

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования

«Ульяновский государственный технический университет»

На правах рукописи

ЮРЕНКОВ ЮРИЙ ПЕТРОВИЧ

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ОГРАНИЧИТЕЛЕЙ ТОКА НА ОСНОВЕ
ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ САМОВОССТАНАВЛИВАЮЩИХСЯ
ПРЕДОХРАНИТЕЛЕЙ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ДО 1 КВ**

Специальность 2.4.2 – Электротехнические комплексы и системы

**Диссертация на соискание
учёной степени кандидата технических наук**

Научный руководитель:
доктор технических наук,
старший научный сотрудник
Кузнецов А.В.

Ульяновск 2022

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	7
1. Анализ способов повышения надежности СЭС до 1 кВ при коротких замыканиях.....	13
1.1. Ожидаемое изменение структуры СЭС с учётом приоритетных направлений научно-технологического развития РФ.....	13
1.2. Надёжность СЭС при тепловом воздействии токов короткого замыкания на её элементы.....	15
1.3. Основные способы повышения надёжности СЭС в условиях повышенных токов КЗ.....	15
1.3.1. Завышение номинальных параметров СЭС.....	15
1.3.2. Применение токоограничивающих устройств	22
1.4. Применение ограничителей тока различного типа на участках СЭС....	33
1.5. Выводы по первой главе.....	37
2. Состояние исследований в области разработки ограничителей тока на основе жидкометаллических самовосстанавливающихся предохранителей.....	39
2.1. Конструктивные особенности.....	39
2.2. Результаты коммутационных испытаний ограничителей тока, полученные различными инициативными группами учёных.....	47
2.3. Коммутационный ресурс ЖСП и способы его повышения.....	49
2.3.1. Применение материалов диэлектрической втулки повышенной стойкостью к воздействию электрической дуги....	50
2.3.2. Шунтирование ЖСП низкоомным резистором.....	50
2.3.3. Применение ЖСП с составной плавкой вставкой (ЖСПС).....	50
2.3.4. Структурный синтез новых схемных решений.....	53
2.4. Рекомендации по применению ЖСП в токоограничивающих устройствах.....	55

2.5. Задачи дальнейших исследований для получения практического выхода.....	59
2.6. Выводы по второй главе.....	61
3. Математическая модель цепи короткого замыкания с ограничителем тока на основе жидкометаллических самовосстанавливающихся предохранителей.....	63
3.1. Известная модель и её функциональные возможности.....	63
3.2. Новая модель электротехнического комплекса с ограничителем тока на основе ЖСП с шунтирующим сопротивлением	64
3.2.1. Этапы процесса короткого замыкания.....	65
3.2.2. Пропускаемый ограничителем ток и тепловой интеграл.....	81
3.3. Оценка адекватности математической модели.....	82
3.4. Исследование новой математической модели.....	86
3.4.1. Зависимости интеграла отключения от соотношения сопротивлений электрической дуги и шунтирующего сопротивления... ..	87
3.4.2. Зависимости интеграла отключения от напряжения зажигания электрической дуги.....	89
3.4.3. Зависимости интеграла отключения от времени существования паровой пробки.....	90
3.4.4. Энергия электрической дуги в ЖСП.....	91
3.5. Новая модель электротехнического комплекса с ограничителем тока на основе ЖСПС с шунтирующим сопротивлением и повышенным коммутационным ресурсом.....	93
3.6. Новая модель электротехнического комплекса с ограничителем тока на основе ЖСП с двухступенчатым принципом токоограничения	100
3.6.1. Структурная схема и математическое описание процесса короткого замыкания.....	100
3.6.2. Энергия электрической дуги в ЖСП1	106

3.7. Выводы по третьей главе.....	111
4. Параметрический синтез. Методика выбора параметров ограничителя тока для использования в СЭС.....	114
4.1. Перегрузочная способность элементов систем электроснабжения.....	114
4.2. Параметрический синтез ограничителя тока с одноступенчатым принципом токоограничения.....	116
4.2.1. Параметрический синтез ограничителя тока с однородной плавкой вставкой.....	120
4.2.2. Параметрический синтез ограничителя тока с составной плавкой вставкой.....	120
4.2.3. Упрощённая инженерная методика параметрического синтеза ограничителя тока с одноступенчатым принципом токоограничения....	120
4.3. Параметрический синтез ограничителя тока с двухступенчатым принципом токоограничения.....	123
4.4. Пример параметрического синтеза всех типов ограничителей тока на основе ЖСП.....	125
4.4.1. Пример параметрического синтеза ограничителя с одноступенчатым принципом токоограничения.....	125
4.4.2. Пример параметрического синтеза ограничителя с двухступенчатым принципом токоограничения.....	126
4.4.3. Снижения отключающей способности автоматического выключателя.....	127
4.5. Выводы по четвёртой главе.....	129
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	132
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	134
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	145
П.1. КОНСТРУКЦИЯ МАКЕТНОГО ОБРАЗЦА ЖСП. ТЕХНОЛОГИЯ ПОДГОТОВКИ К ЛАБОРАТОРНЫМ ИССЛЕДОВАНИЯМ.....	146
П.1.1. Конструкция макетного образца ЖСП без блока создания	

начального давления и ее элементы.....	147
П.1.2. Блок создания начального давления.....	154
П.1.3. Технология заправки ЖСП жидким металлом.....	155
П.1.4. Технология подготовки ЖСП к лабораторным испытаниям.....	160
П.2. ПРОГРАММНАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ЦЕПИ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ С ОГРАНИЧИТЕЛЕМ ТОКА НА ОСНОВЕ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ САМОВОССТАНАВЛИВАЮЩИХСЯ ПРЕДОХРАНИТЕЛЕЙ.....	163
П.2.1. Программная модель электротехнического комплекса с ограничителем тока на основе ЖСП с шунтирующим сопротивлением..	164
П.2.2. Программная модель электротехнического комплекса с ограничителем тока на основе ЖСПС с шунтирующим сопротивлением и повышенным коммутационным ресурсом.....	166
П.2.3. Программная модель электротехнического комплекса с ограничителем тока на основе ЖСП с двухступенчатым принципом токоограничения.....	167
П.2.4. Результаты исследования модели электротехнического комплекса с ограничителем тока на основе ЖСП с шунтирующим сопротивлением в процессе отладки и тестирования.....	168
П.2.4.1. Расчёт пропускаемого теплового импульса ограничителя тока. Материал плавкой вставки – ртуть.....	169
П.2.4.2. Расчёт пропускаемого теплового импульса ограничителя тока. Материал плавкой вставки – калий.....	171
П.2.4.3. Расчёт пропускаемого теплового импульса ограничителя тока. Материал плавкой вставки – натрий.....	173
П.2.4.4. Графики зависимости теплового интеграла для плавкой вставки из ртути, калия, натрия от некоторых параметров электротехнического комплекса.....	175
П.2.4.5. Расчётная осциллограмма тока и пропускаемый тепловой	

интеграл при различных сопротивлениях электрической дуги.....	176
П.3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОГРАНИЧИТЕЛЯ ТОКА.....	178
П.3.1. Исследование переходного сопротивления жидкого металла (натрий) с материалом контактного вывода (нержавеющая сталь – 08X18H10).....	178
П.3.2. Определение номинального тока макетного образца жидкометаллического предохранителя.....	181
П.3.3. Исследование влияния шунтирующего сопротивления на интеграл дуги и энергию дуги жидкометаллического предохранителя...	182
П.3.4. Коммутационные испытания ограничителя тока на основе жидкометаллического предохранителя.....	186
П.3.5. Программа коммутационных испытаний ограничителя тока.....	194
П.4. ДОКУМЕНТЫ О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ.....	199

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Важнейшим требованием к системам электроснабжения является высокая надёжность, в том числе при аварийных ситуациях, связанных с возможностью возникновения коротких замыканий. Токи короткого замыкания могут достигать значительных величин и оказывают разрушающее воздействие на всё технологическое оборудование систем электроснабжения. Это выдвигает повышенные требования к отключающей способности коммутационной аппаратуры. В перспективе развитие электроэнергетической системы РФ предполагает увеличение плотности нагрузок и сокращение расстояний для транспортировки электроэнергии, внедрение интеллектуальных электрических сетей (Smart Grid), применение дополнительных источников генерации электроэнергии на основе возобновляемых источников энергии, повышение номинального напряжения электрических сетей и т.п. Очевидно, что при этом возрастают токи короткого замыкания (КЗ). Повышенные требования к отключающей способности коммутационной аппаратуры ещё более возрастают.

Вопросы, касающиеся требований к предельной отключающей способности коммутационной аппаратуры в настоящем и будущем, связанном с развитием электроэнергетической системы в соответствии с направлениями научно-технологического развития РФ слабо освещены в литературе. Вполне возможно, что предельная отключающая способность коммутационной аппаратуры в ряде случаев не будет достаточной, не позволит включать на параллельную работу дополнительные источники питания, силовые трансформаторы, линии электропередач, препятствует развитию технологий энергосберегающих СТРЭ, будет ограничивать возможности умных электрических сетей (Smart Grid), в особенности с гексагональной структурой. Одним из вариантов решения проблемы является применение ограничителей тока. Большая протяжённость электрических сетей 0,4 кВ требует массового применения таких устройств. По этой причине большое значение при выборе токоограничивающего устройства

является его стоимость. Обзор литературных источников показывает, что такими ограничителями могут быть ограничители на основе жидкометаллических самовосстанавливающихся предохранителей (ЖСП). Это позволяет применять недорогие упрощённые автоматические выключатели с пониженной отключающей способностью.

Результаты исследований ЖСП и ограничителей тока на их основе как за рубежом, так и в РФ пока не достигли того уровня, при котором можно говорить об их промышленном производстве и применении. Вопросы применения ограничителей тока на основе ЖСП их структурного и параметрического синтеза остаются открытыми. Исследования, связанные с обоснованием целесообразности и необходимости применения ограничителей тока на основе ЖСП в системах электроснабжения напряжением до 1 кВ, их структурным и параметрическим синтезом, являются важными и актуальными.

Объект исследования. Надежность и экономичность системы электроснабжения до 1 кВ при коротких замыканиях с учетом перспективного развития электроэнергетической системы РФ.

Предмет исследования. Электротехнический комплекс «источник питания - ограничитель тока – защищаемые элементы электрической сети» напряжением до 1 кВ в режиме короткого замыкания.

Цель работы. Совершенствование ограничителей тока на основе ЖСП, обеспечивающее снижение инвестиций в ЭС до 1 кВ за счет возможности применения автоматических выключателей с пониженной отключающей способностью и снижения требований к динамической и термической стойкости проводников.

Задачи диссертационного исследования:

1. Оценка эффективности устройств ограничения токов короткого замыкания в СЭС напряжением до 1 кВ. Освоенные промышленностью ограничители тока и их характеристики. Ограничители тока на стадии разработки.

2. Анализ состояния исследований в области разработки ограничителей тока на основе жидкометаллических самовосстанавливающихся предохранителей и их совершенствование.

3. Разработка и исследование уточненных математических моделей процесса короткого замыкания в электротехническом комплексе с ограничителем тока на основе ЖСП, отличающихся от известных меньшим количеством допущений.

4. Параметрический синтез ограничителей тока на основе ЖСП.

5. Разработка физической модели ограничителя тока, технологии ее изготовления, лабораторные испытания, подтверждающие достоверность и адекватность математической модели и результатов ее исследования

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработана и исследована уточненная математическая модель процесса короткого замыкания в электротехническом комплексе с ограничителем тока на основе ЖСП с одноступенчатым принципом токоограничения, отличающаяся от известных меньшим количеством допущений.

2. Впервые разработана математическая модель процесса короткого замыкания в электротехническом комплексе с ограничителем тока с двухступенчатым принципом токоограничения.

3. Впервые проведен параметрический синтез ограничителей тока с одно и двухступенчатым принципом токоограничения.

4. Получены новые результаты экспериментальных исследований, которые могут быть использованы для дальнейшего совершенствования конструкций ограничителей тока на основе ЖСП.

Практическая ценность (значимость) работы:

1. Предложено новое техническое решение, защищенное Патентом РФ, обеспечивающее дополнительный эффект увеличения коммутационного ресурса ЖСП за счет двухступенчатого принципа токоограничения.

2. Разработана конструкция физической модели ограничителя тока, обеспечивающая возможность проведения коммутационных испытаний в

широком диапазоне номинальных токов, благодаря использованию сменных диэлектрических втулок различного внутреннего диаметра.

3. Разработана методика выбора параметров элементов ограничителей тока на основе ЖСП с одноступенчатым и двухступенчатым принципом токоограничения для использования в электротехническом комплексе «источник питания - ограничитель тока – защищаемые элементы электрической сети».

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Уточненная математическая модель процесса короткого замыкания в электротехническом комплексе с ограничителем тока на основе ЖСП с одноступенчатым принципом токоограничения, отличающаяся от известных меньшим количеством допущений.

2. Новое техническое решение, защищенное Патентом РФ, обеспечивающее дополнительный эффект увеличения коммутационного ресурса ЖСП за счет двухступенчатого принципа токоограничения.

3. Новая математическая модель процесса короткого замыкания в электротехническом комплексе с ограничителем тока с двухступенчатым принципом токоограничения.

4. Методика и результаты параметрического синтеза ограничителей тока с одно и двухступенчатым принципом токоограничения.

5. Физическая модель ограничителя тока на основе ЖСП и результаты экспериментальных исследований, которые могут быть использованы для дальнейшего совершенствования конструкций ограничителей тока на основе ЖСП.

Методы исследования заключаются в применении основных положений теории электрических цепей, а также математического и физического моделирования. Анализ работы системы проведён на ЭВМ с использованием разработанного программного комплекса.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих НТК:

1. Седьмая Международная научно-техническая конференция «Энергосбережение в городском хозяйстве, энергетике, промышленности», г. Ульяновск, 21.04.2017 - 22.04.2017.

2. АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ АПК, IX международная научно-практическая конференция, г. Саратов, 15.04.2018 - 16.04.2018.

3. Международная научная Электроэнергетическая конференция ISEPC – 2019, г. Санкт - Петербург, 23.05.2019 - 24.05.2019

4. Пятнадцатая всероссийская (седьмая международная) научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых учёных: материалы конференции «ЭНЕРГИЯ-2020», г. Иваново, 07.04.2020 - 10.04.2020

5. High Speed Turbomachines and Electrical Drives Conference 2020 (HSTED - 2020), Prague, Czech Republic, 14.05.2020 - 15.05.2020

6. ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ. ЦЕНОЛОГИЯ. ЭКОЛОГИЯ И ЭНЕРГОБЕЗОПАСНОСТЬ, г. Астрахань, 16.09.2020 - 19.09.2020

7. 12th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE), Bucharest, Romania, 25.03.2021 – 27.03.2021

8. Внутривузовские научно-технические конференции УлГТУ, г. Ульяновск, 2017-2021 г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 15 научных работ, в том числе 3 статьи в журналах из перечня ВАК, 4 статьи в журналах, рецензируемых базами данных Scopus и Web of Science, получен 1 патент на изобретение и 1 свидетельство на регистрацию программы для ЭВМ.

Личный вклад автора заключается в формулировке и выполнении основных задач исследования, определении основных положений научной новизны и практической значимости, разработке модели, выполнении расчётов. В работах, опубликованных в соавторстве, соискателю принадлежит постановка задач, вошедших в диссертацию, и их аналитическое решение.

Информация о финансовой поддержке. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-90307.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности.

Диссертация соответствует паспорту научной специальности 2.4.2. «Электротехнические комплексы и системы». По п.1. направления исследований в работе рассмотрен электротехнический комплекс электроснабжения «источник питания - ограничитель тока - элементы электрической сети». Производится математическое и компьютерное моделирование электротехнического комплекса в целом как системы взаимосвязанных компонентов в системе электроснабжения, его компонентов включая электрический аппарат- ограничитель тока, являющийся равновесной составной частью структуры электротехнического комплекса.

В соответствии с п.3. диссертация включает в себя «разработку, структурный и параметрический синтез электротехнического комплекса»: «источник питания - ограничитель тока - элементы электрической сети в режиме короткого замыкания».

По п.4. в работе проведены исследования работоспособности и качества функционирования электротехнического комплекса «источник питания - ограничитель тока - элементы электрической сети» в аварийном режиме при коротком замыкании.

Структура и объем работы.

Объем диссертации – 200 страниц машинописного текста. Диссертация содержит 92 рисунка, 21 таблица и состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 127 наименований, 4 приложения.

Реализация результатов работы.

Результаты диссертационной работы в виде программной модели использованы при расчете уставок релейной защиты в системе электроснабжения АО «Прометей» (г. Ульяновск) и в учебном процессе УлГТУ (г. Ульяновск) при подготовке бакалавров по профилю «Электроснабжение», магистров по профилю «Электроэнергетические системы, сети, их режимы, устойчивость и надежность».

1. АНАЛИЗ СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ НАДЁЖНОСТИ СЭС ДО 1 кВ ПРИ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЯХ

1.1. Ожидаемое изменение структуры СЭС с учётом приоритетных направлений научно-технологического развития РФ

Одним из приоритетных направлений научно-технологического развития РФ и других стран мира является переход к ресурсосберегающей энергетике. Это напрямую связано с совершенствованием технологий создания энергосберегающих систем транспортировки и распределения электроэнергии (СТРЭ), отмеченных Указом Президента РФ №899 от 7 июля 2011 года [1] как критические технологии в РФ. Создание энергосберегающих технологий неразрывно связано с технологией развития умных «Интеллектуальных электрических сетей» – Smart Grid. Это сети будущего. Литературные источники отражают эту тему пока в ограниченном объёме. Учебная литература практически отсутствует.

Развитие стратегии Smart Grid находит поддержку Государства как за рубежом, так и в РФ. Технология Smart Grid представляет собой систему, оптимизирующую энергозатраты, позволяющую перераспределять электроэнергию. «Интеллектуальные» сети – комплекс технических средств, позволяющий оперативно менять характеристики электрической сети. На технологическом уровне происходит объединение электрических сетей, потребителей и производителей электроэнергии в единую автоматизированную систему, которая в реальном времени позволяет отслеживать и контролировать режимы работы всех участников процесса.

Согласно “Энергетической стратегии России на период до 2030 года” в качестве приоритетных направлений научно-технического прогресса в электроэнергетике выделяется: создание высоко интегрированных интеллектуальных системообразующих и распределительных электрических сетей нового поколения в Единой энергетической системе России

(интеллектуальные сети – Smart Grid) [2]. В настоящее время идёт разработка концепции построения умных сетей, а также реализация проектов по внедрению на объектах ОАО “ФСК ЕЭС” отдельных элементов умных сетей.

В США существует программа Smart Grid Investment Grant (SGIG), которая направлена на ускорение модернизации национальных систем передачи и распределения электроэнергии. Программа была утверждена законом Energy Independence and Security Act (EISA) от 2007 года, раздел 1306. Было выделено 3,4 млрд. долларов на программу Smart Grid Investment Grant (SGIG) [3,4].

1.2. Надёжность СЭС при тепловом воздействии токов короткого замыкания на её элементы

Одним из путей решения задачи создания энергосберегающих систем транспортировки и распределения электроэнергии является создание технологий, обеспечивающих передачу электроэнергии по пути наименьшего электрического сопротивления [38]. Это обеспечивается переключением на отдельную и параллельную работу источников питания, линий электропередач, силовых трансформаторов и т.п. в режиме реального времени в соответствии изменениями нагрузок. Такой режим может быть реализован в интеллектуальных СЭС (Smart Grid).

Очевидно, что при параллельной работе источников питания, линий электропередач, силовых трансформаторов возрастают токи короткого замыкания. Этому способствует увеличение плотности нагрузок и сокращение расстояний для транспортировки электроэнергии, внедрение интеллектуальных СТРЭ (Smart Grid) [5,8], интеллектуальных сетей с гексагональной топологией [6], применение дополнительных источников генерации электроэнергии на основе возобновляемых источников энергии [7], повышение номинального напряжения электрических сетей с 10 до 20 кВ и т.п.

Важнейшим требованием к системам транспортировки и распределения электроэнергии является высокая надёжность, в том числе при возникновении

аварийных ситуаций, связанных с возможностью возникновения коротких замыканий. Токи короткого замыкания могут достигать значительных величин и оказывают разрушающее воздействие на всё технологическое оборудование систем транспортировки и распределения электроэнергии. Для сохранения работоспособности системы технологией предусмотрено отключение поврежденного участка, которое осуществляется устройствами защиты, включающими в себя средства релейной защиты и коммутационные электрические аппараты. Технические характеристики устройств защиты должны позволять защитить неповреждённые элементы от разрушающего теплового воздействия.

За период времени от начала возникновения тока короткого замыкания до его отключения температура элементов технологического оборудования повышается. Её значение зависит от величины тока короткого замыкания и длительности этого периода, т.е. времени действия релейной защиты и электрического аппарата. Задача в данном случае сводится к тому, чтобы не допустить нагрев до критической температуры, при которой нарушается работоспособность технологического оборудования защищаемого участка СТРЭ.

При больших токах короткого замыкания и длительности воздействия термическая и динамическая стойкость защищаемых элементов оказывается ниже, чем возможное тепловое и динамическое воздействие тока короткого замыкания. В этой связи нормами проектирования предписано выполнять проверку выбранных сечений проводников, выбранных силовых полупроводниковых приборов, и других элементов защищаемой сети на термическую и динамическую стойкость в соответствии с утверждёнными методиками как в России [9], так и за рубежом [10,11].

1.3. Основные способы повышения надёжности СЭС в условиях повышенных токов КЗ

1.3.1. Завышение номинальных параметров СЭС

Если окажется, что температура защищаемых элементов достигает критических значений, то проектное решение сводится к завышению номинальных параметров элементов технологического оборудования до уровня, при котором температура новых элементов не будет достигать критических значений. Для проводников это длительно допустимый ток, для полупроводниковых приборов это предельный ток, для коммутационной аппаратуры это предельная отключающая способность. Завышение сечений проводников и кабелей, увеличение номинальных токов защищаемых элементов СТРЭ связано с излишним расходом материалов: меди, алюминия, драгоценных и полудрагоценных металлов. Это увеличивает металлоёмкость сети, приводит к необходимости применять усложнённые конструкции коммутационных аппаратов на участках защищаемой сети. В конечном счёте, увеличивается инвестиционная составляющая в СТРЭ.

Существующие электрические аппараты защиты зачастую не могут ограничить тепловое воздействие тока короткого замыкания на защищаемые элементы СЭС до допустимого уровня [40, 41]. В результате для повышения допустимого показателя термической стойкости требуется завышение их номинальных параметров. Превышение инвестиционной составляющей является неким излишним расходом, предназначенным исключительно на случай возникновения аварийных ситуаций. Эти явления довольно редкие. В СЭС за время жизни проекта КЗ может и не произойти. Однако расходы на это в виде превышения инвестиционной составляющей предусмотрены.

Завышение инвестиционной составляющей в СТРЭ напряжением до 1 кВ по отношению к общим затратам на производство и передачу электроэнергии достигает 2,7 % [12]. Избежать этого можно применением устройств ограничения токов короткого замыкания.

Существуют СЭС, в которых ТКЗ могут достигнуть критического уровня для элементов СЭС. В таком случае придётся завышать номинальные параметры элементов СЭС, и, как следствие, происходит завышение инвестиционной

составляющей. На рис. 1.1. показаны схемы СЭС, в которых ТКЗ могут превышать критические значения. Это возможно за счёт:

- увеличения единичной мощности силовых трансформаторов до $S_n = 4$ МВА;
- включения силовых трансформаторов двух или трёх в параллельную работу (сюда же можно отнести гексагональные сети [43]);
- применения мощных автономных энергетических систем (судовые энергосистемы);
- распространения мощных преобразователей, обеспечивающих преобразование переменного тока в постоянный ток, зависит от наличия многоамперных и токоограничивающих электрических аппаратов, обладающих возможностью коммутирования повышенных значений токов КЗ.

Например, рассмотрим сеть (рис 1.2.), имеющую схему замещения (рис. 1.3.), с расчётным установившимся значением тока короткого замыкания (рис. 1.4.). При раздельной работе трансформаторов в некоторых случаях надо использовать автоматические выключатели с отключающей способностью, выраженной установившимся значением тока короткого замыкания 100 кА, а когда установившийся ток КЗ будет, например, меньше 65 кА, то можно будет использовать автоматические выключатели с номинальным током отключения 65 кА. Во втором случае, когда трансформаторы работают параллельно, автоматические выключатели могут не подойти по отключающей способности даже 100 кА и придётся увеличивать сопротивление сети для уменьшения тока КЗ, что не соответствует стратегии научно-технологического развития РФ.

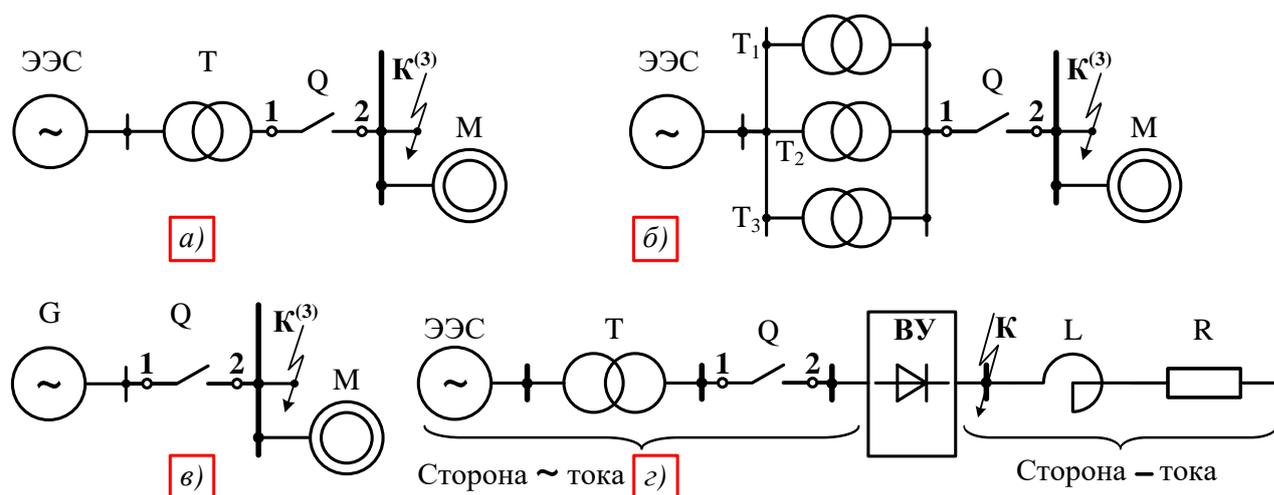


Рис. 1.1. Системы электроснабжения с большими токами КЗ:

a – СЭС с мощной п/ст за счёт увеличенной единичной мощности силового трансформатора до $S_H = 4$ МВА; *б* – СЭС с мощной п/ст за счёт включения нескольких силовых трансформаторов на параллельную работу; *в* – судовая электроэнергетическая система, где в качестве источника питания служит мощный генератор *G*; *г* – СЭС с мощным преобразователем; ЭЭС – электроэнергетическая система бесконечной мощности; *T* – силовой трансформатор с предельным значением номинальной мощности; T_1, T_2, T_3 – группа трансформаторов большой номинальной мощности включаемых в параллель; *M* – эквивалентный по мощности электродвигатель, соответствующий суммарной мощности одновременно работающих электродвигателей; *Q* – полюс аппарата; $K^{(3)}$ – место трёхфазного КЗ; ВУ – вентильное устройство; *L* – реактор; *R* – активная нагрузка; *K* – место КЗ.

Покажем количественную оценку завышения номинальных параметров автоматических выключателей (QF_1, QF_2, QF_3 на рис. 1.2.). Предположим, что в качестве указанных выключателей выбраны автоматические выключатели из каталога завода изготовителя [42] ВА50-45Про (Протон 40). Производитель АО «Контактор» входящий в французский бренд *Legrand*. В случае, если действующий ток КЗ будет больше 65 кА, надо применять автоматический выключатель с номинальным током отключения 100 кА. А если меньше, то с номинальным током отключения 65 кА. Уйти от применения автоматического

выключателя с большим номинальным током отключения (происходит завышение номинального параметра автоматического выключателя!) можно только в случае снижения ТКЗ. Также немаловажно, что применение автоматического выключателя с меньшей отключающей способностью приведёт к уменьшению его стоимости и стоимости всей СЭС. Автоматический выключатель ВА50-45Про (Протон 40) с номинальным током отключения 65 кА имеет стоимость 430, 440 тыс. руб., а с номинальным током отключения 100 кА имеет стоимость 504, 040 тыс. руб. [42]. Завышение инвестиционной составляющей – 14,6%.

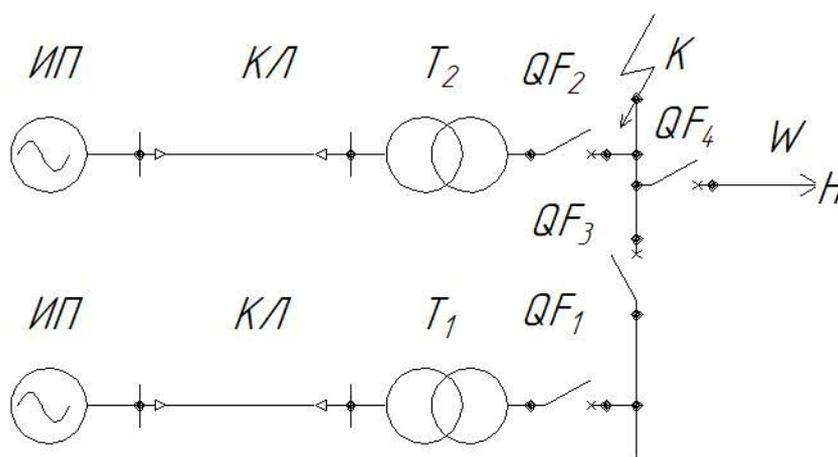


Рис. 1.2. Упрощённая схема СЭС: ИП – источник питания, КЛ – кабельная линия; Т₁, Т₂ – понижающий трансформатор (ТС(З) 4000 10/0,4); QF₁, QF₂, QF₃, QF₄ – автоматические выключатели; W – отходящая линия, питающая нагрузку H.

Более существенным будет завышение номинальных параметров проводников. По ПУЭ выбор проводников производится по нагреву, экономической плотности тока и по условиям короны. «Проводники любого назначения должны удовлетворять требованиям в отношении предельно допустимого нагрева с учётом не только нормальных, но и послеаварийных режимов, а также режимов в период ремонта и возможных неравномерностей распределения токов между линиями, секциями шин и т.п. При выборе проводников по условию нагрева в качестве тока принимается получасовой

максимум тока, наибольший из средних получасовых токов данного элемента сети» [44]. После выбора проводников осуществляется проверка проводников. «Защитные устройства должны отключать любой сверхток в проводниках электрической цепи прежде, чем такой ток может вызвать опасность из-за тепловых или механических воздействий, вредных для изоляции, соединений, оконцеваний или материалов, окружающих проводники» [45].

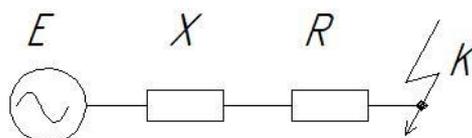


Рис. 1.3. Схема замещения одной ветви СЭС представлена на рис.1.2.: E – источник питания; X , R – суммарные активное и реактивное сопротивление до точки КЗ K (на шинах низшего напряжения). Параметры системы: $U_{ср.н}$ – среднее номинальное напряжение системы (кВ)=10 кВ; I_c – ток системы (примем за ток системы номинальный ток предельного отключения для выключателя со стороны ИП, кА), для выключателя ВВ/TEL-10 = 31,5 кА; X_c – сопротивление системы (Ом) = 0,0077 Ом. Суммарное активное и реактивное сопротивление: $X = X_c + X_{КЛ} + X_T$; $X_{КЛ}$ – реактивное сопротивления КЛ (в зависимости от типа и длины КЛ, Ом), X_T – реактивное сопротивление T (Ом) = 1,35 Ом; $R = R_{КЛ} + R_T + r_{дон}$; $R_{КЛ}$ – активное сопротивление КЛ (в зависимости от типа и длины КЛ, Ом), R_T – активное сопротивление T (Ом) = 0,135 Ом; $r_{дон}$ – дополнительное сопротивление при КЗ на шинах п/ст (1-я ступень сети) при трёхфазном КЗ = 1 мОм.

Приведём пример. К шинам низкого напряжения (рис. 1.2.) присоединены несколько проводников, например, кабель с номинальным сечением (W на рис. 1.2.) $F_{НОМ} = 95 \text{ мм}^2$ с жилами из алюминия и изоляцией из ПВХ. Далее следует его проверить на термическую стойкость. Для кабелей и изолированных проводников время отключения полного тока короткого замыкания в любой точке цепи не должно превышать время, в течение которого достигается допустимая

температура изоляции проводников. При коротком замыкании продолжительностью до 5 с время, в течение которого данный ток короткого замыкания приведёт к повышению температуры изоляции до предельной температуры, может быть вычислено по формуле [45]:

$$t = \left(\frac{k \cdot F_{НОМ}}{I} \right)^2, \quad (1.1)$$

где t – продолжительность, с;

$F_{НОМ}$ – площадь поперечного сечения, мм²;

I – действующее значение тока в А, выраженное как среднеквадратичное значение;

k – является фактором, учитывающим удельное сопротивление, температурный коэффициент и теплоёмкость проводникового материала, и соответствующие начальные и конечные значения температуры.

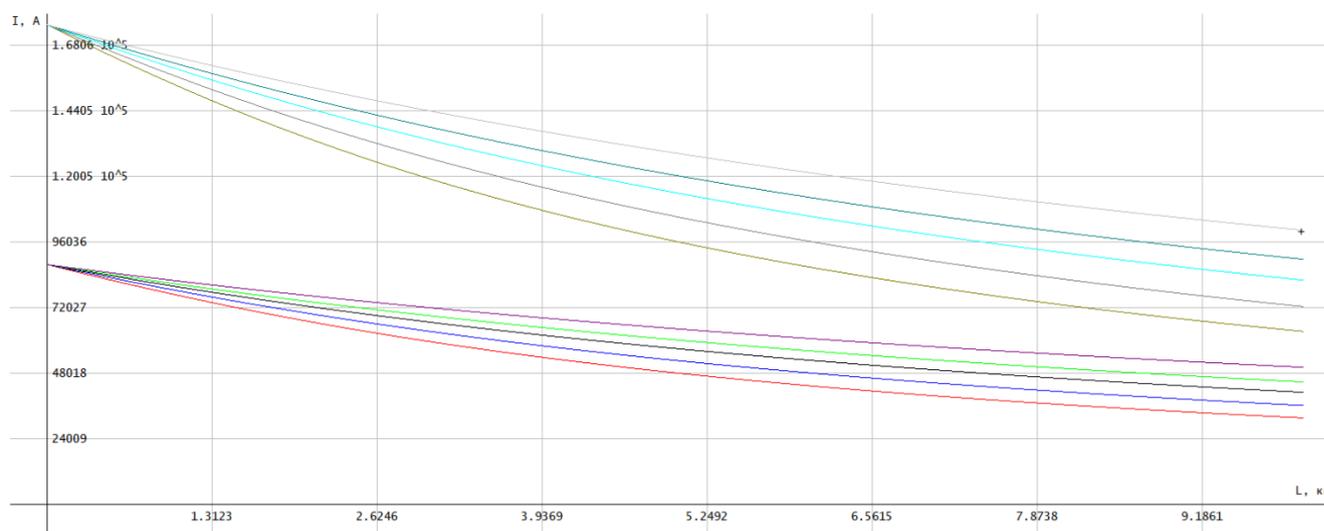


Рис. 1.4. Зависимость допустимого действующего значения тока КЗ I от длины питающей КЛ L для разных сечений (от 95 мм² до 240 мм²) кабелей АСБ.

Для данного кабеля $k=76$ [45]. Предположим, что действующее значение тока $I=100$ кА. Тогда по (1.1):

$$t = \left(\frac{76 \cdot 95}{100000} \right)^2 = 0,005213.$$

Такое значение времени меньше минимального времени срабатывания электромагнитного расцепителя 0,01 с. Кабель не защищён от теплового воздействия.

Увеличиваем номинальное сечение до $F_{НОМ} = 150 \text{ мм}^2$, тогда по (1.1):

$$t = \left(\frac{76 \cdot 150}{100000} \right)^2 = 0,013.$$

Такое время меньше является достаточным для защиты кабеля от теплового воздействия. Но при этом возникла необходимость увеличения сечения на два номинальных порядка! Увеличился расход проводникового материала.

Следует отметить, что при установке в сети селективных автоматических выключателей, в которых предусмотрена искусственно созданная выдержка времени отключения тока короткого замыкания, время отключения КЗ увеличивается, что создаёт дополнительные проблемы, связанные с завышением сечений проводников и кабелей.

Решение этой проблемы может быть обеспечено за счёт блокировки выдержки времени при коротком замыкании на участке сети от селективного автоматического выключателя до ближайшего нижеустановленного автоматического выключателя. Блокировка должна осуществляться при отсутствии тока короткого замыкания через нижеустановленный автоматический выключатель. Реализация такого решения не вызывает принципиальных трудностей и связана с использованием цифровых технологий управления электрической сетью.

1.3.2. Применение токоограничивающих устройств

Наряду с завышением номинальных параметров элементов СЭС на практике применяются схемотехнические решения, обеспечивающие ограничение токов КЗ для повышения надёжности СЭС, а также применяются специальные токоограничивающие устройства.

Конструкций токоограничивающих устройств достаточно много (рис. 1.5.). Часть из них производится в РФ и за рубежом и широко применяется в системах электроснабжения. Уровень исследований другой части пока не позволяет производить промышленное производство. Среди них есть устройства, которые проходят эксплуатационные испытания, стадию ОКР или стадию НИР. Каждое из них обладает преимуществами и недостатками. Специфические особенности построения СТРЭ выдвигают особые требования к техническим характеристикам токоограничивающих устройств. Ранее эти требования не учитывались при проектировании и создании конструкций токоограничителей. Возникает задача выбора токоограничивающих устройств в соответствии с новыми требованиями для энергосберегающих СТРЭ. Конкретные рекомендации по выбору можно дать на основании сравнительного анализа известных токоограничивающих устройств, их классификации, определения преимуществ и т.п. Результаты могут быть полезны для формирования технической политики в этом направлении, для разработчиков токоограничивающих устройств, бизнеса, государственных органов.

Учёные разных стран мира трудятся над совершенствованием коммутационных электрических аппаратов и их составных элементов. Увеличивается их быстродействие и токоограничивающие свойства. Совершенствуются традиционные электрические аппараты [13]. Плавкие предохранители и автоматические выключатели. На сегодняшний день результаты исследований показывают, что совершенствование коммутационных аппаратов, направленное на повышение коммутационной способности и быстродействия связаны с их усложнением и увеличением стоимости. Это препятствует их массовому применению в системах электроснабжения. В существующей ситуации технические характеристики применяемых устройств защиты в ряде случаев не обеспечивают защиту элементов электрической сети, выбранных по номинальным параметрам. В результате требуется их завышение.

Быстродействием и токоограничивающими свойствами обладают специальные предохранители и автоматические выключатели. Эти

токоограничивающие устройства наряду с функцией ограничения токов короткого замыкания осуществляют ряд других функций. Например, отключение сети при возникновении тока короткого замыкания, при этом обеспечивают селективность действия коммутационных аппаратов, обеспечивают коммутацию сети в нормальных режимах, осуществляют защиту сети от перегрузок и т.п. Эти аппараты выполняют несколько функций и являются *многофункциональными токоограничивающими устройствами*.

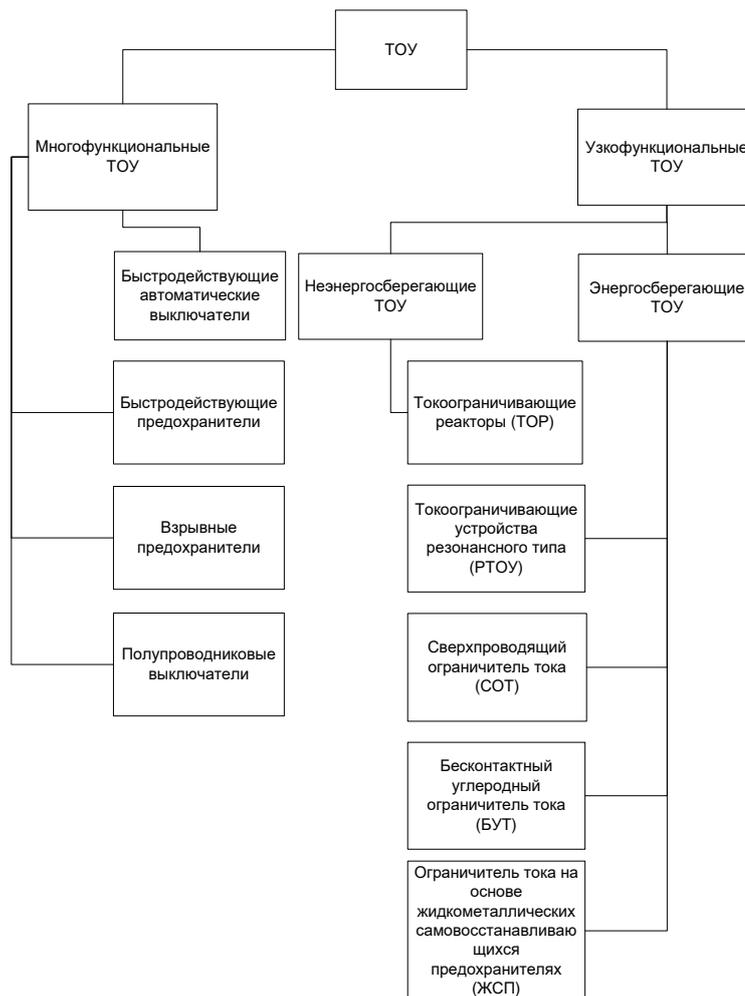


Рис. 1.5. Классификация ТОУ по типу.

Многофункциональные токоограничивающие устройства.

Быстродействующие коммутационные аппараты. Включают в себя быстродействующие автоматические выключатели и предохранители, взрывные предохранители и полупроводниковые выключатели.

Быстродействующие автоматические выключатели и предохранители. Они отключают электрическую сеть при повреждении и могут ограничивать при этом ток короткого замыкания. Серийно выпускаются быстродействующие предохранители и быстродействующие автоматические выключатели. Например, в РФ завод «Контактор», который входит в группу компаний *Legrand*, выпускает токоограничивающие автоматические выключатели ВА53–41 на номинальные токи до 1000А и напряжение до 660 В [15]. За рубежом японская фирма *Mitsubishi* производит серию токоограничивающих автоматических выключателей *F-U Series Ultra Current-limiting Type* на номинальные токи 15-800 А и напряжение 200-690 В [14]. На Российском рынке представлены быстродействующие предохранители ПП57, ПП59, ПП60 с серебряной плавкой вставкой на номинальные токи от 25 А до 1000 А и напряжение 220, 380, 660, 1250, 2000 В. За рубежом компания *Bussmann* и многие другие производит предохранители для переменного тока с номинальным током до 7500 А и напряжением 400, 660, 690, 1000 и 1250 В [16]. Все они в массовом порядке используются в электрических сетях низкого напряжения. Однако их токоограничивающие свойства и быстродействие не всегда являются достаточными для защиты элементов электрической сети. Приходится завышать номинальные параметры элементов защищаемой сети.

Взрывные предохранители. Они представляют собой устройства, в которых плавкая вставка в аварийном режиме разрушается под действием взрывного заряда. Контроль тока в цепи осуществляется датчиком тока. При коротком замыкании датчик выдаёт сигнал для срабатывания взрывного устройства, расположенного внутри плавкой вставки трубчатой формы. В результате взрыва вставка разрушается. Электрическая дуга гасится. Электрическая цепь отключается. Следует отметить, что сигналом или входной воздействующей величиной от датчика тока может быть не только значение тока, но и скорость его

нарастания, что существенно увеличивает быстродействие [17]. Время срабатывания или интервал времени от момента достижения аварийным током значения, равного току уставки, до начала токоограничения предохранителем в этих устройствах составляет доли миллисекунды (0,2 — 0,7 мс).

Взрывные предохранители на номинальные напряжения 0,4-1 кВ, 6- 10 кВ и токи 1- 3 кА, разработанные и выпускаемые более 40 лет зарубежными фирмами Calor Emag (Германия), Fuji (Япония), Ferraz (Франция), G&W Electric Company (США), АBB [39], а также отечественные образцы ВП1, ВР-10 хорошо зарекомендовали себя как аппараты защиты от токов КЗ мощных полупроводниковых преобразователей, в качестве секционных выключателей, аппаратов шунтирования токоограничивающих реакторов и т.п.

Ограничители тока на основе взрывных предохранителей широко используются на предприятиях таких промышленных гигантов, как *SHELL*, *Ford Motor Company*, *IBM* и многих других. В качестве широко используемых за рубежом образцов коммутационных ограничителей тока (*Commutating Current Limiter*) можно назвать *CLiP* (на токи до 5000 А) и *PAF* (на токи до 600 А) [18].

Заложенный в их основу общий принцип двухступенчатой коммутации (параллельно подключённые сильноточный взрывной предохранитель и специальный плавкий предохранитель с плавкой вставкой на небольшой ток) позволяет увеличить номинальный ток до 10 кА и существенно повысить токоограничивающую и отключающую способность при допустимом уровне коммутационных перенапряжений. Сейчас нет других контактных аппаратов защиты на большие номинальные токи (в частности, постоянного тока) и напряжения, способных отключать аварийные токи за столь короткое время при практически неограниченной отключающей способности.

Однако они не лишены недостатков: громоздкость и сложность конструкции, неудобства эксплуатации. Эксплуатация взрывных предохранителей связана с некоторыми неудобствами при замене взрывного устройства. В условиях эксплуатации предусматривается транспортировка и хранение взрывчатых веществ, наличие специально обученного персонала, оборудования и

помещений для хранения и перезарядки плавких вставок. Плавкие предохранители, взрывные предохранители, а также устройства, в состав которых входят предохранители и взрывные предохранители являются устройствами однократного действия. После срабатывания этих устройств требуется их замена запасным комплектом. Это связано с перерывом электроснабжения электроприёмников. При их использовании невозможно автоматическое восстановление питания после ликвидации короткого замыкания. Невозможно автоматизировать процесс управления электрической сетью в нормальном режиме. Это ограничивает их область применения. Автоматические выключатели и полупроводниковые выключатели являются электрическими аппаратами многократного действия и лишены этих недостатков.

Полупроводниковые выключатели. Полупроводниковые выключатели не уступают по отключающей способности взрывным предохранителям. Быстродействие полупроводниковых выключателей обеспечивает отключение сети за время значительно меньше, чем время, необходимое для достижения током короткого замыкания амплитудного значения. В бывшем СССР были разработаны полупроводниковые выключатели серии ВА 81, ВА 83 на номинальный ток от 63 до 1000 А и напряжение 630 В [46]. В настоящее время ЗАО «Институт Энергетической Электроники» специализируется на разработке и изготовлении бесконтактной коммутационной аппаратуры с использованием мощных силовых тиристоров для использования в системах электроснабжения 10/6/0,4 кВ. Имеется информация о разработке полупроводникового выключателя на напряжение 138 кВ научно-исследовательским институтом электроэнергетики (США). Для создания выключателя было решено применять тиристоры с узлом принудительной коммутации.

В силу высокой стоимости массовое применение полупроводниковых выключателей экономически не целесообразно. Их применение ограничивается теми установками, где требуется многократное включение и отключение нагрузки в течение суток, и установками, где происходят частые короткие замыкания. В таких случаях полупроводниковые выключатели нельзя заменить контактными.

Последние обладают ограниченным ресурсом механической износостойкости. Технология создания энергосберегающих СТРЭ предполагает довольно частое изменение конфигурации сети в соответствии с изменениями нагрузок в течение суток. Требуется соответствующие переключения. Контактные аппараты в данном случае имеют ограниченный коммутационный ресурс, часто выходят из строя, приводят к авариям, перерыву электроснабжения. Полупроводниковые выключатели обладают практически не ограниченным коммутационным ресурсом, найдут своё место в энергосберегающих СТРЭ.

Все токоограничивающие аппараты, особенно взрывные предохранители и полупроводниковые выключатели, обладают существенным недостатком. При отключении цепи возникают существенные перенапряжения, оказывающие негативное влияние на систему электроснабжения. Чем выше быстродействие, тем выше уровень перенапряжений. Избежать перенапряжений позволяет применение специальных *узкофункциональных* токоограничивающих устройств.

Узкофункциональные токоограничивающие устройства.

