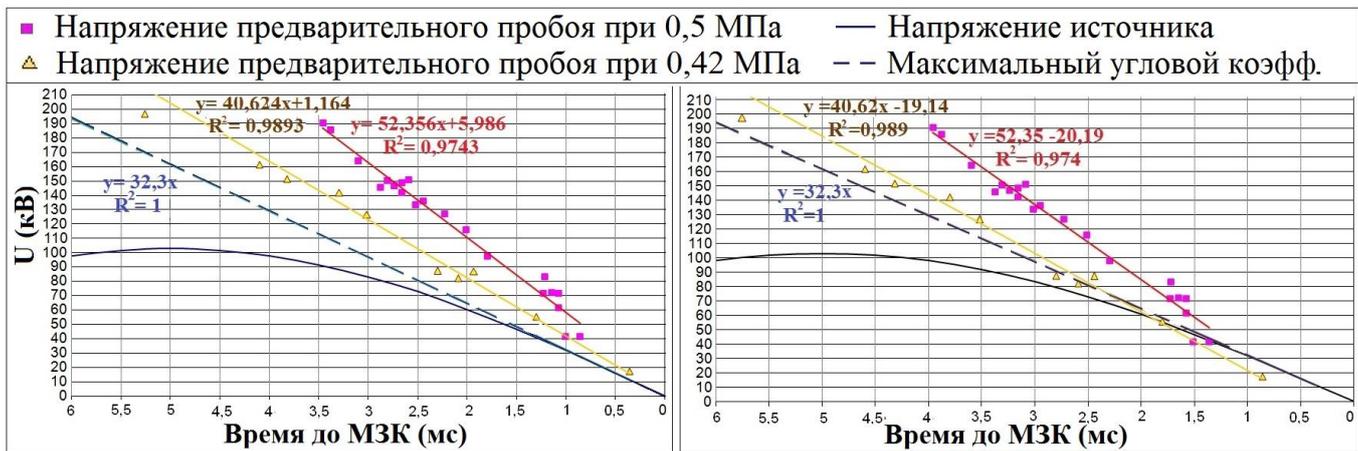


Рисунок 8 – Кривые электрической прочности с напряжением источника при нормированном собственном времени включения  $t_{\text{собств. вкл.}}$  (а), при уменьшении  $t_{\text{собств. вкл.}}$  на 0,5 мс (б)

Оптимальный интервал включения лежит в пределах от 0,3 мс до нуля напряжения и вплоть до 1,5 мс после нуля напряжения (-5...27 электрических градусов). В случае

уменьшения собственного времени включения выключателя (например, при снижении напряжения в цепи электромагнитов управления) на 0,5 мс (рисунок 8 б) предварительный пробой будет происходить на 0,5 мс раньше. Соответственно, электрическая прочность МП будет пересекаться с напряжением источника (Рисунок 8 б). Необходимо ввести норму изменения собственного времени включения – норма  $\pm 0,5$  мс. Соответственно, оптимальным интервалом

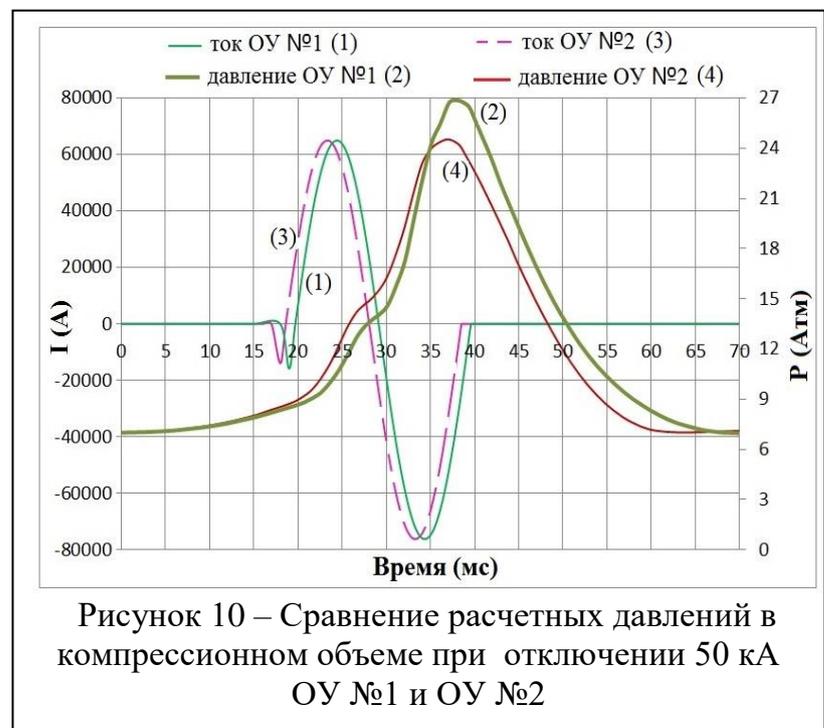


Рисунок 10 – Сравнение расчетных давлений в компрессионном объеме при отключении 50 кА ОУ №1 и ОУ №2

включения будет период времени в пределах от 0 мс до 1 мс после нуля. В математическую модель заложены функции адаптации собственного времени срабатывания ЭВ от изменения величины напряжения цепей управления электромагнитов включения/отключения, температуры, давления в приводе, времени бездействия выключателя с целью обеспечения стабильности собственного времени срабатывания.

**В пятой главе** детально рассмотрена проблема оценки кривой хода контактов (Рисунок 9) при отключении токов КЗ выключателей автокомпрессионного типа.

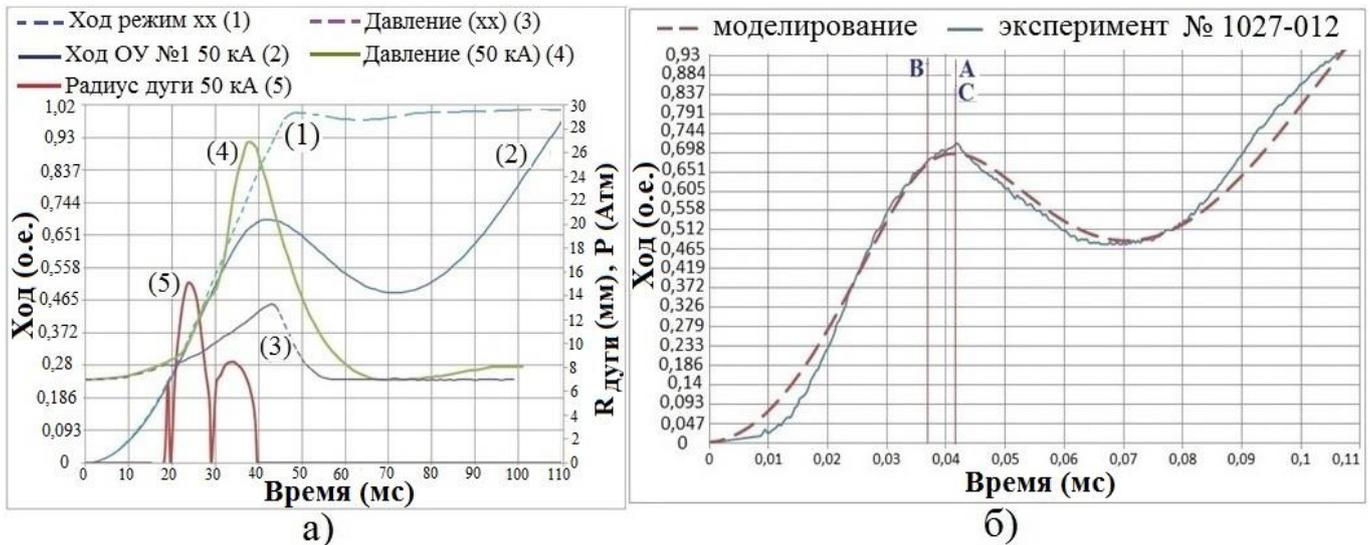


Рисунок 9 – Сравнение электро-газодинамических и механических характеристик при моделировании кривой хода в процессе отключения тока 50 кА и в режиме без тока (а), сравнение с экспериментом при отключении 50 кА (б)

Объекты исследования – баковый выключатель 220 кВ с одним приводом на три полюса и колонковые выключатели на 500 кВ (2 разрыва) и 750 кВ (4 разрыва).