Эти устройства выполняют одну функцию - ограничение тока короткого замыкания. Другие функции, например, отключение тока и т.д. выполняют другие устройства в системе электроснабжения. Узкофункциональное токоограничивающее устройство представляет собой реактор или активное сопротивление, включённое в электрическую цепь. В ряде случаев оно может быть зашунтировано быстродействующими контактными, бесконтактными коммутационными аппаратами или ограничителями, использующими свойства низкотемпературной или высокотемпературной сверхпроводимости. Узкофункциональные токоограничивающие устройства могут использоваться в качестве альтернативы многофункциональным токоограничивающим устройствам для обеспечения надёжности СТРЭ при высоких значениях токов короткого замыкания.

Известные узкофункциональные токоограничивающие устройства можно классифицировать по ряду свойств. При этом можно выделить неэнергосберегающие и энергосберегающие токоограничивающие устройства.

Неэнергосберегающие токоограничивающие устройства представляют собой дополнительное сопротивление в схеме электроснабжения, ограничивающее ток короткого замыкания до необходимого уровня. В нормальном режиме они создают дополнительные потери электроэнергии.

Токоограничивающий реактор. Традиционным устройством, получившим широкое применение, является токоограничивающий реактор. Производится на номинальные токи от 50 до 10000 А и как на низкое напряжение до 1 кВ, так и на высокое напряжение 3-750 кВ. В России выпускают бетонные реакторы марок РБ, РБУ, РБГ и т.д., масляные реакторы, сухие реакторы РТС [19]. За рубежом реакторы производятся компанией *ABB* [20], *Legrand* [21], *BERKELEKTROTEKNIK*, *GBE* и многими другими.

Недостатком токоограничивающего реактора является активное сопротивление обмоток, вызывающее потери активной мощности и энергии в нормальном режиме. Энергосберегающие СТРЭ требуют массового применения токоограничивающих реакторов, что сопровождается ощутимым увеличением потерь. Это противоречит принципу создания технологий энергосберегающих СТРЭ. Избежать потерь электроэнергии позволяют энергосберегающие токоограничивающие устройства. В отличие от неэнергосберегающих устройств, энергосберегающие устройства в нормальном режиме имеют сопротивление близкое к нулю, а при коротком замыкании изменяют его до уровня необходимого для ограничения тока короткого замыкания.

Энергосберегающие токоограничивающие устройства. Схемотехническое решение устройства предполагает при возникновении короткого замыкания дешунтировать реактор или активное сопротивление, при его отключении вновь зашунтировать. При дешунтировании в цепи появляется сопротивление, ограничивающее ток короткого замыкания. Известны схемы, в которых дешунтируется или отключается одна из обмоток сдвоенного реактора. К

энергосберегающим устройствам однократного действия можно отнести токоограничивающие устройства на основе взрывных предохранителей. К энергосберегающим устройствам многократного действия можно отнести токоограничивающие устройства резонансного типа, устройства на основе полупроводниковых выключателей, сверхпроводниковых ограничителей тока, бесконтактных углеродных ограничителей тока, жидкометаллических самовосстанавливающихся предохранителей.

Токоограничивающие устройства резонансного типа. Резонансные токоограничивающие устройства (РТОУ) основаны на использовании эффекта резонанса при рабочих режимах соответствующей цепи и расстройке резонанса при аварийных режимах. В настоящее время известно более 100 вариантов и модификаций резонансных токоограничивающих устройств, отличающихся составом элементов и способом расстройки резонанса. Некоторые РТОУ созданы и эксплуатируются в сетях 6 кВ ряда зарубежных стран [22, 23]. Резонанс в устройствах РТОУ обеспечивается подключением в цепь реактора (индуктивности) и конденсаторной установки. Конденсаторная установка необходимой мощности для РТОУ представляет собой довольно сложное и дорогое устройство. Подобная схема в России не получила практического применения [23].

Сверхпроводниковый ограничитель тока (СОТ). Основным рабочим элементом устройства является сверхпроводник. Он увеличивает своё сопротивление в несколько тысяч раз при скачке тока и снижает его до безопасного уровня. Это происходит за счёт физических свойств материала сверхпроводника [37].

Ранние разработки ограничителей основывались на применении низкотемпературных сверхпроводников (НТСП). К их основному недостатку можно отнести то, что эти материалы находятся в сверхпроводящем состоянии только при температуре, всего на несколько градусов превосходящей абсолютный нуль, что, естественно, делает их охлаждение (в основном жидким гелием) очень дорогим, а саму токоограничивающую установку громоздкой и тяжёлой в

эксплуатации. Несмотря на это, некоторые разработчики достигли достаточно больших успехов в освоении НТСП-токоограничителей. Например, можно отметить совместный проект французской электроэнергетической системы Electricite de France и концерна Alstom. Созданный НТСП-токоограничитель выдержал испытания при напряжении 40 кВ.

Открытие в 1986 году высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) кардинально изменило положение, ведь теперь сверхпроводящего состояния можно достичь охлаждением не до 4К (как у НТСП), а до 77К, и, конечно, не жидким гелием, а азотом, что существенно удешевляет конструкцию ВТСП-токоограничителя и уменьшает его габариты.

Разработками в этой области занимаются как за рубежом, так и в РФ. Объединение американской компании American Super-conductor Corporation (ASC) и концерна SIEMENS ведёт исследование в области ВТСП-токоограничителей. Компания ABB ведёт достаточно успешные исследования. На одной из электростанций Швейцарии для испытаний был установлен ВТСП-токоограничитель ABB 1,2 МВА, 10 кВ. Изготовлен токоограничитель 6,4 МВА 8 кВ с номинальным током 800 А и установлен в немецкую сеть RWE для испытаний. Токоограничитель Matrix, создаваемый компаниями SuperPower (США) и Nexans (Германия) на напряжение 138 кВ готов для применения в действующей сети. Эксплуатационные испытания проходят токоограничитель 10 МВА, 10 кВ, 600 А. В Японии токийской электроэнергетической компанией и Toshiba разработан ограничитель 6,6 кВ, 2000 А [24].

В РФ компания «СуперОкс» запустила производство инновационных токоограничивающих устройств на основе высокотемпературных сверхпроводников. Разработка «СуперОкс» является самым мощным сверхпроводниковым токоограничителем в мире и первым подобным устройством на российском рынке.

Бесконтактный углеродный ограничитель тока. Среди перспективных научно-технологических направлений в области совершенствования приборов электротехники помимо сверхпроводимости в России следует выделить

разработку и создание бесконтактных углеродных ограничителей тока – БУТ. В Институте ядерных исследований РАН работы с углеродными пенками ведутся со второй половины 80 г. прошлого века. В результате предварительных поисковых исследований были обнаружены аномальные электромагнитные эффекты в углеродных наногранулированных плёнках. Одним из них является скачок сопротивления на несколько порядков при критических токах 1-100 мА. В этой связи многие учёные серьёзно рассматривают возможность высокотемпературной сверхпроводимости с критической температурой до 650К [25]. Если сверхпроводящий ограничитель тока требует криогенного охлаждения и работает при сверхнизких температурах, БУТ работает при температурах до 350° С. По сравнению с СОТ, БУТ имеет меньшие габариты и цену и отличается полным отсутствием тока в состоянии высокого сопротивления. По мнению авторов, БУТ способно обеспечить полное отключение сети [26].

Основным элементом конструкции БУТ являются тонкие, толщиной около 1 мкм наноструктурированные углеродные плёнки, нанесённые на кварцевую подложку. Переключение их состояния с низким сопротивлением в состояние с высоким происходит за время порядка 100 мкс. По информации [25] разработка БУТ и последующее его внедрение в различных отраслях может оказаться настоящим прорывом России в области хайтека, а также создать базис для экспансии данных российских технологий на глобальном рынке.

За рубежом осуществляется мощная государственная поддержка внедрения технологий Smart grid в целом, но проектов по созданию БУТ пока нет [26]. Основные риски проекта сосредоточены в технологической плоскости. Работы по разработке технологий активно ведутся. В ближайшее время планируется создание БУТ на номинальный ток до 1000 А.

Жидкометаллический самовосстанавливающийся предохранитель (ограничитель тока). Первые публикации об опытных образцах жидкометаллических самовосстанавливающихся предохранителей (ЖСП) появились в 60-годы прошлого столетия. Однако сегодня не разработаны промышленные образцы ЖСП для использования в системах электроснабжения.

Такие исследования проводятся отдельными инициативными группами в разных странах мира. Это Япония, США, Германия, Китай, РФ, и др. [27-34]. В зарубежной литературе ЖСП называют «Permanent Power Fuse» и «Fast-acting Self-Healing Metallic Fuse». Созданы и исследованы макетные и экспериментальные образцы на напряжение до одного кВ с номинальным током от 60 до 800 А.

ЖСП – это электрический аппарат, подобный обычному плавкому предохранителю, в котором в качестве плавкого элемента применяется жидкий металл (индий, галлий, ртуть, щелочные металлы и т.п.), расположенный в канале диэлектрической втулки. При протекании по жидкометаллической плавкой вставке тока короткого замыкания она испаряется, вызывая взрывообразное повышение давления. При высоком давлении пары металла обладают значительным сопротивлением. В результате ток резко ограничивается. После чего в канале образуется электрическая дуга, которая гасится при естественном переходе тока через нулевое значение. После остывания и конденсации паров жидкого металла электрическая цепь восстанавливается. Экспериментальные исследования показывают, что время восстановления колеблется в достаточно широких пределах и может быть соизмеримо с половиной периода частоты сети [12]. В этой связи во втором, третьем и последующих полупериодах процесс может повторяться до момента отключения цепи дополнительным коммутационным аппаратом. ЖСП в данном случае является ограничителем тока и не предназначен для отключения тока КЗ.

1.4. Применение ограничителей тока различного типа на участках СЭС

Рекомендации по применению ограничителей тока короткого замыкания целесообразно связать с анализом электрической сети. Рассмотрим участки сети низкого напряжения. Конечным её участком являются ответвления к электроприёмникам (ЭП). В большинстве случаев ЭП удалены от центра питания – трансформаторной подстанции. Значения токов короткого замыкания в точках

присоединения ответвлений к распределительным пунктам, распределительным шинопроводам не являются предельными для серийно выпускаемой коммутационной аппаратуры, токоограничивающие устройства не требуются. К электрическим аппаратам в большинстве случаев не предъявляются требования многократности действия. Перерыв питания при замене предохранителя касается только одного или нескольких электроприёмников. В настоящее время в существующих сетях низкого напряжения в качестве коммутационных аппаратов используются предохранители и автоматические выключатели общепромышленного применения. Переход на технологии энергосберегающих и интеллектуальных СТРЭ (Smart Grid) не изменяет структуру этих участков и применяемую коммутационную аппаратуру.

Участки сети, питающие распределительные устройства и распределительные шинопроводы, ближе расположены к источнику питания. Они могут быть присоединены как непосредственно к шинам распределительного устройства силового трансформатора, так и к промежуточному распределительному пункту, в свою очередь присоединённому к шинам распределительного устройства силового трансформатора посредством линий электропередачи (рис. 1.2). В любом варианте токи короткого замыкания возрастают. Чем ближе к источнику питания, тем больше ток короткого замыкания (рис. 1.4). В рассматриваемом случае (рис. 1.2.) ток короткого замыкания ограничивается сопротивлением линии электропередачи, соединяющей распределительный пункт с шинами распределительного устройства силового трансформатора. При превышении током короткого замыкания предельных значений возникает необходимость применять токоограничивающие устройства. В большинстве случаев достаточно использования многофункциональных токоограничивающих устройств, быстродействующих автоматических выключателей или плавких предохранителей. Применение предохранителей связано с перерывом питания на время его замены не одного, а небольшой группы электроприёмников. Предохранители на этих участках находят ограниченное применение.

При непосредственном присоединении распределительного пункта или электроприёмника к шинам распределительного устройства трансформаторной подстанции, особенно в случае объединения силовых трансформаторов на параллельную работу (рис. 1.2.), токи короткого замыкания достигают максимальных значений и могут превышать критические значения для коммутационной аппаратуры и проводников, выбранных по расчётному току нагрузки. Применение токоограничивающих устройств в большинстве случаев необходимо. Причём многофункциональные токоограничивающие устройства – быстродействующие выключатели, полупроводниковые выключатели, предохранители, взрывные предохранители не следует рекомендовать для применения на рассматриваемых участках в силу их недостатков.

Выключатели имеют механические элементы, независимый расцепитель, механизм свободного расцепления, контакты. Несмотря на то, что в быстродействующих выключателях предусмотрено ускорение размыкания контактов за счёт электродинамического эффекта, по быстродействию они уступают предохранителям, полупроводниковым выключателям, взрывным предохранителям. В ряде случаев не обеспечивают ограничение тока короткого замыкания до необходимого уровня. Полупроводниковые выключатели и предохранители в силу преимущественного быстродействия и токоограничивающих свойств создают значительные коммутационные перенапряжения.

Кроме того, электрические аппараты, установленные на шинах распределительной подстанции, должны быть выбраны и проверены по условию селективности, иметь выдержку времени отключения тока короткого замыкания. В противном случае при коротком замыкании на удалённом участке отключится от сети не только этот участок, но все электроприёмники, получающие питание от аппарата, установленного на шинах подстанции. Это будет связано с перерывом электроснабжения значительного числа электроприёмников. Отсутствие выдержки времени снижает надёжность электроснабжения. В одном

многофункциональном аппарате выполнить два противоречивых требования - селективность и быстродействие - невозможно.

Указанные недостатки не имеют места при использовании узкофункциональных энергосберегающих токоограничивающих устройств. При этом селективность обеспечивается традиционными электрическими аппаратами, а ток короткого замыкания ограничивается токоограничивающим устройством. Две эти задачи решаются независимо. При использовании многофункциональных токоограничивающих устройств это невозможно.

Узкофункциональные токоограничивающие устройства с использованием для дешунтирования токоограничивающего резистора аппаратов однократного действия (взрывные предохранители) создают проблему нарушения электроснабжения не одного, а большой группы ЭП на время замены предохранителя. Учитывая это преимущественное применение, на участках сети в непосредственной близости к трансформаторной подстанции остаётся за узкофункциональными энергосберегающими токоограничивающими устройствами с использованием быстродействующих аппаратов многократного действия - полупроводниковых выключателей, сверхпроводниковых ограничителей тока, бесконтактных углеродных ограничителей тока, жидкометаллических самовосстанавливающихся предохранителей. К сожалению, проведённый объём исследований ещё не достиг того уровня, при котором можно говорить о промышленном производстве сверхпроводниковых ограничителей тока, бесконтактных углеродных ограничителей тока, жидкометаллических самовосстанавливающихся предохранителей.

Требуются проведение дополнительных исследований, опытно-конструкторских разработок, разработки технологий промышленного производства. После получения практических результатов, макетных, промышленных образцов узкофункциональных токоограничивающих устройств с использованием сверхпроводниковых ограничителей тока, бесконтактных углеродных ограничителей тока, жидкометаллических самовосстанавливающихся предохранителей, их лабораторных и эксплуатационных испытаний можно

сравнить технические технологические эксплуатационные и экономические характеристики. После чего может быть определена область применения каждого из них в системах электроснабжения.

В электрических сетях низкого напряжения, учитывая большую протяжённость, массовость использования токоограничивающих устройств, следует отдать предпочтение в применении токоограничивающим устройствам с использованием ЖСП, несмотря на недостаток, связанный с ограниченным коммутационным ресурсом. Предположительно затраты на проведение НИОКР, затраты на производство этих устройств на несколько порядков ниже, чем затраты на разработку и производство токоограничивающих устройств с использованием сверхпроводниковых ограничителей тока, бесконтактных углеродных ограничителей тока. В сетях среднего и высокого напряжения, учитывая повышенные требования к надёжности электроснабжения, предпочтительно применение токоограничивающих устройств с использованием сверхпроводниковых ограничителей тока, бесконтактных углеродных ограничителей тока.

1.5. Выводы по первой главе

1. Реализация приоритетных задач перехода к ресурсосберегающей энергетике, совершенствования технологий создания энергосберегающих систем транспортировки электроэнергии, развития технологий умных «Интеллектуальных электрических сетей» - Smart Grid - связана с повышением в системах электроснабжения токов короткого замыкания.

2. Применение традиционных токоограничивающих устройств (быстродействующие предохранители, автоматически выключатели) для проектируемых и вновь разрабатываемых СЭС низкого напряжения не обеспечивает ограничение токов короткого замыкания до необходимого уровня. Приходится завышать номинальные параметры элементов систем электроснабжения для повышения их стойкости к воздействию токов короткого

замыкания. Это связано с вынужденным повышением металлоёмкости сетей, применением усложнённых конструкций электрических аппаратов, увеличением инвестиционной составляющей в электрические сети.

3. Необходимо применение других токоограничивающих устройств. Целесообразным является использование узкофункциональных токоограничивающих устройств с использованием полупроводниковых выключателей, сверхпроводниковых ограничителей тока, бесконтактных углеродных ограничителей тока, жидкометаллических самовосстанавливающихся предохранителей.

4. Из перечисленных электрических аппаратов на стадии промышленного производства находятся только полупроводниковые выключатели. Остальные аппараты находятся на стадии разработки. Для сравнительной оценки и определения области применения каждого из них на сегодняшний день нет достаточного объема информации.

5. В электрических сетях низкого напряжения, учитывая большую протяжённость, массовость использования токоограничивающих устройств, следует отдать предпочтение в применении токоограничивающим устройствам с использованием ЖСП.

2. СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ РАЗРАБОТКИ ОГРАНИЧИТЕЛЕЙ ТОКА НА ОСНОВЕ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ САМОВОССТАНАВЛИВАЮЩИХСЯ ПРЕДОХРАНИТЕЛЕЙ

Предложение использовать ЖСП в качестве элемента токоограничивающего устройства в составе электротехнического комплекса «источник питания - токоограничивающее устройство - защищаемые элементы электрической сети в режиме короткого замыкания» требует более тщательного обоснования. Это связано с тем, что ЖСП является недостаточно изученным электрическим аппаратом, его исследования не доведены до уровня промышленного производства. Состояние исследований не освещено в достаточной степени в технической литературе.

2.1. Конструктивные особенности

Условно все конструкции можно разделить на два типа (рис. 2.1.) в зависимости от степени преобразования жидкометаллического элемента:

– первый тип предусматривает полное преобразование плавкого элемента по всей его длине $l_{\text{пз}}$ [33, 49-52, 79-83, 96-100] (общий вид конструкции на рис. 2.2, а);

– второй тип предусматривает частичное преобразование жидкометаллического элемента (общий вид конструкции на рис. 2.2, б) в каналах малого сечения путём деления его на чередующие участки каналов малого сечения и каналов большого сечения [30, 53-77, 86-95].

У первого типа конструкции есть свои преимущества: в канале используется относительно небольшой объём жидкого металла, это имеет огромное значение при использовании токсичных, пожароопасных металлов (щелочные металлы, ртуть). Второй тип конструкции позволяет использовать несколько перегородок, обеспечивающих сужение плавкой вставки. При увеличении числа суженных частей улучшаются условия гашения электрической

дуги. Недостатком этой конструкции является ограничение по расположению в пространстве. Работа конструкции возможна в горизонтальном положении, угол поворота вокруг вертикальной плоскости допускается до 45-50°.

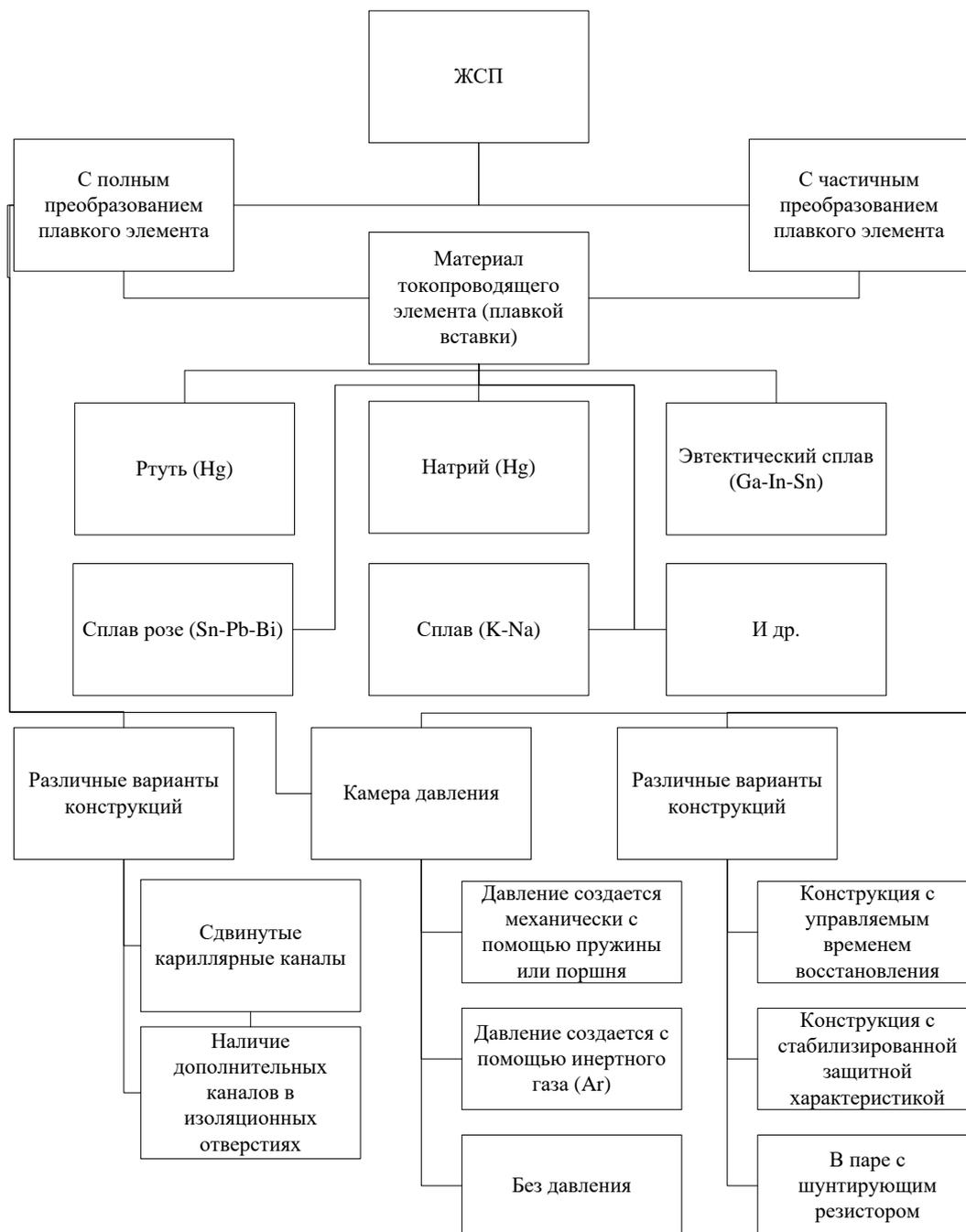


Рис. 2.1. Анализ конструкций ограничителей тока на основе жидкометаллических самовосстанавливающихся предохранителей

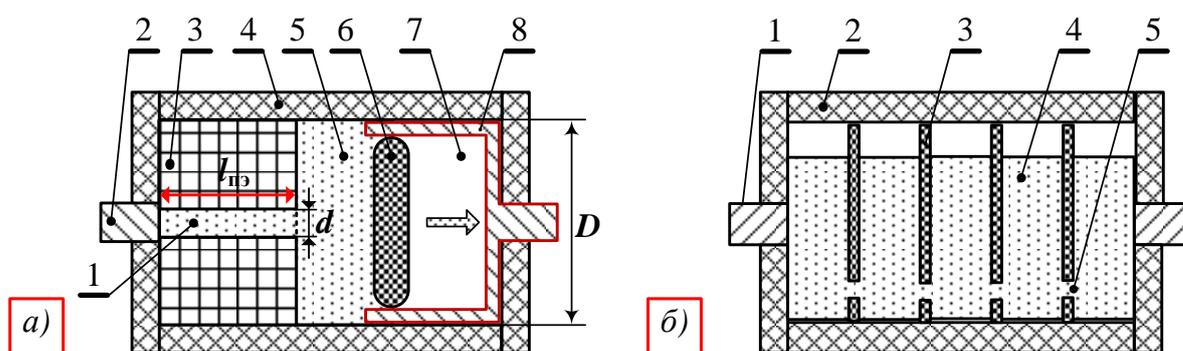


Рис. 2.2. Основные элементы устройств токоограничителей с полным преобразованием плавкого элемента (а) и с частичным преобразованием плавкого элемента (б).

Рис. 2.2, а: d – диаметр плавкого элемента; $l_{пэ}$ – длина плавкого элемента; D – диаметр камеры передачи давления от жидкометаллического плавкого элемента в буферную камеру 7 посредством поршня 6; 1 – плавкий элемент; 2 – вывод токоограничителя; 3 – диэлектрическая втулка; 4 – корпус; 5 – жидкий металл камеры передачи давления; 6 – поршень; 7 – буферная камера; 8 – токопровод.
 б: 1 – вывод токоограничителя; 2 – корпус; 3 – керамическая пластина-диафрагма (всего четыре пластины); 4 – жидкий металл; 5 – четвертый капиллярный канал (один из четырёх жидкометаллических плавких элементов).

Процесс работы токоограничителей указанных типов значительно отличается друг от друга. В токоограничителе с полным преобразованием плавкого элемента предполагается наличие очень высокого давления, обеспечивающего большое сопротивление плазмы дуги. В токоограничителе с частичным преобразованием плавкого элемента основной упор делается на создание необходимого количества последовательно включённых дуг, суммарное напряжение которых ограничивает ток КЗ. По существу, такой токоограничитель является самовосстанавливающимся, многократным аналогом плавких предохранителей с наполнителем и многократно перфорированным плавким элементом.

Вопросом создания ЖСП первой конструкции занимались японские учёные ещё в начале 70-х годов прошлого века из компании «Мицубиси дэнки» и назвали его Power Permanently Fuse (PPF) (рис.2.3) [33, 49-52].

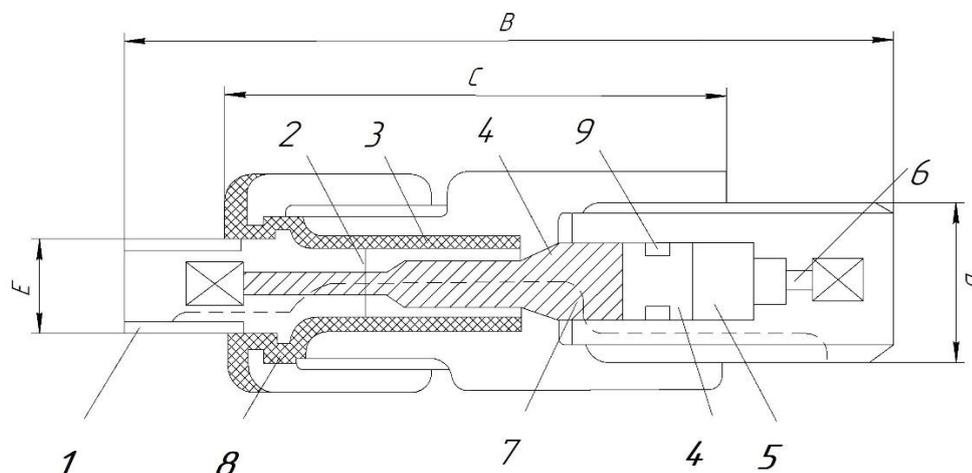


Рис. 2.3 Конструкция ЖСП «Мицубиси дэнки» №3

Габаритные размеры $A = 41\text{мм}$, $B = 165\text{мм}$, $C = 90\text{мм}$, $D = 3\text{мм}$ и $E = 16\text{мм}$.

[49, 78]

В конструкции в качестве жидкого металла используется натрий, который помещён в цилиндр 7, выполненный из керамической трубки с диаметром 3,5мм, и имеет сужение до 1,3мм на расстоянии 5мм.

Ток в нормальном режиме течёт от электрода 1 к электроду 2 через токоограничивающий элемент 3 (пунктирной линией). При возникновении тока КЗ материал элемента 3 (натрий) испаряется и превращается в высокотемпературную плазму высокого давления. Под действием этого давления поршень 4 перемещается вправо, сжимая инертный газ в камере 5. При движении поршня давление, возникшее в результате испарения натрия, уменьшается. Высокое электрическое сопротивление плазмы натрия приводит к резкому ограничению аварийного тока. После ограничения тока КЗ поршня восстанавливается исходное состояние предохранителя. В результате испытаний время восстановления предохранителя составляет от 3 до 5 миллисекунд [12, 46, 49, 97, 100].

Применение оксида бериллия в качестве керамической втулки обусловлено его высоким коэффициентом теплопроводности, что обеспечивает хорошую теплопередачу от плавкого элемента к электродам предохранителя.

Вопросом создания первого типа конструкции занимаются с 80-х годов прошлого века в Ульяновском государственном техническом университете (УлГТУ) такие учёные, как Кузнецов А.В., Крежевский Ю.С., Андреев В.А. Опубликовано более 20 патентов. Разработаны конструкции с управляемым временем восстановления ЖСП. После отключения аварийного тока они могут быть подготовлены к повторному действию только под влиянием внешнего воздействия со стороны оператора или автоматического устройства и конструкции с неуправляемым временем восстановления ЖСП. Их восстановление в исходное состояние происходит сразу же после конденсации паров жидкого металла.

Кроме уже названных исследовательских групп, исследованием данного типа конструкции занимались учёные из г. Новочеркаска [81-83], Украины [84], Германии [61].

Вопросом создания второго типа конструкции занимались учёные СамГТУ: Приходченко В.И., Танаев В.В., Николаева Л.Т., Кулаков П.А., Лавриненко А.И., Веретенков А.В., Новиков О.Я., Воронин А.А., Казанцев А.А.

Основная идея – это создание самовосстанавливающихся токоограничителей и предохранителей многократного действия, предназначенных для ограничения токов КЗ и в комплекте с автоматическими выключателями обеспечение селективной защиты от токов КЗ. Принцип действия самовосстанавливающихся токоограничителей и предохранителей основан на разрушении жидкометаллического токопровода в параллельных каналах и возникновении параллельных дуг в изоляционных каналах [86].

За всё время Самарскими учёными были получены 13 авторских свидетельств (патентов) на изобретения, которые служат для ограничения тока и используют в качестве рабочего тела металл или сплав с температурой плавления меньше 100°С.

Запатентованы следующие виды: жидкометаллический токоограничитель многократного действия [86-95, 100], где жидкий металл, подвергнувшийся тепловому воздействию дуги, оседает на дно изоляционной камеры, оставляя над собой чистый металл, который и заполняет основной канал; токоограничители у которых различаются формами внутренних каналов [100] от уже рассмотренного выше, в конструкции [95] для увеличения номинального тока; наличие дополнительных каналов в изоляционных отверстиях Т-образного профиля, сообщающихся с основным каналом и полостями между пластинами, не занятыми контактным рабочим теплом, для устранения силы Пинч-эффекта; самовосстанавливающийся ограничитель тока, имеющий два П-образных контура с легкоплавким сплавом, который при КЗ под действием электромагнитных сил переходит в жидкое состояние и выбрасывается в верхнюю часть ограничителя, а между электродами возникает ряд дуг отключения, ограничивая повышенным сопротивлением ток КЗ; токоограничитель с электромагнитным клапаном [100].

Учёные из СамГТУ предлагают использовать разные виды жидкометаллического рабочего тела. Это сплав розе [100] (Sn 25%-Pb25%-Bi50%) с температурой плавления 94°C, ртуть (Hg) [100] с температурой плавления -38,83 °C, и эвтектический сплав галлий-индий-олово (Ga 67%-In 20,5%+Sn 12,5%) [92, 100] с температурой плавления 10,5 °C.

На рисунке 2.4. изображён токоограничитель во включённом положении. Он содержит твёрдометаллические электроды 1, герметизирующие шайбы 2, керамические изоляционные пластины 3, в которых симметрично по окружности выполнены отверстия 4 капиллярного сечения, образующие изоляционные каналы, медные проводящие пластины 5 со сквозными отверстиями 6. В твёрдометаллических электродах выполнены отверстия 7 и установлены демпфирующие сильфоны 8, 9, обеспечивающие прокачку жидкого металла. Во включённом положении по токоограничителю протекает номинальный ток. При этом за счёт теплоотвода и демпфирующих сильфонов 8, 9 обеспечивается термическая и магнитогидродинамическая устойчивость жидкометаллического токопровода. При повышении тока нарушается термическая и

магнитогидродинамическая устойчивость жидкометаллического токопровода в каналах керамических изоляционных пластин 3. Электрическая дуга, возникающая в изоляционных каналах, образованных отверстиями в керамических изоляционных пластинах, гасится за счёт интенсивного теплоотвода и имеет на жидком металле опорные пятна. Восстановление жидкометаллического токопровода в изоляционных каналах происходит принудительной прокачкой жидкого металла с использованием программируемого приводного устройства, воздействующего на один из сильфонов 8, 9. После прокачки жидкого металла токоограничитель готов к повторному включению. Время восстановления до готовности повторного срабатывания составляет менее одной секунды [87, 88, 92-94].

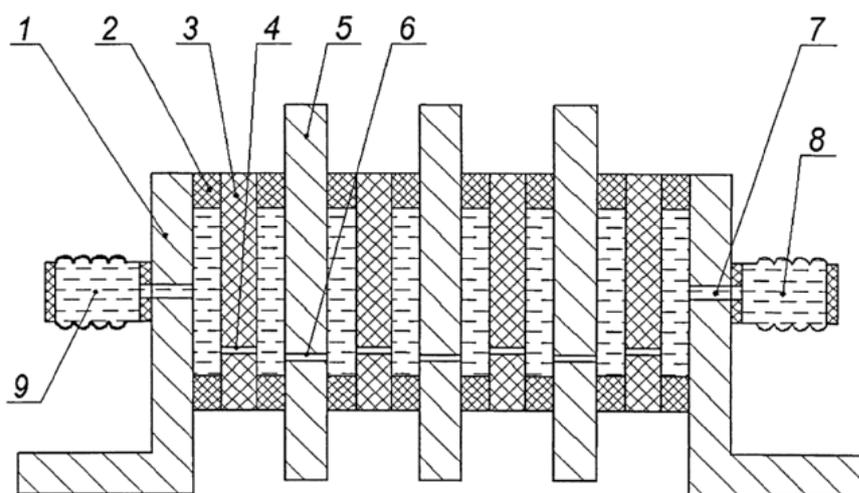


Рис. 2.4. Жидкометаллический ограничитель тока

Также вопросом создания ограничителей тока второго типа в начале 2000-х годов занималась немецкая фирма по производству низковольтного электротехнического оборудования и средств автоматизации Moeller GmbH, основанная в 1899 году в г. Кёльне. На протяжении 6 лет, с 1999 по 2005 годы, в основном W. Kremers, F. Berger, A. Kraetzschmar и в меньшей степени T. Freyermuth, P. Terhoeven, M. Anheuser, O. Borchmann в соавторстве были получены 38 патентов на изобретения [55-60].

Авторы предлагают использовать эвтектический сплав галлий-индий-олово (Ga 67%-In 20,5%+Sn 12,5%), который является жидким при температуре от 10 до 2000 ° С при нормальном давлении и обладает достаточной электрической проводимостью [55-60].

Последние 10 лет в исследовании второго типа активизировались учёные из Китая. Они провели экспериментальные исследования срабатывания ЖСП с плавким элементом из галистана (жидкий сплав 66%*Ga*, 20.5%*In*, 13.5%*Sn*) [64-69, 72-77] и предложили использовать ЖСП в качестве ограничителя тока в сетях постоянного тока [74, 76]. Также имеются публикации учёных из Ирана [28, 70], Словении [62].

При создании ЖСП важным моментом является выбор жидкого металла для их конструкций. Металлов, имеющих температуру плавления близкую к температуре окружающей среды, достаточно много. С точки зрения быстродействия, желательно отдать предпочтение металлам с низким удельным сопротивлением. В [12, 98] приводятся результаты исследований и сравнительный анализ нескольких металлов для плавкой вставки (рис. 2.5).

На рисунке 2.5 показана зависимость интеграла отключения предохранителей с плавкими вставками из различных материалов. Анализ зависимостей показывает, что быстродействие плавких вставок из щелочных металлов значительно выше, чем плавких вставок из ртути и серебра. В результате можно сказать, что предпочтительным материалом для плавкой вставки могут быть щелочные металлы. В макетных образцах в качестве плавкого элемента использовалась ртуть [12, 86], натрий [12, 33, 49-52, 61, 79-83, 96-100], сплав натрия и калия [12, 61], галистан [30, 53-77, 86-95].

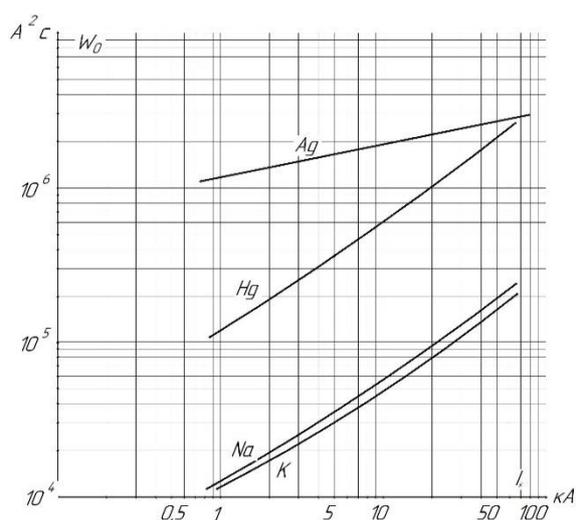


Рис. 2.5. Расчётные зависимости интеграла отключения ЖСП с плавкими вставками из различных материалов на номинальный ток 63 А от тока короткого замыкания.

2.2. Результаты коммутационных испытаний ограничителей тока, полученные различными инициативными группами учёных

Рассмотрим экспериментальные данные, полученные разными инициативными группами учёных.

Результаты сравнения ТКЗ совместного эксперимента учёных из Германии и Китая с ЖСП и без него показаны на рис. 2.6, а). Ударное значение ТКЗ без ЖСП (ожидаемый ток) равен 140,7 кА, а ударное ограниченное значение (ток обрыва) равен 19,9 кА. На рис. 2.6, б) показано, что ток обрыва достигает своего максимума при 2 мс (это преддуговое время срабатывания ЖСП), далее ток резко снижается примерно до 3 кА и достигает нуля менее чем за 10 мс. Также на рис. 2.6, б) показано изменение напряжения КЗ.

На рис. 2.7. представлены экспериментальные данные, полученные немецкими учёными из Moeller GmbH. Проводилось несколько опытов при разных напряжениях: 254, 440, 550, 725 В. При 550 В ожидаемый ТКЗ 50 кА, ток обрыва 16 кА, преддуговое время 1,8 мс.

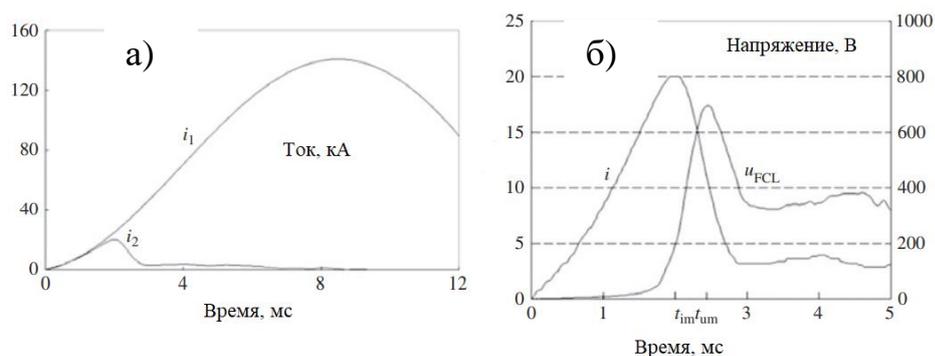


Рис. 2.6. Результаты совместного эксперимента учёных из Германии и Китая [77]: а – сравнение ТКЗ через ЖСП и без него; б – ток и напряжение КЗ через ЖСП.

На рис. 2.8. представлены результаты опыта, проводимого Кузнецовым А.В. в испытательном центре электрооборудования АО «Контактор» в г. Ульяновске. Осциллограмма отражает результат коммутационных испытаний макетной конструкции устройства защиты на основе ЖСП, разработанной на кафедре «электроснабжение» УлГТУ. Ударное значение тока в контуре 52,6 кА; ток обрыва 1,7 кА; значение напряжения сети 245 В; пик напряжения при КЗ 324 В; преддуговое время 0,5 мс.

На рис. 2.9. представлены результаты опыта, проводимого на японской конструкции ЖСП. Ожидаемое значение ТКЗ 28 кА; ток обрыва 17 кА; преддуговое время 2,5 мс.

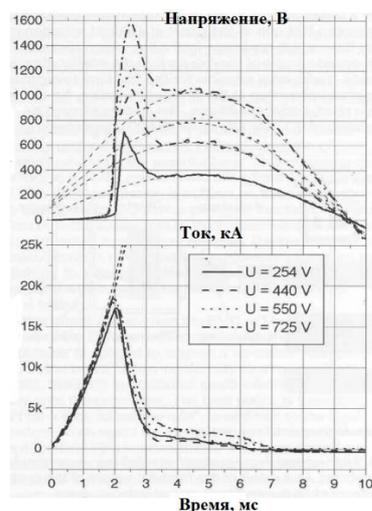


Рис. 2.7. Результаты совместного эксперимента немецких учёных из Moeller GmbH [62, 71]

Осциллограммы на рис. 2.6. и 2.7. относятся к конструкции с частичным преобразованием плавкого элемента из жидкого металла, а на рис. 2.8. и 2.9. к типу с полным преобразованием плавкого элемента из жидкого металла. Анализируя рисунки 2.6-2.9, можно сказать, что любая конструкция ЖСП обладает большой токоограничивающей способностью.

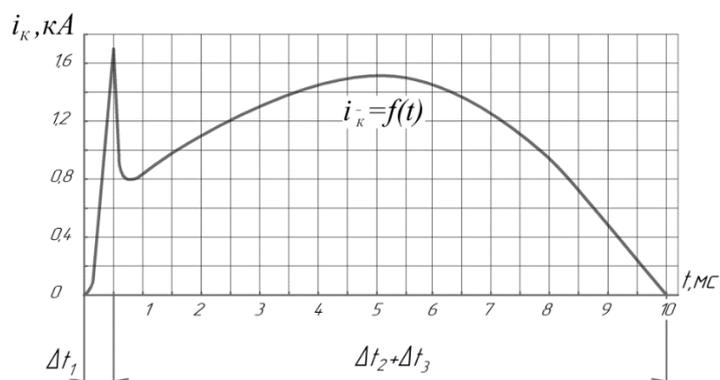


Рис. 2.8. Опытная осциллограмма в цепи короткого замыкания ЖСП [12]

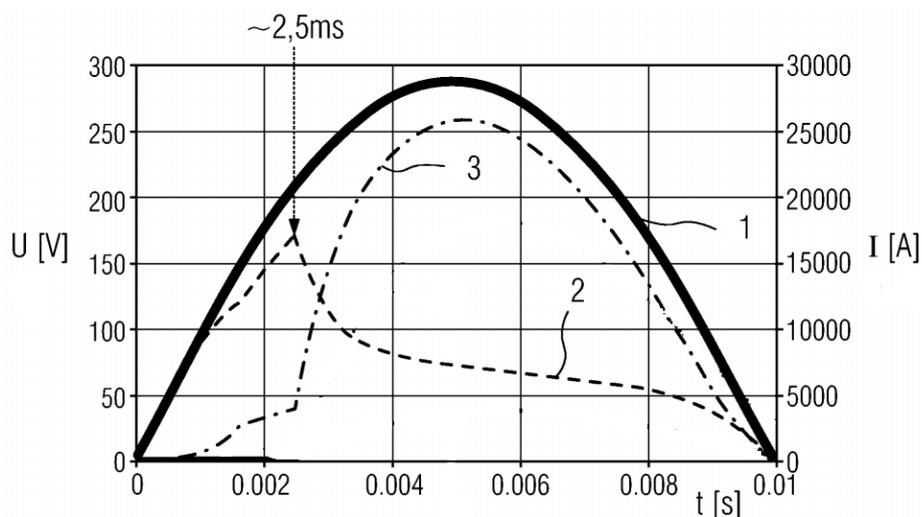


Рис. 2.9. Осциллограмма ТКЗ и напряжения КЗ на японской конструкции ЖСП. Где: 1— ожидаемый ТКЗ, 2 — ТКЗ, 3 — напряжение КЗ

2.3. Коммутационный ресурс ЖСП и способы его повышения

Существенным недостатком всех конструкции является то, что во время коммутационного процесса канал диэлектрической втулки ЖСП подвергается

дуговой эрозии при каждом срабатывании [12]. Диаметр канала диэлектрической втулки из керамики увеличивается. Это равносильно увеличению диаметра плавкой вставки. Значит, увеличивается время срабатывания, и ухудшаются токоограничивающие свойства.

Дуговая эрозия накладывает ограничение на коммутационный ресурс ЖСП. В условиях эксплуатации после одного или нескольких срабатываний параметры ЖСП могут измениться так, что не будут удовлетворять требованиям защиты элементов сети. В ряде случаев потребуется его замена.

2.3.1. Применение материалов диэлектрической втулки повышенной стойкостью к воздействию электрической дуги

Коммутационный ресурс может быть увеличен за счёт применения материалов более стойких к воздействию электрической дуги, чем керамика на основе окиси бериллия. Это могут быть карбиды металлов и другие материалы с температурой плавления от 3000 до 4000 °С [35]. Однако сведений об их использовании в настоящее время не обнаружено.

2.3.2. Шунтирование ЖСП низкоомным резистором

Коммутационный ресурс ЖСП может повышаться не только использованием материалов с повышенной стойкостью к воздействию электрической дуги. Он повышается как конструктивными [12, 27, 34, 99, 100], так и схемными решениями [12, 33, 49-52, 55-59, 74-76, 101].

Схемное решение предполагает шунтирование ЖСП низкоомным резистором, которое уменьшает энергию, выделенную в канале ЖСП во время дуговой стадии процесса [12, 33, 49-52, 55-59, 74-76, 101]. Часть энергии поглощается и рассеивается шунтирующим сопротивлением.

2.3.3. Применение ЖСП с составной плавкой вставкой (ЖСПС)

На рисунке 2.10. *a*, представлена упрощенная модель предохранителя с повышенным коммутационным ресурсом [12, 27]. Повышенный коммутационный ресурс достигается тем, что плавкая вставка выполнена из двух составных частей. Одна из них 2 выполнена из жидкого металла. Вторая часть представляет собой тугоплавкий электрод 1. Электрод является частью составной плавкой вставки. Он образует участок с повышенной по отношению к плавкой вставке температурой плавления и не разрушается при срабатывании ЖСП. При протекании по ЖСП аварийного тока быстрее нагреваются участки токоведущих частей с повышенным сопротивлением. Им обладает участок плавкой жидкометаллической плавкой вставки в месте контакта с торцевой поверхностью электрода за счёт сужения линий тока. При достижении температуры кипения часть жидкого металла в зоне контакта с электродом испаряется, обеспечивая разрыв электрической цепи с последующим гашением электрической дуги. Эрозия канала диэлектрической втулки 3 при этом присутствует. Это область 4. См. рис. 2.10. *б*. Однако время срабатывания конструкции определяется проводимостью и сечением участка с повышенным сопротивлением. Изменение сечения жидкометаллической части плавкой вставки при дуговой эрозии стенок канала в данном случае не влияет на время срабатывания при коротком замыкании. Электрод обеспечивает сужение линий тока в жидкометаллической плавкой вставке до сечения торцевой части, образует участок, подобный узкому перешейку в обычной плавкой вставке. Сечение узкого перешейка не изменяется при коммутационных процессах. Время срабатывания также остаётся постоянным. Коммутационный ресурс такой конструкции определяется длиной электрода L_1 , которая уменьшается под действием электрической дуги в период каждой коммутации. См. рис. 2.10. *б*. Конструкции с составной плавкой вставкой, одной из частей которой является тугоплавкий электрод, в литературе получили название жидкометаллический предохранитель со стабилизированной защитной характеристикой (ЖСПС).

Коммутационные испытания [12, 99] макетных образцов подтвердили, что довольно эффективным средством повышения коммутационного ресурса,

стабилизации преддугового интеграла и интеграла отключения ЖСП является шунтирование его низкоомным резистором. См. рис. 2.11. (зависимость 2). При этом эффект ещё больше повышается, если в суженной части канала диэлектрической втулки расположить тугоплавкий электрод (зависимость 3). Испытания проводились в контуре с током короткого замыкания 2,7 кА, напряжение 450В, диаметр суженной части плавкой вставки 0,7 мм. В качестве жидкого металла использовалась ртуть. Для ЖСПС с тугоплавким электродом из вольфрама от цикла к циклу закономерного увеличения величины пропускаемого тока и максимального тока через ЖСП от цикла к циклу не наблюдалось. Данные исследования показали, что при срабатывании ЖСП полностью отсутствуют коммутационные перенапряжения.