Вариант исполнения ОУ №2 (Рисунок 11) является более предпочтительным. Вследствие минимального противохода практически не прекращается обдув дуги газовым потоком. Расчет показывает, что в такой конфигурации силовой характеристики пружины при отключении тока КЗ 50 кА величина давления в компрессионном объеме составит 24,53 Атм (Рисунок 10) и выключатель будет иметь

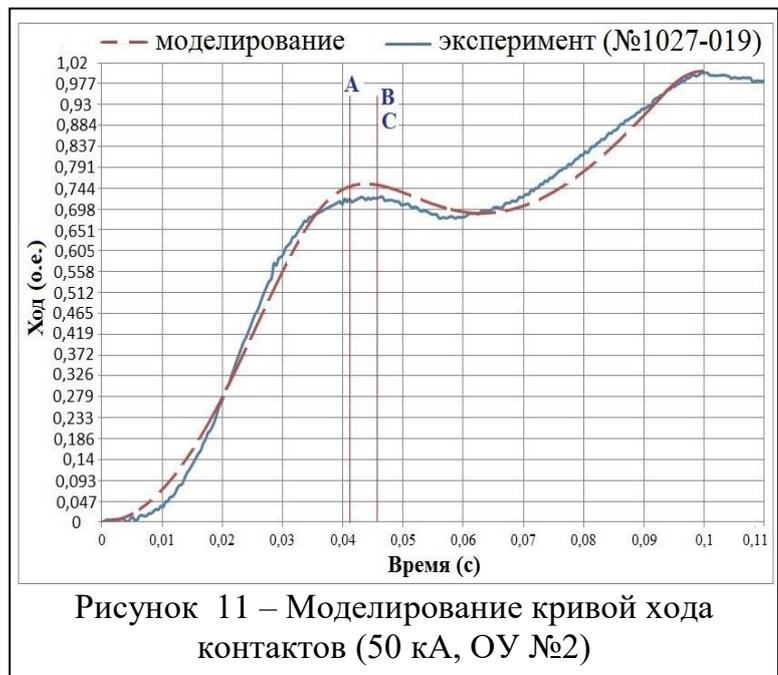


Рисунок 11 – Моделирование кривой хода контактов (50 кА, ОУ №2)

меньший (по сравнению с ОУ №1 с пиком давления 26,73 Атм) обратный ход. Моменты погасания дуги (Рисунок 11) соответствуют точкам А, В, С. Погрешность результатов расчета относительно эксперимента – в пределах 6 %. На рисунке 12 представлен алгоритм оценки кривой хода контактов при отключении токов КЗ. В случае, если при расчете получен обратный ход контактов (не выполняется условие:  $dx/dt > 0$ ), алгоритм возвращает на шаг 1 и 2, предлагая повысить силовую характеристику и/или изменить геометрические параметры ДУ (увеличить кольцевой зазор, уменьшить площадь цилиндра, изменить момент открытия сопла и т.д.). В общем случае алгоритм, представленный на рисунке 12, действует для режимов отключения токов КЗ и коммутации емкостных токов. Алгоритм также возвращает на шаг 1 и 2, предлагая повысить силовую характеристику и/или

изменить геометрические параметры ДУ в случае, если в режиме отключения емкостного тока рассчитанный перепад давления (Рисунок 12) оказался меньше некоторой требуемой величины ( $\Delta P_{\text{треб}}$ ). Величина требуемой величины перепада давления ( $\Delta P_{\text{треб}}$ ) задается пользователем. Обычно для выключателей с ДУ автокомпрессионного типа перепад давления составляет 0,4–0,8 МПа на холостом ходу.

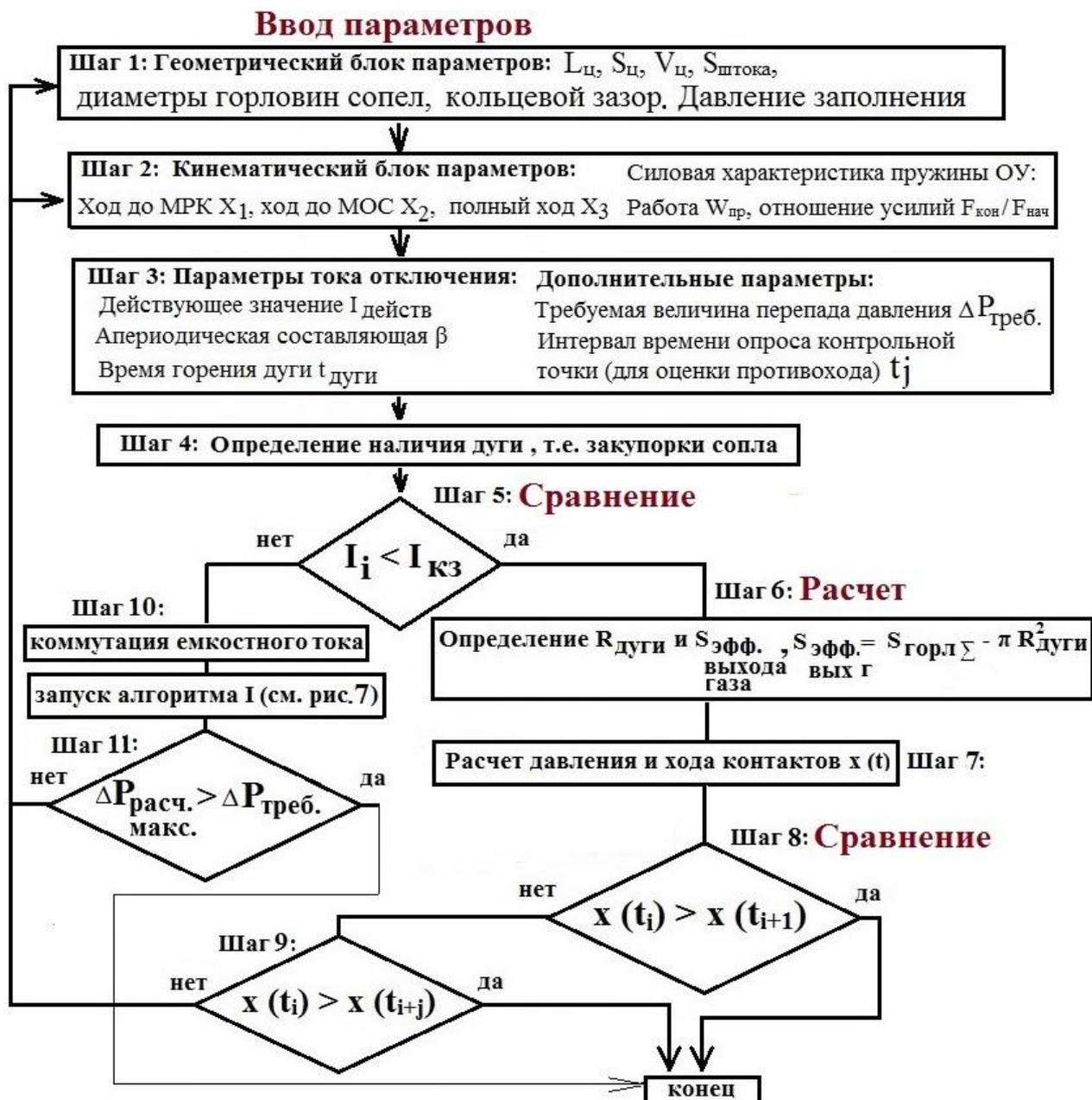


Рисунок 12 – Алгоритм оценки отключающей способности выключателя

Также предложена методика оценки отключающей способности выключателя по критерию электрической прочности. В момент отключения тока КЗ находится точка межконтактного промежутка, определяется температура в околодуговом пространстве в момент нуля тока. Производится приведение величины напряженности ЭП в момент погасания дуги к величине ПВН и сравнение с нижним пределом. Далее производится корректировка нижнего предела электрической прочности на величину температуры и давления по известным в научной литературе зависимостям. Для температур элегаза в диапазоне 1400–3000 °К с шагом 50 °К была

выполнена аппроксимация изменения величины  $E/N$  [88-90\*] (Рисунок 14) от величины давления, т.е. фиксировалось значение температуры, например 1550 °К. Для этой температуры определялось аппроксимирующее выражение изменения параметра  $E/N$  от величины давления.

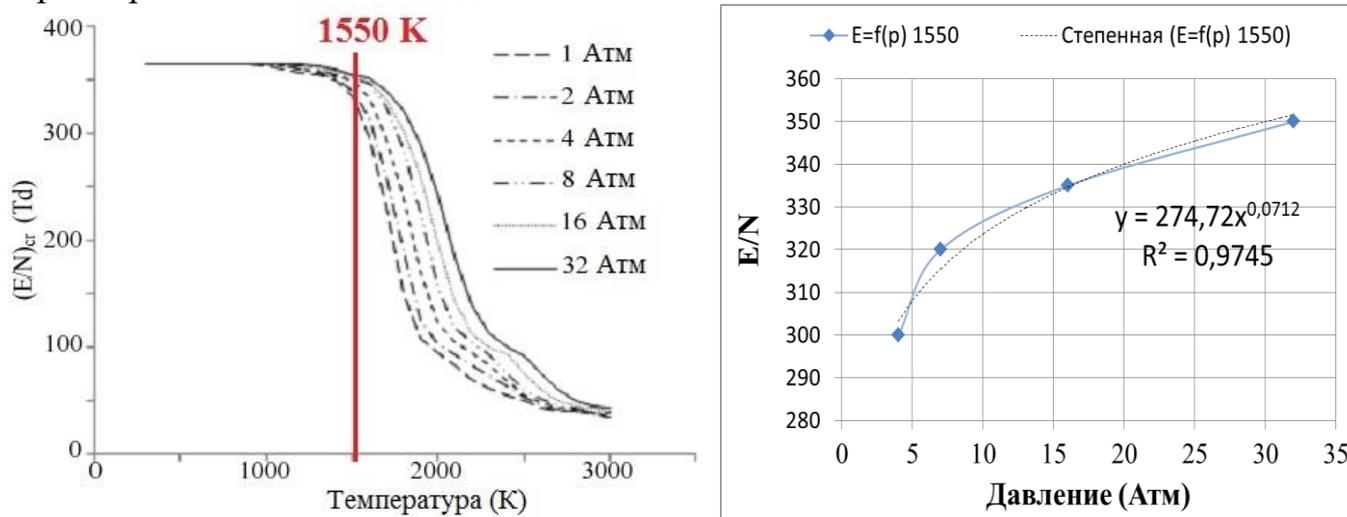


Рисунок 13 – Аппроксимация величины  $E/N$  [88-90\*] от величины давления \*литературные источники 88-90 соответствуют списку использованной дитературе диссертации.

Расчетная программа позволяет найти значение температуры и давления в околонулевого пространства. Далее в каждый момент времени рассчитанной в программе величине температуры в околонулевого пространстве присваивалось выражение  $E/N=f(P)$  (Таблица 1).

Таблица 1 – Аппроксимирующие выражения [90] при фиксированных температурах

| Т (°К)           | $E/N=f(P)$ при $T=const$                                    | Величина достоверности аппроксимации, % |
|------------------|---|---|
| 1400             | $y = 330,33 * x^{0,025}$<br>т.е. $E/N = 330,33 * P^{0,025}$ | 93                                      |
| 1450             | $y = 318,47 * x^{0,0348}$                                   | 99                                      |
| 1500             | $y = 313,03 * x^{0,0338}$                                   | 93                                      |
| 1550             | $y = 274,7 * x^{0,0712}$                                    | 97,45                                   |
| И т.д. до 3000 К |   |   |

Далее в момент отключения тока КЗ производится коррекция соотношения  $E/N$  на величину достигнутого давления при температуре через аппроксимирующее выражение  $E/N=f(P)$ .

Для удобства пользователя программный комплекс разрабатывался с целью произведения оценки параметров газа в околонулевой области как через понятие приведенная напряженность, так и через определение разрядного (пробивного) напряжения, т.е. для сопоставления пробивного напряжения с огибающей ПВН. В момент погасания дуги программный комплекс производит расчет давления и температуры в межконтактном пространстве, далее производится расчет пробивного напряжения, т.е. возрастание электрической прочности (ВЭП). Затем расчетная кривая ВЭП сопоставляется с огибающей ПВН. В случае, если огибающая ПВН

выше рассчитанной кривой ВЭП, то вероятен пробой МП. Из рисунка 14 видно, что на участке 0,4–0,876 мс (в диапазоне напряжений 300–450 кВ) огибающая ПВН выше, чем значения кривой ВЭП. Проведенные коммутационные испытания подтвердили, что в этом диапазоне происходят пробои МП (8 шт.).