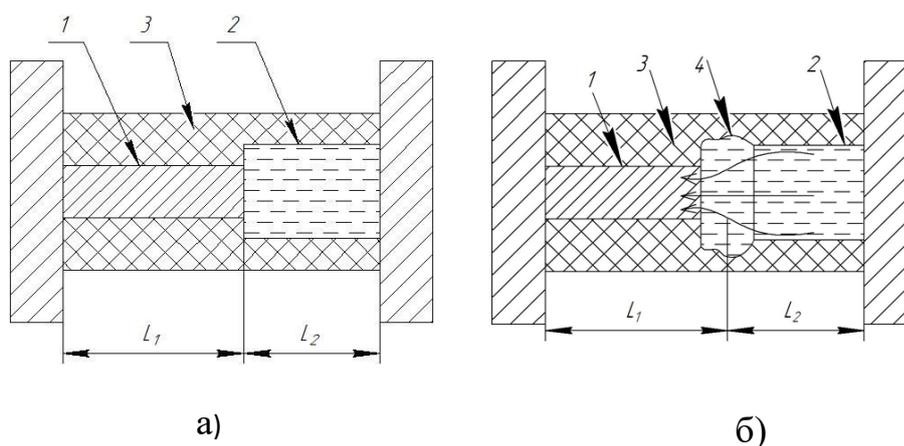


Рис. 2.10. Упрощённая модель предохранителя с составной плавкой вставкой: а – до испытания; б – после нескольких срабатываний. Где: 1–электрод; 2 – жидкий металл; 3 – диэлектрическая втулка; 4 – зона эрозии; L_1 – длина электрода; L_2 – длина жидкометаллической вставки металла.

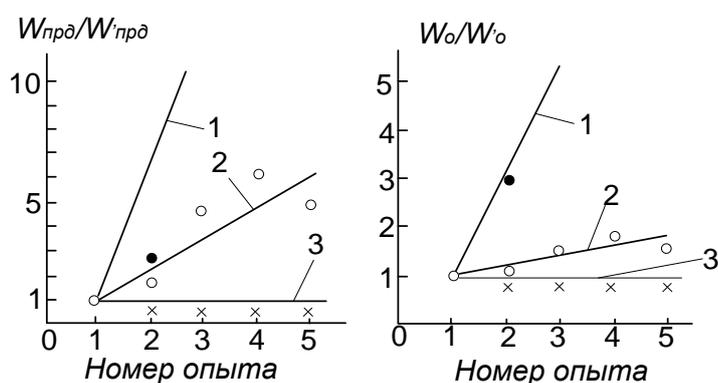


Рис. 2.11. Зависимость относительного значения преддугового интеграла и интеграла отключения от числа коммутаций ЖСП. Где: $W_{\text{прд}}$ – преддуговой интеграл ЖСП; $W'_{\text{прд}}$ – преддуговой интеграл ЖСП в первом опыте; W_0 – интеграл отключения ЖСП; W'_0 – интеграл отключения в первом опыте; 1 – включение ЖСП без шунтирующего сопротивления, 2 – с шунтирующим сопротивлением, 3 – с шунтирующим сопротивлением и при расположении в суженной части канала диэлектрической втулки вольфрамового электрода.

2.3.4. Структурный синтез новых схемных решений

Дальнейшие исследования могут включать в себя структурный и параметрический синтез новых технических решений, направленных на повышение коммутационного ресурса ограничителя тока на основе ЖСП и ЖСПС. Синтезировано схемное решение, направленное на повышение коммутационного ресурса, защищённое патентом РФ. Это решение реализует двухступенчатый принцип токоограничения. Предложенное токоограничивающее устройство (рис. 2.12) содержит ЖСП и параллельно подключённое к нему токоограничивающее сопротивление. Особенностью является то, что токоограничивающее сопротивление состоит из двух последовательно включённых сопротивлений, параллельно одному из которых подключён второй ЖСП.

В нормальном режиме рабочий ток проходит через первый ЖСП. Параллельно подключённое к первому ЖСП первое сопротивление несоизмеримо

больше, чем сопротивление плавкой вставки первого ЖСП. По этой причине ток в параллельно подключённом первом сопротивлении отсутствует. При возникновении тока КЗ плавкая вставка первого ЖСП нагревается и переходит в парообразное состояние, возникает электрическая дуга. Сопротивление первого ЖСП возрастает и становится значительно больше параллельно подключённого первого сопротивления. Ток КЗ переключается из цепи первого ЖСП в цепь первого сопротивления и второго ЖСП. Ток в параллельно подключённом втором сопротивлении в виду значительного сопротивления по сравнению со вторым ЖСП отсутствует. За время, пока плавкая вставка второго ЖСП нагревается и переходит в парообразное состояние, к первому ЖСП прикладывается напряжение, равное падению напряжения на первом сопротивлении, так как это сопротивление является только частью шунтирующего сопротивления, соответствующего классическому варианту (ЖСП шунтированное низкоомным резистором), значит оно меньше. Уменьшение напряжения на первом ЖСП влечёт за собой уменьшение тока и энергии выделенной дугой и меньшую степень эрозии, т.е. повышение коммутационного ресурса. После образования паров жидкого металла и электрической дуги во втором ЖСП сопротивление второго ЖСП увеличивается и ток переключается в параллельно подключенное второе сопротивление. Начиная с этого момента и до погасания электрической дуги, в первом ЖСП и втором ЖСП цепь тока КЗ ограничивается двумя последовательно включёнными сопротивлениями.

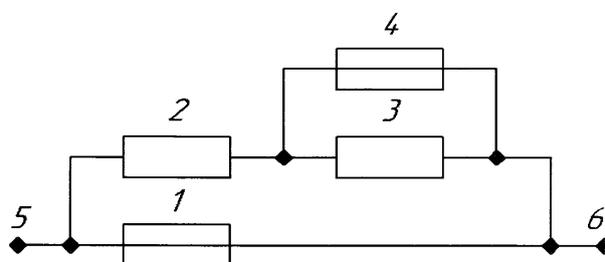


Рис. 2. 12. Токоограничивающее устройство на основе двух ЖСП с двухступенчатым принципом токоограничения. Где: 1, 4 – ЖСП; 2, 3 – шунтирующее сопротивление; 5, 6 – контактные соединения [100].

Предложенное решение (рис. 2.12) позволяет снизить энергию электрической дуги в первом ЖСП в течение промежутка времени от возникновения дуги в первом ЖСП до нагревания плавкой вставки второго ЖСП до температуры кипения и перехода её в парообразное состояние. Тем самым выделяемая энергия делится между двумя ЖСП и увеличивается их коммутационный ресурс.

2.4. Рекомендации по применению ЖСП в токоограничивающих устройствах

Вариант использования ЖСП в комплексе с шунтирующим сопротивлением и дополнительным коммутационным аппаратом получил более полное научное обоснование и развитие. Научный задел в этом отношении более всего приближен к практическому выходу. В [12] содержатся результаты параметрического синтеза устройства на основе ЖСП, включающие в себя расчёт геометрии плавкой вставки, расчёт значения шунтирующего сопротивления в соответствии с требованиями защиты элементов защищаемой электрической сети, выведено выражение для определения коэффициента чувствительности и т.п. Все эти результаты получены на основе исследования упрощённой математической модели.

ЖСП возможно применять вместо токоограничивающих реакторов (рис. 2.13), если отключающая способность автоматического выключателя недостаточна, а также для ограничения токов короткого замыкания в системах электроснабжения с элементами, обладающими низкой перегрузочной способностью.

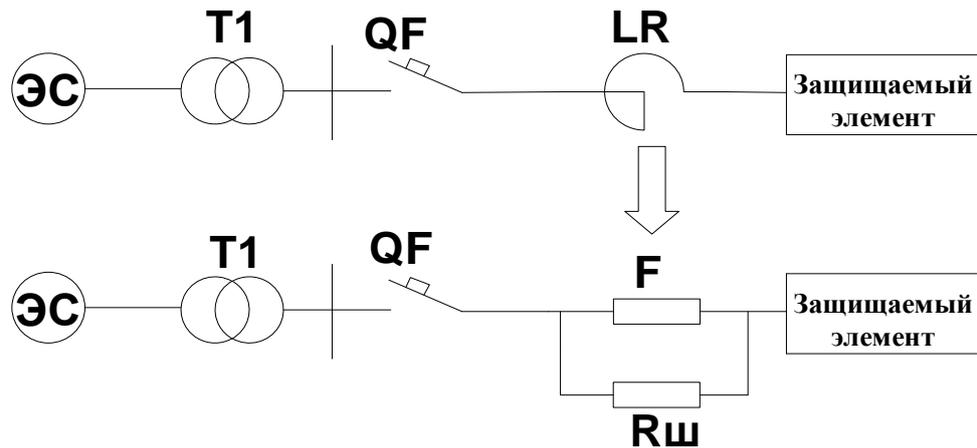


Рис. 2.13. Схема применения ЖСП.

ЖСП FU может конструктивно входить в единый электрический аппарат Q (рис. 2.14, б), и в ряде случаев применяться отдельно, работая не с одним автоматическим выключателем QF , а с группой линейных автоматических выключателей QF_1, QF_2, QF_3 (рис. 2.14, в). Комбинация токоограничитель-выключатель открывает возможность использования обычных автоматических выключателей с относительно низким значением коммутационной способности. Ограничение тока КЗ в составе $FU+QF$ обеспечивается ЖСП, а завершение процесса отключения выполняет выключатель QF , окончательно размыкая цепь своей контактно-дугогасительной системой. Таким образом, токоограничитель фактически является сопутствующим электрическим аппаратом по отношению к основному аппарату многоразового действия, который, по своему назначению, аналогичен плавкой вставке предохранителя типа аМ.

Характер совместной работы токоограничителя и автоматического выключателя проще всего понять с помощью совмещённых, отдельно полученных друг от друга время-токовых характеристик ЖСП $t = f(i)$ FU и автоматического выключателя QF (рис. 2.15). В качестве примера возьмём аппарат $FU_{Rш}+QF$ типа $NFU-225$ [49, 51].

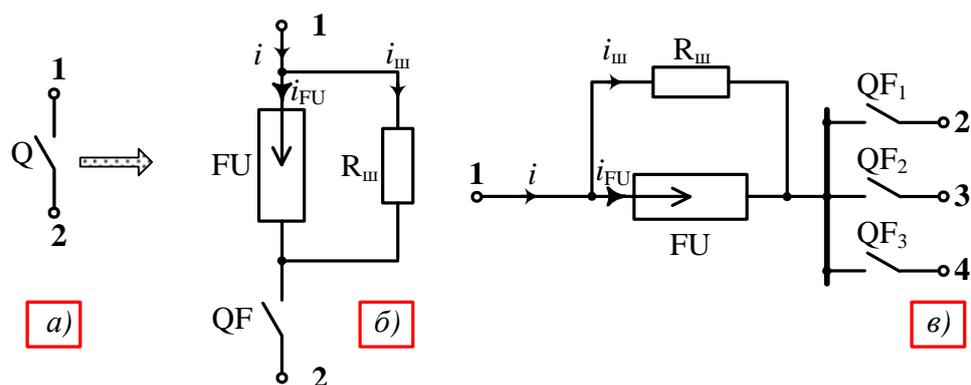


Рис. 2.14. Полюс аппарата $FU_{R_{ш}}+QF$ (а), устройство полюса аппарата $FU_{R_{ш}}+QF$ (б), устройство отдельно расположенного полюса токоограничителя $FU_{R_{ш}}$ и последовательно соединёнными, отдельно расположенными, линейными выключателями QF_1, QF_2, QF_3 (в): QF, QF_1, QF_2, QF_3 – автоматические выключатели; FU – сопутствующий токоограничитель; $R_{ш}$ – шунтирующий резистор; $i = i_{FU} + i_{ш}$ – ток КЗ внешней цепи; i_{FU} – ток ветви токоограничителя FU ; $i_{ш}$ – ток ветви шунтирующего резистора $R_{ш}$; **1** – верхний вывод токоограничителя; **2, 3, 4** – нижние вывода автоматических выключателей

Поскольку совокупный аппарат $FU_{R_{ш}}+QF$ представляет собой последовательное соединение отдельных аппаратов, то и отключение тока КЗ будет происходить в общем случае последовательно, определённым образом. На участке **2-3**, где кратность тока КЗ менее $k < 15I_n$, отключение тока КЗ осуществляет автоматический выключатель QF , а токоограничитель FU не успевает срабатывать. На участке **3-5**, где кратность тока КЗ более $k > 15I_n$, отключение тока КЗ начинает осуществлять токоограничитель FU , а автоматический выключатель QF «подхватывает» процесс отключения и завершает его. В свою очередь участок **3-5** в части особенности отключения тока КЗ делится на два подучастка. На первом подучастке **3-4** время срабатывания таково, что возможно повторное зажигание дуги в месте нахождения плавкого элемента токоограничителя, так как возможность «подхвата» отключения тока КЗ автоматическим выключателем ограничена относительно длительным его срабатыванием. На втором подучастке **4-5** время срабатывания токоограничителя

менее 10 мс, а значения пропускаемого им тока вполне достаточно для надёжного срабатывания автоматического выключателя и завершения отключения после первого перехода тока через нуль.

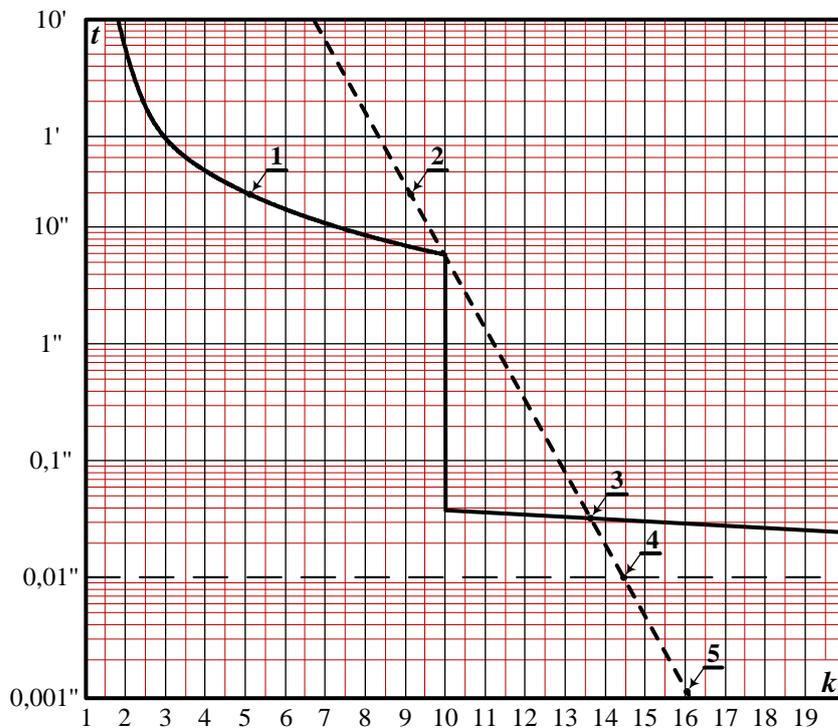


Рис. 2.15. Время-токовые характеристики автоматического выключателя (1) и токоограничителя (2): **2-3** – участок отключения токов КЗ автоматическим выключателем; **3** – одновременная работа аппаратов; **3-4** – участок срабатывания токоограничителя в течение времени более 10 мс; **4-5** – участок срабатывания токоограничителя в течение времени менее 10 мс; t – время срабатывания; k – кратность тока КЗ по отношению к значению номинального тока I_n всей совокупности $FU_{RШ}+QF$; ' – размерность времени в минутах; '' – размерность времени в секундах.

Хочется ещё отметить, что имеются публикации, где авторы находят применение ЖСП в сетях среднего напряжения (только компьютерное моделирование) [52, 93] и применение ЖСП в сетях постоянного тока (экспериментальные исследования) [74, 76].

2.5. Задачи дальнейших исследований для получения практического выхода

Объём проведённых исследований показывает возможность создания токоограничивающего устройства для СЭС до 1 кВ на основе ЖСП конкурентоспособного с другими токоограничивающими устройствами. Однако при этом остаются открытыми ряд вопросов, не позволяющих рекомендовать ограничители тока в конкретной схеме СЭС. Дальнейшие исследования следует вести в направлении параметрического синтеза токоограничивающего устройства на основе ЖСП с параллельно включённым шунтирующим сопротивлением в составе электротехнического комплекса «источник питания - ограничитель тока - защищаемый элемент сети в режиме короткого замыкания».

Отсутствие шунтирующего сопротивления сводит коммутационный ресурс ЖСП практически к одному коммутационному циклу. После него в результате дуговой эрозии канала диэлектрической втулки увеличивается сечение плавкой вставки и изменяется защитная характеристика. Шунтирующее сопротивление уменьшает энергию дуги в ЖСП и снижает степень износа канала диэлектрической втулки.

Следует обратить внимание на отсутствие информации о параметрическом синтезе токоограничивающего устройства, в состав которого входит ЖСП с составной плавкой вставкой – ЖСПС и шунтирующим сопротивлением. Как показано выше, коммутационный ресурс такого устройства больше, чем устройства с ЖСП, плавкая вставка которого не является составной. Получение такой информации является важной задачей.

Дальнейшие исследования могут включать в себя параметрический синтез нового технического решения, направленного на повышение коммутационного ресурса ограничителя тока на основе ЖСП и ЖСПС. Это решение представляет собой схемное решение, реализующее двухступенчатый принцип токоограничения. См. гл. 2.3.4.

Решение вопросов структурного и параметрического синтеза токоограничивающих устройств на основе ЖСП и ЖСПС обеспечит получение новых знаний в области создания и применения таких токоограничивающих устройств. Необходимым этапом решения вопросов параметрического синтеза является создание математической модели электротехнического комплекса «источник питания - ограничитель тока - защищаемый элемент сети в режиме короткого замыкания».

2.6. Выводы по второй главе

1. Высокое быстродействие и отличные токоограничивающие свойства ЖСП вызывают интерес в разработке и использовании ЖСП для ограничения токов короткого замыкания в системах электроснабжения. Уровень исследований как в нашей стране, так и за рубежом пока не позволяет перейти к созданию промышленных образцов ЖСП.

2. Рассмотренные известные на сегодняшний день варианты конструкций ЖСП разделяются на две основные группы: с полным преобразованием плавкого элемента и с частичным преобразованием плавкого элемента.

3. Общим недостатком ЖСП любой конструкции является то, что во время коммутационного процесса канал диэлектрической втулки ЖСП подвергается дуговой эрозии при каждом срабатывании. Устранить эрозию не представляется возможным в связи со значительной разницей между температурой плавления известных диэлектрических материалов и температурой плазмы электрической дуги.

4. Дуговая эрозия препятствует созданию ЖСП многократного использования. Коммутационный ресурс может быть увеличен за счёт применения материалов более стойких к воздействию электрической дуги, чем керамика на основе окиси бериллия. Это карбиды металлов и другие материалы с температурой плавления от 3000 до 4000 °С. Однако сведений об их использовании в настоящее время не обнаружено.

5. Имеются конструктивные решения, использующие в канале диэлектрической втулки тугоплавкий электрод, который не разрушается при воздействии тока короткого замыкания. Схемное решение предполагает шунтирование ЖСП низкоомным резистором, уменьшающим энергию, выделенную в канале ЖСП во время дуговой стадии процесса.

6. Синтезировано новое схемное решение, направленное на повышение коммутационного ресурса, защищённое патентом РФ. Оно реализует двухступенчатый принцип токоограничения.

6. Вариант использования ЖСП в комплексе с шунтирующим сопротивлением и дополнительным коммутационным аппаратом получил более полное научное обоснование и развитие. Научный задел в этом отношении более всего приближен к практическому выходу. С точки зрения быстродействия и токоограничивающих свойств предпочтительно использовать в ЖСП плавкие вставки из щелочных металлов.

7. Объём проведённых исследований показывает возможность создания токоограничивающего устройства на основе ЖСП конкурентоспособного с другими токоограничивающими устройствами.

8. Дальнейшие исследования следует сосредоточить на параметрическом синтезе токоограничивающего устройства на основе ЖСП и ЖСПС с параллельно включённым шунтирующим сопротивлением, а также нового схемотехнического решения, реализующего двухступенчатый принцип токоограничения в составе электротехнического комплекса «источник питания - ограничитель тока - защищаемый элемент сети в режиме короткого замыкания».

9. Решение вопросов структурного и параметрического синтеза токоограничивающих устройств на основе ЖСП и ЖСПС обеспечит получение новых знаний в области создания и применения таких токоограничивающих устройств.

10. Необходимым этапом решения вопросов параметрического синтеза является создание математической модели электротехнического комплекса

«источник питания - ограничитель тока - защищаемый элемент сети в режиме короткого замыкания».

3. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЦЕПИ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ С ОГРАНИЧИТЕЛЕМ ТОКА НА ОСНОВЕ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ САМОВОССТАНАВЛИВАЮЩИХСЯ ПРЕДОХРАНИТЕЛЕЙ

В главе представлена уточнённая математическая модель процесса короткого замыкания в электротехническом комплексе «источник питания - ограничитель тока - защищаемый элемент сети в режиме короткого замыкания» и результаты её исследования. При этом ограничитель тока представлен в нескольких вариантах. В первом варианте ЖСП с шунтирующим сопротивлением. Во втором варианте ЖСПС с шунтирующим сопротивлением. В третьем варианте ограничитель тока представляет собой новое схемотехническое решение, реализующее двухступенчатый принцип токоограничения.

3.1. Известная модель и её функциональные возможности

В [12] предложена математическая модель, которая включает в себя эквивалентную схему замещения цепи короткого замыкания. Она состоит из источника переменного тока, активного и индуктивного сопротивления цепи короткого замыкания, защищаемого коммутационным аппаратом, параллельно которому подключено шунтирующее активное сопротивление. Последнее выполняет функцию ограничителя тока короткого замыкания до допустимого значения при разрыве цепи после срабатывания коммутационного аппарата.

В известной математической модели коммутационный аппарат представлен в виде идеального ключа, имеющего два состояния: отключено и включено. В первом состоянии его сопротивление равно бесконечности. Во втором состоянии оно равно нулю. Принятое допущение ограничивает область её применения. На самом деле при разрыве электрической цепи после испарения жидкого металла происходит возникновение электрической дуги. Её сопротивление в ряде случаев не является бесконечно большим по отношению к сопротивлению цепи короткого

замыкания. По этой причине токоограничивающие свойства коммутационного аппарата, определённые по известной математической модели, будут завышенными. Это обстоятельство требует уточнения математической модели путём учёта в цепи сопротивления электрической дуги. [101, 102]. Модель представляет собой зависимость тока в цепи короткого замыкания от параметров схемы замещения. Известная математическая модель содержит следующие параметры:

$$\left. \begin{aligned} i_1^* &= F(A, S, R, L, \psi, U_m) \\ i_2^* &= F(R, R_{ш}, L, \psi, U_m) \end{aligned} \right\} \text{в первом полупериоде}$$

$$\left. \begin{aligned} i_3^* &= F(A, S, R, L, \psi, U_m) \\ i_4^* &= F(R, R_{ш}, L, \psi, U_m) \end{aligned} \right\} \text{во втором полупериоде}$$

3.2. Новая модель электротехнического комплекса с ограничителем тока на основе ЖСП с шунтирующим сопротивлением

В отличие от известной модели, новая модель содержит дополнительно следующие параметры: время существования паровой пробки (время, предшествующее возникновению электрической дуги), напряжение зажигания электрической дуги, сопротивление электрической дуги (в известной модели это значение равно бесконечности). По этой причине новая модель обладает расширенными функциональными возможностями. Новая эквивалентная схема цепи с коммутационным аппаратом при коротком замыкании представлена на рис. 3.1. Она состоит из источника переменного напряжения G , индуктивности сети L , активного сопротивления сети R , сопротивления плавкой вставки жидкометаллического предохранителя R_f , сопротивления дуги R_d , возникающей при срабатывании ЖСП, шунтирующего сопротивления $R_{ш}$. В исходном состоянии ключи Q_1 разомкнуты, а ключ Q_2 замкнут в положении 1.

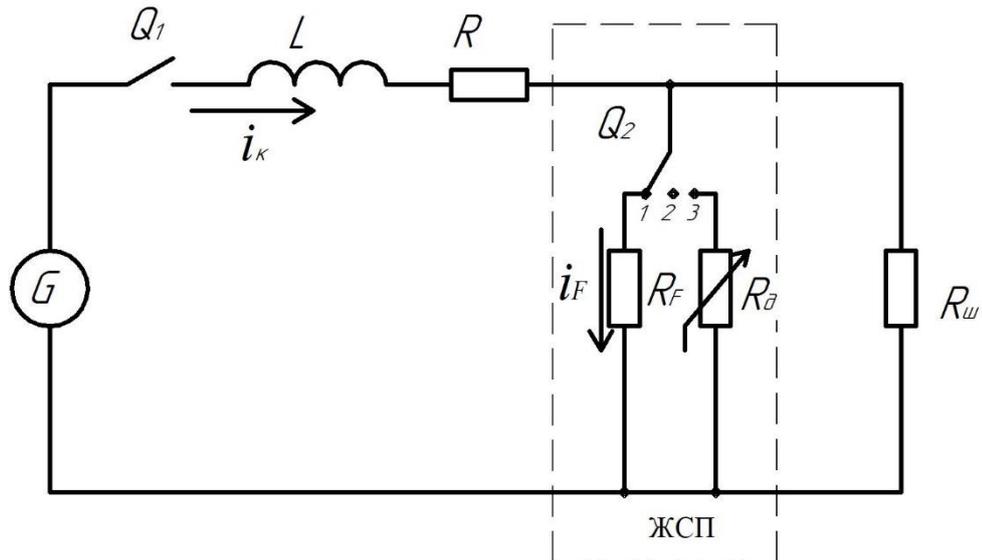


Рис. 3.1. Эквивалентная схема процесса короткого замыкания.

Процесс короткого замыкания начинается в момент замыкания ключа Q_1 . После чего за время возникновения КЗ до второго естественного перехода тока через ноль процесс КЗ проходит семь основных этапов. Каждый этап на схеме замещения (Рис. 3.1.) соответствует состоянию ключа Q_2 в определённом положении 1,2 или 3.

Новая математическая модель содержит следующие параметры:

$$\left. \begin{aligned}
 i_1 &= F(A, S, R, L, \psi, U_m) \\
 i_2 &= F(R, R_{ш}, L, \psi, U_m, U_{зак}, \Delta t) \\
 i_3 &= F(R, R_{ш}, R_o, L, \psi, U_m)
 \end{aligned} \right\} \text{в первом полупериоде}$$

$$\left. \begin{aligned}
 i_4 &= F(R, R_{ш}, L, \psi, U_m, \Delta t) \\
 i_5 &= F(A, S, R, L, \psi, U_m) \\
 i_6 &= F(R, R_{ш}, L, \psi, U_m, \Delta t) \\
 i_7 &= F(R, R_{ш}, R_o, L, \psi, U_m)
 \end{aligned} \right\} \text{во втором полупериоде}$$

3.2.1. Этапы процесса короткого замыкания

Первый этап происходит в период времени $0 \leq t \leq t_1$, где t_1 – время, соответствующее нагреву плавкой вставки под действием тока короткого

замыкания до температуры кипения и переходу в парообразное состояние. Это время называют преддуговым временем:

$$t_1 = t_{\text{прд}} \quad (3.1)$$

Оно определяется как время, за которое текущее значение теплового интеграла $W = \int_0^t i_f^2 dt$ от протекающего через ЖСП тока достигнет значения равного значению преддугового интеграла

$$W = W_{\text{прд}} = \int_0^t i_f^2 dt \quad (3.2)$$

где $W_{\text{прд}} = AS^2$; S – минимальное сечение плавкой вставки; A – постоянная для данного материала плавкой вставки величина.

Постоянная A содержит четыре составляющие, каждая из которых соответствует определённой стадии преддугового процесса. Результаты расчёта значений величины A для различных жидких металлов представлены в [12].

Уравнение (3.2) решается относительно t численными методами. При вычислении текущего значения i_f на каждом шаге итерационного процесса находят текущее значение W и сравнивают его с $W_{\text{прд}}$. При выполнении условия (3.2) текущее значение t приравнивают к t_1 . Решение найдено.

Найденному значению t_1 соответствует мгновенное значение тока $I_{0.1}$ в конце рассматриваемого периода. На первом этапе это значение, до которого ограничивается ток короткого замыкания. Его называют током обрыва $I_{c,1}$.

$$I_{0.1} = I_{c,1}$$

Рассматривая рис. 3.1, можно сказать, что сопротивление R_f плавкой вставки мало по сравнению с сопротивлением $R_{ш}$, им можно пренебречь и принять равным нулю. Тогда схема замещения (см. рис. 3.1.) преобразуется к виду, изображённому на рис. 3.2. Уравнение переходного процесса на первом этапе будет выглядеть следующим образом:

$$U_m \sin(\omega t + \psi) = L \frac{di}{dt} + Ri \quad (3.3)$$

Решение этого уравнения имеет вид:

$$i_1 = I_{m,1} \cdot \sin(\omega \cdot t + \psi - \phi_1) - I_{m,1} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_1}} \cdot \sin(\psi - \phi_1) \quad (3.4)$$

при $0 \leq t \leq t_1$; $t_1 = t_{np\partial,1}$.

где U_m – амплитудное значение напряжения источника;

ψ – начальная фаза источника, соответствующая моменту возникновения короткого замыкания или замыканию ключа Q_1 ;

τ_1 – постоянная времени цепи короткого замыкания $R - L$;

ϕ_1 – угол сдвига фаз между током короткого замыкания и напряжением в установившемся режиме;

$I_{m,1}$ – амплитудное значение тока короткого замыкания в установившемся режиме;

τ_1 – постоянная времени цепи короткого замыкания $R - L$

$$\tau_1 = \frac{L}{R} = \frac{1}{\left(\frac{R}{\omega L}\right) \cdot \omega};$$

ϕ_1 – угол сдвига фазы между током короткого замыкания и напряжением в установившемся режиме в $R - L$ цепи

$$\phi_1 = \text{arctg} \frac{1}{\left(\frac{R}{\omega L}\right)};$$

$I_{m,1}$ – амплитуда тока короткого замыкания в $R - L$ цепи в установившемся режиме;

$$I_{m,1} = \frac{U_m}{Z}, \text{ где } Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$$

Выражение для тока в конце этапа

$$I_{0,1} = I_{m,1} \cdot \sin(\omega \cdot t_1 + \psi - \phi_1) - I_{m,1} \cdot e^{-\frac{t_1}{\tau_1}} \sin(\psi - \phi_1), \quad (3.5)$$

при $t = t_1$;

Этот ток называют током обрыва $I_{c,1}$ в первом полупериоде процесса КЗ

$$I_{0,1} = I_{c,1}$$

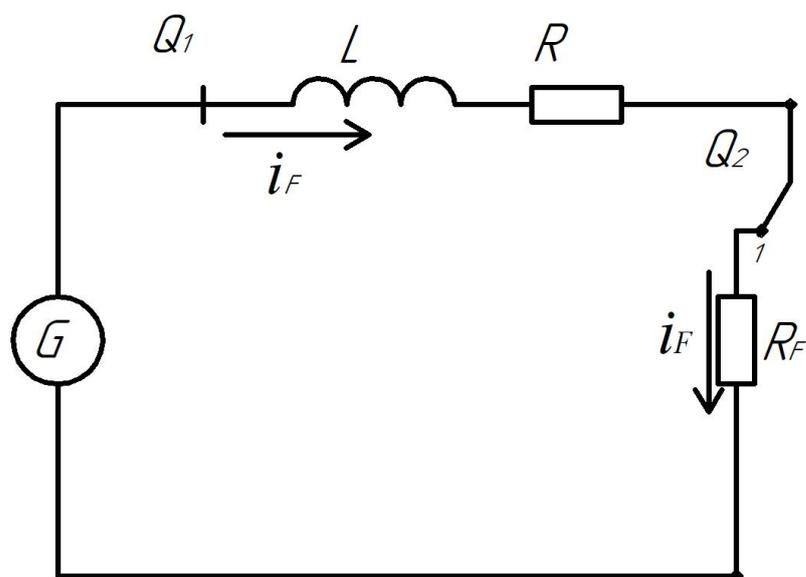


Рис. 3.2. Эквивалентная схема замещения на первом этапе.

Второй этап процесса происходит на интервале времени $t_1 < t \leq t_2$. Этот этап характеризуется наличием в канале ЖСП паровой пробки, возникающей в результате нагрева плавкой вставки до температуры кипения. Пары жидкого металла обладают высоким сопротивлением. Электрическая цепь разрывается, что эквивалентно переключению ключа Q_2 из положения 1 в положение 2. На рис. 3.3 представлена эквивалентная схема этого этапа. Длительность этапа небольшая, определяется экспериментально [12, 101, 102], в ряде случаев этой длительностью можно пренебречь.

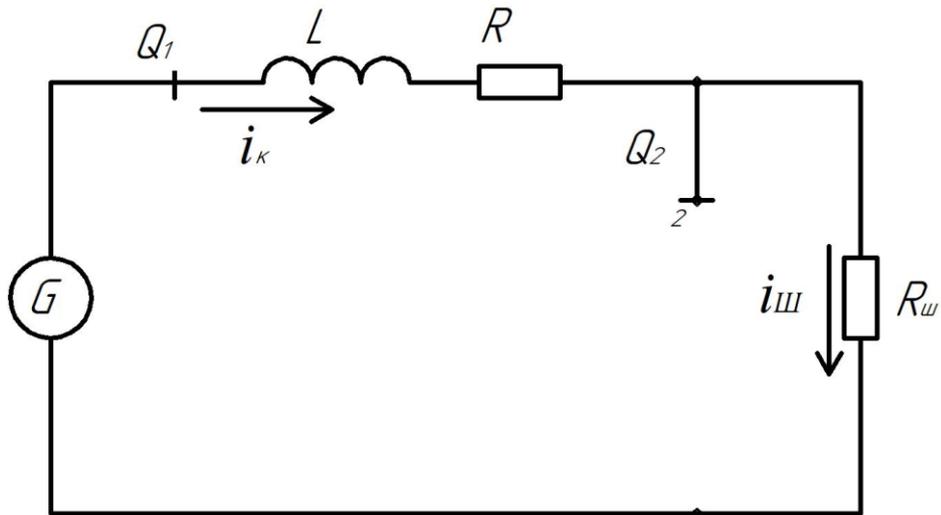


Рис. 3.3. Эквивалентная схема замещения на втором этапе.

Уравнение переходного процесса на втором этапе будет выглядеть следующим образом:

$$U_m \sin(\omega t + \psi) = L \frac{di}{dt} + (R + R_w)i \quad (3.6)$$

Решение этого уравнения принимает вид:

$$i_2 = I_{m,2} \cdot \sin(\omega \cdot t + \psi - \phi_2) + \left[I_{0,1} - I_{m,2} \cdot \sin(\omega \cdot t_1 + \psi - \phi_2) \right] \cdot e^{-\frac{t-t_1}{\tau_2}}, \quad (3.7)$$

, при $t_1 < t \leq t_2$

где τ_2 – постоянная времени цепи короткого замыкания $R - L - R_w$,

$$\tau_2 = \frac{L}{R + R_w} = \frac{1}{\left(\frac{R + R_w}{\omega L} \right) \cdot \omega};$$

ϕ_2 – угол сдвига фаз между током короткого замыкания и напряжением в

установившемся режиме в $R - L - R_w$ цепи, $\phi_2 = \arctg \frac{1}{\left(\frac{R + R_w}{\omega L} \right)}$;

$I_{m,2}$ – амплитуда тока короткого замыкания в $R-L-R_{ш}$ цепи в установившемся режиме, $I_{m,2} = \frac{U_m}{Z}$, где $Z = \sqrt{(R + R_{ш})^2 + (\omega L)^2}$.

Напряжение на шунтирующем сопротивлении и ток в цепи в момент времени t_2 , соответствующий окончанию этапа, определяются следующим образом [101, 102]:

$$I_{0,2} = I_{m,2} \cdot \sin(\omega \cdot t_2 + \psi - \phi_2) + \left[I_{0,1} - I_{m,2} \cdot \sin(\omega \cdot t_1 + \psi - \phi_2) \right] \cdot e^{-\frac{t_2 - t_1}{\tau_2}} \quad (3.8)$$

при $t = t_2$;

Выражение для напряжения $R_{ш}$ в конце этапа

$$U_{0,2} = U_m \cdot \sin(\omega \cdot t_2 + \psi - \phi_2) - I_{0,2} \cdot \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}, \text{ при } t = t_2. \quad (3.9)$$

Третий этап происходит на интервале времени от t_2 до t_3 . На этом этапе в начальный момент времени происходит дуговой пробой газовой пробки и возникновение электрической дуги, что эквивалентно переключению ключа Q_2 из положения 2 в положение 3. Эквивалентная схема замещения этапа 3 изображена на рис. 3.4.

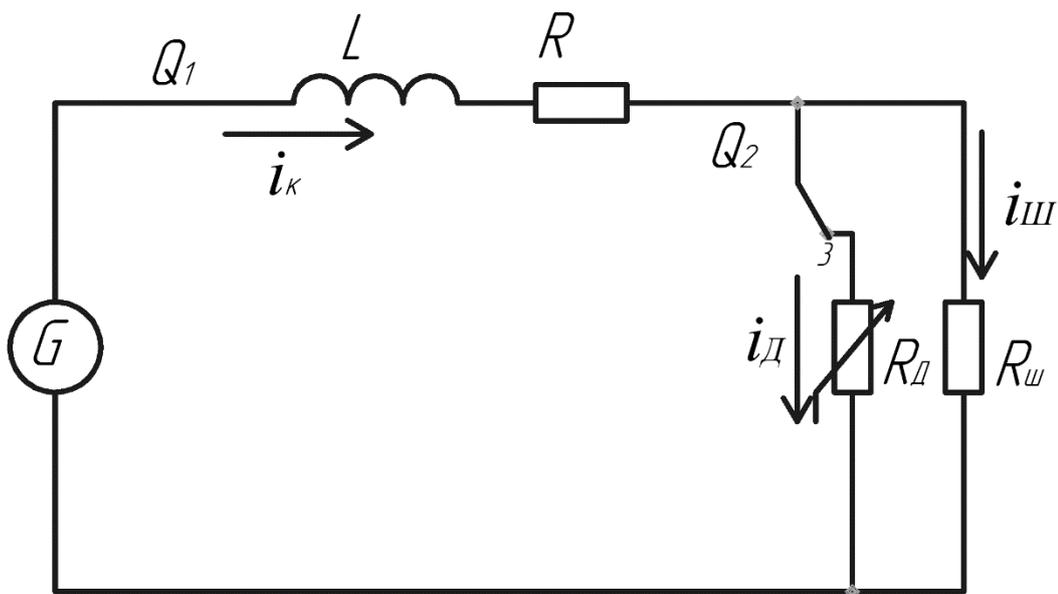


Рис.3.4. Эквивалентная схема замещения на третьем этапе.

В конце этапа в момент времени t_3 , соответствующий естественному переходу тока через нуль, электрическая дуга гасится. Длительность этого этапа определяется путём контроля вычисленных значений тока в итерационном процессе и сравнения их с нулевым значением. При достижении током нулевого значения решение найдено.

Уравнение переходного процесса будет иметь вид:

$$U_m \sin(\omega t + \psi) = L \frac{di}{dt} + Ri + u_{ш}(i_d), \quad (3.10)$$

где

$$u_d(i_d) = u_{ш}(i_d) \quad (3.11)$$

Напряжение на параллельно включённых сопротивлениях R_d и $R_{ш}$. Одно из них является нелинейным и определяется на основании зависимости $u_{ш} = f(i_d)$ динамической вольт-амперной характеристики электрической дуги в ЖСП.

Можно предположить, что в начале этапа в момент времени t_2 напряжение u_d равно напряжению определённого для этого момента времени по (3.9).

Ток дуги i_d , соответствующий этому напряжению $u_{ш}$, можно определить, используя динамическую вольт-амперную характеристику. Отсюда сопротивление дуги $R_{d,1}$ в начальный момент времени t_2 этапа 3 вычисляется как:

$$R_{d,1} = \frac{u_{ш,2}}{i(u_{ш,2})}$$

Сделав предположение о том, что это сопротивление $R_{d,1}$ не изменяется при изменении напряжения $u_{ш}$ в течение промежутка времени Δt , соответствующего шагу разбиения всего времени этапа на n частей, процесс короткого замыкания на 3 этапе можно представить в соответствие со следующей схемой замещения (Рис. 3.5). В этой схеме нелинейное сопротивление R_d представлено набором линейных сопротивлений $R_{d,i}$ поочерёдно включаемых в цепь с помощью ключа Q_3 промежутком времени Δt .

Уравнение переходного процесса на каждом из временных интервалов Δt :

$$U_M \sin(\omega t + \psi) = L \frac{di}{dt} + \left(R + \frac{R_{ш} R_{d,j}}{R_{ш} + R_{d,j}} \right) i \quad (3.12)$$

Решение этого уравнения для каждого из n временных интервалов Δt имеет вид:

На каждом j -том временном интервале Δt разбиения этапа $t_2 < t \leq t_3$

$$i_{3,j} = I_{m,3,j} \cdot \sin(\omega \cdot t + \psi - \varphi_{3,j}) +$$

$$+ \left[I_{0,3,(j-1)} - I_{m,3,j} \cdot \sin(\omega \cdot (t_2 + \Delta t \cdot (j-1)) + \psi - \varphi_{3,j}) \right] \cdot e^{-\frac{t - (t_2 + \Delta t \cdot (j-1))}{\tau_{3,j}}} \quad (3.13)$$

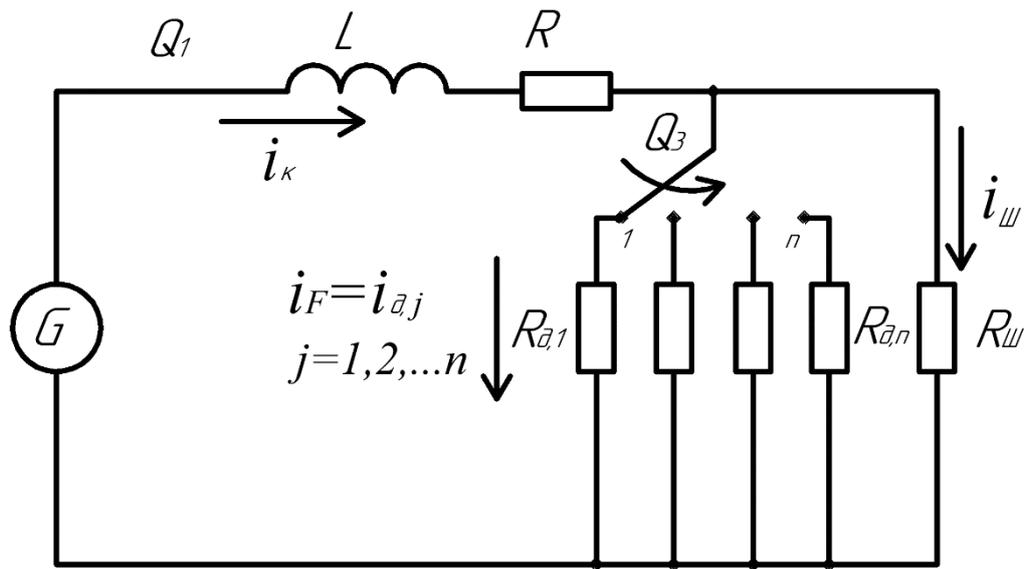


Рис. 3.5. Эквивалентная схема замещения третьего этапа.

Причём при $j=1$, $I_{m,3,(j-1)} = I_{0,2}$

$t = t_2 + \Delta t \cdot j$, при $t_2 + \Delta t \cdot (j-1) < t \leq t_2 + \Delta t \cdot j$; $j = 1, 2, 3, \dots, j_{\max, 3}$;

$(t_2 + \Delta t \cdot j_{\max, 3}) \leq t_3$

При $j = 1$, $I_{0,3,(j-1)} = I_{0,2}$; при $t = t_3$, $i_3 = 0$

$\tau_{3,j}$ – постоянная времени цепи короткого замыкания $R - L - \frac{R_w \cdot R_{d,3,j}}{R_w + R_{d,3,j}}$

на каждом j -том временном интервале

$$\tau_{3,j} = \frac{L}{R + \frac{R_{uu} \cdot R_{\partial,3,j}}{R_{uu} + R_{\partial,3,j}}} = \frac{1}{\left(\frac{R + \frac{R_{uu} \cdot R_{\partial,3,j}}{R_{uu} + R_{\partial,3,j}}}{\omega L} \right)} \cdot \omega ;$$

$\varphi_{3,j}$ – угол сдвига фаз между током короткого замыкания и напряжением в

установившемся режиме в $R - L - \frac{R_{uu} \cdot R_{\partial,3,j}}{R_{uu} + R_{\partial,3,j}}$ цепи

$$\varphi_{3,j} = \arctg \frac{1}{\left(\frac{R + \frac{R_{uu} \cdot R_{\partial,3,j}}{R_{uu} + R_{\partial,3,j}}}{\omega L} \right)} ;$$

$I_{m,3,j}$ – амплитуда тока короткого замыкания в $R - L - \frac{R_{uu} \cdot R_{\partial,3,j}}{R_{uu} + R_{\partial,3,j}}$ цепи в

установившемся режиме

$$I_{m,3,j} = \frac{U_m}{Z}, \text{ где } Z = \sqrt{\left(R + \frac{R_{uu} \cdot R_{\partial,3,j}}{R_{uu} + R_{\partial,3,j}} \right)^2 + (\omega L)^2}$$

Выражение для тока в цепи $R - L - \frac{R_{uu} \cdot R_{\partial,3,j}}{R_{uu} + R_{\partial,3,j}}$ в конце каждого j -

того временного интервала Δt на этапа $t_2 < t \leq t_3$ в момент времени

$$t = t_2 + \Delta t \cdot j$$

$$I_{0,3,j} = I_{m,3,j} \cdot \sin(\omega \cdot (t_2 + \Delta t \cdot j) + \psi - \varphi_{3,j}) +$$

$$+ \left[I_{0,3,(j-1)} - I_{m,3,j} \cdot \sin(\omega \cdot (t_2 + \Delta t \cdot (j-1)) + \psi - \varphi_{3,j}) \right] \cdot e^{-\frac{(t_2 + \Delta t \cdot j) - (t_2 + \Delta t \cdot (j-1))}{\tau_{3,j}}}, \text{ при}$$

$$t = t_2 + \Delta t \cdot j; \quad j = 1, 2, 3, \dots, j_{\max,3}, \quad (t_2 + \Delta t \cdot j_{\max,3}) \leq t_3; \quad j_{\max,3} \leq \frac{t_3 - t_2}{\Delta t};$$

$j = j_{\max, 3}$ при условии, когда $t_3 - \Delta t < t < t_3 + \Delta t$

$$I_{0,7,j_{\max,3}} = I_{m,7,j_{\max,3}} \cdot \sin(\omega \cdot (t_6 + \Delta t \cdot j_{\max,3}) + \psi - \varphi_{7,j_{\max,3}}) + \\ + \left[I_{0,7,(j_{\max,3}-1)} - I_{m,7,j_{\max,3}} \cdot \sin(\omega \cdot (t_6 + \Delta t \cdot (j_{\max,3} - 1)) + \psi - \varphi_{7,j_{\max,3}}) \right] \cdot \\ \cdot e^{-\frac{(t_6 + \Delta t \cdot j_{\max,3}) - (t_6 + \Delta t \cdot (j_{\max,3} - 1))}{\tau_{7,j_{\max,3}}}} \quad (3.14)$$

Выражение для напряжения $\frac{R_u \cdot R_{\partial,3,j}}{R_u + R_{\partial,3,j}}$ в конце каждого j -того

временного интервала Δt разбиения этапа $t_2 < t \leq t_3$

$$U_{0,3,j} = U_m \cdot \sin(\omega \cdot (t_2 + \Delta t \cdot j) + \psi - \varphi_{3,j}) - I_{0,3,j} \cdot \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} \quad (3.15)$$

$$U_{0,3,j_{\max,3}} = U_m \cdot \sin(\omega \cdot (t_2 + \Delta t \cdot j_{\max,3}) + \psi - \varphi_{3,j_{\max,3}}) - I_{0,3,j_{\max,3}} \cdot \\ \cdot \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} \quad (3.16)$$

Выражение для тока в цепи $R - L - \frac{R_u \cdot R_{\partial,3,(j_{\max,3}+1)}}{R_u + R_{\partial,3,(j_{\max,3}+1)}}$ на временном

участке $t_2 + \Delta t \cdot j_{\max,3} < t \leq t_3$

$$i_{0,3,(j_{\max,3}+1)} = I_{m,3,(j_{\max,3}+1)} \cdot \sin(\omega \cdot t + \psi - \varphi_{3,(j_{\max,3}+1)}) + \\ + \left[I_{0,3,j_{\max,3}} - I_{m,3,(j_{\max,3}+1)} \cdot \sin(\omega \cdot (t_2 + \Delta t \cdot j_{\max,3}) + \psi - \varphi_{3,(j_{\max,3}+1)}) \right] \cdot \\ \cdot e^{-\frac{(t - (t_2 + \Delta t \cdot j_{\max,3}))}{\tau_{3,(j_{\max,3}+1)}}} \quad (3.17)$$

При $i_{0,3,(j_{\max,3}+1)} = 0$, $t = t_3$, момент первого естественного перехода тока через ноль.

$$\tau_{3,(j_{\max,3}+1)} = \frac{L}{R + \frac{R_u \cdot R_{\partial,3,(j_{\max,3}+1)}}{R_u + R_{\partial,3,(j_{\max,3}+1)}}} = \frac{1}{\left(\frac{R + \frac{R_u \cdot R_{\partial,3,(j_{\max,3}+1)}}{R_u + R_{\partial,3,(j_{\max,3}+1)}}}{\omega L} \right)} \cdot \omega$$

$$\varphi_{3,(j_{\max,3}+1)} = \arctg \frac{1}{\left(\frac{R + \frac{R_{uu} \cdot R_{\partial,3,(j_{\max,3}+1)}}{R_{uu} + R_{\partial,3,(j_{\max,3}+1)}}}{\omega L} \right)}$$

$$I_{m,3,(j_{\max,3}+1)} = \frac{U_m}{Z}, \text{ где } Z = \sqrt{\left(R + \frac{R_{uu} \cdot R_{\partial,3,(j_{\max,3}+1)}}{R_{uu} + R_{\partial,3,(j_{\max,3}+1)}} \right)^2 + (\omega L)^2}$$

Третий этап завершится при окончании дугового процесса во время естественного перехода тока через ноль при восстановлении диэлектрической прочности паровой пробки.