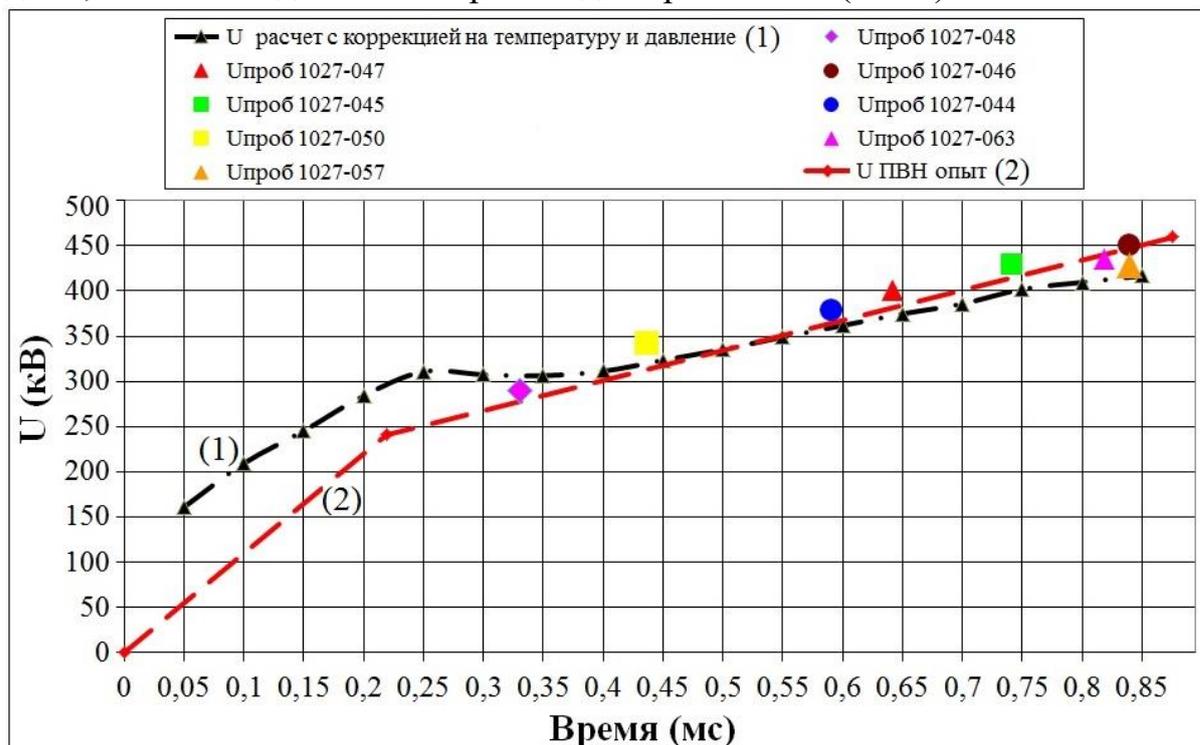


Рисунок 14 – Сопоставление ВЭП с огибающей ПВН для одного из вариантов исполнения выключателя автокомпрессионного типа

Для большей вероятности успешного отключения при расчете кривой ВЭП необходимо вводить коэффициент запаса  $K_3$  по электрической прочности относительно ПВН. Алгоритм оценки отключающей способности (Рисунок 16) дополнен проверкой на критическое расстояние при обратном ходе с целью предотвращения пробоя от воздействия напряжения источника отключения КЗ.

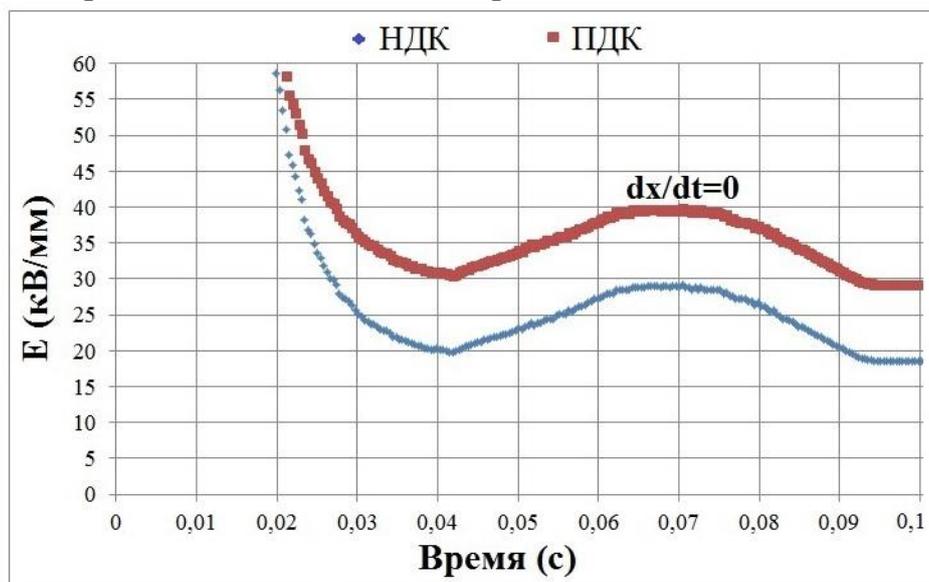


Рисунок 15 – Напряженность на НДК и ПДК, синхронизированные с ходом контактов при отключении 50 кА

В точке достижения нулевой скорости  $dx/dt=0$  (Рисунок 15) при обратном ходе программа сопоставляет давление и температуру газа в межконтактном пространстве, рассчитывает диэлектрический уровень при минимальном МР.

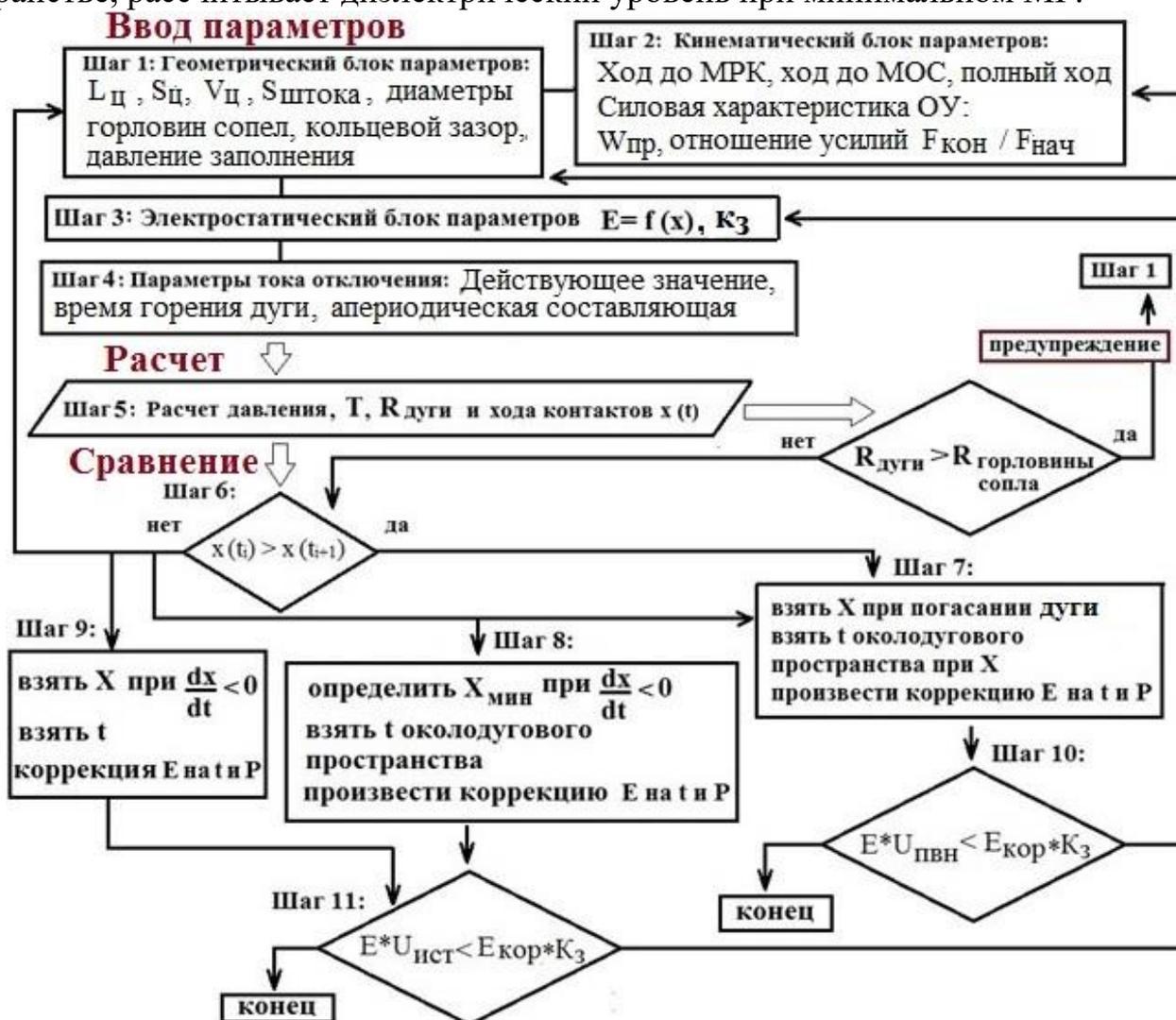


Рисунок 16 – Алгоритм оценки отключающей способности

Указанный на рисунке 16 алгоритм оценки отключающей способности совмещен с алгоритмом на рисунке 12, учитывающим оценку отключающей способности в режиме коммутации емкостного тока (оценка детально показана в рисунке 7). Например, при величине давления заполнения 0,7 МПа, при которой обеспечивается успешное отключение емкостного тока (Рисунок 17 а), в режиме отключения тока КЗ в 50 кА наблюдается резкое торможение блока контактов к моменту погасания дуги (приложение ПВН) и обратный ход (Рисунок 17 б). При торможении и при обратном ходе достигнутой величины межконтактного расстояния может быть недостаточно для обеспечения требуемого диэлектрического уровня как при приложении ПВН ( $X_{крит}$  при  $U_{пвн}$ ), так и в обратном ходе при приложении напряжения источника ( $X_{крит}$  при  $U_{ист}$ ) при  $t_{дуги}=21$  мс и при  $t_{дуги}=28$  мс). Т.е. величина давления заполнения ЭВ может существенно повлиять на кинематическую характеристику при отключении больших величин токов КЗ.

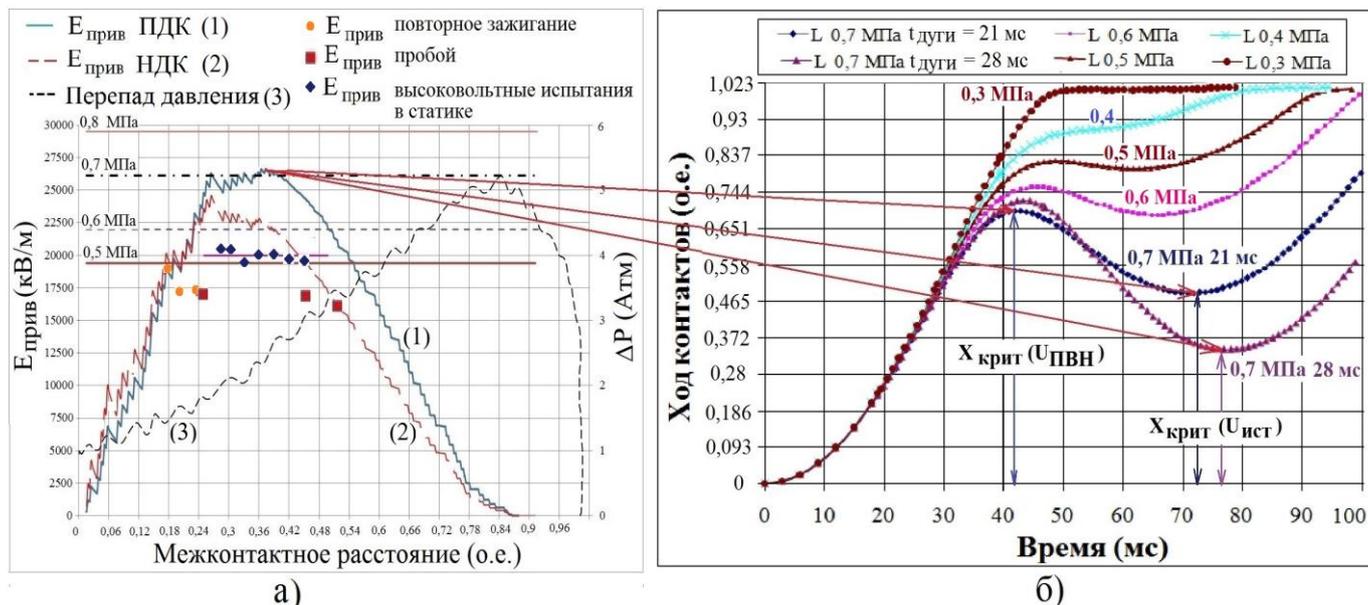


Рисунок 17 – Приведенные напряженности ЭП в режиме отключения емкостного тока (а) и соответствующие этим величинам давления заполнения кривые хода контактов (б), получаемые в режиме отключения тока КЗ

Также в математическую модель включена дополнительная проверка на необходимое межконтактное расстояние (в полностью разомкнутом состоянии) при испытании внутренней изоляции напряжением грозового импульса. В случае, если приведенная к разности потенциалов напряженность ЭП больше величины нижнего предела электрической прочности ( $E_{кр}$  при соответствующем воздействии грозовым импульсом), то вероятен разряд. В таком случае алгоритм возвращает на начальные шаги, предлагая изменить электростатическую характеристику  $E=f(x)$ , повысить полный ход (MP) и/или давление заполнения.

Постановка натурального эксперимента по отключению тока КЗ включала в себя не только оценку движения контактов, но и анализ развиваемых величин падения напряжения на дуге.

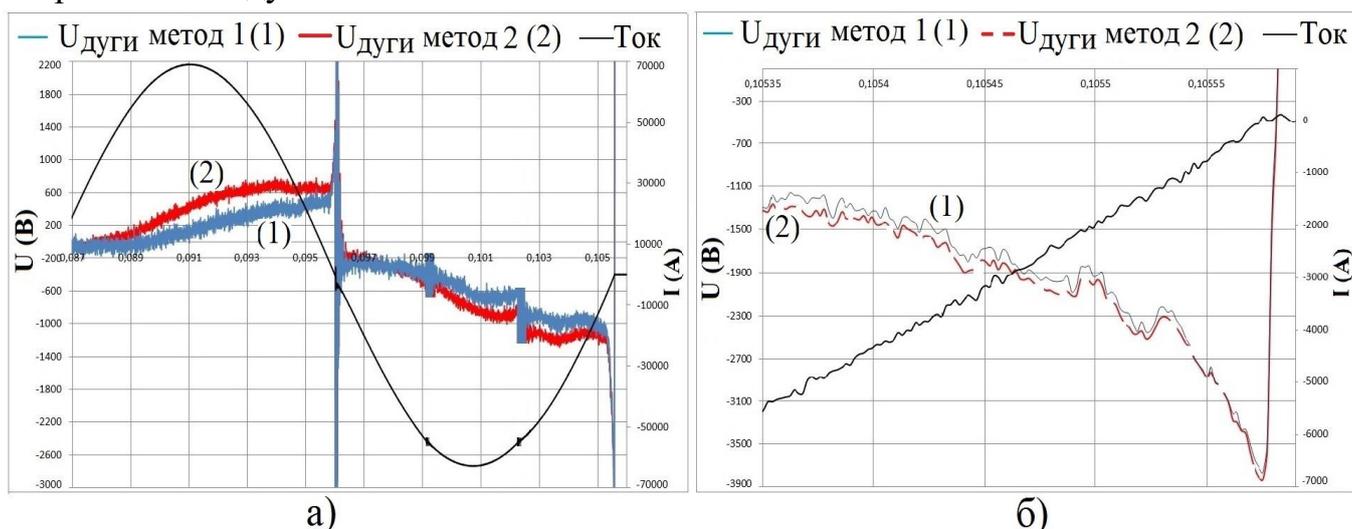


Рисунок 18 – Ток, падение напряжения на дуге в процессе отключения 50 кА – сравнение двух методов (а); процесс в течение последних 0,2 мс перед погасанием дуги (б)

Впервые показано падение напряжения на дуге в абсолютных величинах (В) для конкретной конструкции с достигаемым массовым секундным расходом элегаза. На рисунке 18 приведены результаты исследования дуговых процессов, происходящих в ДУ выключателя на 220 кВ при отключении тока КЗ 50 кА. Установлено, что развиваемое падение напряжение на дуге вследствие разведения контактов и интенсивного охлаждения газовым потоком не приводит к уменьшению тока в последнем полупериоде. Рассмотрена околонулевая зона в процессе отключения тока. Рисунок 18 б иллюстрирует падение напряжения на дуге в течение последних 0,2 мс. Наблюдаются колебания на дуге, вызванные интенсивным охлаждением дуги потоком элегаза.