В диссертации ЖСП рассматривается как часть составного устройства ограничения ТКЗ, он работает в паре с упрощённым автоматическим выключателем. Поэтому во время перехода тока через нулевое значение упрощённый автоматический выключатель должен отключиться и тем самым процесс КЗ закончится. Если отключение не происходит, то во втором полупериоде процесс продолжается.

Четвёртый этап процесса происходит в интервале времени от t_3 до t_4 . В начале этого этапа ключ Q_2 переходит из состояния 3 в состояние 2 (см рис. 3.1). Весь ток аварийного режима теперь идёт непосредственно через шунтирующее сопротивление, и эквивалентная схема замещения принимает вид, представленный на рис. 3.3.

Решение уравнения переходного процесса на данном этапе будет иметь вид (3.18), а время t_4 определяется по аналогии с t_2 :

$$i_4 = I_{m,4} \cdot \sin(\omega \cdot t + \psi - \phi_4) + \left[I_{0,3} - I_{m,4} \cdot \sin(\omega \cdot t_3 + \psi - \phi_4) \right] \cdot e^{-\frac{t-t_3}{\tau_4}}, \quad (3.18)$$

при $t_3 < t \leq t_4$

где τ_4 – постоянная времени цепи короткого замыкания $R - L - R_{ш}$,

$$\tau_4 = \tau_2;$$

φ_4 – угол сдвига фаз между током короткого замыкания и напряжением в установившемся режиме в $R - L - R_{ш}$ цепи, $\varphi_4 = \varphi_2$;

$I_{m,4}$ – амплитуда тока короткого замыкания в $R - L - R_{ш}$ цепи в установившемся режиме, $I_{m,4} = I_{m,2}$

Выражение для тока в конце этапа

$$I_{0,4} = I_{m,4} \cdot \sin(\omega \cdot t_4 + \psi - \phi_4) + \left[I_{0,3} - I_{m,4} \cdot \sin(\omega \cdot t_3 + \psi - \phi_4) \right] \cdot e^{-\frac{t_4 - t_3}{\tau_4}}, \quad (3.19)$$

при $t = t_4$

На пятом этапе ЖСП восстанавливается, его сопротивление снова стремится к нулю, ключ Q_2 из состояния 2 переходит в состояние 1 (Рис.3.1). Эквивалентная схема замещения на данном этапе выглядит аналогично рис.3.2.

Пятый этап происходит на временном интервале $t_4 < t \leq t_5$, где t_5 – время, соответствующее нагреву плавкой вставки под действием тока короткого замыкания до температуры кипения и переходу в парообразное состояние. Это время определяется аналогично времени t_1 .

Ток на этом этапе будет изменяться по следующему закону:

$$i_5 = I_{m,5} \cdot \sin(\omega \cdot t + \psi - \phi_5) + \left[I_{0,4} - I_{m,5} \cdot \sin(\omega \cdot t_4 + \psi - \phi_5) \right] \cdot e^{-\frac{t - t_4}{\tau_5}}, \quad (3.20)$$

при $t_4 \leq t \leq t_5$;

Преддуговое время во втором полупериоде $t_{npd,2}$ представляет собой

$$t_5 - t_4 = t_{npd,2}$$

τ_5 – постоянная времени цепи короткого замыкания $R - L$, $\tau_5 = \tau_1$;

φ_5 – угол сдвига фазы между током короткого замыкания и напряжением в установившемся режиме в $R - L$ цепи, $\varphi_5 = \varphi_1$;

$I_{m,5}$ – амплитуда тока короткого замыкания в $R - L$ цепи в установившемся режиме, $I_{m,5} = I_{m,1}$.

Выражение для тока в конце этапа

$$I_{0,5} = I_{m,5} \cdot \sin(\omega \cdot t_5 + \psi - \phi_5) + \left[I_{0,4} - I_{m,5} \cdot \sin(\omega \cdot t_4 + \psi - \phi_5) \right] \cdot e^{-\frac{t_5 - t_4}{\tau_5}}, \quad (3.21)$$

при $t = t_5$;

Этот ток называют током обрыва $I_{c,2}$ во втором полупериоде процесса КЗ

$$I_{0,5} = I_{c,2}.$$

Шестой этап процесса происходит на интервале времени $t_5 < t \leq t_6$. Этот этап аналогичен второму этапу и характеризуется наличием в канале ЖСП паровой пробки, возникающей в результате нагрева плавкой вставки до температуры кипения. Начало этапа соответствует переключению ключа Q_2 из положения 1 в положение 2. На рис. 3.3 представлена эквивалентная схема этапа.

Решение уравнения переходного процесса будет иметь вид:

$$i_6 = I_{m,6} \cdot \sin(\omega \cdot t + \psi - \phi_6) + \left[I_{0,5} - I_{m,6} \cdot \sin(\omega \cdot t_5 + \psi - \phi_6) \right] \cdot e^{-\frac{t - t_5}{\tau_6}}, \quad (3.22)$$

при $t_6 < t \leq t_5$

где τ_6 – постоянная времени цепи короткого замыкания $R - L - R_{uu}$,

$$\tau_6 = \tau_2;$$

φ_6 – угол сдвига фаз между током короткого замыкания и напряжением в установившемся режиме в $R - L - R_{uu}$ цепи, $\varphi_6 = \varphi_2$;

$I_{m,6}$ – амплитуда тока короткого замыкания в $R-L-R_{uu}$ цепи в установившемся режиме, $I_{m,6} = I_{m,2}$

Выражение для тока в конце этапа

$$I_{0,6} = I_{m,6} \cdot \sin(\omega \cdot t_6 + \psi - \phi_6) + \left[I_{0,5} - I_{m,6} \cdot \sin(\omega t_5 + \psi - \phi_6) \right] \cdot e^{-\frac{t_6 - t_5}{\tau_6}}, \quad (3.23)$$

при $t = t_6$;

Выражение для напряжения R_{uu} в конце этапа

$$U_{0,6} = U_m \cdot \sin(\omega \cdot t_6 + \psi - \phi_6) - I_{0,6} \cdot \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}, \quad (3.24)$$

при $t = t_6$;

Седьмой этап происходит на интервале времени от t_6 до t_7 и аналогичен этапу 3, На этом этапе в начальный момент времени происходит дуговой пробой газовой пробки и возникновение электрической дуги, что эквивалентно переключению ключа Q_2 из положения 2 в положение 3. Эквивалентная схема замещения этого этапа представлена на рис. 3.4.

Ток короткого замыкания на этом этапе:

На каждом j -том временном интервале Δt разбиения этапа $t_6 < t \leq t_7$

$$i_{7,j} = I_{m,7,j} \cdot \sin(\omega \cdot t + \psi - \phi_{7,j}) + \left[I_{0,7,(j-1)} - I_{m,7,j} \cdot \sin(\omega \cdot (t_6 + \Delta t \cdot (j-1)) + \psi - \phi_{7,j}) \right] \cdot e^{-\frac{t - (t_6 + \Delta t \cdot (j-1))}{\tau_{7,j}}}. \quad (3.25)$$

, при $t_6 + \Delta t \cdot (j-1) < t < t_6 + \Delta t \cdot j$; $j = 1, 2, 3, \dots$; $(t_6 + \Delta t \cdot j) \leq t_7$

При $j = 1$, $I_{0,7,(j-1)} = I_{0,6}$

где $\tau_{7,j}$ – постоянная времени цепи короткого замыкания

$R-L - \frac{R_{uu} \cdot R_{\partial,7,j}}{R_{uu} + R_{\partial,7,j}}$ на каждом j -том временном интервале

$$\tau_{7,j} = \frac{L}{R + \frac{R_{uu} \cdot R_{\delta,7,j}}{R_{uu} + R_{\delta,7,j}}} = \frac{1}{\left(\frac{R + \frac{R_{uu} \cdot R_{\delta,7,j}}{R_{uu} + R_{\delta,7,j}}}{\omega L} \right)} ;$$

$\varphi_{7,j}$ – угол сдвига фаз между током короткого замыкания и напряжением в

установившемся режиме в цепи $R - L - \frac{R_{\phi} \cdot R_{\ddot{a},7,j}}{R_{\phi} + R_{\ddot{a},7,j}}$

$$\varphi_{7,j} = \arctg \left(\frac{1}{\left(\frac{R + \frac{R_{\phi} \cdot R_{\ddot{a},7,j}}{R_{\phi} + R_{\ddot{a},7,j}}}{\omega L} \right)} \right) ;$$

$I_{m,7,j}$ – амплитуда тока короткого замыкания в цепи $R - L - \frac{R_{uu} \cdot R_{\delta,7,j}}{R_{uu} + R_{\delta,7,j}}$ в

установившемся режиме;

$$I_{m,7,j} = \frac{U_m}{Z}, \text{ где } Z = \sqrt{\left(R + \frac{R_{\phi} \cdot R_{\ddot{a},7,j}}{R_{\phi} + R_{\ddot{a},7,j}} \right)^2 + (\omega L)^2}$$

Выражение для тока в цепи $R - L - \frac{R_{\phi} \cdot R_{\ddot{a},7,j}}{R_{\phi} + R_{\ddot{a},7,j}}$ в конце каждого j -

того временного интервала Δt на этапе $t_6 < t \leq t_7$ в момент времени

$$t = t_6 + \Delta t \cdot j$$

$$\begin{aligned} I_{0,7,j} = & I_{m,7,j} \cdot \sin\left(\omega \cdot (t_6 + \Delta t \cdot j) + \psi - \phi_{7,j}\right) + \\ & + \left[I_{0,7,(j-1)} - I_{m,7,j} \cdot \sin\left(\omega \cdot (t_6 + \Delta t \cdot (j-1)) + \psi - \phi_{7,j}\right) \right] \cdot \\ & \cdot e^{-\frac{(t_6 + \Delta t \cdot j) - (t_6 + \Delta t \cdot (j-1))}{\tau_{7,j}}} \end{aligned} \quad (3.26)$$

при $t = t_6 + \Delta t \cdot j$; $t_6 + \Delta t \cdot (j-1) < t \leq t_6 + \Delta t \cdot j$; $j = 1, 2, 3, \dots, j_{\max, 7}$;

$$(t_6 + \Delta t \cdot j_{\max, 7}) \leq t_7; \quad j_{\max, 7} \leq \frac{t_7 - t_6}{\Delta t};$$

$j = j_{\max, 7}$ при условии, когда $t_7 - \Delta t < t < t_7 + \Delta t$

$$\begin{aligned} I_{0,7,j_{\max,7}} &= I_{m,7,j_{\max,7}} \cdot \sin(\omega \cdot (t_6 + \Delta t \cdot j_{\max,7}) + \psi - \varphi_{7,j_{\max,7}}) + \\ &+ \left[I_{0,7,(j_{\max,7}-1)} - I_{m,7,j_{\max,7}} \cdot \sin(\omega \cdot (t_6 + \Delta t \cdot (j_{\max,7}-1)) + \psi - \varphi_{7,j_{\max,7}}) \right] \cdot \\ &\cdot e^{-\frac{(t_6 + \Delta t \cdot j_{\max,7}) - (t_6 + \Delta t \cdot (j_{\max,7}-1))}{\tau_{7,j_{\max,7}}}} \end{aligned} \quad (3.27)$$

Выражение для напряжения $\frac{R_{uu} \cdot R_{\partial,7,j}}{R_{uu} + R_{\partial,7,j}}$ в конце каждого j -того

временного интервала Δt разбиения этапа $t_6 < t \leq t_7$

$$U_{0,7,j} = U_m \cdot \sin(\omega \cdot (t_6 + \Delta t \cdot j) + \psi - \varphi_{7,j}) - I_{0,7,j} \cdot \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} \quad (3.28)$$

$$\begin{aligned} U_{0,7,j_{\max,7}} &= U_m \cdot \sin(\omega \cdot (t_6 + \Delta t \cdot j_{\max,7}) + \psi - \varphi_{7,j_{\max,7}}) - \\ &- I_{0,7,j_{\max,7}} \cdot \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} \end{aligned} \quad (3.29)$$

Выражение для тока в цепи $R - L - \frac{R_{uu} \cdot R_{\partial,7,(j_{\max,7}+1)}}{R_{uu} + R_{\partial,7,(j_{\max,7}+1)}}$ на временном

участке $j_{\max,7} + 1$

$$t_6 + \Delta t \cdot j_{\max,7} < t \leq t_7$$

$$\begin{aligned} i_{7,(j_{\max,7}+1)} &= I_{m,7,(j_{\max,7}+1)} \cdot \sin(\omega \cdot t + \psi - \varphi_{7,(j_{\max,7}+1)}) + \\ &+ \left[I_{0,7,j_{\max,7}} - I_{m,7,(j_{\max,7}+1)} \cdot \sin(\omega \cdot (t_6 + \Delta t \cdot j_{\max,7}) + \psi - \varphi_{7,(j_{\max,7}+1)}) \right] \cdot e^{-\frac{(t - (t_6 + \Delta t \cdot j_{\max,7}))}{\tau_{7,(j_{\max,7}+1)}}} \end{aligned}$$

При $i_{7,(j_{\max,7}+1)} = 0$, $t = t_7$, момент второго естественного перехода тока через ноль.

Седьмой этап закончится при гашении электрической дуги во время естественного перехода тока через ноль.

3.2.2. Пропускаемый ограничителем ток и тепловой интеграл

Пропускаемый ток — это максимальное мгновенное значение тока через токоограничивающее устройство. Надёжность электротехнического комплекса «источник питания - ограничитель тока - защищаемый элемент сети в режиме короткого замыкания» обеспечивается, если токоограничивающее устройство обеспечивает снижение амплитуды тока короткого замыкания до значения допустимого для защищаемого элемента сети, при котором не происходит механических повреждений в результате электродинамического воздействия тока короткого замыкания. Значение тока для токоограничивающего устройства вычисляется в программной модели итерационным способом и может быть представлено в результатах расчёта.

Тепловой импульс характеризует максимальное значение тепловой энергии, выделяемой в элементах защищаемой сети за время от возникновения тока короткого замыкания до его отключения дополнительным коммутационным аппаратом. Надёжность электротехнического комплекса «источник питания - ограничитель тока - защищаемый элемент сети в режиме короткого замыкания» обеспечивается, если токоограничивающее устройство даёт снижение теплового импульса до значений, при которых не происходит теплового разрушения защищаемых элементов. Для модели ЖСП с шунтирующим сопротивлением тепловой импульс за время одного полупериода частоты сети представляет собой (рис. 3.6)

$$W_0 = W_1 + W_2 + W_3 \quad (3.30)$$

Исходя из формулы (3.4) тепловой импульс на первом этапе равен:

$$W_1 = \int_0^{t_1} (I_{m,1} \cdot \sin(\omega \cdot t + \psi - \phi_1) + I_{m,1} \cdot \sin(\psi - \phi_1)) \cdot e^{-\frac{t}{\tau_1}})^2 dt; \quad (3.31)$$

Исходя из формулы (3.7) тепловой импульс на втором этапе равен:

$$W_2 = \int_{t_1}^{t_2} (I_{m,2} \cdot \sin(\omega \cdot t + \psi - \phi_2) + (I_{0,1} - I_{m,2} \cdot \sin(\omega \cdot t_1 + \psi - \phi_2)) \cdot e^{-\frac{(t-t_1)}{\tau_2}})^2 dt \quad (3.32)$$

Исходя из формулы (3.13) тепловой импульс на третьем этапе:

$$W_3 = \int_{t_2 + \Delta t \cdot (j-1)}^{t_2 + \Delta t \cdot j} ((I_{m,3,j} \cdot \sin(\omega \cdot t + \psi - \phi_{3,j}) + [I_{0,3,(j-1)} - I_{m,3,j} \cdot \sin(\omega \cdot (t_2 + \Delta t \cdot (j-1)) + \psi - \phi_{3,j})] \cdot e^{-\frac{t - (t_2 + \Delta t \cdot (j-1))}{\tau_{3,j}}})^2 dt \quad (3.33)$$

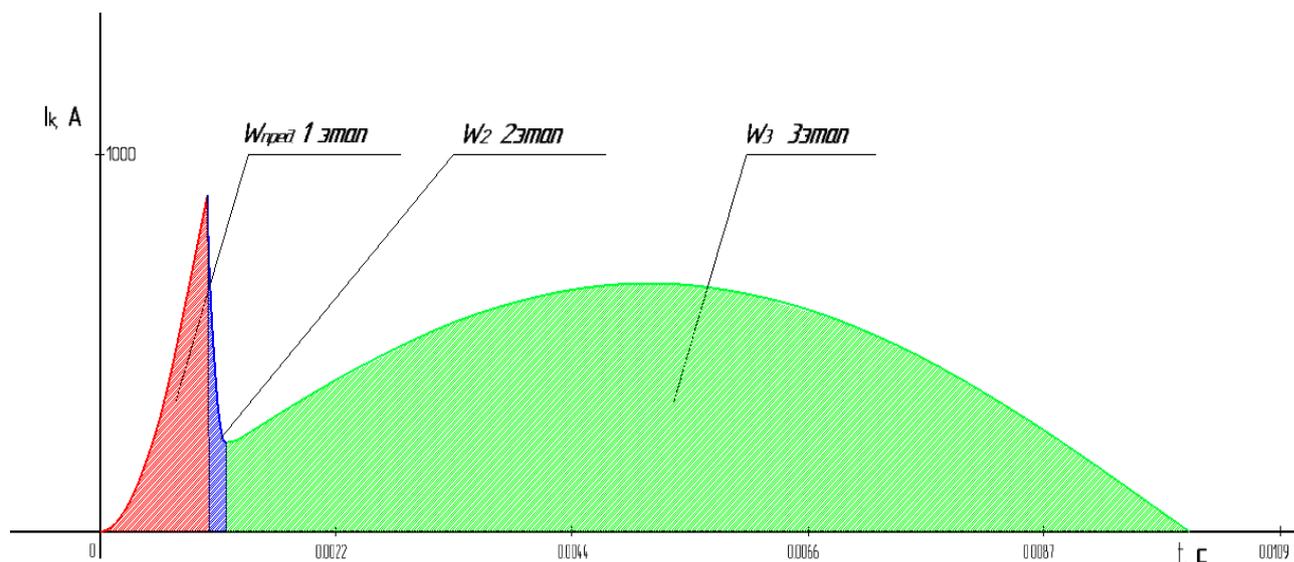


Рис. 3.6. График зависимости тока от времени на 1,2,3 этапах.

Используя предложенные выражения, можно вычислить пропускаемый ограничителем ток на первом и третьем этапе в программной модели. Программная модель представлена в Приложение П2.

3.3. Оценка адекватности математической модели

Результаты расчёта при использовании математической модели (рис. 3.7) представлены в виде зависимостей тока в сети $i_K = f(t)$, тока через ЖСП $i_F = f(t)$, тока через шунтирующее сопротивление $i_{SH} = f(t)$, а также падения напряжения на шунтирующем сопротивлении $U_{SH} = f(t)$ от времени с учётом рассмотренных этапов процесса. Параметры сети в схеме замещения в тестовом примере соответствуют напряжению источника $240 В$ (действующее значение), $\cos \varphi = 0.19$,

значению максимального ударного тока КЗ $52,6 \text{ кА}$ при начальной фазе напряжения источника $\psi = 90^\circ$.

При расчётах в схеме замещения использовались параметры ЖСП с номинальным током 60А , плавкой вставкой из ртути, с узким перешейком диаметром $0,7 \text{ мм}$. Величина шунтирующего сопротивления равна $0,2 \text{ Ом}$.

Интервалы времени каждого из этапов процесса КЗ подобраны так, чтобы их можно было отчётливо различить на рисунке. В таком случае полученные расчётные зависимости могут наглядно продемонстрировать характер процесса на каждом временном интервале. Линии не будут сливаться, мелкие детали рисунка будут отсутствовать. Длительность каждого этапа процесса обозначена на рисунке как Δt_i ($i=1,2,3,4,5,6,7$). Время существования паровой пробки Δt_2 в первом полупериоде и Δt_4 во втором выбрано равным $1,8 \text{ мс}$. Период времени горения дуги Δt_3 и Δt_7 в первом и во втором полупериодах разделён на 4 интервала $\Delta t_{3,1}, \Delta t_{3,2}, \Delta t_{3,3}, \Delta t_{3,4}$ и $\Delta t_{7,1}, \Delta t_{7,2}, \Delta t_{7,3}, \Delta t_{7,4}$ соответственно. Длительность каждого из них составляет 2 мс , 2 мс , 2 мс , и $1,2 \text{ мс}$.

Сопротивления дуги ЖСП на каждом из интервалов этапа горения дуги выбраны соизмеримыми с значением шунтирующего сопротивления. Такой выбор сделан для того, чтобы на графических зависимостях можно было увидеть распределение тока КЗ между параллельно включёнными сопротивлениями дуги и шунтирующим сопротивлением. При значительной разнице в сопротивлениях распределение тока может быть незаметным. Сопротивление дуги на интервалах $\Delta t_{3,1}, \Delta t_{3,2}, \Delta t_{3,3}, \Delta t_{3,4}$ и $\Delta t_{7,1}, \Delta t_{7,2}, \Delta t_{7,3}, \Delta t_{7,4}$ принято равным $7 \cdot R_{SH}$, $6 \cdot R_{SH}$, $4 \cdot R_{SH}$, $6 \cdot R_{SH}$ соответственно.

Анализ расчётных зависимостей (см. рис. 3.8) говорит о следующем: на всех участках процесса КЗ токи в сети $i_K = f(t)$ и её ветвях $i_F = f(t)$, $i_{SH} = f(t)$ изменяются в соответствии с математическим описанием. При включении ЖСП на короткое замыкание ток $i_K = i_F = f(t)$ возрастает до значения $1,7 \text{ кА}$ на первом этапе процесса и $2,2 \text{ кА}$ на пятом этапе процесса, не достигая ударного значения

равного $52,6 \text{ кА}$. Результаты получены по (3.2). На этих этапах ток $i_{SH} = f(t)$ в цепи с шунтирующим сопротивлением R_{SH} и напряжение $U_{SH} = f(t)$ на нём отсутствуют.

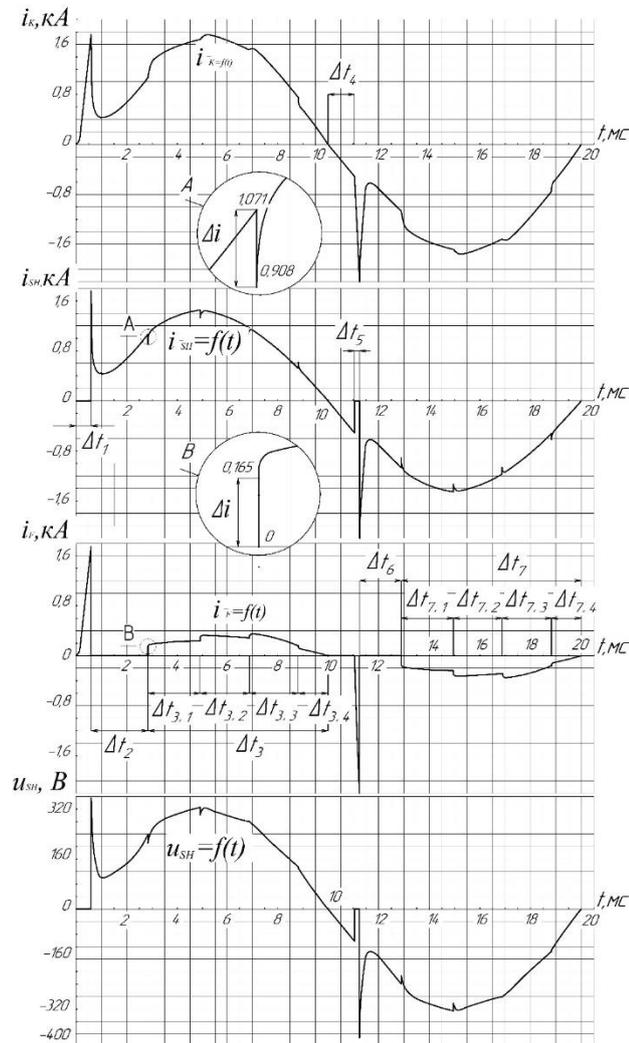


Рис. 3.7. Расчётные зависимости в ветвях схемы замещения

В период дуговой стадии (этап 3 и 7) процесса наблюдаются скачкообразные изменения токов $i_F = f(t)$, $i_{SH} = f(t)$ на границах временных интервалов. Это связано с тем, что происходит скачкообразное изменение сопротивления R_K за счёт подключения параллельно R_{SH} сопротивлений электрической дуги. Ток $i_K = f(t)$ не может измениться скачком в силу присутствия индуктивности в цепи КЗ. Он распределяется между

сопротивлениями R_{SH} и $R_{d.j}$ обратно пропорционально значениям этих сопротивлений.

Анализируя фрагменты зависимостей $i_F = f(t)$ и $i_{SH} = f(t)$ в переходном режиме (на рис. 3.7 показаны в увеличенном виде), можно увидеть, что после скачкообразного изменения тока i_F и i_{SH} , на величину Δi , их изменение происходит в соответствии с (3.13). Качественная картина переходного процесса КЗ соответствует законам электротехники.

Изменение напряжения на зажимах R_{SH} как в первом, так и во втором полупериодах представлено на зависимости $U_{SH} = f(t)$.

Часть исходных данных для математической модели обладает некоторой степенью неопределённости. К таким исходным данным относятся: время $\Delta t_2, \Delta t_6$ существования паровой пробки – этап 2 и 6, время Δt_4 восстановления ЖСП после перехода через нулевое значение – этап 4, сопротивление электрической дуги. Их значения при расчётах выбраны произвольно по соображениям, связанным с наглядным представлением процесса на графических зависимостях, а также по причине отсутствия информации. Значения этих величин могут быть определены на основании экспериментальных исследований. После чего используются для уточнённого исследования процесса КЗ.

Опытная осциллограмма тока КЗ в сети с токоограничивающим устройством на основе ЖСП представлена на рис. П3.7. Осциллограмма отражает один из результатов коммутационных испытаний макетной конструкции токоограничивающего устройства на основе ЖСП в испытательном центре электрооборудования (ИЦЭО) АО «Контактор» г. Ульяновск. Подготовка к натурному эксперименту заняло самое большое время. Для эксперимента был создан макет ЖСП по разработанным чертежам. Конструкция макета представлена в П.1.1. Общий вид макетного образца показан на рис. П1.1. Разработана технология заправки ЖСП жидким металлом, описанная в П.1.3. Стоит отметить, что было две неудачных заправки макетного образца ЖСП жидким металлом. Было проведено 9 опытов с макетным образцом ЖСП в

соответствие с программой испытаний (см. П.3.5.). Результаты всех испытаний отражены в П.3.

Анализ результатов испытаний позволил выяснить значения Δt_2 , Δt_3 и оценить значение сопротивления электрической дуги для рассматриваемого конкретного случая. Оценка величины сопротивления дуги проводилась на основании соотношения токов в ветви с ЖСП и в ветви с шунтирующим сопротивлением в период дуговой стадии процесса Δt_3 . Это соотношение оказалось равным $0,056 - 4,987$. Стало быть, сопротивление дуги изменяется от $0,56 \cdot R_{SH}$ до $50 \cdot R_{SH}$.

Параметры схемы испытательного контура, в котором проводился эксперимент, номинальные параметры ЖСП, а также значения Δt_2 , Δt_3 и значения сопротивлений электрической дуги, полученные в результате коммутационных испытаний, могут представлять собой исходные данные, необходимые и достаточные для расчёта зависимости $i_k = f(t)$ по математической модели. Расчёт зависимости производился с целью её сравнения с опытной осциллограммой. Сравнение результатов расчёта с опытной осциллограммой показало практически полное совпадение расчётной зависимости тока $i_k = f(t)$ и зависимости тока от времени, представленной на опытной осциллограмме. Это подтверждает адекватность предложенной математической модели физическим процессам в цепи короткого замыкания с токоограничивающим устройством на основе ЖСП, шунтированного резистором. В общем случае адекватность подтверждается результатами анализа расчётных зависимостей, которые не противоречат физике процесса протекания токов в цепи

3.4. Исследование новой математической модели

Исследования проводились при следующих параметрах сети и плавкой вставки:

$$U_{сети} = 250 \text{ В};$$

Материал плавкой вставки – Na ;

Сечение плавкой вставки $S=0,5 \text{ мм}^2$;

Угол возникновения КЗ $\Psi=0^\circ$.

Для исследования параметры модели преобразованы в относительные единицы. Среди них:

$\frac{R}{\omega \cdot L}$ - отношение активного и индуктивного сопротивления цепи короткого замыкания,

$\frac{I_{0,m}}{I_{k,m}}$ - отношение амплитуды тока короткого замыкания $I_{k,m}$ в установившемся режиме к амплитуде тока $I_{0,m}$ в цепи $R - L - R_{ш}$,

$\frac{W_{np}}{I_{k,m}^2}$ - относительное значение пропускаемого теплового интеграла,

$\frac{R_{\partial}}{R_{ш}}$ - отношение сопротивлений электрической дуги и шунтирующего сопротивления. Принимается допущение, что сопротивление электрической дуги постоянно на всём интервале горения электрической дуги (до отключения дополнительным коммутационным аппаратом).

3.4.1. Зависимости пропускаемого теплового интеграла от соотношения сопротивлений электрической дуги и шунтирующего сопротивления

На рис. 3.8 представлены расчётные зависимости пропускаемого теплового интеграла от соотношения сопротивлений электрической дуги и шунтирующего сопротивления.

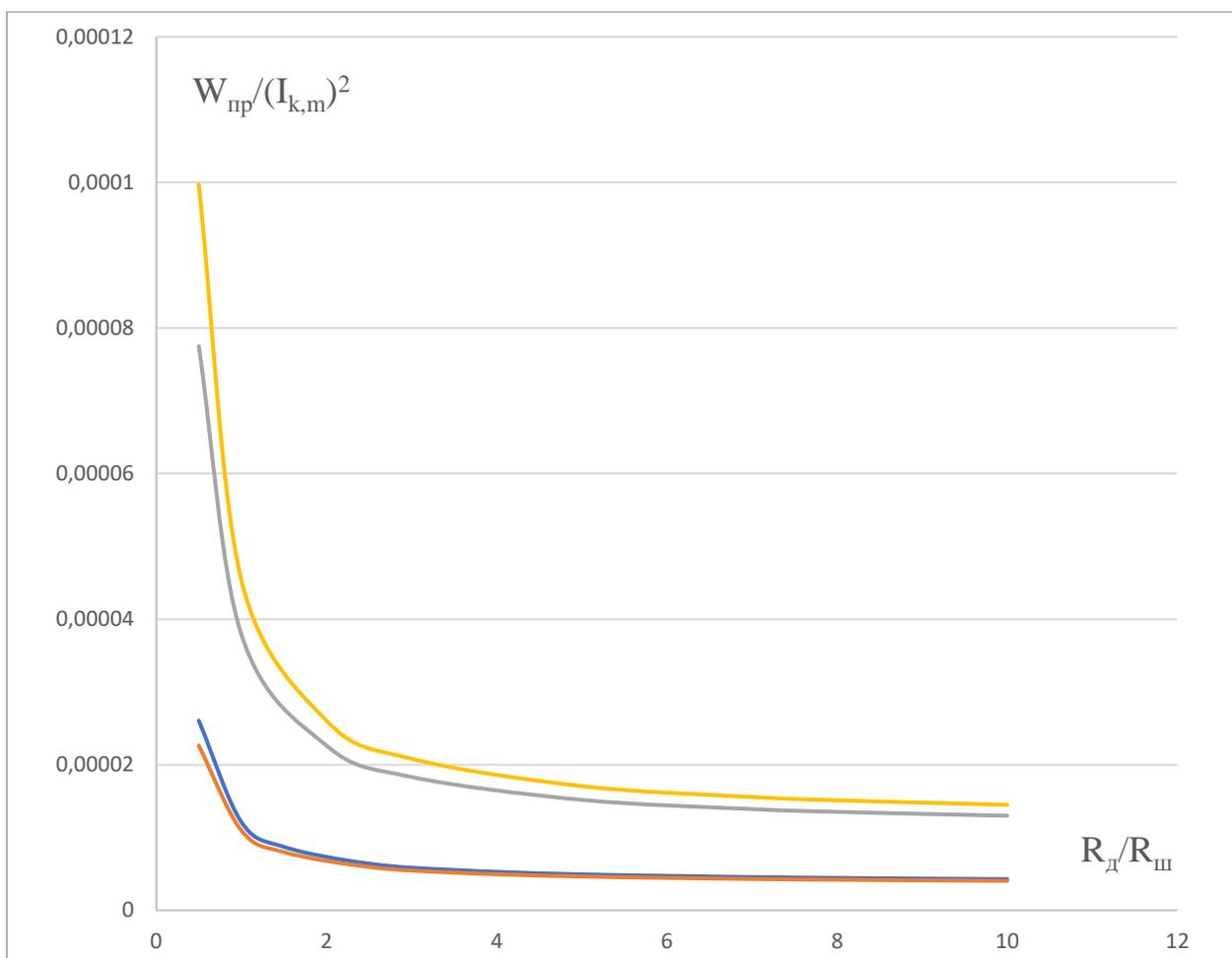


Рис. 3.8. Кривые зависимости пропускемого теплового интеграла от соотношения сопротивления электрической дуги и сопротивления шунтирующего сопротивления

Кривые на рисунке 3.8 построены при постоянном значении $\frac{R}{\omega \cdot L} = 0,001$ (синяя и жёлтая кривые) и при $\frac{R}{\omega \cdot L} = 100$ (серая и оранжевая кривые), что соответствует чисто индуктивному и активному сопротивлению сети.

На рисунке 3.8 представлено 4 кривые:

кривая 1(синяя) и кривая 2(оранжевая), при $R_{ш}=0,1$ Ом и $\frac{I_{0,m}}{I_{k,m}} = 0,047$;

кривая 3(серая) и кривая 4(желтая), при $R_{ш}=0,2$ Ом и $\frac{I_{0,m}}{I_{k,m}} = 0,023$.

Анализ кривых показывает увеличенное значение пропускемого теплового интеграла при индуктивном характере цепи короткого замыкания и соотношении

сопротивления дуги к сопротивлению шунта меньше, чем 4. При значениях $\frac{R_d}{R_u}$ больше 4 изменение значения пропускаемого теплового интеграла не превышает 10%. Отсюда следует, что при разработке и проектировании токоограничивающих устройств, критерием оценки принимаемого решения может быть значение

$$\frac{R_d}{R_u} \geq 4.$$

При таком условии можно не принимать во внимание изменение пропускаемого теплового интеграла.

3.4.2. Зависимости пропускаемого теплового интеграла от напряжения зажигания электрической дуги.

Зависимости 3.9. рассчитаны при учёте критерия $\frac{R_d}{R_u} \geq 4$.

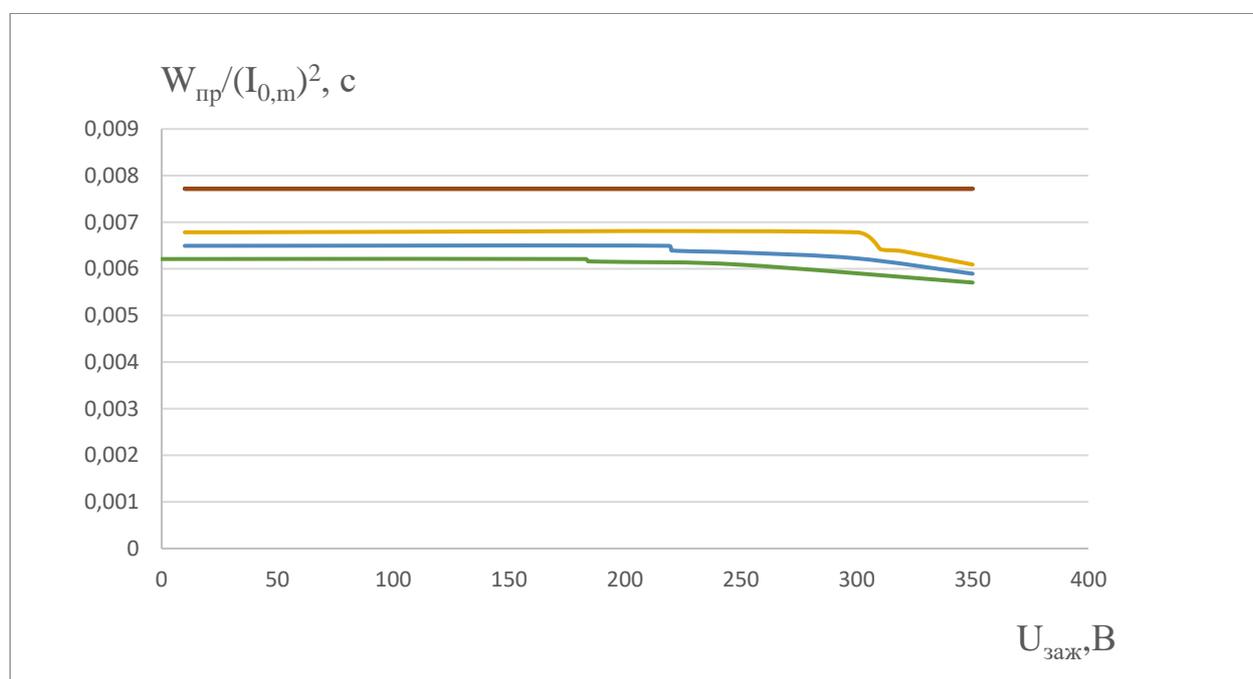


Рис. 3.9. Кривые зависимости пропускаемого теплового интеграла от напряжения зажигания электрической дуги

Графики на рисунке 3.9 построены при постоянном $\frac{R}{\omega \cdot L} = 0,001$. Это соответствует чисто индуктивному сопротивлению сети.

На рисунке 3.9 представлено 4 кривые:

кривая 1(коричневая), при $R_{ш} = 0,1$ Ом;

кривая 2(оранжевая), при $R_{ш} = 0,07$ Ом;

кривая 3(синяя), при $R_{ш} = 0,06$ Ом;

кривая 4(зеленая), при $R_{ш} = 0,05$ Ом.

Анализ показывает, что напряжение зажигания электрической дуги слабо влияет на пропускаемый тепловой интеграл.

3.4.3. Зависимости пропускаемого теплового интеграла от времени существования паровой пробки

Зависимости 3.10. рассчитаны при учёте критерия $\frac{R_0}{R_{ш}} \geq 4$.

Кривые на рисунке 3.11 построены при постоянном $\frac{R}{\omega \cdot L} = 0,001$ (синяя и серая кривые) и при $\frac{R}{\omega \cdot L} = 100$ (жёлтая и оранжевая кривые), что соответствует чисто индуктивному и активному сопротивлению сети.

На рисунке 3.10 представлено 4 кривые:

кривая 1(синяя) и кривая 2(оранжевая), при $R_{ш} = 0,1$ Ом и $\frac{I_{0,m}}{I_{k,m}} = 0,047$;

кривая 3(серая) и кривая 4(жёлтая), при $R_{ш} = 0,2$ Ом и $\frac{I_{0,m}}{I_{k,m}} = 0,023$.

Анализ показывает, что время существования паровой пробки мало влияет на пропускаемый тепловой интеграл. Параметр времени существования паровой пробки t_2 неизвестен, значения приняты на основе рассуждений от 0 с до $0,0035$ с. Меньше половины одного полупериода.

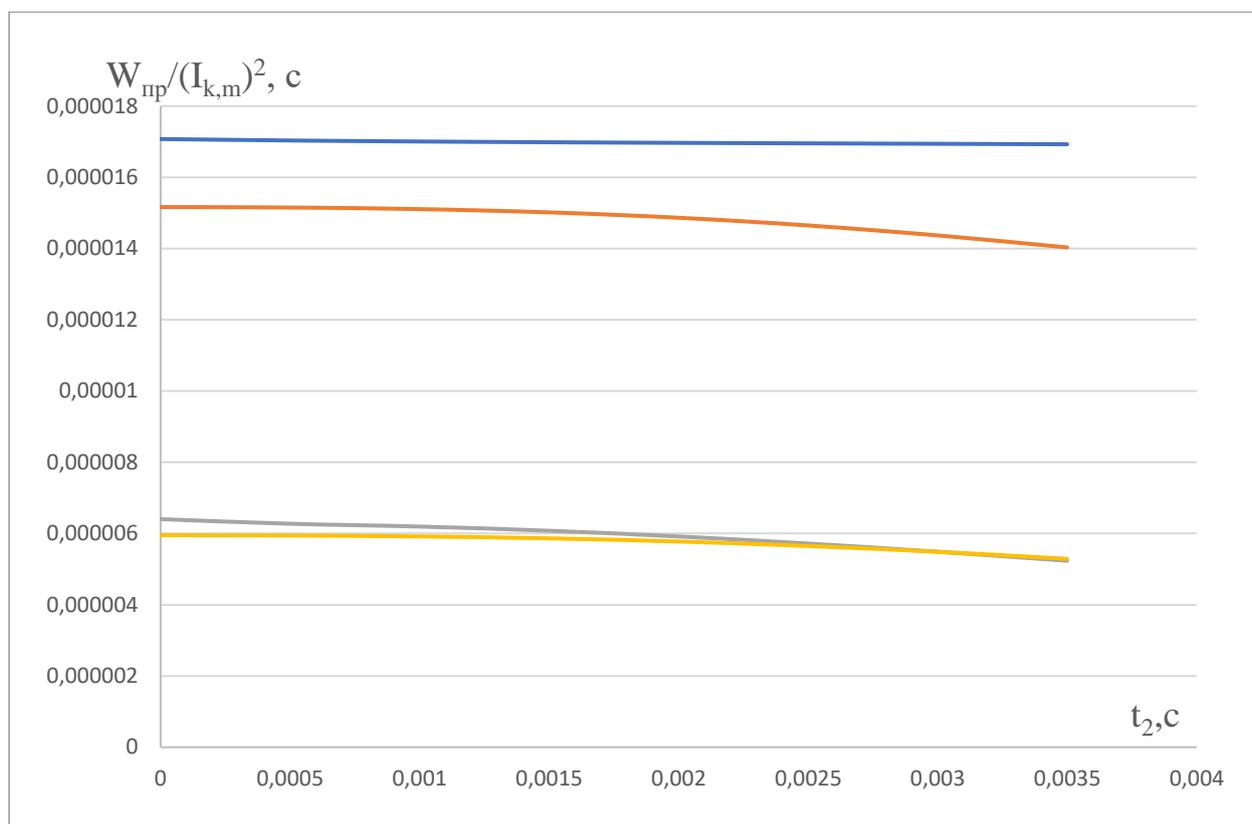


Рис. 3.10. Кривые зависимости пропускаемого теплового интеграла от времени существования паровой пробки

Кривые на рисунке 3 построены при постоянном $\frac{R}{\omega \cdot L} = 0,001$ (синяя и жёлтая кривые) и при $\frac{R}{\omega \cdot L} = 100$ (серая и оранжевая кривые), что соответствует чисто индуктивному и активному сопротивлению сети.

3.4.4. Энергия электрической дуги в ЖСП

Энергия, выделяемая электрической дугой во время дуговой стадии процесса срабатывания ЖСП, является важным показателем ЖСП. Её значение характеризует степень дуговой эрозии канала диэлектрической втулки, как следствие, стабильность защитной характеристики при многократных срабатываниях. Этим определяется показатель коммутационного ресурса. Очевидно, что, чем меньше энергия дуги, тем выше коммутационный ресурс.

Энергия дуги определяется тепловым интегралом дуги за время от её возникновения $t = 0$ до погасания $t = t_0$

$$W_{\delta} = \int_0^{t_0} i^2 dt.$$

На рис. 3.11 представлены зависимости W_{δ} от соотношения $\frac{R_w}{R_{\delta}}$, при $R_{\delta} = \text{const}$. Кривые на рисунке 3.11 построены при постоянном $\frac{R}{\omega \cdot L} = 0,001$ и при $\frac{R}{\omega \cdot L} = 100$, что соответствует чисто индуктивному и активному сопротивлению сети.

Из рис. 3.11 видно, что энергия дуговой стадии процесса в ЖСП уменьшается за счёт уменьшения значения шунтирующего сопротивления более, чем в 2-3 раза.

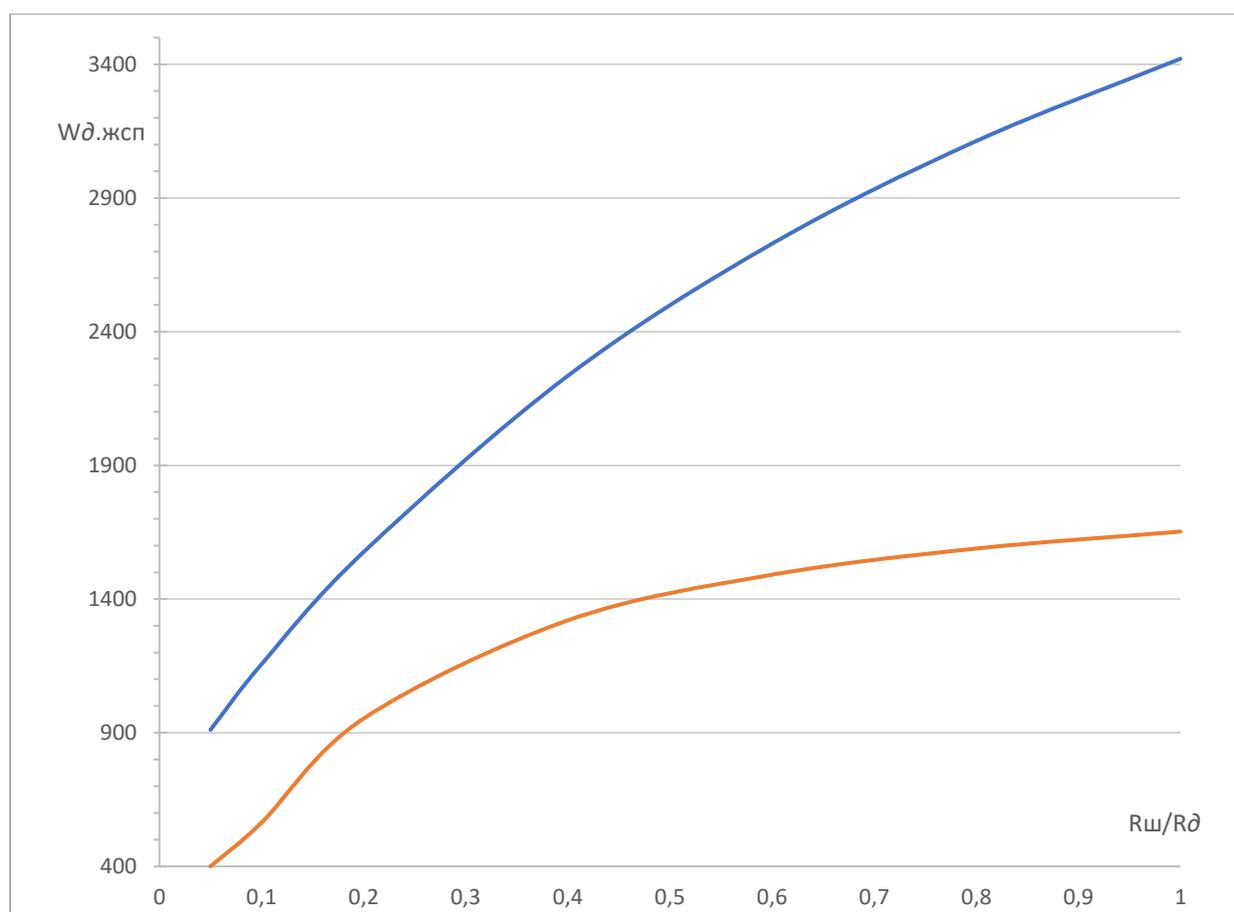


Рис. 3.11. Кривые зависимости интеграла дугового процесса W_{δ} через ЖСП FU от соотношения сопротивления электрической дуги и сопротивления

шунтирующего сопротивления $\frac{R_w}{R_{\delta}}$

3.5. Новая модель электротехнического комплекса с ограничителем тока на основе ЖСПС с шунтирующим сопротивлением и повышенным коммутационным ресурсом

В целом математическая модель с использованием ограничителя тока с ЖСПС и шунтирующим сопротивлением практически не отличается от модели ограничителя тока с ЖСП и шунтирующим сопротивлением. Различие в том, что в качестве минимального сечения плавкой вставки используется сечение тугоплавкого электрода. При этом значение постоянной A зависит от теплофизических свойств применяемых в составной плавкой вставке материалов. Методика определения постоянной A приводится ниже.