Величины напряжений погасаний и моменты достижения максимального напряжения погасания относительно нуля тока в диссертационной работе сведены в сводные таблицы. Последующий анализ дуговых процессов при моделировании дуги моделей Касси и Майера можно производить с помощью аппроксимирующей функции вольт-амперной характеристики в околонулевой зоне. Точность воспроизведения тока и падения напряжения на дуге в указанных интервалах перед погасанием равна 92-97% (Рисунок 19). Временной шаг составляет 2 мкс.

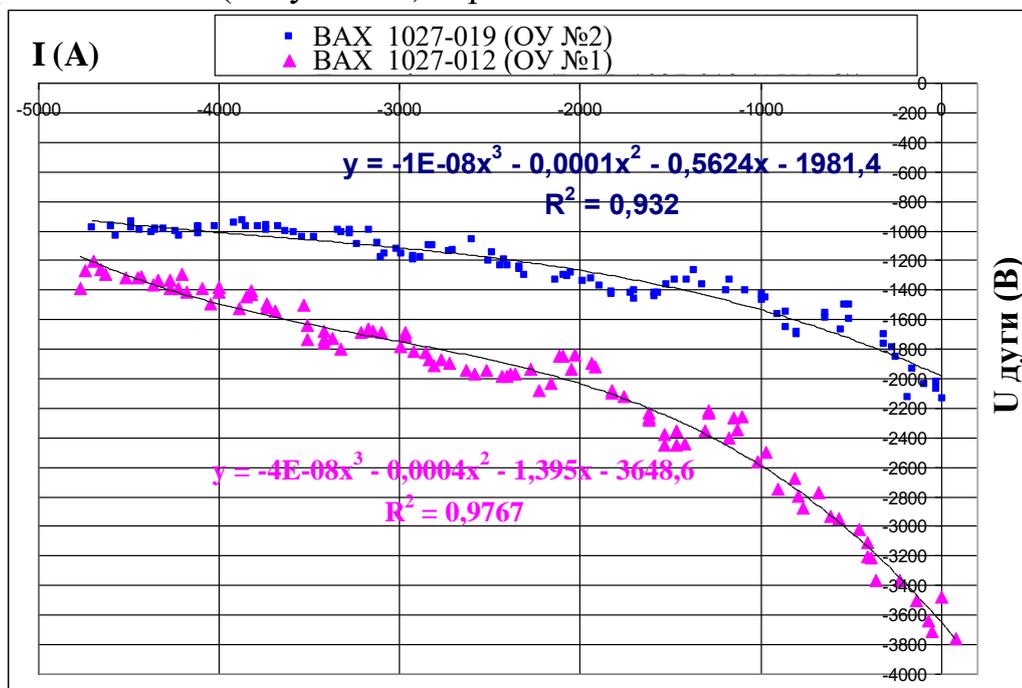


Рисунок 19 – Вольт-амперная характеристика за 0,2 мс до погасания дуги

**В шестой главе** представлены результаты этапы разработки модуля разъединитель-заземлитель в среде элегаз и элегаз+хладон (тетрафторметан). Произведена оптимизация распределения электрического поля и снижение напряженности ЭП в зависимости от применяемых экранов. Произведено подтверждение диэлектрического уровня с помощью проведения высоковольтных испытаний. В диссертации представлены результаты коммутационных испытаний во всех требуемых стандартами ГОСТ/МЭК режимах. Детально рассмотрен режим отключения уравнительного тока 1600А при стандартной величине напряжения в случае применения в газоизолированных подстанциях и 100 В (Рисунок 20) для класса напряжения 110 кВ в случае применения аппарата на обычных классических подстанциях с воздушной ошиновкой. Вариант с отключением такого тока при

повышенном напряжении подразумевает универсальность использования коммутационного аппарата во всех типах подстанций – с газозолированной ошиновкой (GIS) или воздушной ошиновкой (AIS).

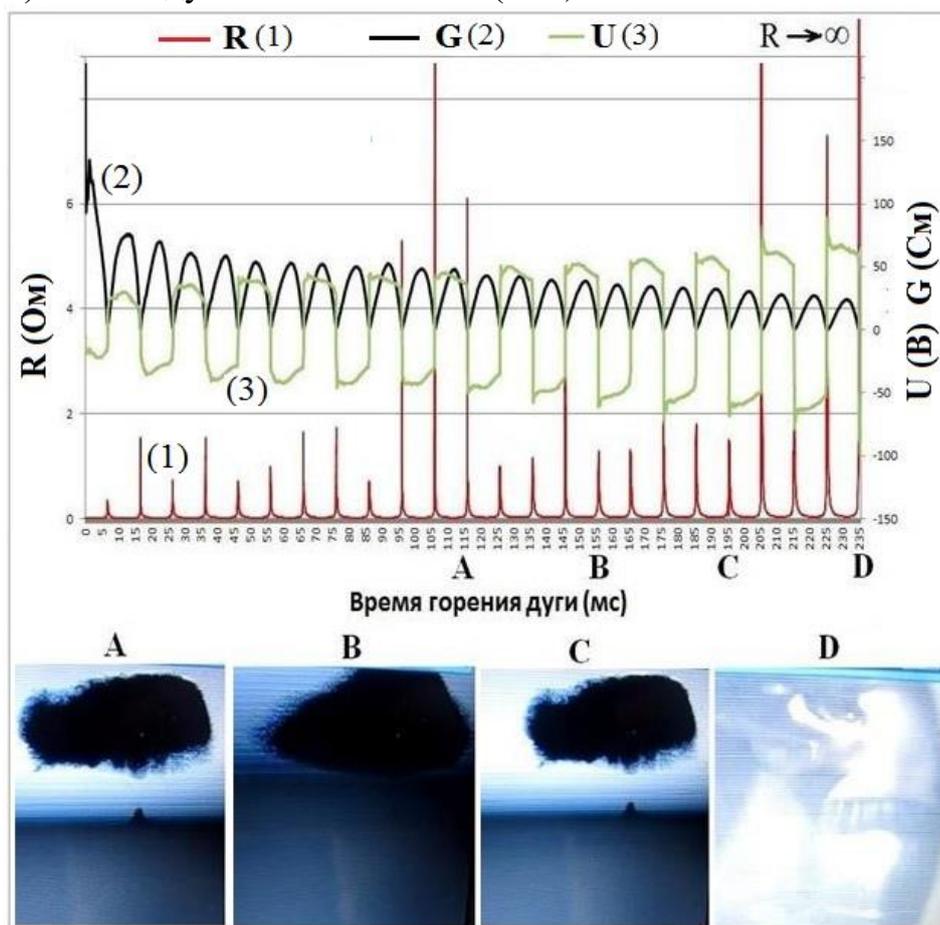


Рисунок 20 – Процесс отключения со средним временем горения дуги 235 мс, падение напряжения на дуге, сопротивление, проводимость