При существенных преимуществах конструкция ЖСПС с тугоплавким электродом по сравнению с ЖСП обладает недостатком. Если за время протекания по плавкой вставке аварийного тока электрод успевает нагреваться до температуры плавления, происходит его разрушение. Это говорит об ограниченной коммутационной способности ЖСПС. На сколько этот недостаток ограничивает область применения ЖСПС? На сегодняшний день вопрос остаётся открытым. Возникает задача найти и определить критерий, при котором происходит это явление. Этот критерий является критерием работоспособности устройства.

Необходимым условием работоспособности ЖСПС является превышение теплового интеграла плавления электрода W_{Δ} над суммой преддугового интеграла плавкой вставки $W_{np\delta}$ и теплового интеграла от тока W_{δ} во время дуговой стадии процесса в ЖСПС

$$W_{\Delta} \geq W_{np\delta} + W_{\delta}. \quad (3.34)$$

Значение тепловых интегралов определяется по осциллограммам срабатывания ЖСПС

$$W_{np\delta} = \int_0^{t_{np\delta}} i^2 dt, \quad W_{\delta} = \int_{t_{np\delta}}^{t_{\text{дуги}}} i^2 dt. \quad (3.35)$$

Выполнение условия (3.34) означает, что электрод при срабатывании ЖСПС не достигнет температуры плавления.

Значения $W_{\text{Э}}$ определяются по формуле:

$$W_{\text{Э}} = A_{\text{Э}} \cdot S_{\text{Э}}^2. \quad (3.36)$$

Значение $A_{\text{Э}}$ представляет собой энергию, необходимую для нагрева электрода до температуры плавления. Для таких тугоплавких материалов, как вольфрам, рений, значения рассчитывались по выражению [12]:

$$A = \frac{c_1 \cdot \gamma_1}{\rho_0 \cdot \alpha} \cdot \ln \left(\frac{1 + \alpha \cdot T_{\text{пл}}}{1 + \alpha \cdot T_0} \right); \quad (3.37)$$

где c_1 – теплоёмкость материала электрода в твёрдом его состоянии; γ_1 – плотность материала плавкой вставки; α – температурный коэффициент изменения сопротивления; ρ_0 – удельное сопротивление материала плавкой вставки при температуре 0°C ; T_0 – температура окружающей среды; $T_{\text{пл}}$ – температура плавления.

Результаты приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1.

Результаты расчёта значений $A_{\text{Э}}$.

Материал электрода	$A_{\text{Ж}} \cdot 10^{16}, \frac{\text{Дж}}{\text{Ом} \cdot \text{м}^4}$	$A_{\text{Ж}}, \frac{\text{Дж}}{\text{Ом} \cdot \text{мм}^4}$
Вольфрам	2,12	21200
Рений	1,1	11042

Значение $W_{\text{прд}}$ для составной плавкой вставки, прежде всего, зависит от времени нагрева жидкого металла до температуры кипения и перехода в парообразное состояние. При этом возможны два случая. В одном из них при протекании аварийного тока часть жидкого металла в месте контакта с электродом нагревается раньше, чем электрод достигает указанной температуры. После чего происходит разрыв электрической цепи с последующим возникновением и гашением дуги. В другом случае электрод нагревается до

температуры кипения жидкого металла раньше, чем нагревается жидкий металл. Тогда электрод нагревает жидкий металл и происходит испарение части жидкого металла в месте контакта с торцевой частью. Какой из этих случаев будет иметь место, зависит от теплофизических свойств, применяемых в составной плавкой вставке материалов.

В первом случае преддуговой интеграл будет равен:

$$W_{np\delta} = W_{np\delta, Ж} = A_{Ж} \cdot S_{Ж}^2. \quad (3.38)$$

Значение $A_{Ж}$ представляет собой энергию, необходимую для нагрева жидкого металла до температуры кипения и превращения в парообразное состояние. Для плавких вставок из жидкого металла приводятся в технической литературе [12]. Во втором случае:

$$W_{np\delta} = W_{np\delta, Ж-Э} = A_{Ж-Э} \cdot S_{Э}^2. \quad (3.39)$$

Во втором случае постоянная $A_{Ж-Э}$ представляет собой энергию, необходимую для нагрева электрода до температуры кипения жидкого металла. Значение $A_{Ж-Э}$ определяется по выражению (3.38), в котором используются теплофизические константы материала электрода, кроме температуры плавления. Температура плавления принимается равной температуре кипения жидкого металла. Расчёт $A_{Ж-Э}$ представлен в таблице 3.2.

Таблица 3.2.

Результаты расчёта значений $A_{Ж-Э}$

Материал электрода	Вольфрам			Рений			Тантал		
	натрий	калий	ртуть	натрий	калий	ртуть	натрий	калий	ртуть
$A_{Ж-Э}, \frac{Дж}{Ом \cdot мм^4}$	10398	9536	5350	5183	4716	2533	4664	4265	2357

Преддуговой интеграл $W_{np\delta}$ при составной плавкой вставке будет равен меньшему значению из двух рассмотренных случаев (3.38) и (3.39).

$$W_{npd} = W_{npd, Ж-Э}, \text{ если } W_{npd, Ж-Э} \leq W_{npd, Ж}; \quad (3.40)$$

$$W_{npd} = W_{npd, Ж}, \text{ если } W_{npd, Ж-Э} \geq W_{npd, Ж}. \quad (3.41)$$

Учитывая, что в составной плавкой вставке

$$S_{Э} = S_{Ж} = S, \quad (3.42)$$

при расчётах W_{npd} для составной плавкой вставки значение $A_{вст}$ выбирается следующим образом:

$$A_{вст} = A_{Ж-Э}, \text{ если } A_{Ж-Э} \leq A_{Ж}; \quad (3.43)$$

$$A_{вст} = A_{Ж}, \text{ если } A_{Ж-Э} \geq A_{Ж}. \quad (3.44)$$

Тогда

$$W_{npd} = A_{вст} \cdot S^2. \quad (3.45)$$

Результаты расчёта $A_{вст}$ для составной плавкой вставки при использовании в качестве одной из частей вольфрама, а в качестве второй части натрия, калия и ртути представлены в таблице. 3.3.

Таблица 3.3.

Результаты расчёта значений $A_{вст}$ для составной плавкой вставки.

материал электрода – вольфрам

Жидкий металл	$A_{Ж}, \frac{Дж}{Ом \cdot мм^4}$	$A_{Ж-Э}, \frac{Дж}{Ом \cdot мм^4}$	$A_{вст}, \frac{Дж}{Ом \cdot мм^4}$
Натрий	18000	10398	10398
Калий	5800	9536	5800
Ртуть	1300	5350	1300

С учётом сказанного условие (3.34) принимает вид:

$$A_{Э} \cdot S^2 \geq A_{вст} \cdot S^2 + W_{\delta}; \quad (3.46)$$

Ток короткого замыкания в ограничителе тока, состоящем из ЖСПС и шунтирующего сопротивления, в начальный момент протекает через ЖСПС, нагревая плавкую вставку. После достижения током значения, при котором тепловой интеграл достигнет значения преддугового интеграла ЖСПС за время t_{npd} плавкая вставка вблизи электрода испаряется и возникает электрическая дуга,

которая гасится при прохождении тока через нулевое значение. Электрическая цепь разрывается дополнительным коммутационным аппаратом. Длительность дуговой стадии процесса определяется временем $t_{np\delta}$. Возникновение электрической дуги сопровождается переключением части тока в цепь шунтирующего сопротивления.

Пропускаемый тепловой интеграл ограничителя тока W_{np} будет складываться из преддугового интеграла плавкой вставки и теплового интеграла $W_{\delta-R}$ от тока, протекающего в цепи короткого замыкания в интервал времени от возникновения дуги и переключения части тока в цепь шунтирующего сопротивления до естественного перехода тока через нулевое значение

$$W_{np} = W_{np\delta} + W_{\delta-R}. \quad (3.47)$$

Токи в цепи сопротивления электрической дуги и цепи шунтирующего сопротивления распределяются обратно пропорционально соотношению этих сопротивлений

$$\frac{i_R}{i_\delta} = \frac{R_\delta}{R_{ш}}. \quad (3.48)$$

Отношение тока через сопротивление дуги к ограниченному ограничителем тока $i_{\delta-R}$ в цепи короткого замыкания в интервал времени от возникновения дуги и переключения части тока в цепь шунтирующего сопротивления выглядит следующим образом:

$$\frac{i_{\delta-R}}{i_\delta} = \frac{R_\delta + R_{ш}}{R_{ш}}. \quad (3.49)$$

Сделав предположение, что отношение квадрата тока дуги к квадрату тока в защищаемой цепи после срабатывания ограничителя тока равно отношению их тепловых интегралов, получим:

$$\frac{i_{\delta-R}^2}{i_\delta^2} = \frac{W_{\delta-R}}{W_\delta} = \frac{W_{np} - W_{np\delta}}{W_\delta}. \quad (3.50)$$

После алгебраических преобразований (3.50) получим полное квадратное уравнение:

$$W_{np} = \frac{S^2 \cdot (A_{\text{Э}} - A_{\text{вс}})}{\left(\frac{R_{\text{и}}}{R_{\text{д}}}\right)^2} + \frac{2 \cdot S^2 \cdot (A_{\text{Э}} - A_{\text{вс}})}{\frac{R_{\text{и}}}{R_{\text{д}}}} + S^2 \cdot A_{\text{Э}} \quad (3.51)$$

Его решение представляется двумя вещественными корнями (3.52), (3.53).

$$\frac{R_{\text{д}}}{R_{\text{и}}} = \frac{\frac{W_{np}}{S^2} - A_{\text{Э}}}{\sqrt{(A_{\text{вс}} - A_{\text{Э}})} \cdot \left(\sqrt{\left(A_{\text{вс}} - \frac{W_{np}}{S^2}\right)} - \sqrt{(A_{\text{вс}} - A_{\text{Э}})} \right)} \quad (3.52)$$

$$\frac{R_{\text{д}}}{R_{\text{и}}} = \frac{A_{\text{Э}} - \frac{W_{np}}{S^2}}{\sqrt{(A_{\text{вс}} - A_{\text{Э}})} \cdot \left(\sqrt{(A_{\text{вс}} - A_{\text{Э}})} + \sqrt{\left(A_{\text{вс}} - \frac{W_{np}}{S^2}\right)} \right)} \quad (3.53)$$

Значение $\frac{R_{\text{д}}}{R_{\text{и}}}$ по (3.52) имеет отрицательное значение и не представляет интереса. Для дальнейших рассуждений используем выражение (3.53). Значение $\frac{R_{\text{д}}}{R_{\text{и}}}$ в (3.53) представляет собой критерий работоспособности ограничителя тока с составной плавкой вставкой. При значениях $\frac{R_{\text{д}}}{R_{\text{и}}}$ меньше критических (критериальных) работоспособность ограничителя тока с составной плавкой вставкой не обеспечивается.

Выражение (3.53) позволяет получить графическую зависимость критических значений $\frac{R_{\text{д}}}{R_{\text{и}}}$ от пропускаемого теплового интеграла $\frac{W_{np}}{S^2}$. См. рис.

3.12. На рисунке область правее графика зависимости представляет собой область значений $\frac{W_{np}}{S^2}$ и $\frac{R_{\text{д}}}{R_{\text{и}}}$, при которых обеспечивается работоспособность составной плавкой вставки. При срабатывании электрод не достигает температуры плавления, остаётся работоспособным. Другая область при значениях $\frac{R_{\text{д}}}{R_{\text{и}}}$ ниже критических говорит о том, что электрод будет разрушаться. В качестве примера проверим работоспособность ограничителя тока с составной плавкой вставкой в

цепи короткого замыкания. Предположим, что цепь короткого замыкания включает в себя ограничитель с последовательно включённым автоматическим выключателем с собственным временем срабатывания t , соизмеримым с половиной периода частоты сети. Параметры ограничителя тока обеспечивают ограничение амплитуды возможного тока короткого замыкания до $I_{m,огр} = 28$ кА. Это значение является пропускаемым током. Пропускаемый тепловой интеграл такого устройства можно оценить следующим образом:

$$W_{np} = \left(\frac{I_{m,огр}}{\sqrt{2}} \right)^2 \cdot t = \left(\frac{28 \cdot 10^3}{\sqrt{2}} \right)^2 \cdot 0,01 = 4,0 \cdot 10^6 \text{ (A}^2 \cdot \text{c)}$$

При сечении электрода 1 мм^2 W_{np} и $\frac{W_{np}}{S^2}$ по значению равны между собой.

На рис. 3.13 видно, что этому значению, согласно зависимости 1, соответствует значение $\frac{R_d}{R_{и}}$ равное 20. При значениях больше указанного работоспособность ЖСПС обеспечивается. При меньших значениях возможно расплавление электрода и нарушение работоспособности.

Из рис. 3.12 следует, что повышать отключающую способность ЖСПС возможно за счёт увеличения $\frac{R_d}{R_{и}}$ или увеличения сопротивления дуги R_d . Это достигается за счёт повышения начального давления для жидкого металла. Повышенное начальное давление устанавливается за счёт конструкции демпфирующего устройства. Для этого могут быть использованы механические пружины, сжатый газ и т.п. [105]. В настоящее время информация об исследованиях вольтамперной характеристики дуги в парах жидкого металла и её сопротивления в литературных источниках пока отсутствует.

Зависимости могут оказаться полезными при разработке конструкций ЖСПС. Например, при выборе материала электрода и жидкого металла и т.п.

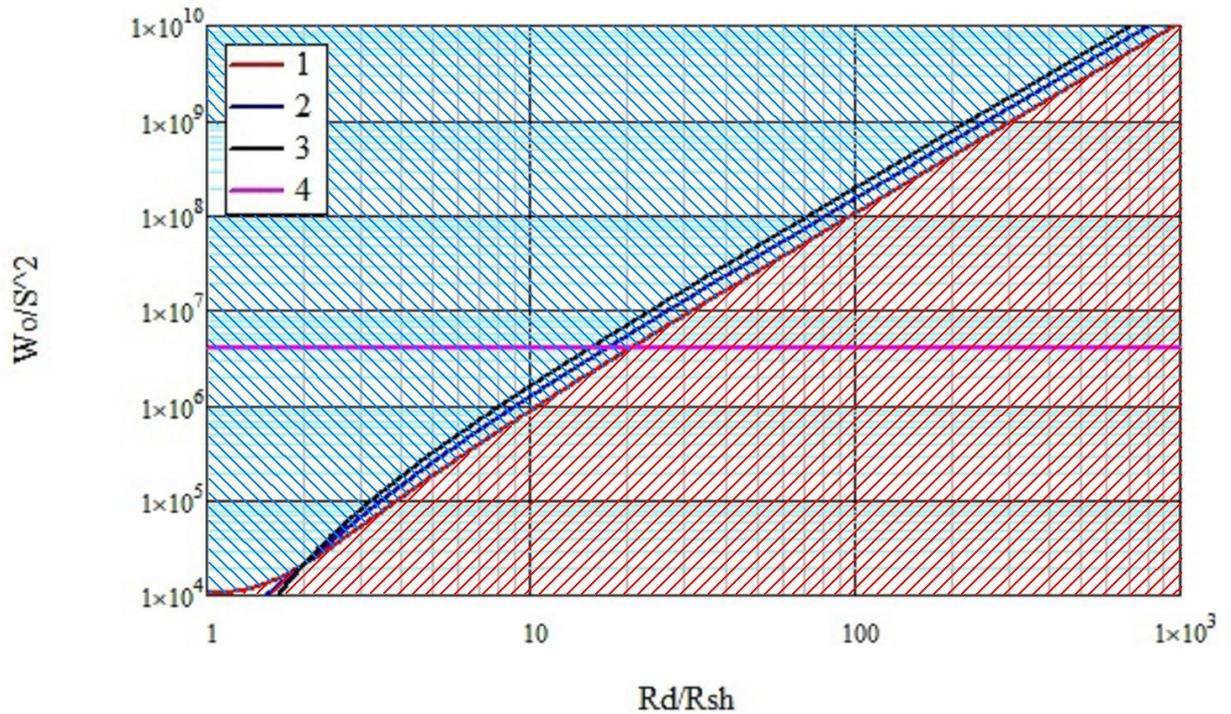


Рис. 3.12. Зависимость $\frac{R_d}{R_{III}} = f\left(\frac{W_{np}}{S^2}\right)$ для составной плавкой вставки ЖСПС.

Материал электрода – вольфрам. Зависимость 1 – материал вставки натрий.
Зависимость 2 – материал вставки калий. Зависимость 3 – материал вставки ртуть.

Для натрия: зона работоспособности – красная штриховка, зона
неработоспособности – синяя штриховка.

3.6. Новая модель электротехнического комплекса с ограничителем тока на основе ЖСП с двухступенчатым принципом токоограничения

3.6.1. Структурная схема и математическое описание процесса короткого замыкания

В работе для увеличения коммутационного ресурса предложено использовать устройство ограничения тока с двухступенчатым принципом токоограничения. См. гл. 2.3.4.

Математическая модель этого устройства представлена ниже и является усовершенствованной моделью, рассмотренной в пункте 3.2. диссертации.

Схема замещения представлена на рис. 3.13. Она состоит из источника переменного напряжения G , индуктивности сети L , активного сопротивления сети R , двух ЖСП подключенных параллельно, сопротивления плавких вставок жидкометаллических предохранителей R_f , сопротивления электрической дуги R_d , возникающей при срабатывании ЖСП, шунтирующих сопротивлений $R_{ш1}$ и $R_{ш2}$. В исходном состоянии ключи Q_1 разомкнуты, а ключи Q_2 и Q_4 замкнуты в положении 1.

Процесс КЗ имитируется замыканием ключа Q_1 . И далее происходит поочередное срабатывание ключей Q_2 и Q_4 (рис. 3.13) в первом полупериоде. Всего в первом полупериоде 4 этапа.

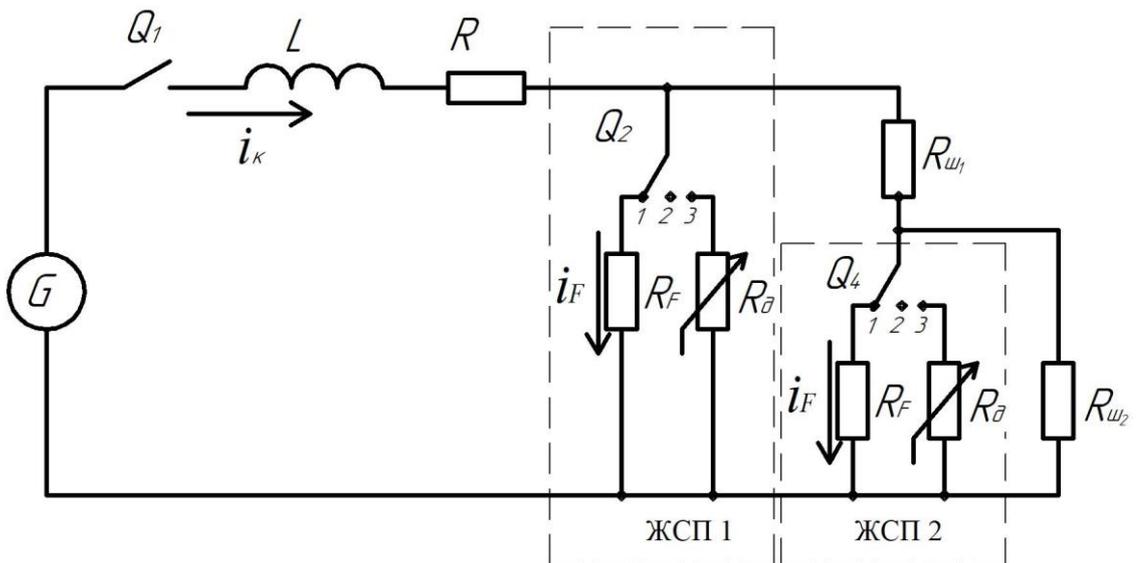


Рис. 3.13. Эквивалентная схема процесса короткого замыкания.

Первый этап происходит в период времени $0 \leq t \leq t_1$, где t_1 – время, соответствующее нагреву плавкой вставки под действием тока короткого замыкания до температуры кипения и переходу в парообразное состояние. Этот этап остаётся без изменения и для его расчёта используются формулы 3.1-3.5.

Второй этап процесса происходит на интервале времени $t_1 < t \leq t_2$. Этот этап предшествует возникновению электрической дуги в первом ЖСП. Схема замещения представлена на рисунке 3.14.

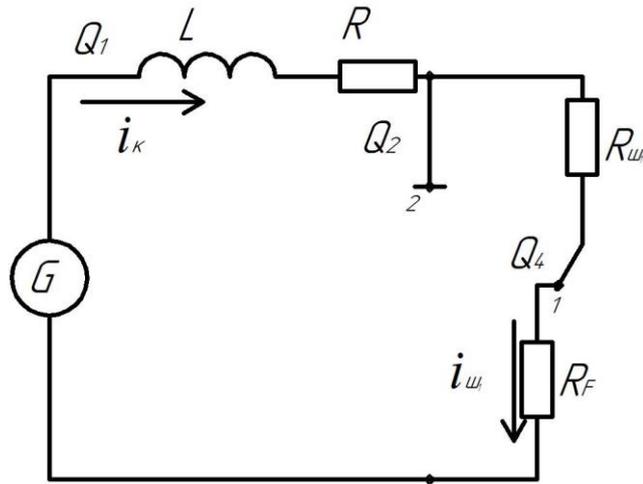


Рис. 3.14. Схема замещения процесса короткого замыкания на втором этапе

Сопротивление плавкой вставки R_f второго ЖСП считаем равным нулю, тогда схема рис. 3.14. примет вид схемы на рис. 3.15. Для расчёта этого этапа используются формулы 3.6-3.9, только вместо $R_{ш}$ подставляется $R_{ш1}$.

Третий этап происходит на интервале времени от t_2 до t_3 . На этом этапе в начальный момент происходит дуговой пробой газовой пробки в первом ЖСП (рис. 3.14) и возникает электрическая дуга в первом ЖСП, что эквивалентно переключению ключа Q_2 из положения 2 в положение 3, Q_2 пока ещё в положении 1. Эквивалентная схема замещения этапа 3 изображена на рис. 3.15.

Сопротивление плавкой вставки R_f второго ЖСП считаем равным нулю. Тогда схема замещения на рис. 3.15 принимает вид схемы замещения на рис. 3.4. Для расчёта этого этапа используются формулы 3.12-3.17, только вместо $R_{ш}$ подставляется $R_{ш1}$. Отметим, что в исходной модели третий этап кончается при естественном переходе тока через нулевое значение. В этом же случае этап заканчивается, когда во втором ЖСП нагреется плавкая вставки под действием ТКЗ до температуры кипения и перейдёт в парообразное состояние. Получается на этом этапе дуговой этап в первом ЖСП, а во втором ЖСП преддуговой этап. Время этого этапа находится из уравнения 3.2 (аналогичным способом, который был описан в пункте 3.2.). Только ток i_f из уравнения 3.2. будет рассчитываться умножением тока из 3.13 на коэффициент:

$$k_{ЖСП2,3} = \frac{R_{u1}}{R_{u1} + R_{\partial,3,j}}. \quad (3.54)$$

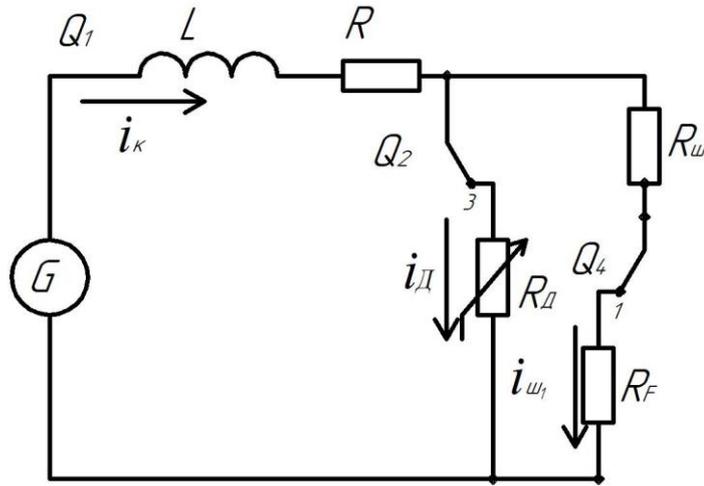


Рис. 3.15. Схема замещения процесса короткого замыкания на третьем этапе

Четвёртый этап происходит на интервале времени от t_3 до t_4 . На этом этапе дуга в первом ЖСП ещё горит и ключ Q_4 переходит в положение 3 и во втором ЖСП загорается дуга (рис. 3.16). Уравнение переходного процесса будет иметь вид:

$$U_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \psi) = L \frac{di_{K.4}}{dt} + R_{K.4} \cdot i_{K.4}. \quad (3.55)$$

Сопротивление $R_{K.4}$ будет иметь вид:

$$R_{K.4} = R + \frac{\left(R_{u1} + \left(\frac{R_{u2} \cdot R_{\partial,3,j}}{R_{u2} + R_{\partial,3,j}} \right) \cdot R_{\partial,3,j} \right)}{\left(R_{u1} + \left(\frac{R_{u2} \cdot R_{\partial,3,j}}{R_{u2} + R_{\partial,3,j}} \right) + R_{\partial,3,j} \right)}.$$

Ток КЗ будет находиться по формуле:

$$i_{K.4} = I_{4,m,j} \cdot \sin(\omega \cdot t + \psi - \varphi_{4,j}) - [I_{0,4,(j-1)} - I_{4,m,j} \cdot \sin(\omega \cdot (t_3 + \Delta t \cdot (j-1)) + \psi - \varphi_{4,j})] \cdot e^{-\frac{t - (t_3 + \Delta t \cdot (j-1))}{\tau_{4,j}}} \quad (3.56)$$

, где $\tau_{4,j}$ – постоянная времени цепи короткого замыкания на каждом j -том временном интервале

$$\tau_{4,j} = \frac{L}{R + \frac{R_{u1} + \left(\frac{R_{u2} \cdot R_{\delta,3,j}}{R_{u2} + R_{\delta,3,j}} \right) \cdot R_{\delta,3,j}}{R_{u1} + \left(\frac{R_{u2} \cdot R_{\delta,3,j}}{R_{u2} + R_{\delta,3,j}} \right) + R_{\delta,3,j}}}} ;$$

$\phi_{4,j}$ – угол сдвига фаз между током короткого замыкания и напряжением в установившемся режиме в цепи

$$\tau_{4,j} = \arctg \left(\frac{\omega L}{R + \frac{R_{u1} + \left(\frac{R_{u2} \cdot R_{\delta,3,j}}{R_{u2} + R_{\delta,3,j}} \right) \cdot R_{\delta,3,j}}{R_{u1} + \left(\frac{R_{u2} \cdot R_{\delta,3,j}}{R_{u2} + R_{\delta,3,j}} \right) + R_{\delta,3,j}}} \right) ;$$

$I_{m,4,j}$ – амплитуда тока короткого замыкания в цепи в установившемся режиме $I_{m,4,j} = \frac{U_m}{Z} = \frac{U_m}{\sqrt{R_{K,4}^2 + L^2}}$.

При $j = 1$, $I_{0,4,(j-1)} = I_{0,3}$; при $t = t_4, i_4 = 0$.

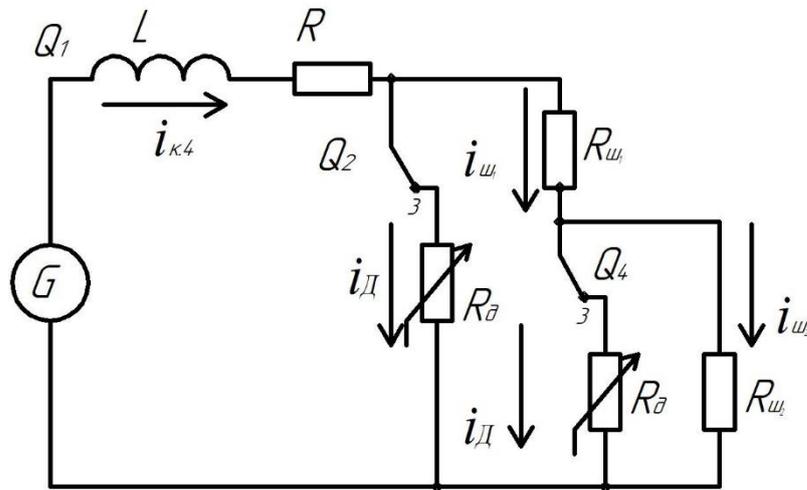


Рис. 3.16. Схема замещения процесса короткого замыкания на четвёртом этапе

В двухступенчатом ограничителе интеграл Джоуля через второй ЖСП будет находиться:

$$W_{0,ЖСП1} = W_1 + W_{3,ЖСП1} + W_{4,ЖСП1} \quad (3.57)$$

W_1 рассчитывается по формуле (3.40).

$W_{3,ЖСП1}$ равен:

$$W_{3,ЖСП1} = \int_{t_2 + \Delta t \cdot (j-1)}^{t_2 + \Delta t \cdot j} (i_{K.3} \cdot k_{ЖСП1,3})^2 dt \quad (3.58)$$

$$k_{ЖСП1,3} = \frac{R_{\delta,3,j}}{R_{u1} + R_{\delta,3,j}}. \quad (3.59)$$

$W_{4,ЖСП1}$ равен:

$$W_{4,ЖСП1} = \int_{t_3 + \Delta t \cdot (j-1)}^{t_3 + \Delta t \cdot j} (i_{K.4} \cdot k_{ЖСП1,4})^2 dt \quad (3.60)$$

$$k_{ЖСП1,4} = \frac{\left(R_{u1} + \left(\frac{R_{u2} \cdot R_{\delta,3,j}}{R_{u2} + R_{\delta,3,j}} \right) \right)}{\left(R_{u1} + \left(\frac{R_{u2} \cdot R_{\delta,3,j}}{R_{u2} + R_{\delta,3,j}} \right) + R_{\delta,3,j} \right)}. \quad (3.61)$$

Расчётные осциллограммы тока через ограничитель и напряжения на нём представлены на рис. 3.17 и 3.18. Где синий график относится к ограничителю тока на основе двух ЖСП с двухступенчатым принципом, а красный график — к ограничителю тока на основе одного ЖСП.

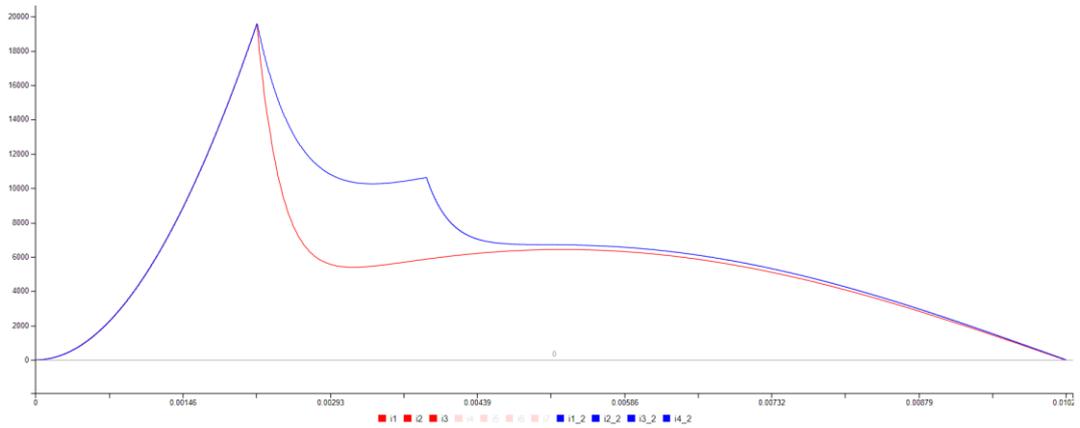


Рис. 3.17. Сравнение токов КЗ

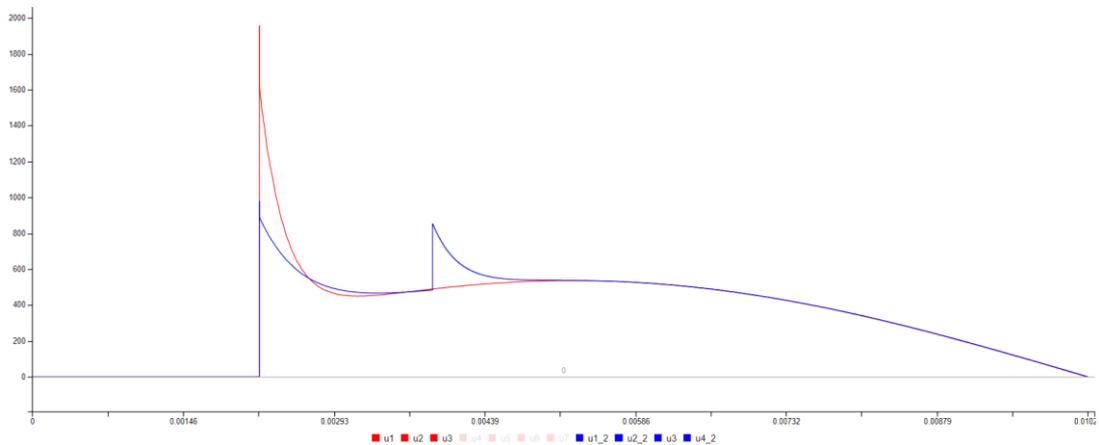


Рис. 3.18. Сравнение напряжений КЗ

3.6.2 Энергия электрической дуги в ЖСП1

Разработанная математическая модель нового ограничителя тока, структурная схема которого реализует двухступенчатый принцип токоограничения (см. рис. 3.13), может быть использована для оценки снижения энергии электрической дуги в ЖСП1 и, как следствие, возможности повышения коммутационного ресурса. Для сравнения при расчётах использовалась энергия дуги, выделяемая в ЖСП с одноступенчатым принципом токоограничения.

Исследования проводились при следующих параметрах сети и плавкой вставки:

$$U_{сети} = 250 \text{ В};$$

Материал плавкой вставки – *Na*;

Сечение плавкой вставки первого ЖСП $S_I = 5 \text{ мм}^2$;

Угол возникновения КЗ $\Psi = 0^\circ$;

Шунтирующее сопротивление $R_{III} = R_{III1} + R_{III2} = 0,2 \text{ Ом}$;

Отношение амплитуды тока короткого замыкания $I_{k,m}$ в установившемся режиме к амплитуде тока $I_{0,m}$ в цепи $R - L - R_{II}$, $\frac{I_{0,m}}{I_{k,m}} = 0,023$;

Критерий $\frac{R_\sigma}{R_{II}} \geq 4$.

Для исследования параметры модели преобразованы в относительные единицы. Среди них:

$\frac{R}{\omega \cdot L}$ - отношение активного и индуктивного сопротивления цепи короткого замыкания,

$\frac{I_{0,m}}{I_{k,m}}$ - отношение амплитуды тока короткого замыкания $I_{k,m}$ в установившемся режиме к амплитуде тока $I_{0,m}$ в цепи $R - L - R_{II}$,

$\frac{W_{\sigma,1}}{W_{\sigma,\varepsilon}}$ - изменение интеграла дуги (износ) в первом ЖСП при двухступенчатом принципе токоограничения $W_{\sigma,1}$ по отношению к интегралу дуги в первом ЖСП при одноступенчатом принципе токоограничения $W_{\sigma,\varepsilon}$,

$\frac{W_{np,1}}{W_{np,\varepsilon}}$ - изменение пропускаемого теплового интеграла в ограничителе тока с двухступенчатым принципом токоограничения $W_{np,1}$ по отношению к пропускаемому тепловому интегралу при одноступенчатом принципе токоограничения $W_{np,\varepsilon}$,

$\frac{R_{III1}}{R_{III1} + R_{III2}}$ - отношение первого шунтирующего сопротивления и суммы первого и второго шунтирующих сопротивлений,

$\frac{R_d}{R_u}$ - отношение сопротивлений электрической дуги и шунтирующего сопротивления. Принимается допущение, что сопротивление электрической дуги постоянно на всём интервале горения электрической дуги (до отключения дополнительным коммутационным аппаратом).

Кривые на рисунке 3.19 и рисунке 3.20 построены при постоянном значении $\frac{R}{\omega \cdot L} = 0,001$ (синяя) и при $\frac{R}{\omega \cdot L} = 100$ (оранжевая), что соответствует чисто индуктивному и активному сопротивлению сети. И при постоянном значении сечения $S_2 = 3 \text{ мм}^2$.

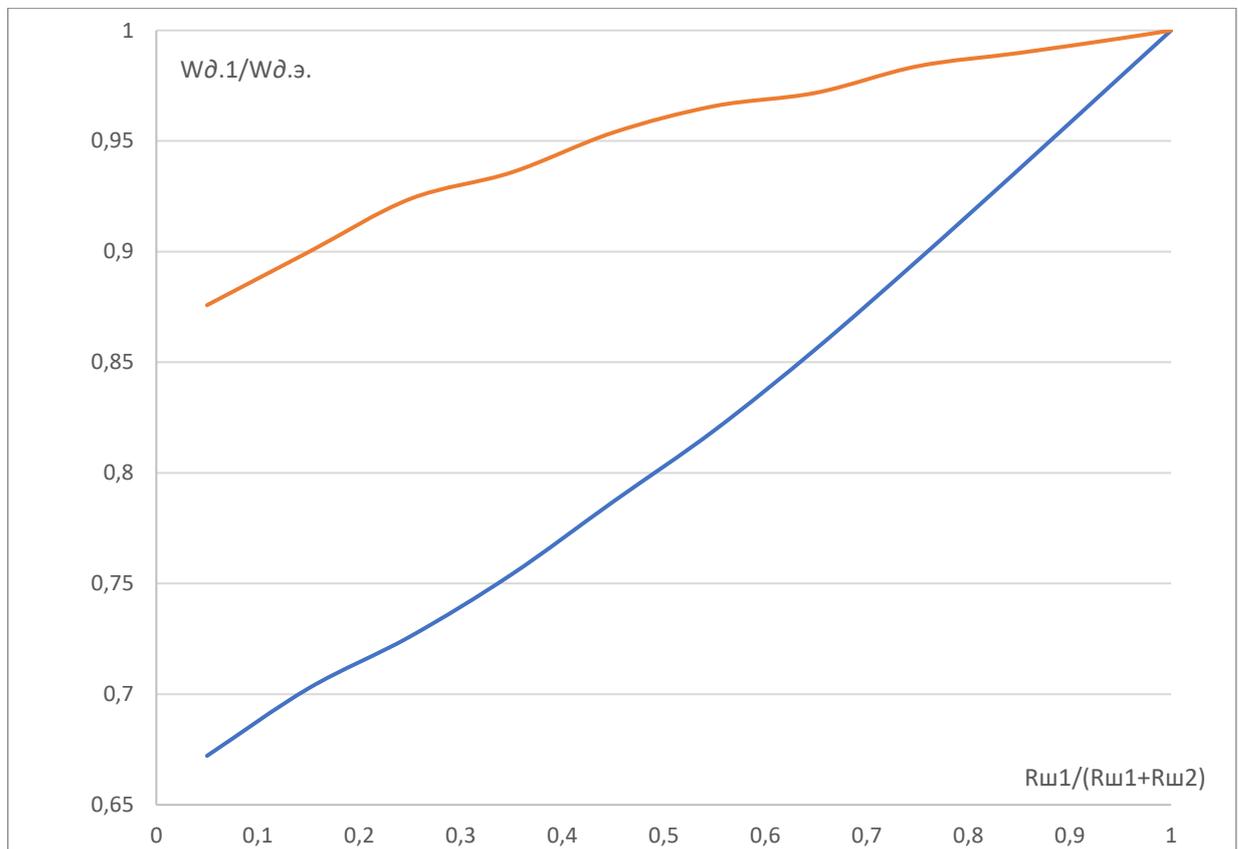


Рис. 3.19. Кривые зависимости изменения интеграла дуги $W_{d,1}$ через первый ЖСП в ограничителе тока с двухступенчатым принципом токоограничения по отношению к интегралу дуги $W_{d,э}$ через ограничитель тока с одноступенчатым принципом токоограничения в зависимости от соотношения сопротивлений

$$\frac{R_{ш1}}{R_{ш1} + R_{ш2}}$$

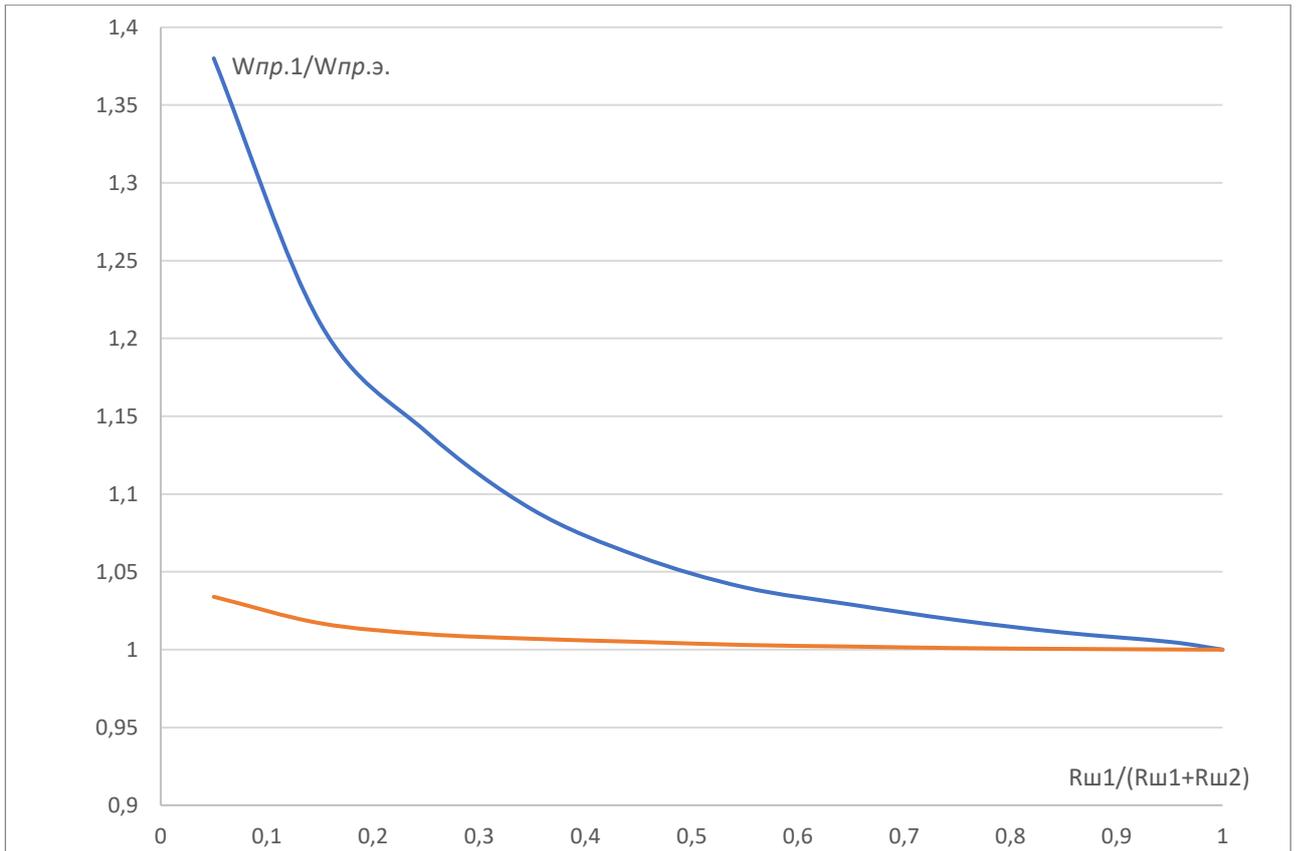


Рис. 3.20. Кривые зависимости изменения пропускаемого теплового интеграла $W_{пр.1}$ через ограничитель тока с двухступенчатым принципом токоограничения по отношению к пропускаемому тепловому интегралу $W_{пр.э}$ через ограничитель тока с одноступенчатым принципом токоограничения в зависимости от соотношения

$$\text{сопротивлений } \frac{R_{ш1}}{R_{ш1} + R_{ш2}}$$

Анализ кривых на рис. 3.19 показывает уменьшение энергии дуги в первом ЖСП1 при двухступенчатом принципе токоограничения по отношению к энергии дуги, при одноступенчатом принципе токоограничения в зависимости от значения $\frac{R_{ш1}}{R_{ш1} + R_{ш2}}$ при $\frac{R_{ш1}}{R_{ш1} + R_{ш2}} = 0,1$ уменьшение происходит более чем на 30%. Проводя аналогию, это значение можно отнести к увеличению коммутационного ресурса.

Анализ кривых на рис. 3.20 показывает, что при двухступенчатом принципе токоограничения пропускаемый тепловой интеграл возрастает более чем на 20%,

при значении $\frac{R_{ш1}}{R_{ш1} + R_{ш2}} = 0,1$ и менее. Это обстоятельство необходимо учитывать при разработке и проектировании токоограничивающих устройств.

В конструкции выделяемая энергия в ЖСП1 зависит не только от соотношения сопротивлений $\frac{R_{ш1}}{R_{ш1} + R_{ш2}}$, но и от сечения плавкой вставки ЖСП2.

Кривые на рисунке 3.21 построены при постоянном значении $\frac{R}{\omega \cdot L} = 0,001$, что соответствует чисто индуктивному. И при постоянном значении сечения $\frac{R_{ш1}}{R_{ш1} + R_{ш2}} = 0,25$ (синяя кривая) и $\frac{R_{ш1}}{R_{ш1} + R_{ш2}} = 0,5$ (оранжевая кривая).

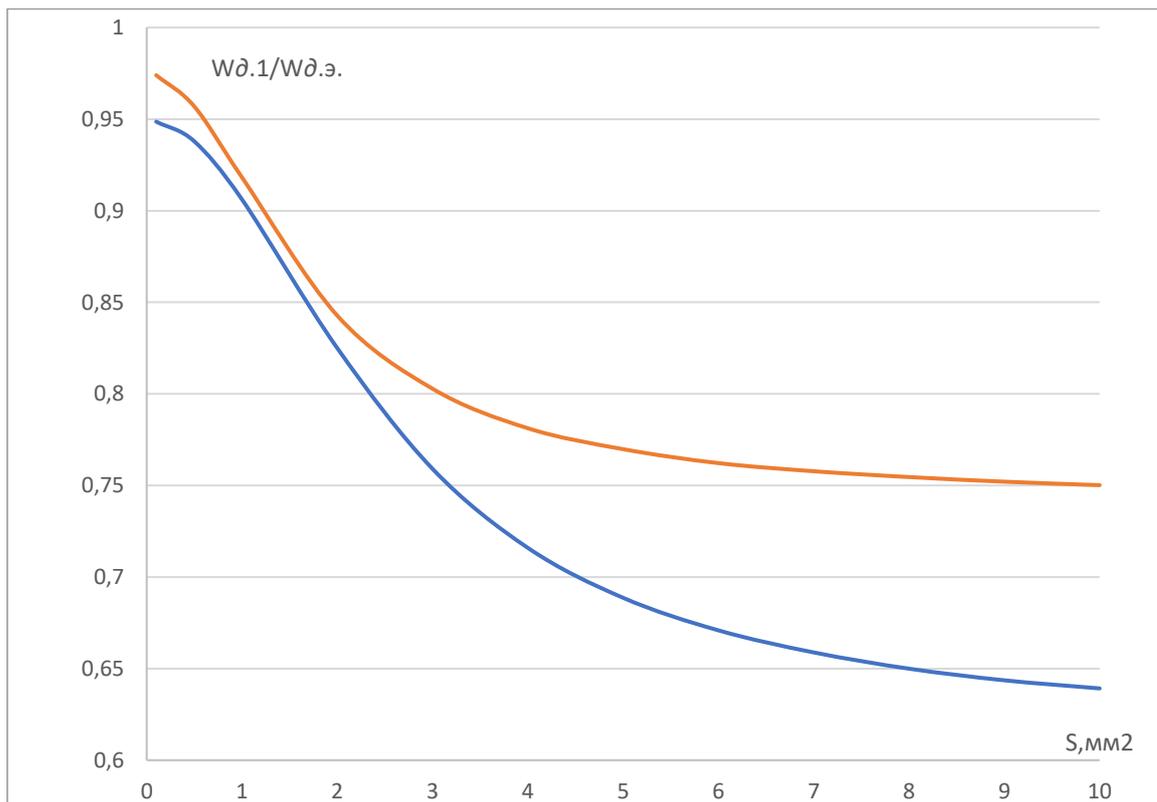


Рис. 3.21. Кривые зависимости изменения интеграла дуги $W_{д.1}$ через первый ЖСП1 в ограничителе тока с двухступенчатым принципом токоограничения по отношению к интегралу дуги $W_{д.э}$ через ограничитель тока с одноступенчатым принципом токоограничения в зависимости от сечения плавкой вставки S_2 второго ЖСП2.

Анализ кривых на рис. 3.21 показывает уменьшение энергии дуги в первом ЖСП1 при двухступенчатом принципе токоограничения по отношению к энергии дуги, при одноступенчатом принципе токоограничения при увеличении сечения плавкой вставки ЖСП2. Это объясняется увеличением промежутка времени протекания тока через ЖСП1 и $R_{ин1}$ за счёт увеличения преддугового времени срабатывания ЖСП2.

3.7. Выводы по третьей главе

1. Известная математическая модель, посредством которой получены имеющиеся результаты, несовершенна. Она позволяет получить достоверные и достаточно точные результаты только в ограниченной области применения.

2. Представлена уточнённая математическая модель процесса короткого замыкания в электротехническом комплексе «источник питания - ограничитель тока - защищаемый элемент сети в режиме короткого замыкания» и результаты её исследования. При этом ограничитель тока представлен в нескольких вариантах. В первом варианте ЖСП с шунтирующим сопротивлением. Во втором варианте ЖСПС с шунтирующим сопротивлением. В третьем варианте ограничитель тока представляет собой новое схмотехническое решение, реализующее двухступенчатый принцип токоограничения.

3. В отличие от известной модели, новая модель содержит дополнительно следующие параметры: время существования паровой пробки (время, предшествующее возникновению электрической дуги), напряжение зажигания электрической дуги, сопротивление электрической дуги (в известной модели это значение принято равно бесконечности). По этой причине новая модель обладает расширенными функциональными возможностями.

4. Анализ расчётных зависимостей на предмет соответствия основными положениями теории электрических цепей, а также их сравнение с осциллограммой, полученной в результате эксперимента, что подтверждает адекватность предложенной математической модели физическим процессам в цепи короткого замыкания с токоограничивающим устройством на основе ЖСП.

5. Исследование математической модели ограничителя тока с ЖСП и шунтирующим сопротивлением показали увеличенное значение пропускаемого теплового интеграла при индуктивном характере цепи короткого замыкания и соотношении сопротивления дуги к сопротивлению шунта меньше, чем 4. При значениях $\frac{R_o}{R_{ш}} \geq 4$ изменение значения пропускаемого теплового интеграла не превышает 10%. Отсюда следует, что при разработке и проектировании токоограничивающих устройств, критерием оценки принимаемого решения может быть значение $\frac{R_o}{R_{ш}} \geq 4$. При таком условии можно не принимать во внимание возможное изменение пропускаемого теплового интеграла.

6. При $\frac{R_o}{R_{ш}} \geq 4$ величина напряжения зажигания дуги и время существования паровой пробки на значение пропускаемого теплового интеграла существенного влияния не оказывают. В таком случае их значениями можно пренебрегать.

7. Снижение величины шунтирующего сопротивления позволяет в 2-3 раза снизить тепловой интеграл дуги в ЖСП, снизить степень дуговой эрозии канала диэлектрической втулки и повысить коммутационный ресурс.

8. Исследование математической модели ограничителя тока с ЖСПС с составной плавкой вставкой и шунтирующим сопротивлением позволили определить математическое выражение для вычисления зависимости критерия работоспособности от значения пропускаемого теплового интеграла и сечения плавкой вставки. Главным критерием работоспособности ЖСПС является величина соотношения значения сопротивления электрической дуги и шунтирующего сопротивления $\frac{R_o}{R_{ш}}$. При значениях этой величины выше критических разрушения тугоплавкого электрода не происходит.

9. Исследование математической модели ограничителя тока с двухступенчатым принципом токоограничения показали, что в сравнении с

одноступенчатым принципом токоограничения тепловой интеграл ЖСП1 первой ступени уменьшается. Степень уменьшения определяется сечением плавкой вставки ЖСП второй ступени токоограничения и значением шунтирующего сопротивления первой ступени токоограничения. Степень уменьшения теплового интеграла достигает 30% и более. Так, это значение можно отнести к увеличению коммутационного ресурса.

4. ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ. МЕТОДИКА ВЫБОРА ПАРАМЕТРОВ ОГРАНИЧИТЕЛЯ ТОКА ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В СЭС

В четвёртой главе представлен параметрический синтез электротехнического комплекса «источник питания - ограничитель тока - защищаемый элемент сети в режиме короткого замыкания». Структура комплекса включает в себя защищаемый элемент сети. Это может быть механический или аппарат управления (автоматический или полупроводниковый выключатель, выпрямитель, инвертор и т.п.), линия электропередач.

4.1. Перегрузочная способность элементов систем электроснабжения

Защищаемый элемент сети обладает определённой перегрузочной способностью или динамической и термической стойкостью к воздействию тока короткого замыкания. Параметрами динамической и термической стойкости является максимально допустимое значение тока короткого замыкания $I_{\text{доп}}$. Для проводников и кабелей допустимое тепловое воздействие определяется допустимым значением времени протекания тока короткого замыкания I_k . Это выражение определено в формуле 1.1. [45].

$$t_{\text{доп}} = \left(\frac{k \cdot F_{\text{НОМ}}}{I_k} \right)^2 \quad (4.1)$$

$$I_{k,\text{доп}}^2 = \frac{(k \cdot F_{\text{НОМ}})^2}{t_{\text{доп}}} \quad (4.2)$$

При фиксированном времени равном одному полупериоду частоты сети 0,01 с условие (4.1) преобразуется к виду:

$$I_{k,\text{доп}} = \sqrt{\frac{(k \cdot F_{\text{НОМ}})^2}{t_{\text{доп}}}} = \frac{k \cdot F_{\text{НОМ}}}{\sqrt{t_{\text{доп}}}} = \frac{k \cdot F_{\text{НОМ}}}{\sqrt{0,01}} = \frac{k \cdot F_{\text{НОМ}}}{0,1} = 10 \cdot k \cdot F_{\text{НОМ}} \quad (4.3)$$

$F_{\text{НОМ}}$ – площадь поперечного сечения, мм²;

$I_{k,\text{доп}}$ – допустимое действующее значение тока в А, выраженное как среднеквадратичное значение;

k – является фактором, учитывающим удельное сопротивление, температурный коэффициент и теплоёмкость проводникового материала и соответствующие начальные и конечные значения температуры (для кабеля марки АСБ с сечением $F_{НОМ}=95$ мм², коэффициент $k=76$, из справочных данных [45]).

Для автоматических выключателей динамическая и термическая стойкость выражается комплексным показателем – отключающей способностью. Это номинальный ток отключения $I_{НОМ,ОТКЛ}$. Устанавливается заводом изготовителем. Представляет собой максимально действующее установившееся значение тока короткого замыкания, при котором гарантируется выполнение выключателем его функций.

В таблице 4.1 приведён ряд номинальной отключающей способности автоматических выключателей, представленных заводом Контактор [42].

Таблица 4.1.

Номинальный ряд номинальной отключающей способности

кА	4	6	9	10	15	18	20	25	30	35	36	40	50	65	70	100
----	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	-----

Надёжность электротехнического комплекса «источник питания – ограничитель тока – защищаемый элемент сети в режиме короткого замыкания» обеспечивается, если токоограничивающее устройство снижает значения тока короткого замыкания и теплового импульса до значений, допустимых для защищаемого элемента сети, при которых не происходит механических и тепловых повреждений в результате электродинамического и теплового воздействия тока короткого замыкания.

Токоограничивающее устройство на основе ЖСП позволит не превышать перегрузочную способность и применять автоматические выключатели, проводники, кабели с не завышенными номинальными параметрами. Для этого предлагается ответить на два вопроса:

1. Каким должно быть сечение узкого перешейка плавкой вставки?
2. Каково при этом должно быть значение шунтирующего сопротивления?

4.2. Параметрический синтез ограничителя тока с одноступенчатым принципом токоограничения

Токоограничивающие свойства ограничителя тока характеризуются максимальным значением пропускаемого ограничителем тока I_{Π} .

В первом варианте токоограничивающего устройства, представляющего собой ЖСП с шунтирующим сопротивлением, а также во втором варианте токоограничивающего устройства, представляющего собой ЖСПС с составной плавкой вставкой и шунтирующим сопротивлением, пропускаемый ток представляет собой большее из двух мгновенных значений. Одно из них - это значение тока обрыва I_c . Второе – максимальное значение тока $I_{ЖСП}$ в период дуговой стадии процесса в ЖСП. См. рис. 3.6.

$$I_{\Pi} = I_c, \text{ если } I_c \geq I_{ЖСП}$$

$$I_{\Pi} = I_{ЖСП}, \text{ если } I_c < I_{ЖСП}$$

Надёжность электротехнического комплекса будет обеспечиваться, если пропускаемый ток не превышает допустимого мгновенного значения тока короткого замыкания для защищаемого элемента.

$$I_{\Pi} \leq I_{уд, доп} \quad (4.4)$$

Пропускаемый ток зависит от параметров цепи короткого замыкания, от значения сечения плавкой вставки S ЖСП и шунтирующего сопротивления $R_{ш}$. Для этого варианта токоограничивающего устройства параметрический синтез сводится к определению двух параметров токоограничивающего устройства. Это сечение суженного участка плавкой вставки S и значение величины шунтирующего сопротивления $R_{ш}$.

Предлагается следующий подход к решению поставленной задачи.

1. Значение сечения плавкой вставки S ЖСП выбирается из условия. Пропускаемый ЖСП ток, в данном случае ток обрыва, через ограничитель тока не должен превышать допустимого мгновенного значения тока короткого замыкания для защищаемого элемента.

$$I_c \leq I_{уд, доп} \quad (4.5)$$

2. Значение шунтирующего сопротивления должно обеспечивать ограничение тока короткого замыкания в установившемся режиме до значения $I_{ЖСП}$ не выше допустимого значения $I_{y\delta, доп}$.

$$I_{ЖСП} \leq I_{y\delta, доп} \quad (4.6)$$

В самых неблагоприятных случаях это ударное значение тока короткого замыкания $I_{y\delta, доп}$.

В нормативных документах и каталожных данных приводятся допустимые значения тока короткого замыкания в установившемся режиме $I_{доп}$, тогда необходимо перевести их значения в ударные, соответствующие апериодической составляющей тока короткого замыкания $I_{y\delta, доп}$.

$$I_{y\delta, доп} = I_{доп} \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega \cdot t + \psi - \phi) - I_{доп} \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\psi - \phi) \cdot e^{\frac{-t}{T_a}}, \quad (4.7)$$

где T_a – постоянная времени затухания апериодической составляющей КЗ; φ – угол фазы сдвига тока КЗ, ψ – угол возникновения тока КЗ равен 0° ; ω – угловая частота тока, t – время максимального значения тока.

Сечение узкого перешейка плавкой вставки S связано с её преддуговым интегралом уравнениями 3.2 и 3.4 из математической модели.

Сечение S вычисляется итерационным методом в три этапа. На первом этапе из уравнения (4.7) вычисляется $t_{прд}$, при условии $t = t_{прд}$.

На втором этапе вычисляется значение преддугового интеграла плавкой вставки

$$W_{прд} = \int_0^{t_{прд}} i^2 dt \quad (4.8)$$

Затем вычисляется сечение плавкой вставки

$$S = \sqrt{\frac{W_{прд}}{A}} \quad (4.9)$$

Значение $R_{ш}$ шунтирующего сопротивления рассчитывается из условия

$$\frac{U_m}{\sqrt{(\omega L)^2 + (R + R_{ш})^2}} \leq I_{y\delta, доп}. \quad (4.10)$$

где U_m - амплитуда напряжения цепи короткого замыкания.

Как уже было отмечено в п.1. диссертации, используя токоограничивающее устройство, можно снизить ТКЗ и применять упрощённые автоматические выключатели. Если автоматический выключатель подключается напрямую к шинам (QF_1 и QF_2 на рис. 1.2.), то можно, применяя подход, описанный в п.4.2., сформулируем условие для выбора параметров ЖСП. На рисунке 2.14, б показан комплекс устройства жидкометаллического самовосстанавливающегося токоограничителя.

Для автоматического выключателя $I_{доп.}$ это номинальный ток отключения автоматического выключателя (QF рис. 2.14, б) $I_{ном.откл}$ из стандартного ряда (табл. 4.1.). Выбор $I_{доп.}$ производится из каталогов на автоматические выключатели.

При проектировании СЭС требуется выбирать проводники. После выбора по действующим методикам сечения и марку проводника требуется проверить его на термическую стойкость по алгоритму (рис. 4.1.). Если проводник не проходит по термической стойкости, в нашем случае не увеличивается его номинальное сечение, а применяется токоограничивающее устройство на основе ЖСП, то токоограничивающее устройство на основе ЖСП устанавливается на отходящих линиях (рис. 4.2.). Для проводников $I_{доп.}$ это допустимый ТКЗ по условию термической стойкости.

Таким образом, для автоматических выключателей

$$I_{доп.} = I_{ном,откл};$$

для проводников и кабелей

$$I_{доп.} = I_{к,доп.}$$

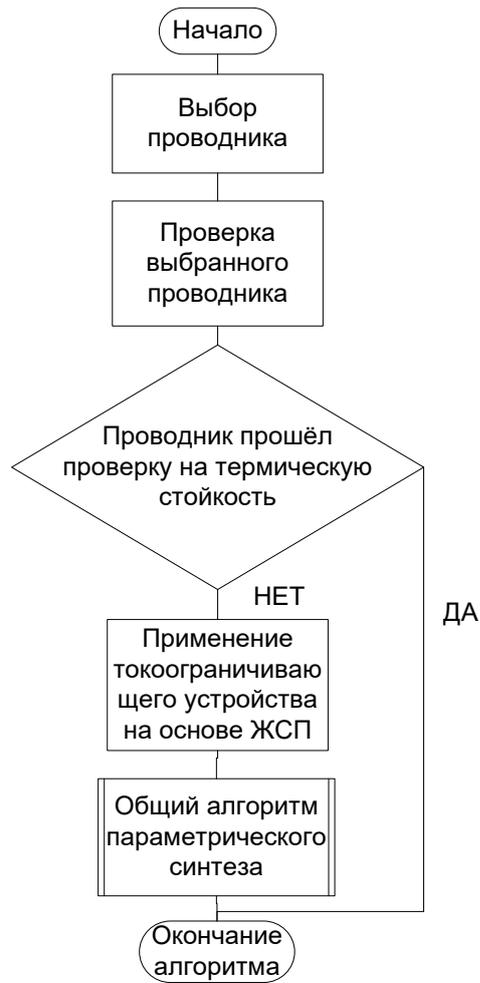


Рис. 4.1. Алгоритм выбора проводников по условиям КЗ

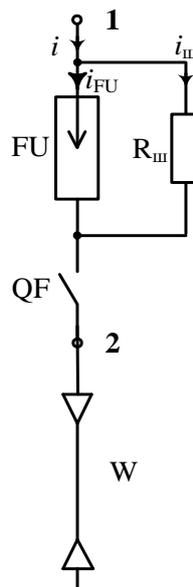


Рис. 4.2. Токоограничивающее устройство на основе ЖСП для защиты линии.

4.2.1. Параметрический синтез ограничителя тока с однородной плавкой вставкой

Значение S и R_{III} находится при использовании разработанной математической модели (п.3.2.) итерационным методом. При $R_{\partial} \geq (4 \div 6)R_{III}$.

Остальные параметры математической модели, характеризующие материал плавкой вставки ($A_{Ж}$ - постоянная Мейера, взятая из таблицы 3.3.), параметры цепи короткого замыкания (U, R, L, ψ), сопротивление электрической дуги R_{III} могут быть приняты константами.

$$S_{\min} = F(I_c, A_{Ж}, U, R, L, \psi) \text{ при } I_c = I_{уд.дон}.$$

$$R_{III} = F(S_{\min}, I_{ЖСП}, A_{Ж}, U, R, L, \psi, R_{\partial}) \text{ при } I_{ЖСП} = I_{уд.дон}.$$

4.2.2. Параметрический синтез ограничителя тока с составной плавкой вставкой

Параметрический синтез ограничителя тока с составной плавкой вставкой производится по аналогии. Разница только в том, что сечение плавкой вставки представляет собой сечение тугоплавкого электрода. При использовании второго варианта ограничителя тока с составной плавкой вставкой и ЖСПС при параметрическом синтезе дополнительно учитывается критерий работоспособности (3.53). Также постоянная A берётся из третьей колонки таблицы 3.3. ($A_{вст}$) при условии, что электрод сделан из вольфрама.

Для математической модели:

$$S_{\min} = F(I_c, A_{вст}, U, R, L, \psi) \text{ при } I_c = I_{уд.дон}.$$

$$R_{III} = F(S_{\min}, I_{ЖСП}, A_{вст}, U, R, L, \psi, R_{\partial}) \text{ при } I_{ЖСП} = I_{уд.дон}.$$

4.2.3. Упрощённая инженерная методика параметрического синтеза ограничителя тока с одноступенчатым принципом токоограничения

На основе результатов исследования математической модели (Рис. 3.13.) предложена упрощённая инженерная методика расчёта сечений плавкой вставки и значений шунтирующих сопротивлений для двух рассматриваемых вариантов токоограничивающего устройства.

Для токоограничивающего устройства с однородной и составной плавкой вставкой.

1. По справочным данным определяется допустимое значение тока $I_{доп}$ для защищаемого элемента сети.

2. Для определения $I_{уд,доп}$ используется упрощённая формула:

$$I_{уд,доп} = \sqrt{2} \cdot k_{уд} \cdot I_{доп}, \quad (4.11)$$

где $k_{уд}$ – ударный коэффициент (таблица 4.2).

Таблица 4.2.

Значение коэффициента $k_{уд}$

Место КЗ	$k_{уд}$
Выводы явнополюсного генератора без успокоительной обмотки	1,95
То же с успокоительной обмоткой	1,93
Выводы турбогенератора	1,91
В цепи, когда не учитывается активное сопротивление	1,8
На низшей стороне трансформаторов:	
1600; 2500	1,4
630; 1000 кВ·А	1,3
100; 250; 400 кВ·А	1,2

3. Рассчитывается установившееся значение тока короткого замыкания $I_{к,м}$ и находится отношение $\frac{I_c}{I_{к,м}}$ при $I_c = I_{уд,доп}$ и отношение активного и реактивного сопротивления сети $\frac{R}{\omega L}$.

4. На рис. 4.3. выбирается кривая с найденным значением $\frac{R}{\omega L}$.

Координата точки $\frac{I_c}{I_{к,м}}$ этой кривой соответствует координате S - искомому значению сечения плавкой вставки. Сечение найдено.

Стоит отметить, что уточняющим условием для выбора сечения будет выбор по номинальному току:

$$S \geq S_{\text{ном.}} \quad (4.12)$$

В приложение П.3.2. описано тепловое испытание для макетного образца ЖСП с $S=0,7 \text{ мм}^2$. Номинальный ток получился $I_{\text{ном}}=110 \text{ А}$.

5. Значение шунтирующего сопротивления находится по формуле.

Из условия (4.10):

$$R_{\text{ш}} \geq \frac{\sqrt{U_m^2 - I_{\text{yd.дон}}^2 \cdot \omega L^2} - I_{\text{yd.дон}} \cdot R}{I_{\text{yd.дон}}} \quad (4.13)$$

Семейство зависимостей $S=f(I_c/I_{k.m})$ построено при использовании программной модели [104] и подхода, описанного в п. 4.2 (рис. 4.3.). Начальные данные для построения кривых: $U_{\text{сету}}=380 \text{ В}$; материал плавкой вставки – Na ; угол возникновения КЗ $\Psi=0^\circ$.

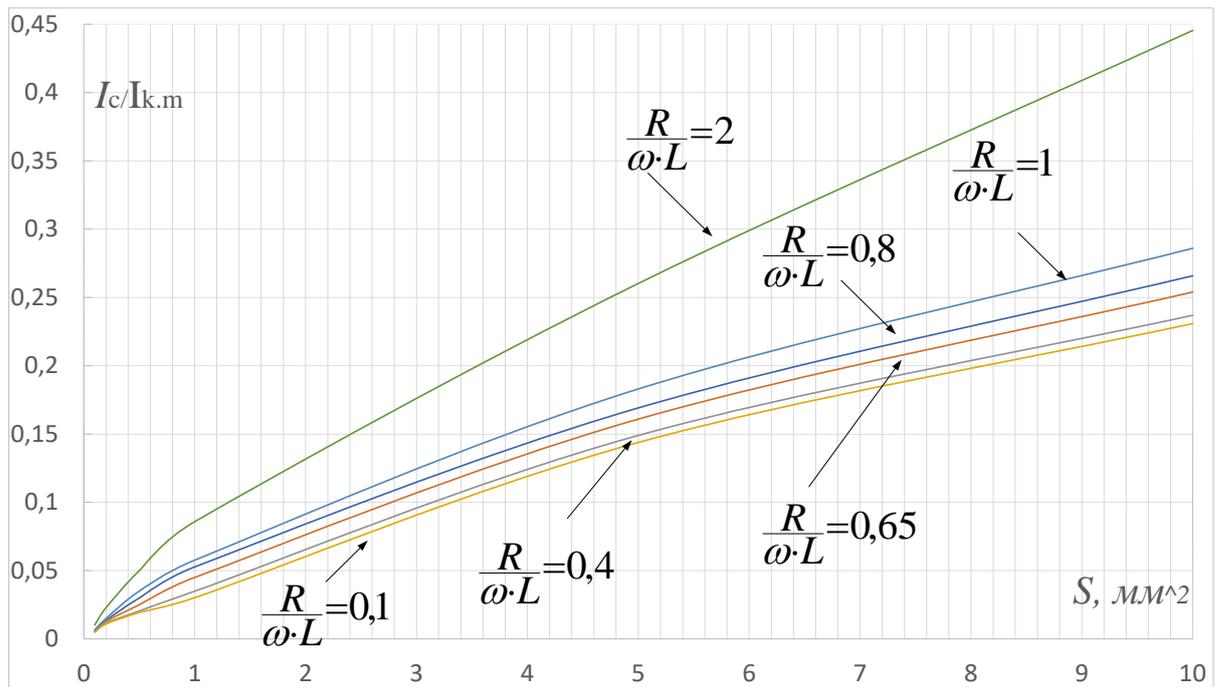


Рис. 4.3. Семейство зависимостей $S=f(I_c/I_{k.m})$: S – сечение плавкой вставки ЖСП;

I_c – ток обрыва; $I_{k.m}$ – амплитудное значение ТКЗ; $\frac{R}{\omega \cdot L}$ – отношение активного и

реактивного сопротивления схемы замещения.

4.3. Параметрический синтез ограничителя тока с двухступенчатым принципом токоограничения

Структурный синтез ограничителя тока с двухступенчатым принципом описан в п.2.3.4. Схема устройства представлена на рис. 4.4.

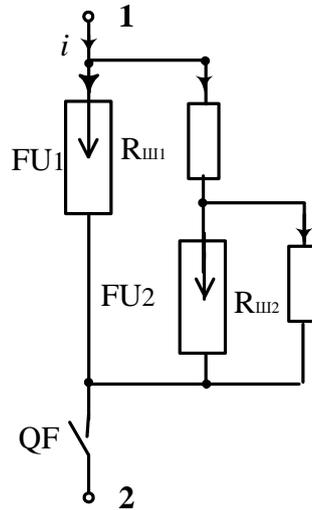


Рис. 4.4. Токоограничивающее устройство на основе ЖСП с двухступенчатым принципом токоограничения

Для третьего варианта токоограничивающего устройства, представляющего собой новое схематическое решение, реализующее двухступенчатый принцип токоограничения, необходимо определить следующие параметры.

1. Сечение плавкой вставки S_1 ЖСП1.
2. Сумму сопротивлений $R_{III1} + R_{III2}$.
3. Соотношение сопротивлений $\frac{R_{III1}}{R_{III1} + R_{III2}}$.
4. Сечение плавкой вставки S_2 в ЖСП2.

Значение S_1 в ЖСП1 и $R_{III1} + R_{III2}$ находится по аналогии с определением S и R_{III} ограничителя тока в первом варианте как с использованием математической модели, так и по упрощённой инженерной методике.

После определения названных параметров остаются неизвестными ещё два параметра $\frac{R_{ш1}}{R_{ш1} + R_{ш2}}$ и S_2 ЖСП2.

Для их определения решается оптимизационная задача. Критерий оптимальности – максимальное снижение теплового интеграла дугового процесса в первом ЖСП1. В качестве эталона для сравнения принимается тепловой интеграл дугового процесса в ЖСП1 при использовании его в ограничителе тока с одноступенчатым принципом токоограничения с сопротивлением равным $R_{ш1} + R_{ш2}$. Сопротивление дуги принимается константой

$$R_{\partial 1} \geq (4 \div 6)(R_{ш1} + R_{ш2}).$$

Тогда критерий снижения теплового интеграла дугового процесса выразится следующим образом:

$$\frac{W_{\partial,1}}{W_{\partial,э}} = \frac{I_{\partial,1}^2 \Delta t_1}{I_{\partial,э}^2 \Delta t_э} \rightarrow \min \quad (4.14)$$

В (4.14) $W_{\partial,1}, I_{\partial,1}, \Delta t_1$ – тепловой интеграл дугового процесса, ток дуги и время дуговой стадии процесса при использовании ЖСП1 в ограничителе тока с двухступенчатым принципом токоограничения. $W_{\partial,э}, I_{\partial,э}, \Delta t_э$ – то же при использовании в эталонном ограничителе тока с одноступенчатым принципом токоограничения с сопротивлением $R_{ш1} + R_{ш2}$.

Используя критерий (4.14), методом итераций при различных значениях $\frac{R_{ш1}}{R_{ш1} + R_{ш2}}$ определяется значение преддугового интеграла ЖСП2, при котором ток обрыва $I_{с2}$ приближается к значению $I_{уд,доп}$.

Значению преддугового интеграла ЖСП2 соответствует определённое значение сечения плавкой вставки S_2 . Окончательно выбирается сечение S_2 и $\frac{R_{ш1}}{R_{ш1} + R_{ш2}}$ при выполнении критерия (4.14).

4.4. Пример параметрического синтеза всех типов ограничителей тока на основе ЖСП

4.4.1. Пример параметрического синтеза ограничителя с одноступенчатым принципом токоограничения

Приведём пример параметрического синтеза, используя схему на рис. 4.4. Для этого типа можно воспользоваться упрощённой инженерной методикой параметрического синтеза, описанной в п. 4.2.3.

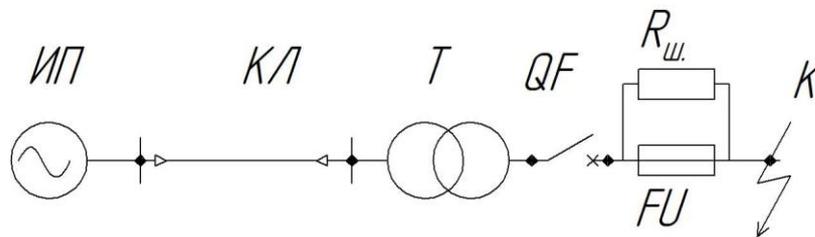


Рис. 4.5. Упрощённая схема СЭС с использованием токоограничивающих устройств на основе ЖСП: ИП – источник питания, КЛ – кабельная линия; Т – понижающий трансформатор; QF, – серийный автоматический выключатель (ВА50-45Про (Протон 40) с $I_{ном.откл.} = 65$ кА); FU – ЖСП с одноступенчатым принципом токоограничения; $R_{ш}$ – шунтирующее сопротивление.

Рассмотрим схему на рис. 4.5. Допустим, что действующее значение ТКЗ в точке К1 будет $I = 153$ кА.

Найдём сечение FU и шунтирующие сопротивления $R_{ш}$, считая, что применяется ЖСП с однородной плавкой вставкой.

1. $I_{дон.} = 65$ кА.

2. $I_{уд.дон.}$ находится по (4.11):

$$I_{уд.дон.} = \sqrt{2} \cdot k_{уд} \cdot I_{дон.} = \sqrt{2} \cdot 1,5 \cdot 65 = 137,9 \text{ кА}.$$

3. Находится амплитудное значение ТКЗ по формуле

$$I_{k,m.} = \sqrt{2} \cdot \frac{U_{сету}}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} = \sqrt{2} \cdot \frac{380}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{(0,00088^2 + (0,001305)^2)}} = 197,2 \text{ кА}.$$

Находится отношение сопротивлений $R/\omega L$

$$\frac{R}{\omega L} = \frac{0,00088}{0,001305} = 0,674.$$

4. Находим отношение $\frac{I_C}{I_{k,m}} = \frac{137900}{197200} = 0,6993.$

По рис. 4.3. определим сечение, $S \approx 31 \text{ мм}^2$ или $d \approx 6,28 \text{ мм}$. Уточняем сечение по номинальному току, но т.к. информация отсутствует оставляем полученное сечение.

5. По формуле (4.12) значение шунтирующего сопротивления:

$$R_{III} \geq 0,0028 \text{ Ом}$$

6*. Если вместо FU будет применяться вариант ЖСП с составной плавкой вставкой, тогда учитываем критерий работоспособности (3.54).

$$W_O = \left(\frac{I_{yd,дон}}{\sqrt{2}} \right)^2 \cdot t = \left(\frac{65 \cdot 10^3}{\sqrt{2}} \right)^2 \cdot 0,01 = 1,4116742 \cdot 10^7 \text{ (A}^2 \cdot \text{c)}.$$

По рис. (3.14) найдём нужное соотношение $\frac{R_d}{R_{III}}$:

$$\frac{R_d}{R_{III}} \geq 37.$$

Для найденного значения шунтирующего сопротивления $R_{III} \geq 0,0028 \text{ Ом}$ сопротивление дуги должно быть $R_d \geq 0,1036 \text{ Ом}$.

4.4.2. Пример параметрического синтеза ограничителя с двухступенчатым принципом токоограничения

Вместо ограничителя с одноступенчатым принципом токоограничения (рис. 4.5.) установим ограничитель с двухступенчатым принципом токоограничения (рис. 4.6.). Сечение плавкой вставки первого ЖСП и значение суммы шунтирующих сопротивлений уже известны и равны $R_{III1} + R_{III2} = R_{III} = 0,0028$, $S_1 \approx 31 \text{ мм}^2$.

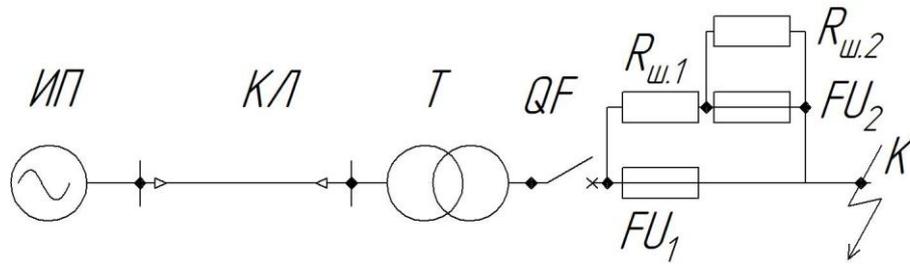


Рис. 4.6. Упрощённая схема СЭС с использованием токоограничивающих устройств на основе ЖСП: ИП – источник питания, КЛ – кабельная линия; Т – понижающий трансформатор; QF, – серийный автоматический выключатель (ВА50-45Про (Протон 40) с $I_{ном.откл.}=65$ кА); FU₁, FU₂ – ЖСП с двухступенчатым принципом токоограничения; R_{ш.1}, R_{ш.2} – шунтирующие сопротивления.

Следующим шагом будет нахождение S_2 , $R_{ш.1}$, $R_{ш.2}$. Для этого воспользуемся критерием снижения теплового интеграла дугового процесса (4.14).

Когда применяется токоограничитель с одноступенчатым принципом токоограничения, значение теплового интеграла дугового процесса равно $W_{д,э} = 393 \text{ А} \cdot \text{с}^2$. Используем критерий снижения энергии дуги (4.14), для этого воспользуемся программной моделью [104].

Значение преддугового интеграла ЖСП2, при котором ток обрыва $I_{с2}$ приближается к значению $I_{уд,дон}$ $W_{пред.S_2} = 1,62 \cdot 10^7 \text{ А} \cdot \text{с}^2$, в этом случае сечение

$$S_2 \approx 30 \text{ мм}^2, \text{ а отношение сопротивлений } \frac{R_{ш1}}{R_{ш1} + R_{ш2}} = \frac{0,00168}{0,00168 + 0,00112} = 0,6.$$

Критерий (4.14) выполняется:

$$\frac{W_{д,1}}{W_{д,э}} = \frac{376}{393} = 0,957.$$

4.4.3. Снижение отключающей способности автоматического выключателя

Предположим, что на рис. 4.5. вместо автоматического выключателя QF будет применяться упрощённый автоматический выключатель со сниженной

отключающей способностью. Отключающую способность возьмём из стандартного ряда (табл. 4.1.) 10 кА.

Найдём сечение FU_1 , FU_2 и шунтирующие сопротивления $R_{ш.1}$, $R_{ш.2}$, применяя ЖСП с *однородной плавкой вставкой*.

1. $I_{дон.} = 10$ кА.

2. $I_{уд.дон.}$ находится по (4.11):

$$I_{уд.дон.} = \sqrt{2} \cdot k_{уд} \cdot I_{дон.} = \sqrt{2} \cdot 1,5 \cdot 10 = 21,21 \text{ кА}.$$

3. Находится амплитудное значение ТКЗ по формуле

$$I_{k,m.} = \sqrt{2} \cdot \frac{U_{сету}}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{(R^2 + (\omega L)^2)}} = \sqrt{2} \cdot \frac{380}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{(0,00088^2 + (0,001305)^2)}} = 197,2 \text{ кА}.$$

Находится отношение сопротивлений $R/\omega L$

$$\frac{R}{\omega L} = \frac{0,00088}{0,001305} = 0,674.$$

4. Находим отношение $\frac{I_C}{I_{k,m}} = \frac{21200}{197200} = 0,107$.

По рис. 4.3. определим сечение, $S \approx 2,8 \text{ мм}^2$ или $d \approx 1,9 \text{ мм}$.

5. По формуле (4.12) значение шунтирующего сопротивления:

$$R_{ш} \geq 0,0244 \text{ Ом}$$

6*. Если вместо FU будет применяться вариант ЖСП с *составной плавкой вставкой*, тогда нужно учитывать критерий работоспособности (3.54).

$$W_0 = \left(\frac{I_{уд,дон}}{\sqrt{2}} \right)^2 \cdot t = \left(\frac{10 \cdot 10^3}{\sqrt{2}} \right)^2 \cdot 0,01 = 5 \cdot 10^5 \text{ (А}^2 \cdot \text{с)}.$$

По рис. (3.14) найдём нужное соотношение $\frac{R_d}{R_{ш}}$:

$$\frac{R_d}{R_{ш}} \geq 8.$$

Для найденного значения шунтирующего сопротивления $R_{ш} \geq 0,0244 \text{ Ом}$ сопротивление дуги должно быть $R_d \geq 0,1952 \text{ Ом}$.

7*. Если применяется ограничитель с двухступенчатым принципом токоограничения (рис. 4.6.), сечение плавкой вставки первого ЖСП и значение суммы шунтирующих сопротивлений уже известны и равны $R_{ш1} + R_{ш2} = R_{ш} = 0,0244$, $S_1 \approx 2,8 \text{ мм}^2$.

Следующим шагом будет нахождение $S_2, R_{ш.1}, R_{ш.2}$. Для этого воспользуемся критерием снижения электрической дуги (4.13).

Для случая, когда применяется токоограничитель с одноступенчатым принципом токоограничения, значение теплового интеграла дугового процесса равно $W_{д,э} = 608 \text{ А} \cdot \text{с}^2$. Используем критерий снижения теплового интеграла дугового процесса (4.14), для этого воспользуемся программной моделью [104].

Значение преддугового интеграла ЖСП2, при котором ток обрыва $I_{с2}$ приближается к значению $I_{уд,дон}$ $W_{пред.S_2} = 1,152 \cdot 10^6 \text{ А} \cdot \text{с}^2$, в этом случае сечение

$$S_2 \approx 8 \text{ мм}^2, \text{ а отношение сопротивлений } \frac{R_{ш1}}{R_{ш1} + R_{ш2}} = \frac{0,00976}{0,00976 + 0,01464} = 0,4.$$

Критерий (4.14) выполняется:

$$\frac{W_{д,1}}{W_{д,э}} = \frac{550}{608} = 0,9.$$

4.5. Выводы по четвёртой главе

1. Представлен параметрический синтез электротехнического комплекса «источник питания - ограничитель тока - защищаемый элемент сети в режиме короткого замыкания». Рассмотрены три варианта токоограничивающих устройств. В первом варианте токоограничивающее устройство представляет собой ЖСП с однородной плавкой вставкой и шунтирующим сопротивлением, во втором варианте ЖСПС с составной плавкой вставкой и шунтирующим сопротивлением. В третьем варианте ограничитель тока представляет собой новое схемотехническое решение, реализующее двухступенчатый принцип токоограничения.

2. Надёжность электротехнического комплекса будет обеспечиваться, если пропускаемый ток не будет превышать допустимого мгновенного значения тока короткого замыкания для защищаемого элемента. В этой связи параметрический синтез сводится к определению параметров токоограничивающего устройства.

3. Для первого варианта токоограничивающего устройства параметрический синтез сводится к определению двух параметров токоограничивающего устройства. Это сечение суженного участка плавкой вставки S и значение величины шунтирующего сопротивления $R_{ш}$. Остальные параметры, характеризующие материал плавкой вставки (A - постоянная Мейера), параметры цепи короткого замыкания U, R, L, Ψ , сопротивление электрической дуги R_d , могут быть приняты константами. Значение S и $R_{ш}$ находится при использовании разработанной математической модели итерационным методом. При $R_d \geq (4 \div 6)R_{ш}$.

4. Для второго варианта токоограничивающего устройства параметрический синтез производится по аналогии, разница только в том, что сечение плавкой вставки представляет собой сечение тугоплавкого электрода. При использовании второго варианта ограничителя тока с составной плавкой вставкой и ЖСПС при параметрическом синтезе дополнительно учитывается критерий работоспособности.

5. Для третьего варианта токоограничивающего устройства, представляющего собой новое схмотехническое решение, реализующее двухступенчатый принцип токоограничения, необходимо определить следующие дополнительные параметры: для их определения решается оптимизационная задача; критерий оптимальности – максимальное снижение энергии электрической дуги в первом ЖСП1.

6. На основе результатов исследования математической модели предложена упрощённая инженерная методика расчёта сечений плавкой вставки и значений шунтирующих сопротивлений для первого и второго варианта токоограничивающего устройства. Для определения параметров третьего

варианта токоограничивающего устройства необходимо использовать программную модель.

7. Рассмотрены примеры параметрического синтеза ограничителей с одноступенчатым и двухступенчатым принципом токоограничения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведен анализ и оценка эффективности освоенных промышленностью ограничителей тока и ограничителей тока на стадии разработки. В результате выявлено, что по экономическим соображениям в электрической сети до 1 кВ целесообразно проводить исследования, разрабатывать для использования ограничители тока на основе ЖСП. Завышение инвестиционной составляющей в ЭЭС может достигать 14%.

2. В результате анализа состояния исследований в области разработки ограничителей тока на основе жидкометаллических самовосстанавливающихся предохранителей показано, что технические характеристики могут обеспечить преимущественно высокий уровень ограничения тока короткого замыкания в системы электроснабжения до 1 кВ, особенно при использовании щелочных металлов. Однако, при этом коммутационный ресурс ЖСП ограничен и не позволяет использовать ЖСП многократно по причине изменения токоограничивающих свойств при последующих срабатываниях. Отмечены известные способы увеличения коммутационного ресурса ЖСП – применение шунтирующего сопротивления и ЖСП с составной плавкой вставкой.

3. Синтезировано новое техническое решение, защищенное Патентом РФ, обеспечивающее дополнительный эффект увеличения коммутационного ресурса ЖСП за счет двухступенчатого принципа токоограничения, позволяющее снизить пропускаемый тепловой интеграл через ЖСП до 30%.

4. Разработаны и исследованы уточненные математические модели процесса короткого замыкания в электротехническом комплексе «источник питания - ограничитель тока – защищаемые элементы электрической сети». с ограничителем тока на основе ЖСП с одноступенчатым и двухступенчатым принципом токоограничения, отличающиеся от известных меньшим количеством допущений, точность по сравнению с известной математической моделью может увеличиваться до 50% в зависимости от входных параметров математической модели.

5. На основе результатов исследования математических моделей предложена методика параметрического синтеза ограничителей тока на основе ЖСП с одноступенчатым и двухступенчатым принципом токоограничения в электротехническом комплексе «источник питания - ограничитель тока – защищаемые элементы электрической сети».

6. Разработана физическая модель ограничителя тока на основе ЖСП и представлены результаты экспериментальных исследований, подтверждающие достоверность и адекватность математической модели и результатов ее исследования и которые могут быть использованы для дальнейшего совершенствования конструкций ограничителей тока на основе ЖСП.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- [1] Указ Президента РФ от 07.07.2011 N 899 (ред. от 16.12.2015) "Об утверждении приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации и перечня критических технологий Российской Федерации"
- [2] Концепция энергетической стратегии России на период до 2030 года (проект). Прил. к журналу "Энергетическая политика". – М.: ГУ ИЭС, 2007.
- [3] Recovery Act - Smart Grid Investment Grant Program
- [4] Ледин С.С. Обзор инициатив в области Smart Grid в мире и России// Автоматизация в промышленности. 2013. № 1.
- [5] F. Possemato, M Paschero, L. Livi, A. Rizzi, A. Sadeghian "On the impact of topological properties of smart grids in power losses optimization problems", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 78, 2016, pp. 755-764.
- [6] Лоскутов, А.Б. Интеллектуальные распределительные сети 10-20 кВс гексагональной конфигурацией / А.Б. Лоскутов, Е.Н. Соснина, А.А. Лоскутов, Д.В. Зырин // Промышленная энергетика. 2013.-№12. -С.3-7
- [7] Четошникова Л. М., Смоленцев Н. И., Четошников С. А., и др. Автономные системы электроснабжения с возобновляемыми источниками энергии и умной сетью// Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2018. Т. 20. № 5-6. С. 3-10.
- [8] Смоленцев Н. И., Четошникова Л. М. Топология электрической сети и способ передачи электрической энергии// Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2019. Т. 21. № 4. С. 95-103.
- [9] ГОСТ Р 52736-2007. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчёта электродинамического и термического действия токов короткого замыкания. М.: Стандартинформ, 2007
- [10] IEC 60865-1: 2011.Short-circuit currents - Calculation of effects - Part 1: Definitions and calculation methods.
- [11] IEC TR 60865-2:2015. Short-circuit currents - Calculation of effects - Part 2: Examples of calculation.
- [12] Кузнецов А.В. Жидкометаллические предохранители и инвестиционная привлекательность их разработки. / А.В.Кузнецов - М: Энергоатомиздат, 2006 – 297 с.
- [13] C.S. Psomopoulos, D.A. Barkas, S.D. Kaminaris, G.C. Ioannidis, P. Karagiannopoulos. Recycling potential for low voltage and high voltage high rupturing capacity fuse links, Waste Management. Dec. 2017, Vol.70, pp. 204-2011.
- [14] Low Voltage Circuit Breakers (General Catalog), Mitsubishi Electric, Sep. 2016, p. 256.

- [15] Выключатели автоматические серии ВА50-41, КОНТАКТОР низковольтные автоматические выключатели, 2014, 38 с.
- [16] High Speed Fuse Application Guide, Cooper Industries plc, USA, 2010
- [17] Сивков А.А., Сайгаш А.С., Климова Г.Н. Использование сверхбыстродействующих взрывных коммутационных аппаратов для повышения надёжности функционирования систем электроснабжения // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 4-2. – С. 328-334;
- [18] П. Елагин, Коммутационные ограничители тока. Новые устройства для защиты электрооборудования // Новости электротехники. – 2004. – № 4 (28).
- [19] ГОСТ 14794-79. Реакторы токоограничивающие бетонные.
- [20] REACTORS. Outdoor Air Core Reactors. Enhancing grid reliability, ABB, p. 2.
- [21] Electrical energy supply, Power guide 2009 (book 03), Legrand, 2009, p. 155.
- [22] Г. Н. Александров, Д. Лиун, Ц. Хайин, Влияние параметров резонансного устройства на условия ограничения токов короткого замыкания в электрических сетях// Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2008. – № 2. – С.127-132.
- [23] Д. Лиун, Разработка и исследование квазирезонансных токоограничивающих устройств для линий электропередач, дис. канд. тех. наук, Санкт-Петербург, защищена 23.10.2009, 165 с.
- [24] П. Елагин, Сверхпроводниковый токоограничитель. Коммутационный аппарат будущего. – 2005. – № 3(33).
- [25] Lebedev S.G., Lebedev A.S. Exploration of Josephson-Like Behavior of Thin Granular Carbon Films. Edited Collection «Superconducting Thin Films: New Research», Editor: Arnold H. Barness, Nova Science Publishers, Inc., 2008.
- [26] Бесконтактный углеродный переключатель - ограничитель тока как элемент системы управления электрическими сетями и их защиты в технологии smart grid / С. Г. Лебедев, Н. И. Андриянов, С. П. Юркевичюс, С. В. Генералова // Инноватика и экспертиза: научные труды. – 2015. – № 1(14). – С. 302-308.
- [27] Кузнецов А. В., Сычева И. В. Жидкометаллический самовосстанавливающийся ограничитель тока. Патент 2242818 (RU), МКИЗ 7Н01Н. №2003122171/09; Заявл. 15.07.03; Оpubл. 20.12.04, Бюл. 35. 4 с. 87/00.
- [28] K. Niayesh, J. Tepper, F. König, A Novel current limitation principle based on application of liquid metals, IEEE transaction on components and packaging technologies, vol 29, No.2, 2006, p. 303-309.
- [29] L.Yiying, W.Yi, H. Chen, H. Hailong, Investigation on the behavior of GaInSn liquid metal Current Limiter, IEEE transaction on components, No.2, 2014, p. 209-215.
- [30] E.Zienicke, Ben-Wen Li, A. Thess, A. Kräzschmar, P. Terhoeven Theoretical and Numerical Stability Analysis of the Liquid Metal Pinch Using the Shallow Water Approximation , Journal of Thermal Science, №3, vol.17, 2008, p. 261-266.

- [31] H. He et al., "Study of Liquid Metal Fault Current Limiter for Medium-Voltage DC Power Systems," in *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, vol. 8, no. 8, Aug. 2018, pp. 1391-1400.
- [32] Казанцев А.А., Косорлуков И.А. Разработка жидкометаллического ограничителя тока // *Электрооборудование: эксплуатация и ремонт*. - 2013. - № 12. - С. 25-27.
- [33] T. Itoh, T. Miyamoto, Y. Wada, T. Mori, and H. Sasao, "Design considerations on the P. P. F. For a control center," *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. PA-92, no. 4, Jul. 1973, pp. 1292–1297.
- [34] A.V. Kuznetsov, Y.P. Yurenkov, Analysis of research and area of application of self-resetting liquid metal fuse, 2019, IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 643, International Scientific Electric Power Conference ISEPC-2019, 23 — 24 May, 2019, Russia, 012034
- [35] Кржижановский Р.Е., Штерн З.Ю. Теплофизические свойства неметаллических материалов (карбиды). Справочник. Л.: Энергия, 1976. – 120 с.
- [36] М10-437 Рекомендации по проектированию систем внутрицехового электроснабжения с параллельной работой трансформаторов КТП
- [37] V. M. Alieva, A. N. Mamedova, S. S. Raqimov, R. I. Selim-zade, and B. A. Tairov, A study of the pseudogap state in $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$ and $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{ZnCu}_2\text{O}_y$ HTSC materials, *Low temperature physics*. 42, 1184–1191 (October 2016)
- [38] Xueguang Wu, Nick Jenkins, Goran Strbac, Jim Watson and Catherine Mitchell, Integrating Renewables and CHP into the UK Electricity System, Tyndall Centre for Climate Change Research. Report No. 13. (March 2004)
- [39] Is-limiter, ABB AG Calor Emag Mittelspannungsprodukte, 2000
- [40] Демченко О. А. Ограничение токов короткого замыкания в низковольтных сетях подземного электроснабжения / О. А. Демченко, Л. А. Муфель//Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах. –2013. – 2(32)- С. 107-117.
- [41] Веселов, А.Е. Повышение эффективности работы промышленных систем электроснабжения при использовании токоограничивающих устройств/ А.Е. Веселов, А.В. Ярошевич, Г.П. Фастий// Вестник Мурманского государственного технического университета. 2011.-Т.14 №3. - С.535-545.
- [42] ВА50-45Про (ПРОТОН 25 40 63) до 6300 А-Технический каталог, 50 с.
- [43] Лоскутов, А. Б. Разработка и исследование гибкой интеллектуальной электрической сети среднего напряжения, основанной на гексагональной структуре / А. Б. Лоскутов, А. А. Лоскутов, Д. В. Зырин // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2016. – № 3(114). – С. 85-94.
- [44] Правила устройства электроустановок ПУЭ: нормативно-технический материал. -7-е изд., перераб. и доп. -М.: ЭНАС, 2004. -330 с.
- [45] ГОСТ Р 50571.4.43-2012. Электроустановки низковольтные. Часть 4-43. Требования по обеспечению безопасности. Защита от сверхтока.