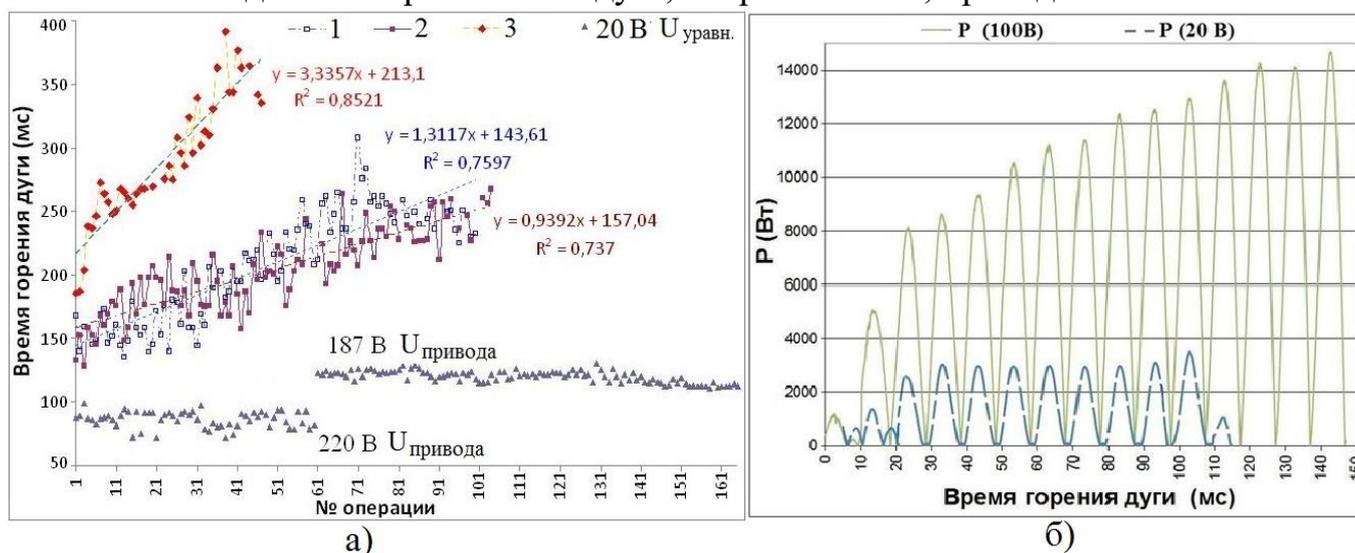


Рисунок 21 – Время горения дуги (а), выделяемые дугой мощности в режимах коммутации с 20 В и 100 В уравнительного напряжения (б)

Рисунок 21 (б) иллюстрирует величины значений выделяемых энергий в режиме отключения тока 1600 А при 20 и 100 В уравнительного напряжения.



Рисунок 22 – Изношенный дугогасительный контакт при 100 В после 100 операций (слева) и дугогасительный контакт при 20 В после 160 операций (справа)

В текущем исследовании оценка износа по массе проводилась на основе эксперимента (Рисунок 22). Контакты взвешивались до и после коммутационных испытаний. Необходимо отметить, что все 3 образца были изготовлены по одной технологии. Технология производства в общем виде: смешение порошка – сжатие под давлением – предварительно спекание – плавка – окончание. Из рисунка 23 видно, что меньший размер гранул исходного порошка вольфрама обеспечивает меньший износ контактов. Следовательно, при отключении больших величин токов при высоком уровне уравнивающего напряжения следует подбирать данный материал контактов с наименьшим размером гранулы (зернистости).

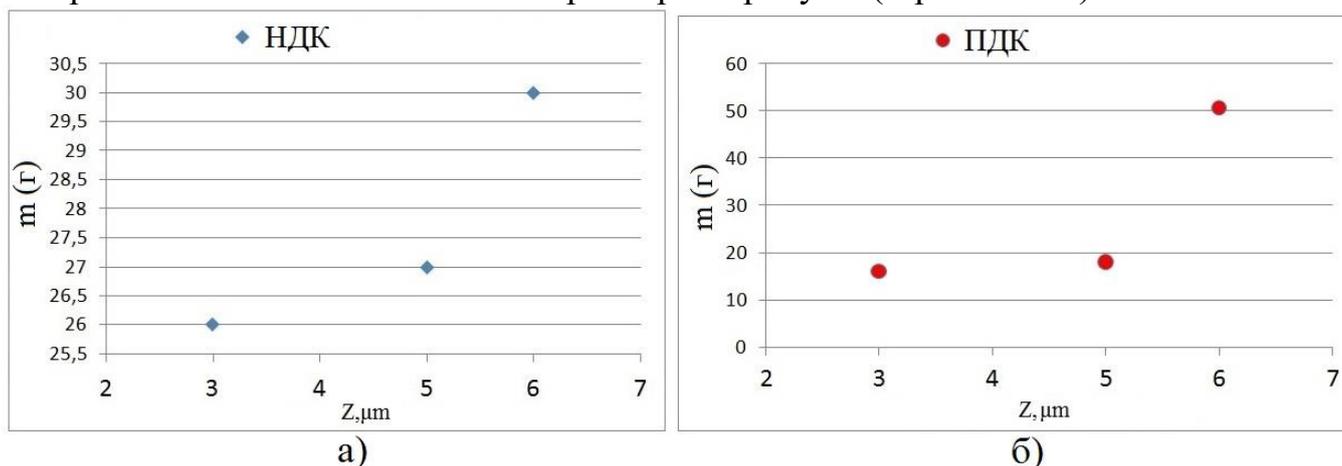


Рисунок 23 – Массовый износ НДК (а), ПДК (б)

Таблица 2 – Результаты экспериментальных данных по трем испытанным образцам

| Параметры  | Образец 1                          | Образец 2                          | Образец 3                         |
|--|------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|
| Состав материала дугогасительных контактов   | ПДК и НДК: вольфрам 80 %, медь 20% | ПДК и НДК: вольфрам 80 %, медь 20% | ПДК и НДК: вольфрам 80%, медь 20% |
| Количество выполненных циклов В-О  | 102                                | 102                                | 47                                |
| $T_{\text{дуги мин}}$ , мс   | 135                                | 128                                | 185                               |
| $T_{\text{дуги макс}}$ , мс  | 308                                | 268                                | 392                               |
| Разброс по времени горения дуги ( $t_{\text{дуги макс}} - t_{\text{дуги мин}}$ ), мс | 173                                | 140                                | 207                               |

|                                   |                |                |  |
|-----------------------------------|----------------|----------------|--|
| Размер гранул (зернистость)- Z,μм | 2-4            | 4-6            | 4-8  |
| Износ по массе НДК, г             | 26             | 27             | 15<br>(30 – в пересчете на 100 циклов В О)     |
| Износ по массе ПДК, г             | 16             | 18             | 25,3<br>(50,6 – в пересчете на 100 циклов В О) |
| Примечание                        | Успешно прошел | Успешно прошел | Не прошел                                      |

Необходимо отметить, что, в отличие от режима уранительного тока при 100 В, во всех остальных режимах отсутствовал какой-либо массовый износ контактов (Рисунок 24). Т.е. дуговой процесс при 100 В напряжения с током 1600 А вызывает разрушение контактов, а дуговой процесс при отключении малого тока 2 А при напряжении 73 000 В не сопровождается вапоризацией материала контактов.