- [46] Намитоков К.К., Ильина Н.А., Шкловский И.Г. Аппараты для защиты полупроводниковых устройств. - М.: Энергоатомиздат, 1988. - 279 с.
- [47] Рачковский, Ю. С. Разработка алгоритма и программы выбора токоограничивающих реакторов ТЭЦ / Ю. С. Рачковский ; науч. рук. В. А. Булат // Актуальные проблемы энергетики: материалы 65-й научно-технической конференции студентов и аспирантов / Белорусский национальный технический университет, Энергетический факультет. – Минск: БНТУ, 2013. – С. 23-25.
- [48] Попова, М. В. Применение токоограничивающих устройств резонансного типа / М. В. Попова, А. Н. Струков, А. В. Бойко // Вестник Российского государственного аграрного заочного университета. – 2021. – № 36(41). – С. 97-100.
- [49] Y. Wada, "Self-rehealing performance of the PPF for a control center", *Int. Conf. Elect. Fuses and their Applic.*, 1976-April.
- [50] T. Itoh, T. Miyamoto, N. Takano, "Permanent Power Fuse - Self Recovering Current Limiting Device", *1970 Winter Power Meeting*.
- [51] H. Nakayama, T. Fukazu, Y. Wada, Y. Shinozaki and K. Ibuki, "Development of high voltage, self-healing current limiting element and verification of its operating parameters as a CLD for distribution substations," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 4, no. 1, pp. 342-348, Jan 1989.
- [52] Yuuichi Wada, Suenobu Hamano, Teijirou Mori, "Self-rehealing characteristics of a sodium current limiter and its overcurrent coordination for low-voltage distribution system", *Electrical Engineering in Japan*, vol. 115, pp. 82, 1995, ISSN 15206416.
- [53] M. Anheuser, A. Kraetzschmar, F. Berger, and W. Kremers, "Self restoring current limiting unit with liquid metal comprises intermediate walls with only their bushes in the zone of the connector channels made of a costly high temperature and fire resistant insulating material" D.E. Patent 000019853580, Dec. 24, 2000.
- [54] A. Thess, Y. Kolesnikov, T. Boeck, P. Terhoeven, and A. Kraetzschmar, "The H-trough: A model for liquid metal electric current limiters," *J. Fluid Mech.* 2005, vol. 527, pp. 67-84.
- [55] W. Kremers, F. Berger and A. Kraetzschmar, "Self-recovering current-limiting device with liquid metal," U.S. Patent 6850145, Feb. 1, 2005.
- [56] W. Kremers, F. Berger and A. Kraetzschmar, "Self-recovering current limiting device with liquid metal," U.S. Patent 6714115, Mar. 30, 2004.
- [57] T. Freyermuth, P. Terhoeven, A. Kraetzschmar, A. Thess and T. Boeck, "Self-resetting current-limiting device for electrical circuit protection, uses liquid metal displaced from chamber with current electrodes at opposite ends into second chamber outside effective current path," D.E. Patent 10243993, Apr. 15, 2004.
- [58] A. Kraetzschmar, F. Berger, M. Anheuser and W. Kremers, "Self-recovering current-limiting device with liquid metal," U.S. Patent 6788516, Sep. 7, 2004.

- [59] W. Kremers, F. Berger and A. Kraetzschmar, "Self-regenerating current limiter with liquid metal," U.S. Patent 6600405, Jul. 29, 2003.
- [60] W. Kremers, F. Berger and A. Kraetzschmar, "Self-recovering current-limiting device having liquid metal," U.S. Patent 6603384, Aug. 5, 2003.
- [61] H. Wilfried, H. Werner, R. Klaus-Dieter, W. Alf and S. Rainer, "Self-resetting current-limiting element," D.E. Patent WO 2007/023137 A1, Aug. 18, 2006.
- [62] Comparison of electrical behaviour between the liquid metal current limiter and the low voltage. Melting fuse / Mitja Koprivsek // ETI Elektroelementd.d., Obrezija 5, SI-1411 Izlake, Slovenija. ICEFA. – 2007.
- [63] H. He et al., "Study of Liquid Metal Fault Current Limiter for Medium-Voltage DC Power Systems," in IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, vol. 8, no. 8, pp. 1391-1400, Aug. 2018.
- [64] Mingzhe Rong, Zhuo Yang, Qing Wan, Hailong He, Yi Wu, Longlong Wang, "Investigation of Liquid Metal Current Limiter for MVDC Power System", Electric Power Equipment - Switching Technology (ICEPE-ST) 2019 5th International Conference on, pp. 408-411, 2019.
- [65] Mingzhe Rong, Yiyang Liu, Yi Wu, Chunping Niu, Qiang Shi, Hong Liu, and Fei Yang Experimental Investigation of Arc Plasma in GaInSn Liquid Metal Current-Limiting Device//IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE. – 2010, VOL. 38, NO. 8, August
- [66] Hailong He, Mingzhe Rong, Yi Wu, Fei Yang, Yiyang Liu, Jiajian Man, Jinhua Luo, Qiang Shi Experimental Research and Analysis of a Novel Liquid Metal Fault Current Limiter// IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY. –2013.
- [67] JU Xingbao, SUN Haishun, YANG Zhuo, ZHANG Junmin// Investigation on the Arc Ignition Characteristics and Energy Absorption of Liquid Metal Current Limiter Based on Self-Pinch Effect// Plasma Science and Technology, Vol.18, No.5, May 2016
- [68] Yiyang Liu, Mingzhe Rong, Yi Wu, Hailong He, Chunping Niu, Hong Liu Numerical analysis of the pre-arcing liquid metal self-pinch effect for current-limiting applications// JOURNAL OF PHYSICS D: APPLIED PHYSICS. –2013. – №46
- [69] Yiyang Liu, Yi Wu, Fengmei Li, Yu Chen, Hailong He Investigation on the Behavior of GaInSn Liquid Metal Current Limiter// IEEE TRANSACTIONS ON COMPONENTS, PACKAGING AND MANUFACTURING TECHNOLOGY, VOL. 4, NO. 2, FEBRUARY 2014
- [70] K. Niayesh, J. Tepper, Friedrich König A Novel Current Limitation Principle Based on Application of Liquid Metals// IEEE TRANSACTIONS ON COMPONENTS AND PACKAGING TECHNOLOGIES, VOL. 29, NO. 2, JUNE 2006
- [71] Kraetzschmar, Physical principles for dimensioning of liquid metal current limiter, CUVILLIER VERLAG, Goettingen, ISBN 3-89873-719-5, 2003, pp. 58

- [72] Hailong He, Yi Wu, Chunping Niu, Zhuo Yang, Mingzhe Rong, Yiwei Sun, Ke Li, "Investigation of the Pinch Mechanism of Liquid Metal for the Current Limitation Application", *Components Packaging and Manufacturing Technology IEEE Transactions on*, vol. 7, no. 4, pp. 563-571, 2017.
- [73] Beibei Wang, Hailong He, Yi Wu, Chunping Niu, Mingzhe Rong, Longlong Wang, "Investigation of a Liquid Metal Fault Current Limiter Based on Current Injection Method", *Electric Power Equipment - Switching Technology (ICEPE-ST) 2019 5th International Conference on*, pp. 403-407, 2019.
- [74] B. Wang, H. He, Y. Wu, M. Rong, L. Wang and J. Li, "Liquid Metal Fault Current Limiter for DC Power Systems," *2020 4th International Conference on HVDC (HVDC)*, 2020, pp. 1084-1088
- [75] H. He, M. Rong, Y. Wu, Y. Liu, J. Man and G. Yu, "Experimental investigation of GaInSn current limiter based on a novel principle," *2013 2nd International Conference on Electric Power Equipment - Switching Technology (ICEPE-ST)*, 2013, pp. 1-4
- [76] Z. Yang et al., "A Novel Topology of a Liquid Metal Current Limiter for MVDC Network Applications," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 34, no. 2, pp. 661-670, April 2019
- [77] H. Wu, X. Li, M. Zhang, D. Stade and H. Schau, "Analysis of a Liquid Metal Current Limiter," in *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, vol. 32, no. 3, pp. 572-577
- [78] Дзежбицки, С. Токоограничивающие выключатели переменного тока: пер. с польск. / С. Дзежбицки, Е. Вальчук. – Л. : Энергоиздат, Ленингр. отд-ние, 1982. – 116 с.
- [79] Кужеков, С.Л. Расчёт динамических процессов, протекающих при срабатывании жидкометаллических самовосстанавливающихся предохранителей/ С.Л. Кужеков, Б.Н. Васильев, Н.Н. Куров// Известия высших учебных заведений. электромеханика. 2012.- №2. - С.131-134.
- [80] Кужеков, С.Л. Оценка быстродействия жидкометаллического самовосстанавливающегося предохранителя/ С.Л. Кужеков, Б.Н. Васильев, Н.Н. Куров// Известия высших учебных заведений. электромеханика. 2012.- №2. - С.134-136.
- [81] Кужеков, С.Л. Конструктивные особенности жидкометаллических самовосстанавливающихся предохранителей и их влияние на процессы, протекающие в них/ С.Л. Кужеков, Б.Н. Васильев, Н.Н. Куров //Изв. вузов. Электромеханика. Специальный выпуск. 2010. С. 53 -55.
- [82] Кужеков, С.Л. Быстродействующий ограничитель тока короткого замыкания в автономной электроэнергетической системе малой мощности/ С.Л. Кужеков, А.А. Пекарский, Н.Н. Куров, А.С. Петренко// Известия высших учебных заведений. электромеханика. Специальный выпуск. 2010. - С.84-86.

- [83] Моделювання роботи саморегенеративних обмежувачів струму з малим часом комутації / К. В. Дубовенко, О. Р. Зотов // Електротехніка і Електромеханіка. 2012. – № 6. – С. 51–55.
- [84] Кузнецов Р. С. Аппараты распределения электрической энергии на напряжение до 1000 В / Р. С. Кузнецов. – Изд. 3-е, перераб. и доп. – М. : Энергия, 1970. – 544 с.
- [85] Воронин, А.А. Опыт использования жидкометаллического рабочего тела в сильноточных коммутационных аппаратах и контактных соединениях/ А.А. Воронин, К.В. Киреев, П.А. Кулаков, В.И. Приходченко// Электротехника. 2008.- №8. - С.10-13.
- [86] Казанцев, А.А., Косорлуков, И.А. Разработка жидкометаллического ограничителя тока // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2013. № 12. С. 25-27.
- [87] Казанцев А.А., Косорлуков И.А. Жидкометаллический токоограничитель // Электрика. 2013. № 1. С. 39-40.
- [88] Приходченко, В.И. Жидкометаллический токоограничитель/ В.И. Приходченко, М.Е. Серпуховитин, М.О. Скрипачев, А.В. Ситников// Известия вузов. Электромеханика. 2011.- №3. - С.60-61.
- [89] Сильноточные предохранители, токоограничители и коммутаторы с жидкометаллическими контактами / П. А. Кулаков, О. Я. Новиков, В. И. Приходченко, В. В. Танаев. – М. : Информэлектро, 1984. – 49 с.
- [90] Особенности горения дуги в аппаратах с жидкометаллическими контактами / В. В. Танаев, А. Ф. Кузьмин // Электротехническая промышленность. – 1982. – № 6. С. 5–6.
- [91] Патент 124989 (RU), МКИ³ H02H 9/02, H02H 3/08. Токоограничитель / А. А. Воронин (RU), В. Г. Гольдштейн (RU), Р. И. Ерофеев (RU), А. А. Казанцев (RU), И. А. Косорлуков (RU), М. А. Серпуховитин (RU) – № 2012126897/07; Заявл. 27.06.12; Опубл. 20.02.13, Бюл. 5. – 5 с.
- [92] Воронин, А.А. Применение жидкометаллический токоограничителя в сетях среднего напряжения / А.А. Воронин, Н.А. Иванов, А.А. Казанцев// В сборнике: Электроэнергетика глазами молодежи труды VI международной научно-технической конференции. ИГЭУ. 2015. С. 462-463.
- [93] Воронин А.А., Ерофеев И.Р., Кулаков П.А., Серпуховитин М.Е. Экспериментальное исследование токоограничивающего аппарата с жидкометаллическими контактами//Материалы международной научно-практической конференции. Ульяновск, УлГТУ -2012. Т.2. -С.306-308.
- [94] А.с. 1094088 СССР, МПК5 H01H87/00. Токоограничитель/ Л.Т. Николаева, В.И. Приходченко, В.В. Танаев (СССР). № 3554968; заяв. 18.02.1983; опубл. 25.05.1984. Бюл. №19, 1 с.
- [95] Андреев, В. А. Основные проблемы создания жидкометаллических самовосстанавливающихся предохранителей и возможная область их

- применения / В. А. Андреев, А. В. Кузнецов // Изв. вузов СССР. Энергетика, 1987. – № 6. – С.42-44
- [96] Андреев, В. А. Анализ быстродействия жидкометаллических и обычных предохранителей / В. А. Андреев, А. В. Кузнецов // Промышленная энергетика, 1991. – №12. – С.22-25.
- [97] Кузнецов, А. В. Повышение стабильности жидкометаллических самовосстанавливающихся предохранителей // Электротехника. – 1986. – № 8. – С.40– 42.
- [98] Кузнецов, А. В. Применение жидкометаллических предохранителей для защиты полупроводниковых аппаратов управления в системах электроснабжения до 1000 В. Диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук: 05.14.02. – Защищена 13.04.88. Утв. 09.11.88. – Свердловск УПИ: – 211 с., прил.
- [99] Определение патентной ситуации в области самовосстанавливающихся токоограничителей. НИР «Предохранители многократного действия»: Отчёт о НИР / ВНИИЭлектроаппарат. – ОАК.І20.397; № ГР 79046254. – Харьков, 1980. – 95 с.
- [100] Патент 2713641 С1 (RU), МКИЗ Н02Н 3/08, Н02Н 9/02. Токоограничивающее устройство [Текст] / А. В. Кузнецов (RU), Ю. П. Юренков (RU); заявитель и правообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ульяновский государственный технический университет» (RU). – № 2019124807; Заявл. 02.08.19; Опубл. 05.02.20, Бюл. 4. – 8 с.
- [101] Кузнецов А.В. Математическая модель процесса короткого замыкания в сети с токоограничивающим устройством на основе жидкометаллического самовосстанавливающегося предохранителя [Текст]/ А.В. Кузнецов, Ю.П. Юренков //Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: технические науки. – 2019. – №3(63). – С. 133 – 146.
- [102] A.V. Kuznetsov and Y.P. Yurenkov, "Mathematical model of the short circuit process in the electrical network with self-recovering current-limiting device with a liquid metal," IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng., International Scientific Electric Power Conference (ISEPC-2019), 2019, pp. 022001, doi:10.1088/1757-899X/643/1/012083
- [103] Таев И. С. Электрическая дуга в аппаратах низкого напряжения. М.: Энергия, 1965. 224 с.
- [104] Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ 2021616865 Российская Федерация. Расчёт процесса короткого замыкания в сети с жидкометаллическим самовосстанавливающимся ограничителем тока [Текст] / Ю.П. Юренков (RU), А.В. Кузнецов (RU); заявитель и правообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ульяновский государственный технический университет» (RU). – №2021616020; заявл. 21.04.2021; опубл. 28.04.2021.– 1 с.

- [105] Kurbatkina V.V., Patsera E.I., Levashov E.A., Timofeev A.N. Self-Propagating High-Temperature Synthesis of Single-Phase Binary Tantalum-Hafnium Carbide (Ta,Hf)C and its Consolidation By Hot Pressing And Spark Plasma Sintering // *Ceramics International*. 2018. V. 44. № 4. P. 4320-4329.
- [106] Кузнецов, А. В. Возможность увеличения коммутационного ресурса жидкометаллических самовосстанавливающихся предохранителей с составной плавкой вставкой / А. В. Кузнецов, Ю. П. Юренков // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. – 2021. – Т. 23. – № 5. – С. 139-149.
- [107] A.V. Kuznetsov, Y.P. Yurenkov and D.S Aleksandrov. "Modeling Operation of Liquid Metal Fuses When Breaking Overcurrents," *High Speed Turbomachines and Electrical Drives Conference (HSTED-2020)*, 2020, E3S Web of Conferences 178(8), 01060, doi: 10.1051/e3sconf/202017801060
- [108] A.V. Kuznetsov and Y.P. Yurenkov, "The Problem of Short-circuit Current Limitation in Energy-saving Systems of Transportation and Electricity Distribution," *2021 12th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE)*, 2021, pp. 1-5, doi: 10.1109/ATEE52255.2021.9425327.
- [109] Кузнецов А.В. Пути совершенствования аппаратов защиты для энергосберегающих систем транспортировки и распределения электроэнергии напряжением до 1 кВ [Текст]/А.В. Кузнецов, Р. Ф. Тимиргазин, Ю. П. Юренков// *Энергосбережение в городском хозяйстве, энергетике, промышленности: ТОМ 2.*– Ульяновск, 2017. – С. 252 – 255.
- [110] Кузнецов А.В. О завышении инвестиционной составляющей в системы электроснабжения, в связи с увеличением токов короткого замыкания [Текст]/ А.В. Кузнецов, Ю.П. Юренков, И.Г. Лапин // *IN MEMORIAM: Василий Андреевич Андреев*. – 2018. – С. 111–116.
- [111] Кузнецов А.В. Применение жидкометаллических самовосстанавливающихся ограничителей тока для энергосберегающих систем транспортировки и распределения электроэнергии [Текст]/ А.В. Кузнецов, Ю.П. Юренков // *Вестник Ульяновского государственного технического университета*. – 2019. – №1. – С. 54–58.
- [112] Кузнецов А.В. Проблема ограничения токов короткого замыкания в энергосберегающих системах транспортировки и распределения электроэнергии [Текст]/ А.В. Кузнецов, Ю.П. Юренков, Ю.Д. Ситникова // *Вестник Ульяновского государственного технического университета*. – 2020. – №1. – С. 36–41.
- [113] Юренков Ю. П. Завышение инвестиционной составляющей в системы электроснабжения [Текст]// *Электроэнергетика: сборник материалов пятнадцатой всероссийской (седьмой международной) научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. (07 апреля -10 апреля 2020 года)*. В 6 т. Т.1. – Иваново: ИГЭУ, 2020. С. 46.
- [114] Кузнецов А. В. Классификация токоограничивающих устройств в системах электроснабжения [Текст]/ А.В. Кузнецов, Ю.П. Юренков // *Энергоэффективность. Ценология. Экология и энергобезопасность: сборник*

- материалов научной конференции. (16 сентября -19 сентября 2020 года). — Астрахань: АГУ, 2020. С. 70-75.
- [115] Кузнецов А.В. Технологические аспекты изготовления и подготовки макетных образцов жидкометаллических предохранителей к тепловым и коммутационным испытаниям [Текст]/ А.В. Кузнецов, Ю.П. Юренков, А.И. Аглиуллов //Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: технические науки. – 2021. – №3(71). – С. 111 – 121.
- [116] Бугай Д.Е., Латыпов О.Р., Черепашкин С.Е. Коррозионно-стойкие материалы. □ Уфа: Нефтегазовое дело, 2012. 197 с.
- [117] Морачевский А.Г., Шестеркин И.А., Буссе-Мачукас В.Б. Натрий. Свойства, производство, применение / Под ред. А.Г. Морачевского. □ СПб: Химия, 1992. 312 с.
- [118] Кийко В.С., Макурин Ю.Н., Ивановский А.Л. Керамика на основе оксида бериллия: получение, физико-химические свойства и применение. □ Екатеринбург: УрО РАН, 2006. 439 с.
- [119] Ивахненко Ю.А, Варрик Н.М. Материалы для высокотемпературных уплотнений (обзор) // Труды ВИАМ. 2015. № 6. 2 с.
- [120] Чайкун А.М., Наумов И.С., Алифанов Е.В. Резиновые уплотнительные материалы (обзор) // Труды ВИАМ. 2017. № 1 (49). 12 с.
- [121] Изготовление прокладок из резины своими руками. – Текст: электронный // Автомобили на альтернативном топливе: сайт. – URL: <https://idoit.ru/2018/01/09/izgotovlenie-prokladok-iz-reziny-svoimi-rukami/> (дата обращения: 10.08.2021).
- [122] Аракелян А.Г. Получение и применение текстолита // Тенденции развития науки и образования. 2018. № 38-4. С. 32-33.
- [123] ГОСТ 520-2011. Подшипники качения. Общие технические условия: межгосударственный стандарт: издание официальное: утверждён и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 19 августа 2011 г. 232-ст: введен впервые: дата введения 2012-07-01 / разработан МТК 307 «Подшипники качения», ООО «НИЦ ЕПК». – Москва: Стандартинформ, 2012. – 65 с.
- [124] Углеродный (карбоновый) кабель. – Текст: электронный // Электронагрев: сайт. – URL: <https://electro-nagrev.ru/catalog/gibkie-nagrevateli/uglerodnyy-karbonovyy-kabel/> (дата обращения: 15.08.2021).
- [125] ГОСТ 8865-93. Системы электрической изоляции. Оценка нагревостойкости и классификация: утверждён и введен в действие Постановлением Комитета Российской Федерации по стандартизации, метрологии и сертификации от 02.06.94 № 160: введен впервые: дата введения 1995-01-01 / разработан Госстандартом России. – Москва: ИПК Издательство стандартов, 2003. – 8 с.
- [126] ГОСТ 2933-83. Аппараты электрические низковольтные. Методы испытаний. утверждён и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 22.03.83 № 1272: введен впервые: дата

введения 1985-01-01 / разработан Минэлектротехпромом СССР. – Москва: ИПК Издательство стандартов, 2002. – 27 с.

[127] Айзенберг, Б. Л. Плавкие предохранители в установках напряжением до 1000 вольт/ Айзенберг Борис Львович - М.; Л. : Госэнергоиздат, 1955. - 144с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

П.1. КОНСТРУКЦИЯ МАКЕТНОГО ОБРАЗЦА ЖСП. ТЕХНОЛОГИЯ ПОДГОТОВКИ К ЛАБОРАТОРНЫМ ИССЛЕДОВАНИЯМ

Конструкция разработанного макетного образца представляет собой два независимых блока. Один из них — это макетный образец ЖСП, содержащий корпус, в котором размещены плавкая вставка из жидкого металла, расположенная в канале диэлектрической втулки из термостойкой керамики, демпфирующее устройство в виде сильфона для компенсации давления, возникающего при взрывообразном испарении жидкого металла во время срабатывания. В таком устройстве начальное давление жидкого металла равно атмосферному. Следовательно, процесс горения электрической дуги происходит при атмосферном давлении.

Исследования показывают, что в таком случае сопротивление электрической дуги может быть недостаточным для ограничения тока короткого замыкания до необходимого уровня. Повысить сопротивление дуги возможно за счёт повышения начального давления жидкого металла.

Второй блок является блоком создания начального давления. Он обеспечивает регулирование начального давления жидкого металла в ЖСП от атмосферного до 100 и более атм. Создание начального давления обеспечивается гидравлически за счёт использования трансформаторного масла. Учитывая тот факт, что жидкость является несжимаемой и не может обеспечить демпфирующий эффект при срабатывании ЖСП конструкцией, предусматривается соединение ЖСП с блоком давления гибким резиновым шлангом высокого давления. Этот шланг будет выполнять роль демпфера.

Такая конструкция позволяет провести экспериментальные исследования в цепи короткого замыкания и выяснить зависимость сопротивления электрической дуги от начального давления. Теоретически такую зависимость получить не представляется возможным. Необходимость информации о сопротивлении электрической дуги, о её вольт–амперной характеристике очевидна для создания промышленных образцов ЖСП.

При разработке конструкции авторы старались предусматривать сборно-разборные конструктивные решения, позволяющие использовать макетный образец многократно с возможностью производить ревизию и замену изношенных во время коммутационных исследований внутренних частей ЖСП.

П.1.1. Конструкция макетного образца ЖСП без блока создания начального давления и её элементы

Упрощённая конструкция макетного образца ЖСП без блока создания начального давления, разработанного и изготовленного на кафедре «Электроснабжение» в Ульяновском государственном техническом университете, изображена на рисунке П1.1.

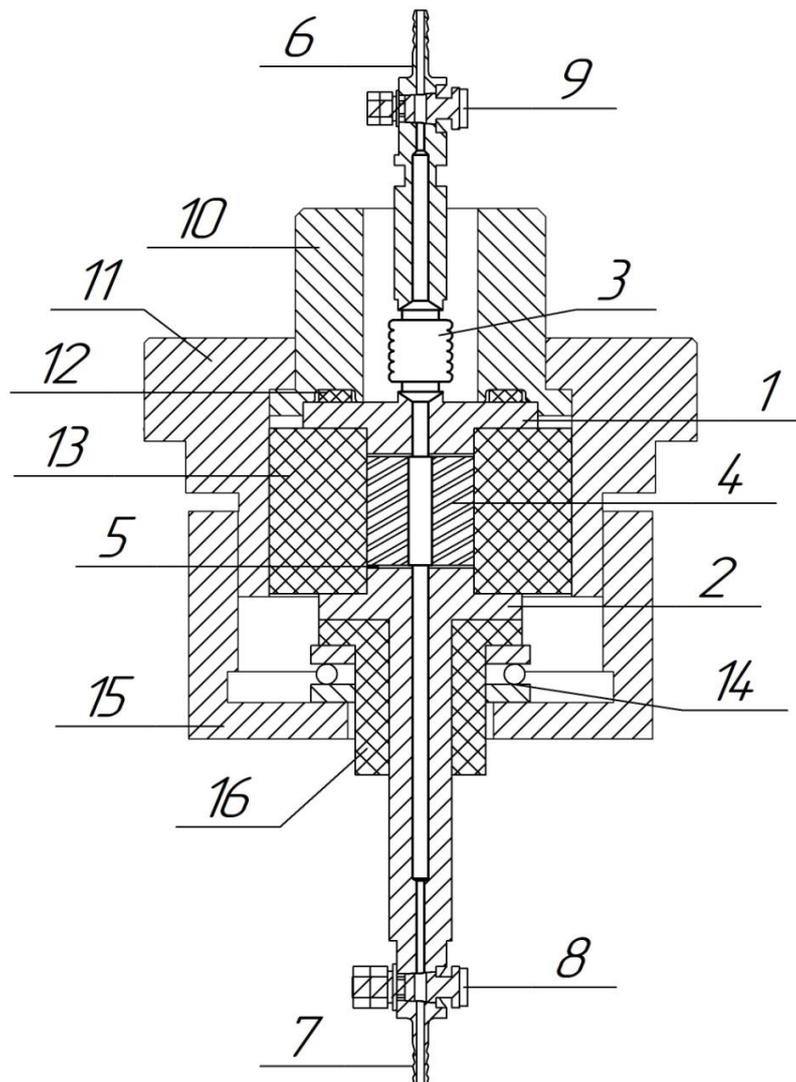


Рис. П1.1. Конструкция макетного образца ЖСП

Макетный образец состоит из контактных выводов 1 и 2, демпфирующего узла 3 в виде сильфона, электрической втулки 4, изоляционной втулки 13, пробковых краников 8, 9, прокладки 12, подшипника 14, изоляционной втулки 16. Для герметичности конструкции между контактными выводами 1, 2 и электрической втулкой 4 расположены герметизирующие прокладки 5. Все детали конструкции помещены в металлический корпус, состоящий из втулки 10, гайки 11, стакана 15.

Основные параметры макета представлены в таблице П1.1.

Таблица П1.1.

Параметры макета ЖСП

Напряжение, В	Диаметр плавкой вставки в самом узком месте, мм	Максимальное рабочее давление контактного вывода, атм	Максимальное рабочее давление сильфона, атм
380	0,7 мм	100	30

Контактные выводы ЖСП (рис. П1.2) изготавливаются из коррозионностойкой жаропрочной стали марки 08X18H10 [116]. Оба конца контактных выводов совмещены со штуцером-ёлочкой 1, 2. При подготовке ЖСП к испытаниям они позволят присоединить к контактным выводам гибкие шланги, чтобы закачать расплавленный натрий в макет. Один из контактных выводов оснащён сильфоном 3. Он предназначен для компенсации давления в ЖСП при его срабатывании за счёт увеличения объема сильфона. Размеры сильфона представлены на рисунке П1.3.

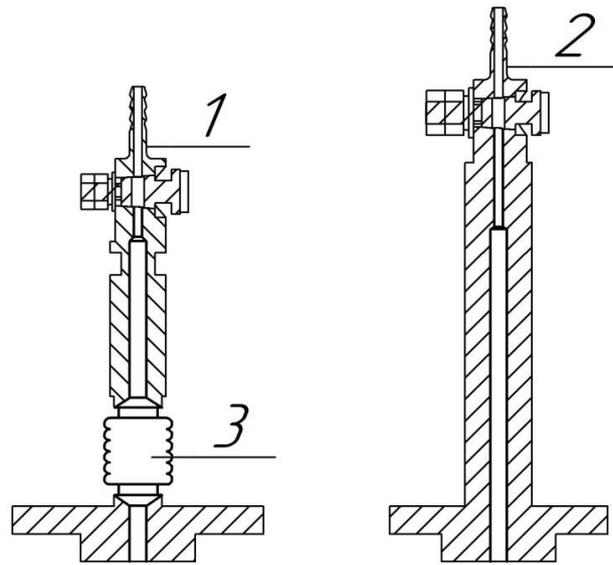


Рис. П1.2. Контактные выводы

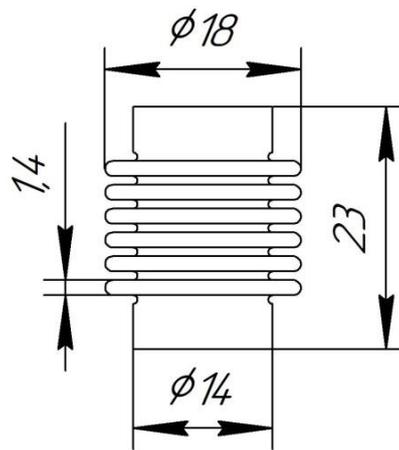


Рис. П1.3. Сильфон

Герметичность жидкого металла, расположенного в канале диэлектрической втулки ЖСП от внешней среды, обеспечивается перекрытыми пробковыми краниками. Пробковые краники изготавливаются из латуни (рис. П1.4).

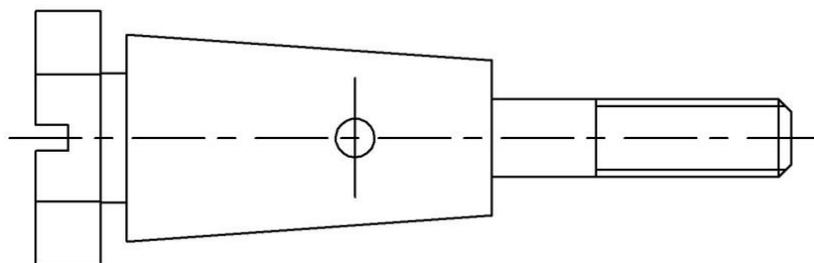


Рис. П1.4. Пробковый краник

При этом пробка должна быть плотно, практически без зазоров подогнана по размерам с конусным отверстием контактного вывода. Это обеспечивается технологической операцией, имеющей название «притирка». С помощью этой операции можно удалить шероховатости с поверхности отверстия и пробки после их чистовой обработки. Притирка осуществляется с помощью притира (пробки) и абразивной пасты разной зернистости. Для удаления больших сколов и царапин используют пасту с наибольшей зернистостью (40 мкм). Далее зернистость уменьшают. Для чистовой притирки используется алмазная паста 10 мкм.

Процесс притирки осуществляется следующим образом. На притир (пробку) наносят ровным слоем абразивно-притирочный материал и вводят его в притираемое отверстие. При помощи воротка притиру придают движение в правую сторону примерно на 180° с усилием, направленным на посадку и с выводом из зацепления в конце хода вращения. Такой подход позволит избежать образований глубоких кольцевых рисок. Далее тот же процесс повторяют в левую сторону. Через несколько парных циклов (10-15) притир вынимают, насухо вытирают его и притираемую поверхность, после чего наносят на притир абразивную пасту. Притирку продолжают до тех пор, пока обрабатываемая поверхность не достигнет нужной чистоты.

Диэлектрическая втулка (рис. П1.5) изготавливается из керамики на основе оксида бериллия (BeO). Этот материал обладает теплопроводностью, превышающей теплопроводность многих металлов, высокой теплостойкостью, прочностью с высокими значениями удельной жёсткости [118]. Эти свойства оксида бериллия необходимы диэлектрической втулке. Именно в её канале происходит возникновение и горение электрической дуги до её гашения. Высокая температура электрической дуги требует применения стойких к воздействию электрической дуги материалов. Иначе происходит их быстрое разрушение.

Размеры диэлектрической втулки представлены на рисунке П1.5.

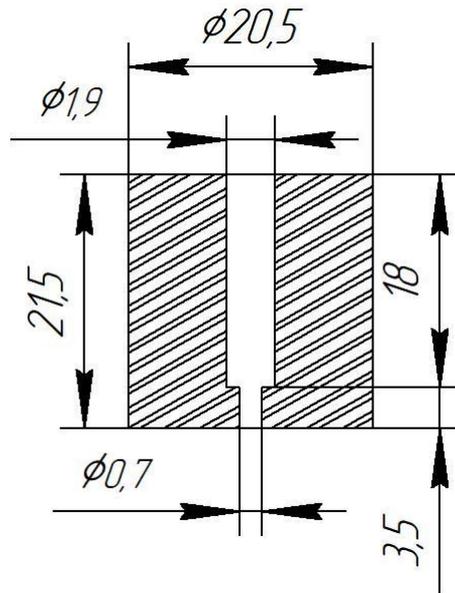


Рис. П1.5. Диэлектрическая втулка

Прокладки 5 (рис. П1.1) изготавливаются из паронита, обеспечивающего герметизацию конструкции, устойчивость к воздействию щелочного металла, высокого давления и температуры [119].

Изоляционные втулки (рис. П1.6) служат для изоляции внутренних деталей макета от корпуса. Они изготавливаются из текстолита. Данный материал обладает отличными электроизоляционными свойствами, влагостойкостью, высокой прочностью при сжатии, повышенной ударной вязкостью [122]. Диапазон рабочих температур материала составляет от -65 до $+85$ °С, это является достаточной для проведения тепловых и коммутационных исследований.

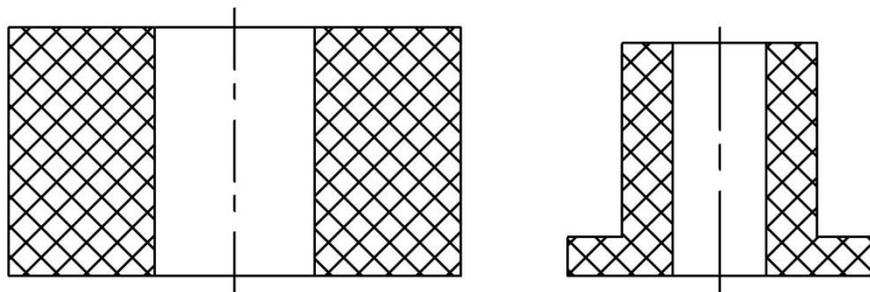


Рис. П1.6. Изоляционные втулки

Втулка 10 (рис. П1.1 и рис. П1.7) предназначена для соединения ЖСП с блоком создания начального давления жидкого металла. Для создания начального давления используется трансформаторное масло. Давление масла создаётся поршневым цилиндром блока начального давления и передаётся в цилиндр втулки 10. Учитывая свойства сиффона, изменяем объём под действием давления, давление в цилиндре передаётся жидкому металлу. Начальное давление жидкого металла внутри сиффона обеспечивается блоком давления и регулируется от 0 до 100 и более атм. Герметизация масла под высоким давлением от окружающей среды обеспечивается прокладкой 12 (рис. П1.1) из маслобензостойкой резины [120].

Прокладка изготавливалась из маслобензостойкой технической пластины. Для выполнения этой работы используется кронциркуль [121]. Для успешной работы перед её началом следует подточить наждачной шкуркой «нулёвкой» ту иголку циркуля, которой будет осуществляться вырезка.

Изготовление прокладок из резины таким способом можно разделить на два этапа.

Предварительный этап:

- определяют размеры (наружный и внутренний), по которым необходимо вырезать прокладку;
- укладывают кусок резины на жесткое ровное основание (например, на металлическую пластину или дощечку);
- устанавливают на кронциркуле наружный размер прокладки;
- устанавливают одну ножку инструмента на резиновую пластину;
- придерживая пластину и слегка нажимая на ножку кронциркуля, начинают его вращать, очерчивая контур наружного размера прокладки;
- для облегчения работы и получения ровного края среза по намеченному контуру наносят тонкий слой машинного масла;

– вращают ножку инструмента, не прилагая большого усилия, постепенно прорезая слой резины, но не до конца (это даст возможность более удобно проводить операцию вырезки меньшего диаметра);

– измеряют и устанавливают на кронциркуле размер меньшего диаметра;

– вставляют ножку инструмента в ту же точку (центр), от которой вырезался больший диаметр;

– придерживая резиновую пластину, прорезают окружность не до конца.

Окончательная вырезка:

– устанавливают на кронциркуле наружный размер диаметр прокладки;

– вставляют ножку инструмента в центр и прорезают наружный диаметр до конца;

– устанавливают внутренний размер прокладки и, придерживая резиновую пластину, прорезают внутренний диаметр.

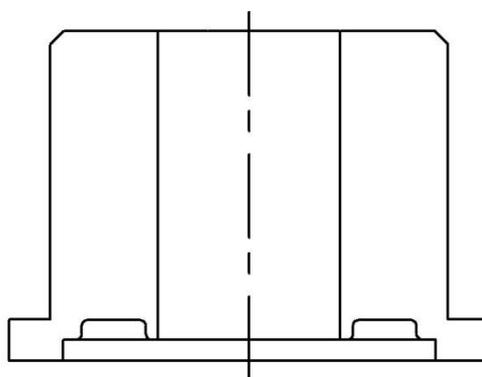


Рис. П1.7. Втулка

Все детали ЖСП помещены в корпус. Корпус макета ЖСП состоит из болта 15 и гайки 11. См рис. П1.1. Отдельно эти детали изображены на (рис. П1.8, П1.9) Герметичность жидкого металла по отношению к окружающей среде обеспечивается сжатием соединяемых деталей с использованием эластичных прокладок. Сжатие деталей обеспечивается резьбовым соединением гайки и болта 15 и 11.

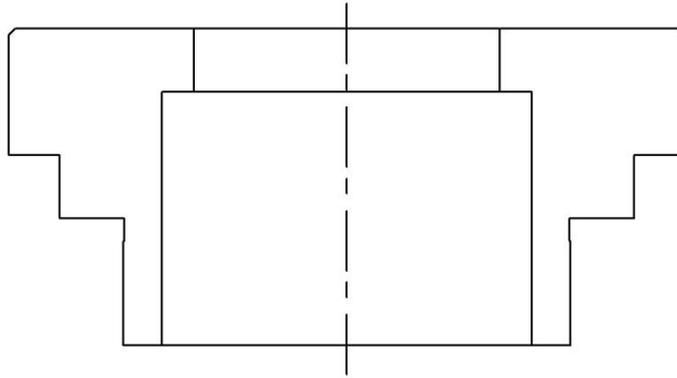


Рис. П1.8. Болт

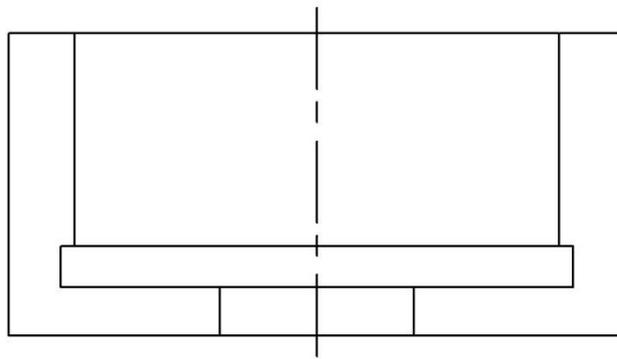


Рис. П1.9. Гайка

Упорный шариковый подшипник 14 (рис. П1.1) марки 8105 (51105) [123] предназначен для того, чтобы при вращении гайки обеспечить сжатие соединяемых деталей без смещения поверхностей деталей, сопряжённых с герметизирующими прокладками. Это позволяет избежать задиrow поверхностей прокладок и сопрягаемых деталей и обеспечивает качество соединений.

П.1.2. Блок создания начального давления

Основным элементом устройства (рис. П1.10.) является гидроцилиндр 4. Внутри гидроцилиндра находится поршень 3, с помощью которого можно изменять давление рабочей жидкости. Усилие на поршень передаётся с помощью нажимного винта 2, который приходит в движение посредством штока 1. Далее идёт крестовина 6, которая имеет четыре отверстия и соединяется с гидроцилиндром с помощью переходника 5. С противоположной стороны от

переходника подсоединяется манометр 8 для измерения давления. Сверху расположена пробка для заливки рабочей жидкости 7, а снизу – переходник 9 для соединения с макетом ЖСП.

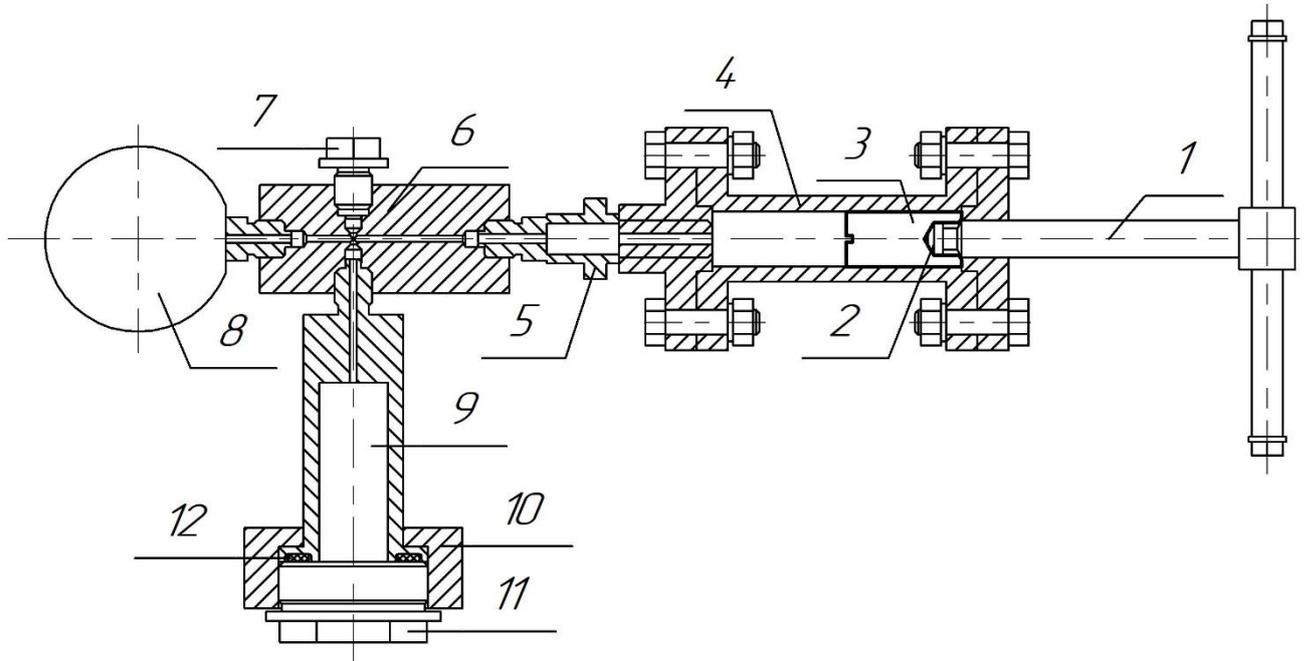


Рис. П1.10. Устройство для создания давления

Предварительно для проверки на герметичность устройство испытывается с заглушкой 11, которая фиксируется с помощью стягивающей гайки 10. Герметичность между заглушкой и переходником обеспечивается посредством прокладки из маслобензостойкой резины 12. После успешного испытания устройства вместо заглушки к переходнику 9 присоединяется макет ЖСП (рис. П1.1) и таким образом получается лабораторная установка в сборе, готовая к испытаниям.

П.1.3. Технология заправки ЖСП жидким металлом

Перед заправкой ЖСП необходимо произвести его промывку и обезжиривание внутренних поверхностей [115]. Для этого используется чистый бензин, этиловый спирт. Гидросистема для промывки ЖСП может представлять

собой ЖСП с присоединённым медицинским шприцом к контактному выводу (штуцеру-ёлочке), посредством гибкого шланга, с одной стороны, и ёмкостью с обезжиривающей жидкостью, в которую будет опускаться гибкий шланг, соединённый со вторым контактным выводом, с другой стороны. Манипулируя шприцом, можно перекачивать жидкость через ЖСП попеременно в одну и другую сторону, обеспечивая промывку и обезжиривание внутренних поверхностей ЖСП. По окончании промывки ЖСП отсоединяется от системы, продувается потоком воздуха, высушивается в сушильном шкафу при повышенной температуре. После этого ЖСП готов к заправке.

Все манипуляции с натрием производятся в перчаточном боксе (рис. П1.11.) в среде инертного газа – аргона.

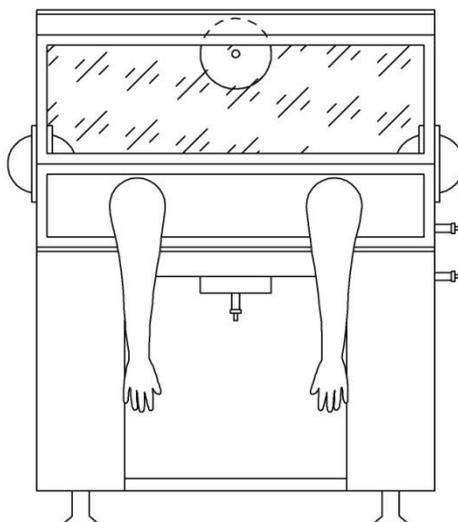


Рис. П1.11. Перчаточный бокс

Предварительно макет 5 (рис. П1.13) закрепляется на подставке 6 в нижней стенке бокса. Монтируется гидросистема. В состав гидросистемы для заправки ЖСП натрием входит ёмкость для расплавленного натрия, макет ЖСП, медицинский шприц. См. рис. П1.13.

Учитывая, что металлический натрий превращается в жидкость при температуре выше нормальной температуры окружающей среды, все элементы гидросистемы для заправки ЖСП натрием должны иметь подогрев до температуры не менее, чем 97,8 °С. Необходимость подогрева ЖСП обусловлена

тем, что во время поступления расплавленного натрия во внутреннее пространство ЖСП возможно его охлаждение за счёт отдачи тепла элементам конструкции ЖСП. Образование при этом пробки делает невозможным дальнейшие манипуляции с натрием.