Рисунок 24 – Состояние контактной системы после режимов коммутации тока заряда шин 2А при напряжении 73 кВ (50 опытов) и ненагруженного трансформатора 2А при напряжении 73 кВ (20 опытов)

Отключение уравнивающего тока 1600 А при высоких уровнях напряжений является актуальной проблемой, поскольку для воздушных разъединителей класса напряжения 220 кВ величина уравнивающего напряжения составляет 200 В (МЭК 62271-102, п. В4.106.2), т.е. в два раза больше величины напряжения чем в текущем исследовании.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

На основании проведенных в диссертационной работе исследований получены следующие результаты:

1. Произведено сравнение точности расчета величины тока среза по двум существующим методикам стандартов МЭК62271-306 и IEEE C37.015-2009, доказана необходимость применения методики, учитывающей падение напряжения на дуге в процессе отключения индуктивного тока, внесены предложения в методику испытаний, внесены предложения по определению величин среза тока в новую редакцию ГОСТ52565-2006.
2. Предложен метод на основе прогнозирования достигаемого расстояния между контактами с установленной силовой характеристикой выключателя

- и синхронизации по времени напряженности ЭП с величиной ПВН. Предложен вариант конструкции ДУ с оптимизацией напряженности ЭП.
3. Предложен метод, направленный на решение проблемы оценки газодинамических, механических и электростатических характеристик элегазовых выключателей автокомпрессионного типа при отключении токов КЗ. Метод позволяет оценить отклонение кривой хода контактов при отключении токов КЗ от кривой хода на холостом ходу. Стадии разработки представлены в виде алгоритма (блок-схемы). Научная новизна заключается в разработке комплекса математических моделей для оценки поведения блока контактов, газодинамических и электрофизических характеристик реального выключателя при отключении токов КЗ *совместно* с решением проблемы отключения емкостного тока без повторных пробоев. Реализован метод оценки критического расстояния при обратном ходе контактов после погасания дуги. Предложен вариант конструкции ДУ с оптимизацией по напряженности ЭП.
  4. Детально проработан метод эффективного снижения перенапряжений – синхронная коммутация. В математическую модель заложены функции адаптации собственного времени срабатывания выключателя от различных факторов.
  5. Разработан новый вид распределительной коммутационной элегазовой аппаратуры – элегазонаполненный модуль разъединитель-заземлитель на класс напряжения 110 кВ. Решена проблема снижения отчуждаемой под строительство подстанции площади и обеспечения высокой коммутационной способности газонаполненного модуля разъединитель-заземлитель как на подстанциях с газоизолированной подводящей ошиновкой (GIS), так и с воздушной ошиновкой (AIS). В группу 17А комитета МЭК/ рабочую группу СИГРЭ внесены предложения по методике испытаний газонаполненных разъединителей в режиме коммутации уравнительного тока для подстанций с воздушной ошиновкой.

## **СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Статьи в рецензируемых научных журналах, определенных ВАК:**

1. Черноскутов Д.В. Перенапряжения, создаваемые в процессе коммутации шунтирующего реактора высоковольтным элегазовым выключателем / Черных И.В., Д.В. Черноскутов // ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2016. № 1. С. 36–41. (0,375 п.л./ 0,187 п.л.).
2. Черноскутов Д.В. Математический метод расчета электрической прочности и анализ отключающей способности высоковольтного элегазового выключателя / Черных И.В., Хомяков Р.А., Д.В. Черноскутов // ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2016. №5. С. 33–39. (0,565 п.л./0,3 п.л.).

3. Черноскутов Д.В. Конструирование, разработка и исследование отключающей способности газонаполненного высоковольтного разъединителя / Черных И.В., Д.В. Черноскутов // Научный вестник НГТУ. 2015. Том 59. № 2. С. 108–119. (0,75 п.л./ 0,375 п.л.).
4. Черноскутов Д.В. Исследование характеристик электрической прочности межконтактного промежутка элегазового выключателя на класс напряжения 110 кВ с применением системы управляемой коммутации / Д.В. Черноскутов // Научное обозрение. 2015. № 10. С. 87–96. (0,937 п.л.).
5. Черноскутов Д.В. Investigation of the electrical strength of a contact gap of the high voltage live tank circuit breaker 126 kV class using an intelligent controlled switching system // Д.В. Черноскутов, Д.А. Чечушков // WIT Transactions on Ecology and the Environment, Energy Production and Management in the 21<sup>st</sup> Century. 2014. № 190. С. 345–355. (0,685 п.л./ 0,34 п.л.).
6. Черноскутов Д.В. Research of Cold Rate of Rise of Dielectric Strength of SF<sub>6</sub> Circuit Breaker / Д.В. Черноскутов // Сборник трудов Международной IEEE конференции по управлению и связи – SIBCONFERENCE 2015, 21–23 мая, 2015 г., Омск. (0,312 п.л.).
7. Черноскутов Д.В. Development and Research of Switching Performance of High Voltage Gas Insulated Disconnecting Switch / Д.В. Черноскутов // Сборник трудов Международной IEEE конференции по управлению и связи, 21–23 мая, 2015 г., Омск. (0,375 п.л.).
8. Черноскутов Д.В. Research of Shunt Reactor Switching Phenomena in SF<sub>6</sub> Circuit Breaker / Д.В. Черноскутов // Сборник трудов Международной IEEE конференции по управлению и связи, 21–23 мая, 2015 г., Омск. (0,437 п.л.).
9. Черноскутов Д.В. Research of High Current Interruption Process in SF<sub>6</sub> Gas Insulated Disconnecting Switch / Д.В. Черноскутов // Сборник трудов конференции 2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM-2016). (0,375 п.л.).

### Другие публикации

10. Черноскутов Д.В. Исследование электрической прочности межконтактного промежутка элегазового выключателя на класс напряжения 110 кВ с применением интеллектуальной системы управляемой коммутации / Д.В. Черноскутов // Сборник статей Международной научно-практической конференции «Наука и образование XXI века». Уфа: РИЦ БашГУ, 2013. С.271-279. (0,562 п.л.).
11. Черноскутов Д.В. Исследование электрической прочности межконтактного промежутка элегазового выключателя на класс напряжения 110 кВ с применением интеллектуальной системы управляемой коммутации / Д.В. Черноскутов // Сборник материалов научно-практической конференции «Энерго-и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии». Екатеринбург, УрФУ 2013. С.249-251. (0,187 п.л.).

12. Черноскутов Д.В. Анализ и исследование эффекта термодинамической закупорки сопла в высоковольтном коммутационном аппарате / Д.В. Черноскутов, Р.А. Хомяков // Сборник статей Международной научно-практической конференции «Приоритетные направления развития науки», 3 апреля 2014 г. Уфа. Уфа: РИЦ БашГУ, 2014. С.141-143. (0,187 п.л. / 0,1 п.л.).
13. Черноскутов Д.В. Исследование электрофизических и газодинамических характеристик альтернативного изоляционного и дугогасительного средства для коммутационного электрического аппарата / Д.В. Черноскутов // Сборник материалов научно-практической конференции «Энерго-и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии», 16 декабря 2014 г., г. Екатеринбург. Екатеринбург, 2014. С. 257-259. (0,187 п.л.).

Подписано в печать  
Печать офсетная

Формат 60\*84 1/16  
Тираж 120 экз.

Бумага писчая  
Заказ № 212

---

Отпечатано в типографии ООО «Таймер»  
620219, Екатеринбург, ул. Луначарского, 136.