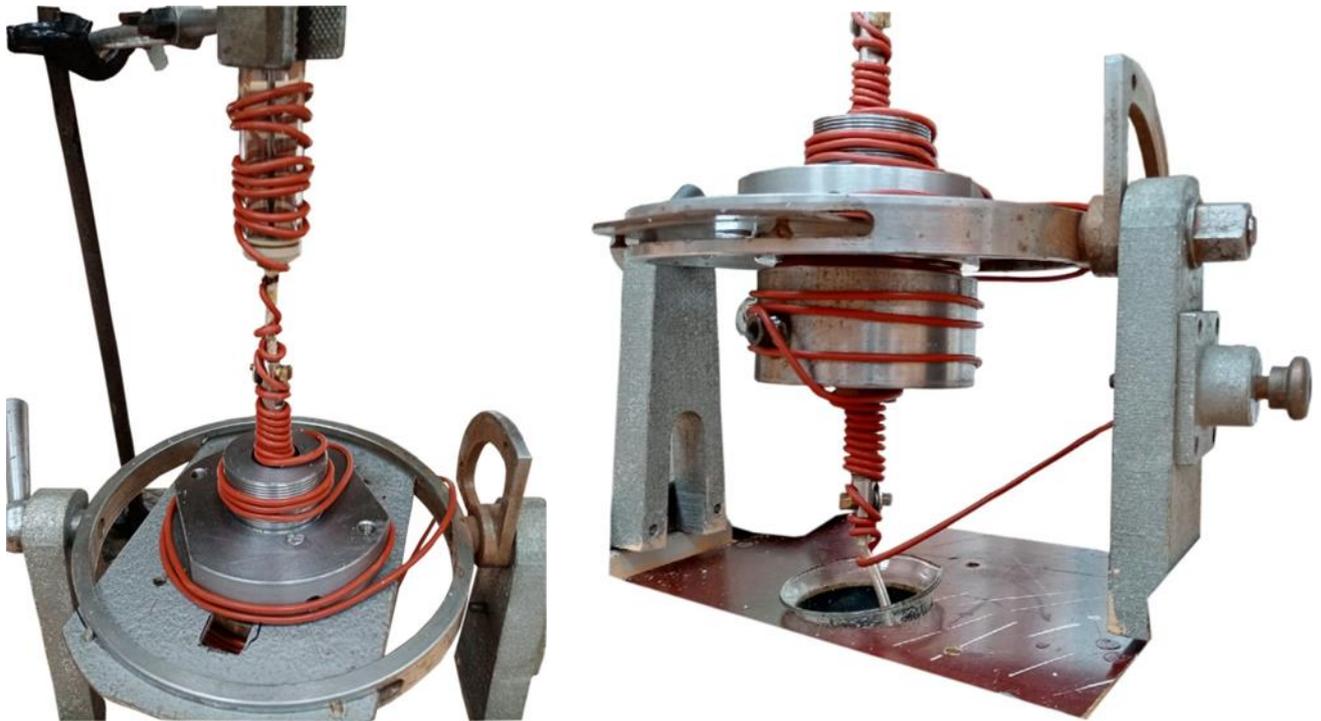


Рис. П1.12. Система подогрева макета ЖСП

Система подогрева (рис. П1.12) элементов гидросистемы может быть выполнена на основе нагревательного элемента и источника питания (в качестве источника питания используется ЛАТР), в качестве которого используется проводник с высоким удельным сопротивлением и термостойкой изоляцией. Термостойкость изоляции должна быть выше температуры плавления натрия и соответственно необходимой температуры нагревания элементов гидросистемы. Этим требованиям удовлетворяет углеводородный кабель, сопротивление которого составляет 33 Ом/м [124]. Изолятором кабеля выступает тефлон, который устойчив к высоким температурам вплоть до 270 °С. Для углеродных волокон характерна высокая степень натяжения и маленький удельный вес. Их

практически нельзя растянуть или порвать, но при этом материал обладает эластичностью. Уникальность углеродистого волокна в его огнеупорности, углерод не перегорает даже при высоких температурах.

Проводником обматывают подогреваемые элементы гидросистемы (рис. П1.12.) и подключают к источнику питания с регулируемым напряжением. Например, автотрансформатору. Экспериментальным путём определяют температуру подогреваемых элементов конструкции ЖСП, которая должна быть не ниже температуры плавления натрия. Для этого используют термопару и мультиметр.

Нижний контактный вывод-штуцер ЖСП посредством гибкой муфты из силиконового шланга 3 соединяется со стеклянной трубкой 7, которая опускается практически до дна в колбу с натрием 9 для заправки ЖСП. См. рис. П.1.13. Объём жидкости в колбе рассчитывается с учётом заполнения внутреннего пространства ЖСП натрием. Ёмкость с натрием фиксируется на подставке 8. Для подогрева ёмкости используется специальный кольцевой нагреватель 10. Верхний контактный вывод-штуцер по аналогии посредством гибкого силиконового шланга соединяется с цилиндром медицинского шприца 1. Шприц крепится в лабораторный штатив 4. Гибкие шланги закрепляются обжимными хомутами 2.

В исходном состоянии нижняя трубка гидросистемы опущена в колбу с расплавленным натрием. Поршень цилиндра медицинского шприца находится в нижнем состоянии, состоянии всасывания жидкости (рис. П1.13.). Все элементы гидросистемы должны быть прогреты до температуры плавления натрия.

Для заполнения гидросистемы натрием поршень шприца медленно поднимается вверх. За счёт расширения объёма внутреннего пространства снижается давление внутри ЖСП. Действующее на натрий атмосферное давление вытесняет его из колбы в зону пониженного давления во внутреннюю часть ЖСП.

Факт заполнения ЖСП и окончания процедуры может контролироваться визуально при появлении натрия в цилиндре шприца. Важным моментом в этой процедуре является необходимость заполнения внутреннего пространства ЖСП без газовых пузырьков, которые могут остаться в лабиринтных участках, в гофрах

сильфона и т. п. Избежать этого могут помочь многократная прокачка в разные стороны, создание вибрации подставки с ЖСП во время заполнения и т. п. После заполнения ЖСП натрием перекрываются пробковые краники, отключается подогрев элементов гидросистемы. Гидросистема размонтируется.

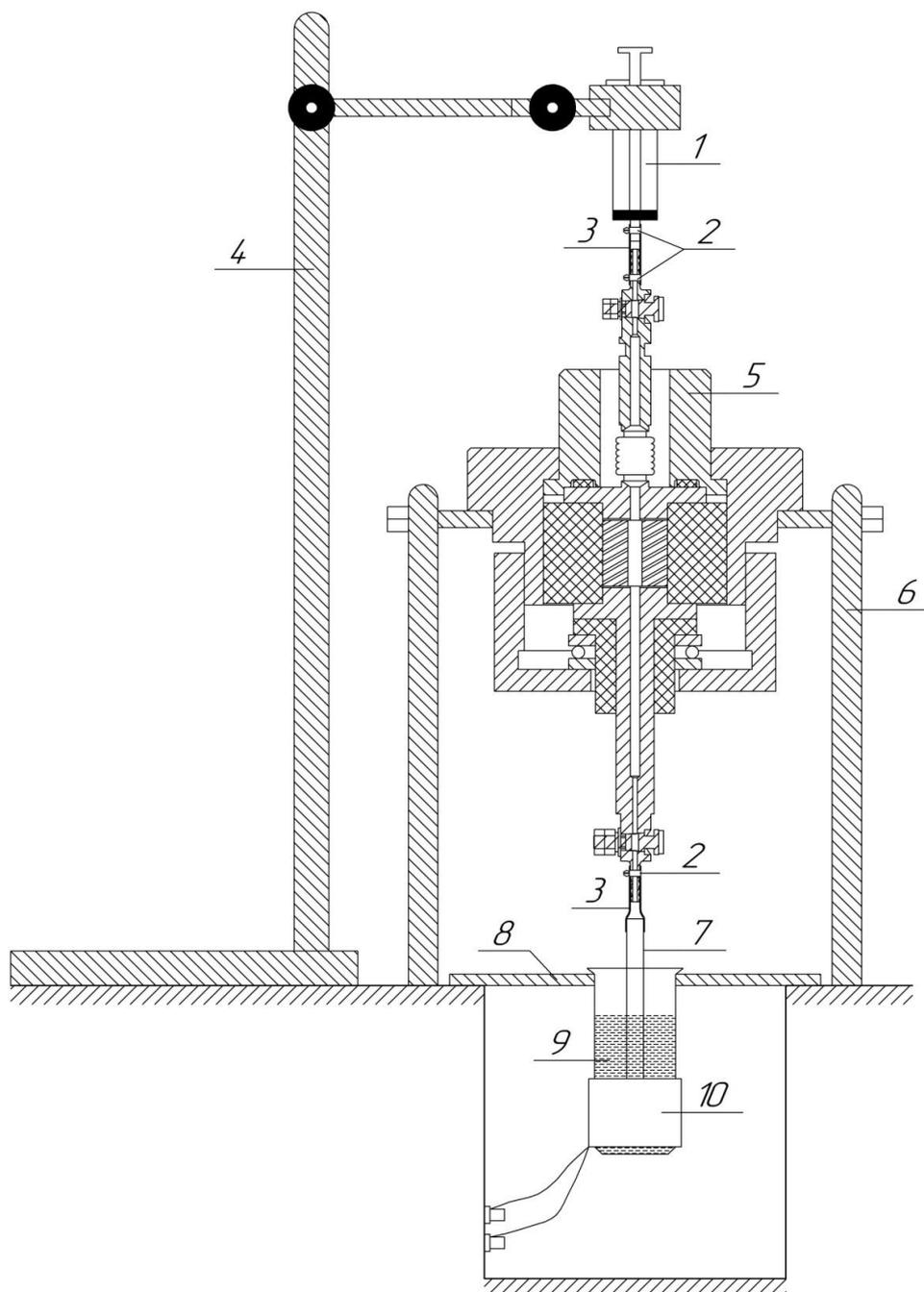


Рис. П1.13. Исходное состояние макета ЖСП перед заправкой

После остывания ЖСП до температуры окружающей среды удаляются остатки натрия в отверстиях контактных выводов-штуцеров. Выполняется уборка перчаточного бокса и утилизация отходов. Заправленный макет готов к

дальнейшим манипуляциям в нормальных лабораторных условиях вне перчаточного бокса.

Процесс заправки макета натрием требует особой осторожности и внимания. Химическая активность натрия может привести к пожару или взрыву, принести вред здоровью, травмировать участников эксперимента.

В этой связи технология заправки ЖСП натрием предварительно отработывалась с использованием вместо натрия химически менее активного вещества – парафина. Температура плавления парафина незначительно отличается от температуры плавления натрия. Для заправки ЖСП парафином требуются те же технические приспособления и манипуляции оператора. Многократное выполнение работ по заправке ЖСП парафином позволило освоить и усовершенствовать технологию заправки ЖСП жидким металлом, увидеть скрытые ситуации, определить возможности их устранения. После приобретения практического опыта работы по заправке ЖСП парафином принималось решение о заправке его натрием и подготовке к лабораторным исследованиям.

П.1.4. Технология подготовки ЖСП к лабораторным испытаниям.

Прежде чем заправлять ЖСП жидким металлом, в качестве которого используется натрий, обладающий повышенной химической активностью к кислороду, необходимо провести ряд действий, направленных на проверку герметичности макетного образца. Для этого используется блок создания начального давления.

Проверку качества пробкового краника предлагается проводить, как показано на рис. П1.15., с помощью переходной втулки, изображённой на рис. П1.14.

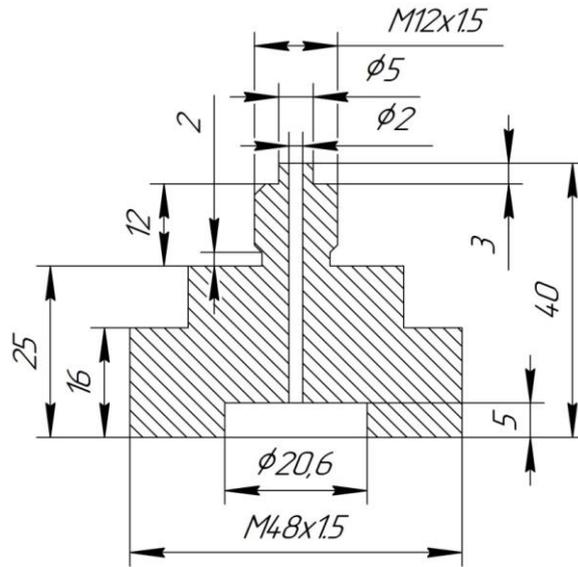


Рис. П1.14. Переходная втулка для проверки контактного вывода

На рисунке П1.15. изображено устройство в сборе с контактным выводом. Контактный вывод 3 крепится к переходной втулке 1 с помощью стягивающей гайки 2. Для герметичности между выводом и переходником применяется паронитовая прокладка 4. Полностью собранное устройство позволяет оценить герметичность соединения после притирки пробкового краника при высоком давлении.

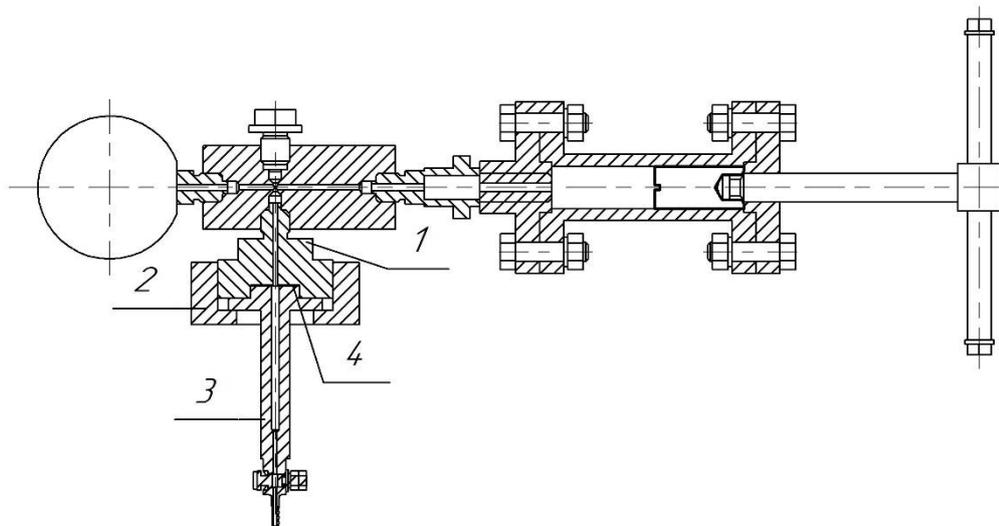


Рис. П1.15. Устройство для создания давления в сборе с контактным выводом

Проверка на герметичность конструкции ЖСП в целом производится следующим образом: используется ЖСП, заправленный не натрием, а бензином или маслом; к предварительно заправленному макету подсоединяют узел давления, описанный выше (рис. П1.16.).

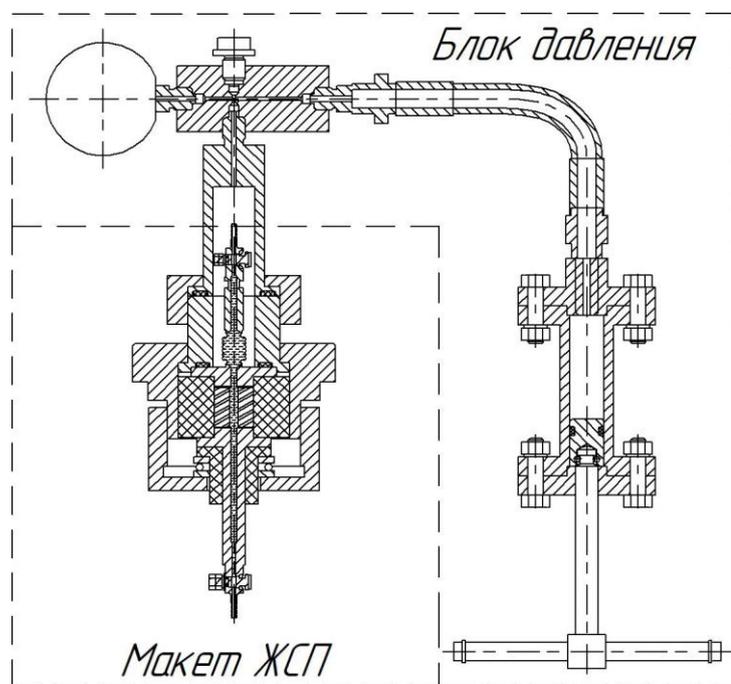


Рис. П1.16. Устройство для создания давления в сборе с заправленным макетом

Далее гидросистему блока создания начального давления необходимо заправить трансформаторным маслом. Для этого используется заливное отверстие с пробкой 3. После заправки устройства с помощью поршня, путём вращения штока поднимают давление до 100 атм. Спустя сутки проверяют остаточное давление и наличие подтёков. После успешного испытания на герметичность макет подготавливают к заправке натрием, по окончании которой будут проводиться тепловые и коммутационные испытания.

П.2. ПРОГРАММНАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ЦЕПИ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ С ОГРАНИЧИТЕЛЕМ ТОКА НА ОСНОВЕ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ САМОВОССТАНАВЛИВАЮЩИХСЯ ПРЕДОХРАНИТЕЛЕЙ

Описанная в главе 3 математическая модель достаточно полно отражает процессы, происходящие в электротехническом комплексе «источник питания - ограничитель тока - защищаемый элемент сети»; позволяет получить расчётные осциллограммы токов и напряжений во всех элементах электротехнического комплекса, пропускаемые ограничителем тока максимальные токи, обусловленные выбранным сечением плавкой вставки и значением шунтирующего сопротивления, а также значение пропускаемого теплового интеграла. С помощью модели, организовав вычислительный процесс, можно установить детерминированные связи между параметрами перегрузочной способности защищаемого элемента сети и параметрами ограничителя тока. Так производится расчёт параметров или параметрический синтез ограничителя тока, предназначенного для уменьшения электродинамического и теплового воздействия тока короткого замыкания на защищаемый элемент электрической сети.

Вычислительная процедура с использованием математической модели является довольно трудоёмкой и требует решения уравнений численными методами. Применение систем компьютерной математики по типу Derive или MathCad незначительно уменьшает трудоёмкость вычислительного процесса.

Уменьшить трудоёмкость за счёт автоматизация вычислительного процесса позволяет программная модель, разработанная автором. Для разработки программы использовалось несколько языков программирования. Математические операции программировались на языке JavaScript. Интерфейс программы обеспечивается использованием языка CSS. Программные коды, написанные на JavaScript и CSS, совмещены с программой, написанной на языке HTML.

По аналогии с математической моделью программная модель процесса короткого замыкания в электротехническом комплексе «источник питания - ограничитель тока - защищаемый элемент сети в режиме короткого замыкания» представлена в трёх вариантах. В первом варианте ограничитель тока выполнен на основе ЖСП с шунтирующим сопротивлением. Во втором - используется ЖСПС с шунтирующим сопротивлением. В третьем - ограничитель тока представляет собой новое схмотехническое решение, реализующее двухступенчатый принцип токоограничения.

П.2.1. Программная модель электротехнического комплекса с ограничителем тока на основе ЖСП с шунтирующим сопротивлением



Рис. П2.1. Интерфейс программной модели

На рис. П2.1. показан общий вид интерфейса программы. Условно интерфейс можно разделить на три зоны. Первая зона «параметры» позволяет вводить и изменять параметры математической модели (рис. П2.2).

R:	<input type="text" value="0.00006284"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="button" value="ручной ввод"/>
L:	<input type="text" value="0.00002"/>	<input type="text" value="0"/>	
Rш (для первого графика):	<input type="text" value="0.1"/>	<input type="text" value="0.000001"/>	
Rш1 (для второго графика):	<input type="text" value="0.05"/>	<input type="text" value="0.001"/>	
Rш2 (для второго графика):	<input type="text" value="0.05"/>	<input type="text" value="0.001"/>	<input type="button" value="ручной ввод"/>
Ψ:	<input type="text" value="2"/>	<input type="text" value="0.001"/>	<input type="button" value="* π"/>
A3:	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0.05"/>	
A4:	<input type="text" value="18000"/>	<input type="text" value="537.4"/>	
S:	<input type="text" value="3"/>	<input type="text" value="250"/>	<input type="button" value="Уаж участвует"/>
S2 (для второго графика):	<input type="text" value="0.1"/>		

Рис. П2.2. Вкладка «параметры» в интерфейсе

Зависимые параметры по умолчанию рассчитываются в программной модели. Тем не менее, алгоритм программы предусматривает их ручной ввод.

Например, зависимый параметр Δt_1 рассчитывается из уравнения 3.2, а при нажатии кнопки «ручной ввод» в интерфейсе программы можно вводить любое значение времени. Для конкретного случая таким образом можно посмотреть, какой будет пропускаемый ток во время дуговой стадии процесса в ЖСП. Такая информация полезна как при отладке программы, так и при исследовании модели.

Алгоритм программы предусматривает ввод значения $U_{ЗАЖ}$ — это напряжение зажигания электрической дуги. Введённое числовое значение несколько изменяет порядок и результат расчёта. При этом задерживается начало третьего этапа процесса в ЖСП до момента тока $U_{III} \geq U_{ЗАЖ}$.

Во втором поле производится настройка всех параметров выводимого на экран графика зависимости, выбор которого производится в поле 3. Пример зависимости представлен на рис. П2.3.

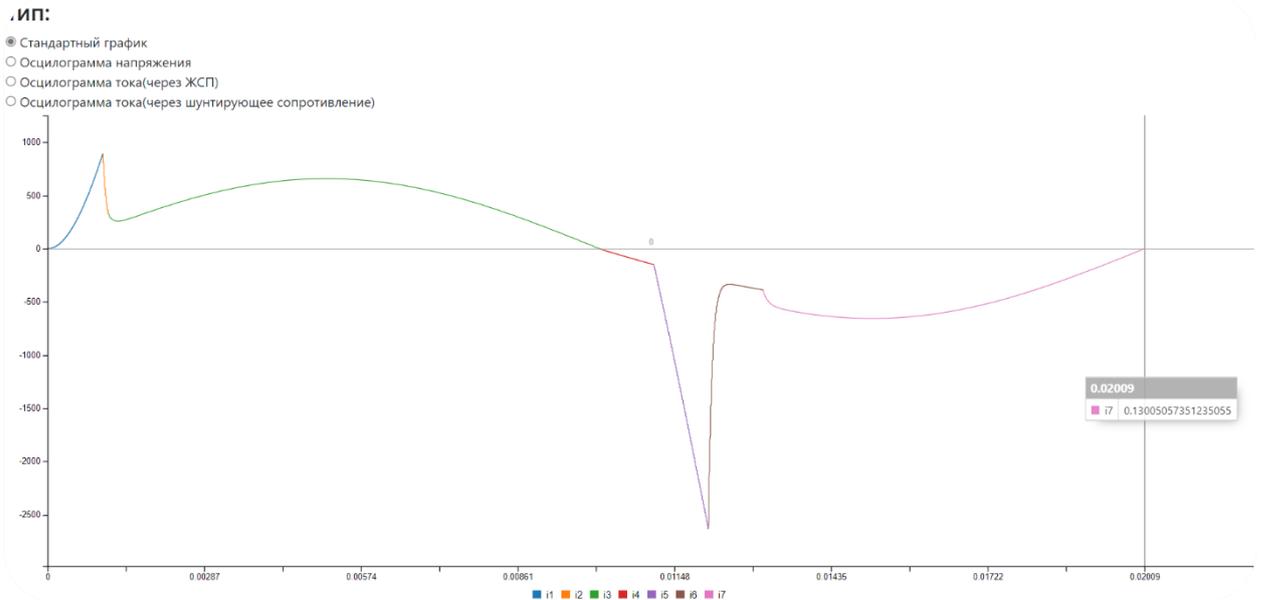


Рис. П2.3. Пример построения графика в программной модели

После построения графика можно производить настройки графика: сделать невидимыми этапы графика (например, с 4 по 7 этапы во втором полупериоде), масштабировать для точного определения значения. Алгоритм программы содержит расчёт интеграла Джоуля, а именно: преддугового интеграла $W_{\text{прд}}$ и пропускаемого теплового интеграла $W_{\text{пр}}$. Числовое значение выводится под графиком (рис. П2.3).

Третье поле «тип» позволяет выбрать зависимость для вывода её на экран. Это может быть зависимость для полного тока цепи i_K (рис. 3.1.), тока через ЖСП i_F (рис. 3.1.), тока через шунтирующее сопротивление $i_{\text{ш}}$ (рис. 3.3.). Кроме этого, можно выбрать зависимость напряжения КЗ u_K .

П.2.2. Программная модель электротехнического комплекса с ограничителем тока на основе ЖСПС с шунтирующим сопротивлением и повышенным коммутационным ресурсом

В целом программная модель с использованием ограничителя тока с ЖСПС и шунтирующим сопротивлением практически не отличается от модели ограничителя тока с ЖСП и шунтирующим сопротивлением. Различие в том, что в качестве минимального сечения плавкой вставки используется сечение

тугоплавкого электрода. Математические выражения, которые использованы при разработке этой программной модели, представлены в 3.5. Для определения работоспособности выбранного варианта параметров ограничителя тока используется выражение 3.53.

П.2.3. Программная модель электротехнического комплекса с ограничителем тока на основе ЖСП с двухступенчатым принципом токоограничения

Программная модель электротехнического комплекса с ограничителем тока на основе ЖСП с двухступенчатым принципом токоограничения разработана на основе программной модели электротехнического комплекса с ограничителем тока на основе ЖСП с шунтирующим сопротивлением (см. П2.1.). В разработанной программе дополнительно учтено математическое описание процесса короткого замыкания в соответствии со структурной схемой электротехнического комплекса с ограничителем тока на основе ЖСП с двухступенчатым принципом токоограничения. См 3.6.1.

На рис. П2.4. представлен вид экрана монитора с введёнными параметрами электротехнического комплекса.

R:	<input type="text" value="0.00006284"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="button" value="ручной ввод"/>
L:	<input type="text" value="0.00002"/>	<input type="text" value="0"/>	
Rш (для первого графика):	<input type="text" value="0.1"/>	<input type="text" value="0.000001"/>	
Rш1 (для второго графика):	<input type="text" value="0.05"/>	<input type="text" value="0.001"/>	
Rш2 (для второго графика):	<input type="text" value="0.05"/>	<input type="text" value="0.001"/>	<input type="button" value="ручной ввод"/>
Ч:	<input type="text" value="2"/>	<input type="text" value="0.001"/>	
A3:	<input type="text" value="0"/>	тогр (для Узаж):	<input type="text" value="0.05"/>
A4:	<input type="text" value="18000"/>	Um:	<input type="text" value="537.4"/>
S:	<input type="text" value="3"/>	Узаж:	<input type="text" value="250"/>
Sz (для второго графика):	<input type="text" value="0.1"/>		<input type="button" value="Узаж участвует"/>

Рис. П2.4. Исходные данные для расчёта

В результате по (П2.1.) рассчитана энергия электрической дуги в ЖСП при его использовании в электротехническом комплексе с ограничителем тока на основе ЖСП и энергия электрической дуги в ЖСП1 по (П2.2) при использовании его с ограничителем тока с двухступенчатым принципом токоограничения.

$$W_{ЖСП}^* = \int_{t_2}^{t_3} (i_{3.ЖСП} \cdot u_3) dt. \quad (П2.1)$$

$$W_{ЖСП}^* = 3594 \text{ Вт} \cdot \text{с}.$$

$$W_{ЖСП1}^* = \int_{t_2}^{t_3} (i_{3.ЖСП} \cdot k_{ЖСП1,3} \cdot u_3) dt + \int_{t_3}^{t_4} (i_{4.ЖСП} \cdot k_{ЖСП1,4} \cdot u_4) dt \quad (П2.2)$$

$$W_{ЖСП1}^* = 3403 \text{ Вт} \cdot \text{с}.$$

Видно, что в первом случае энергия выделяется больше $W_{ЖСП1}^* < W_{ЖСП}^*$.

П.2.4. Результаты исследования модели электротехнического комплекса с ограничителем тока на основе ЖСП с шунтирующим сопротивлением в процессе отладки и тестирования

Схема исследуемой цепи с ЖСП состоит из источника питания, силового трансформатора *Т1* ТМЗ 1000/6/0,4, автоматического выключателя, токоограничивающего устройства на основе жидкометаллического самовосстанавливающегося предохранителя *FU* (рис. П.2.5).

Параметры схемы:

Индуктивного сопротивления сети $L=0,0055 \text{ Ом}$, активного сопротивления сети $R=0,0019 \text{ Ом}$, сопротивления плавкой вставки жидкометаллического предохранителя, принятой $R_f=0$, сопротивления дуги $R_d=0,5 \text{ Ом}$, возникающей при срабатывании ЖСП, шунтирующего сопротивления $R_{ш}=0,2 \text{ Ом}$, напряжение сети $U=240\text{В}$, время существования паровой пробки выбрано равным $t_2=0,0001\text{с}$, период времени горения дуги 3 этапа разделён на 4 интервала, длительность каждого из них составляет $t_3=0,00001\text{с}$. Начальная фаза источника соответствует возникновению максимального значения ударного тока. A – постоянная для

данного материала плавкой вставки величина, сечение берется из таблицы Пб.1 [12].

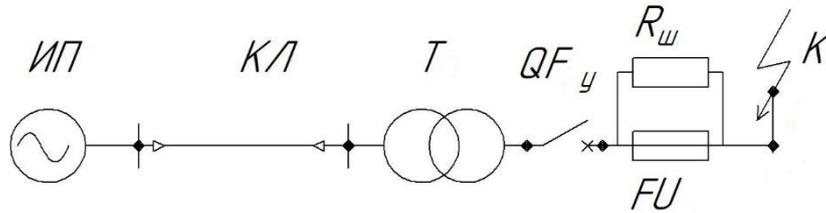


Рис. П2.5. Схема исследуемой цепи с ЖСП.

П.2.4.1. Расчёт пропускаемого теплового импульса ограничителя тока.

Материал плавкой вставки – ртуть

Характеристика ртути: Температура плавления: $t_{\text{плав.}} = -38,87 \text{ }^\circ\text{C}$

Температура кипения: $t_{\text{кип.}} = 357 \text{ }^\circ\text{C}$

Удельное сопротивление при 20°C : $\rho = 0,958 \text{ (ом}\cdot\text{мм}^2)/\text{м}$.

Удельное сопротивление при $t_{\text{кип.}}$: $\rho = 4,037 \text{ (ом}\cdot\text{мм}^2)/\text{м}$.

Температурный коэффициент сопротивления: $0,0092^\circ\text{C}^{-1}$

Постоянный коэффициент А: $1300 \text{ Дж}/(\text{ом}\cdot\text{мм}^2)$

Ввод данных:

Ввод постоянных эксперимента

R	Um
<input type="text" value="0,0019"/>	<input type="text" value="339"/>
L	t1 <input type="checkbox"/> ручной ввод
<input type="text" value="0,0055"/>	<input type="text" value="0"/>
Rш	Δt2
<input type="text" value="0,2"/>	<input type="text" value="0,0001"/>
ψ	Δt (для третьего и седьмого этапа)
<input type="text" value="2"/> * π <input checked="" type="checkbox"/>	<input type="text" value="0,000001"/>
S	R (для третьего и седьмого этапов)
<input type="text" value="0,38465"/>	<input type="checkbox"/> ручной ввод
A	<input type="text" value="1000000"/>
<input type="text" value="1300"/>	

Рис.П2.6. Ввод данных эксперимента для плавкой вставки из ртути.

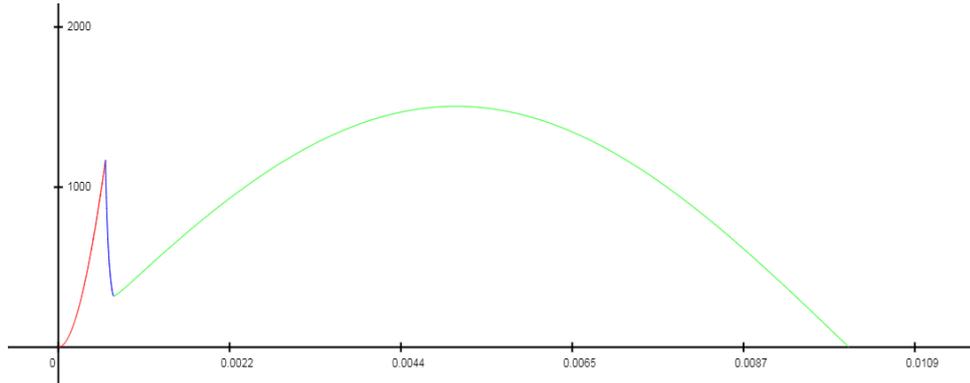


Рис. П2.7. График теплового импульса для плавкой вставки из ртути.

Таблица П2.1.

Результаты расчёта теплового импульса для плавкой вставки из ртути при изменении угла Ψ

Угол Ψ	0	30	60	90	120
$W_{\text{перед}}$	195	207	177	202	194
W_0	15652	14194	9853	4842	1373

Таблица П2.2.

Результаты расчёта теплового импульса для плавкой вставки из ртути при изменении $R_{\text{ш}}$

$R_{\text{ш}}$	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	2,0	3,0
W_0	15652	8559	6262	5156	4509	3235	2794

Таблица П2.3.

Результаты расчёта теплового импульса для плавкой вставки из ртути при изменении сечения канала плавкой вставки F

$F, \text{мм}^2$	0,38465	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$W_{\text{перед}}$	195	330	454	611	807	1047	1337
W_0	15652	16077	16426	16833	17303	17841	18337

П.2.4.2. Расчёт пропускаемого теплового импульса ограничителя тока.

Материал плавкой вставки – калий

Характеристика Калия: Температура плавления: $t_{\text{плав.}} = 63,7 \text{ } ^\circ\text{C}$

Температура кипения: $t_{\text{кип.}} = 760 \text{ } ^\circ\text{C}$

Удельное сопротивление при 20°C : $\rho = 0,066 \text{ (ом}\cdot\text{мм}^2)/\text{м}$.

Удельное сопротивление при $t_{\text{кип.}}$: $\rho = 0,511 \text{ (ом}\cdot\text{мм}^2)/\text{м}$.

Температурный коэффициент сопротивления: $0,004^\circ\text{C}^{-1}$

Постоянный коэффициент А: $5800 \text{ Дж}/(\text{ом}\cdot\text{мм}^2)$

Ввод данных:

Ввод постоянных эксперимента

R	Um
<input type="text" value="0,0019"/>	<input type="text" value="339"/>
L	t1 <input type="checkbox"/> ручной ввод
<input type="text" value="0,0055"/>	<input type="text" value="0"/>
Rш	Δt2
<input type="text" value="0,5"/>	<input type="text" value="0,0001"/>
ψ	Δt (для третьего и седьмого этапа)
<input type="text" value="2"/> * π <input checked="" type="checkbox"/>	<input type="text" value="0,000001"/>
S	R (для третьего и седьмого этапов)
<input type="text" value="0,0062"/>	<input type="checkbox"/> ручной ввод
A	<input type="text" value="1000000"/>
<input type="text" value="5800"/>	

Рис.П2.8. Ввод данных эксперимента для плавкой вставки из калия.

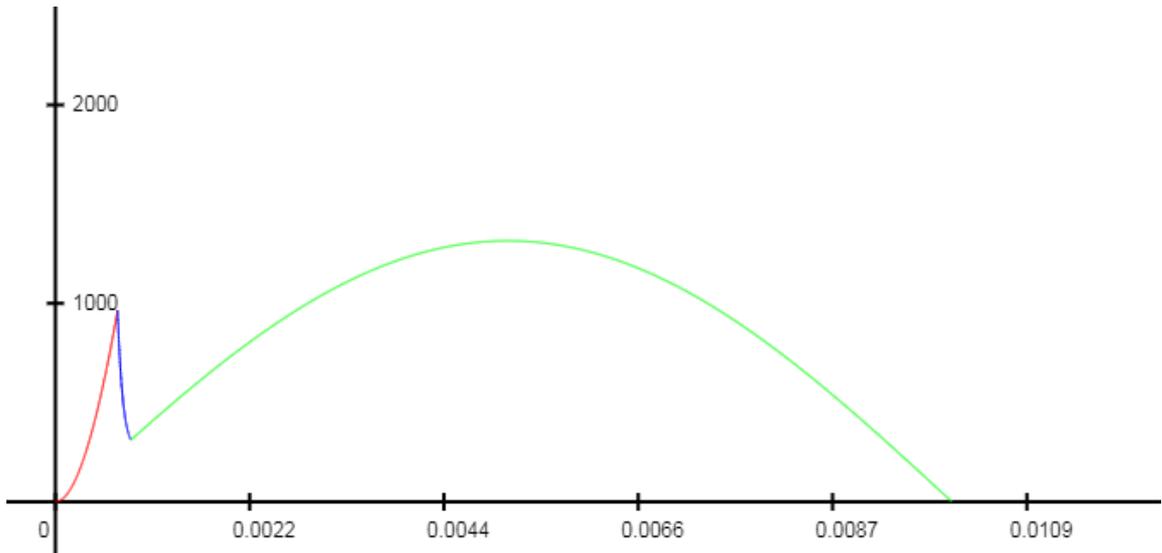


Рис. П2.9. График теплового импульса для плавкой вставки из калия.

Таблица П2.4.

Результаты расчёта теплового импульса для плавкой вставки из калия при изменении угла Ψ

Угол φ	0	30	60	90	120
$W_{\text{пред}}$	155	131	100	90	85
W_0	14711	13307	9198	4310	1070

Таблица П2.5.

Результаты расчёта теплового импульса для плавкой вставки из калия при изменении $R_{\text{ш}}$

$R_{\text{ш}}, \text{ом}$	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	2,0	3,0
W_0	14711	7858	5685	4658	4067	2960	2616

Таблица П2.6.

Результаты расчёта исследования теплового импульса для плавкой вставки калия при изменении сечения канала плавкой вставки F

$F, \text{мм}^2$	0,026	0,034	0,041	0,048	0,055	0,062	0,068
$W_{\text{пред}}$	145	250	356	460	534	608	890

W_0	14711	15228	15431	15454	15507	15584	15609
-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

П.2.4.3. Расчёт пропускаемого теплового импульса ограничителя тока.

Материал плавкой вставки – натрий

Характеристика Натрия: Температура плавления: $t_{\text{плав.}} = 97,8 \text{ } ^\circ\text{C}$

Температура кипения: $t_{\text{кип.}} = 883 \text{ } ^\circ\text{C}$

Удельное сопротивление при 20°C : $\rho = 0,047 \text{ (ом}\cdot\text{мм}^2)/\text{м}$.

Удельное сопротивление при $t_{\text{кип.}}$: $\rho = 0,393 \text{ (ом}\cdot\text{мм}^2)/\text{м}$.

Температурный коэффициент сопротивления: $0,004^\circ\text{C}^{-1}$

Постоянный коэффициент А: $18000 \text{ Дж}/(\text{ом}\cdot\text{мм}^2)$

Ввод данных:

Ввод постоянных эксперимента

<p style="text-align: center;">R</p> <input style="width: 100%;" type="text" value="0,0019"/> <p style="text-align: center;">L</p> <input style="width: 100%;" type="text" value="0,0055"/> <p style="text-align: center;">Rш</p> <input style="width: 100%;" type="text" value="0,5"/> <p style="text-align: center;">ψ</p> <input style="width: 100%;" type="text" value="2"/> * π <input checked="" type="checkbox"/> <p style="text-align: center;">S</p> <input style="width: 100%;" type="text" value="0,0025"/> <p style="text-align: center;">A</p> <input style="width: 100%;" type="text" value="18000"/>	<p style="text-align: center;">Um</p> <input style="width: 100%;" type="text" value="339"/> <p style="text-align: center;">t1 <input type="checkbox"/> ручной ввод</p> <input style="width: 100%;" type="text" value="0"/> <p style="text-align: center;">Δt2</p> <input style="width: 100%;" type="text" value="0,0001"/> <p style="text-align: center;">Δt (для третьего и седьмого этапа)</p> <input style="width: 100%;" type="text" value="0,000001"/> <p style="text-align: center;">R (для третьего и седьмого этапов)</p> <input type="checkbox"/> ручной ввод <input style="width: 100%;" type="text" value="1000000"/>
---	--

Рис. П2.10. Ввод данных эксперимента для плавкой вставки из натрия.

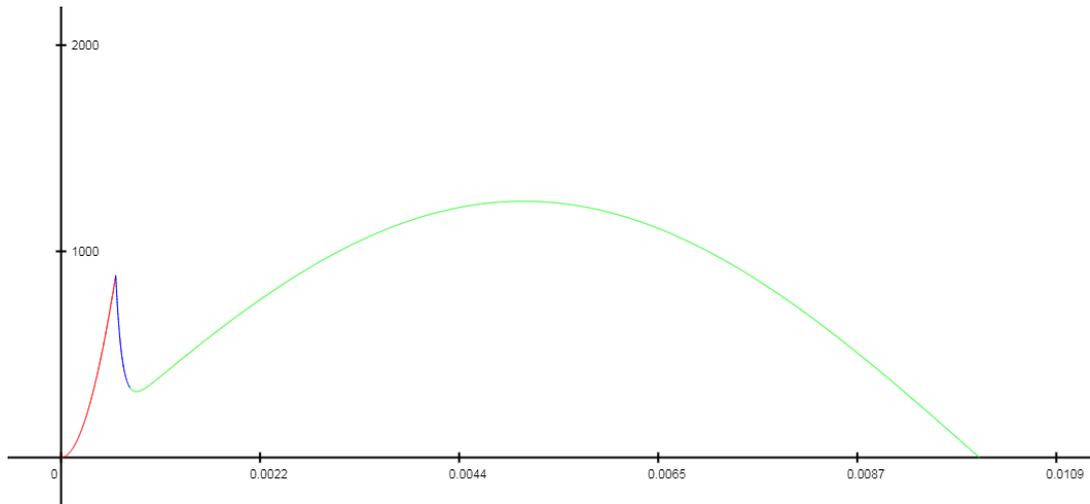


Рис. П2.11. Вывод результатов эксперимента для плавкой вставки из натрия.

Таблица П2.7.

Результаты расчёта теплового импульса для плавкой вставки из натрия при изменении угла Ψ

Угол φ	0	30	60	90	120
$W_{\text{пред}}$	155	131	91	90	120
W_0	14121	12735	8866	4172	1041

Таблица П2.8.

Результаты расчёта теплового импульса для плавкой вставки из натрия при изменении Ru

$R_{\text{ш}}, \text{ом}$	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	2,0	3,0
W_0	14121	7850	5616	4621	4044	2954	2610

Таблица П2.9.

Результаты расчёта теплового импульса для плавкой вставки из натрия при изменении сечения канала плавкой вставки F

F	0,018	0,025	0,029	0,034	0,039	0,044	0,05
$W_{\text{пред}}$	10	250	18	18	24	32	42

W_0	14121	14169	14199	14234	14274	14321	14374
-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

П.2.4.4. Графики зависимости теплового интеграла для плавкой вставки из ртути, калия, натрия от некоторых параметров электротехнического комплекса

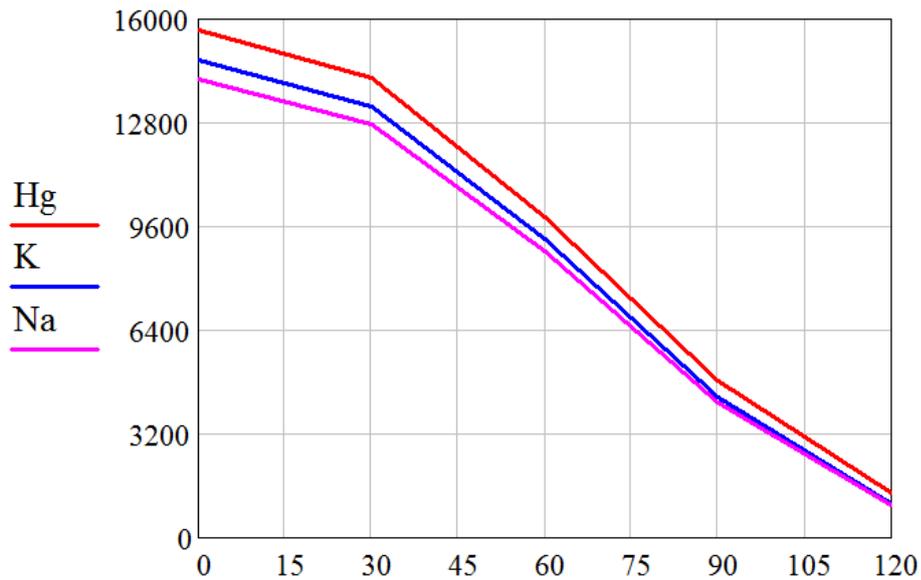


Рис. П2.12. График зависимости теплового импульса в первом полупериоде от угла Ψ для плавкой вставки из ртути, калия, натрия.

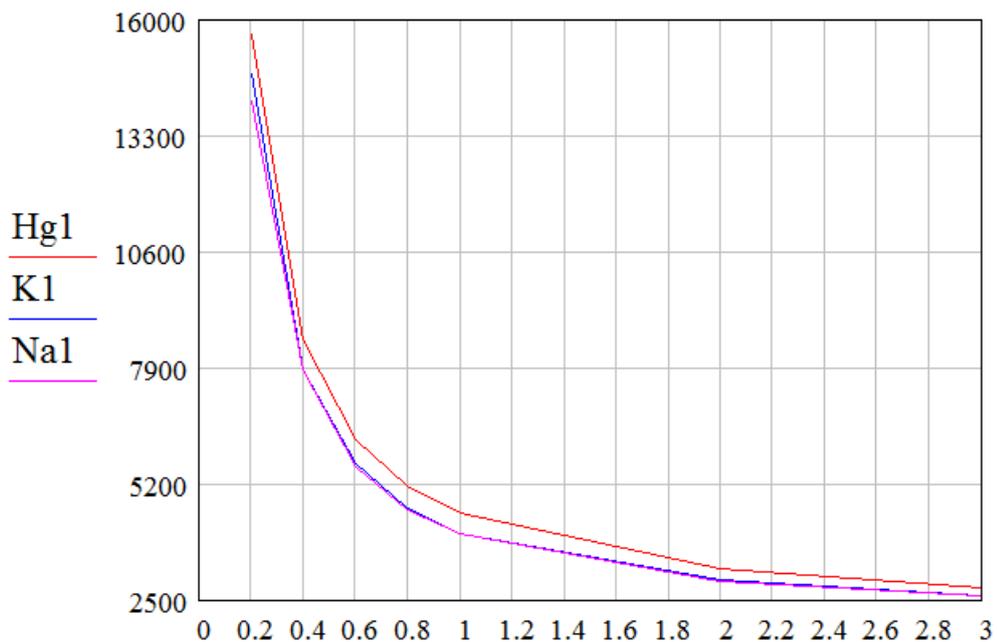


Рис. П2.13. График зависимости теплового импульса в первом полупериоде от шунтирующего сопротивления $R_{ш}$ для плавкой вставки из ртути, калия, натрия.

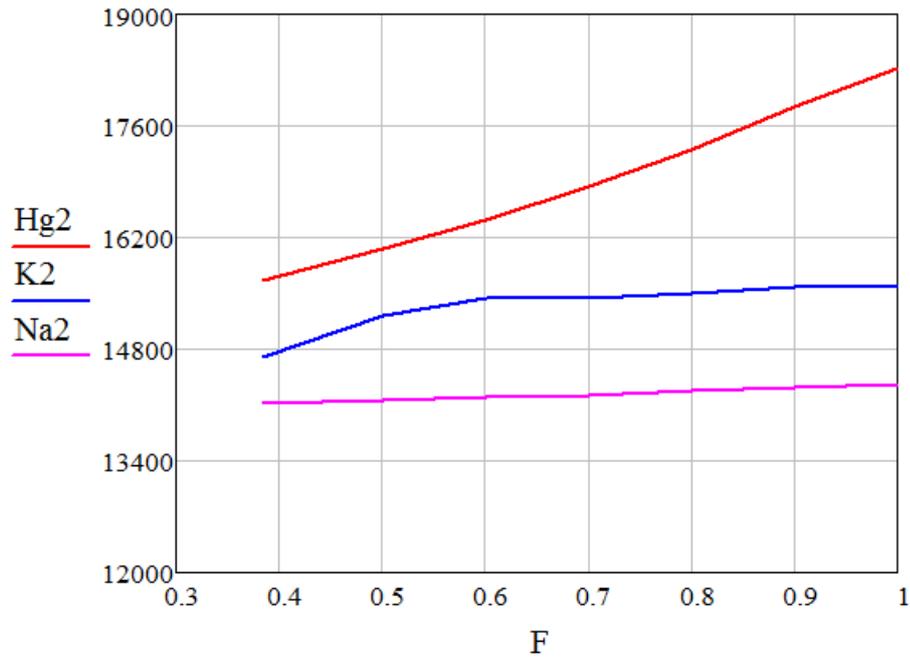


Рис. П2.14. График зависимости теплового импульса в первом полупериоде от сечения плавкой вставки F для плавкой вставки из ртути, калия, натрия.

П.2.4.5. Расчётная осциллограмма тока и пропускаемый тепловой интеграл при различных сопротивлениях электрической дуги

На рис. П2.15 и П2.16 приведены расчётные осциллограммы тока в цепи короткого замыкания и значения пропускаемого теплового интеграла при сопротивлении дуги $R_d = 10000 \text{ Ом}$ (практически - ∞) и $R_d = 0,5 \text{ Ом}$ для жидкой плавкой вставки из натрия.

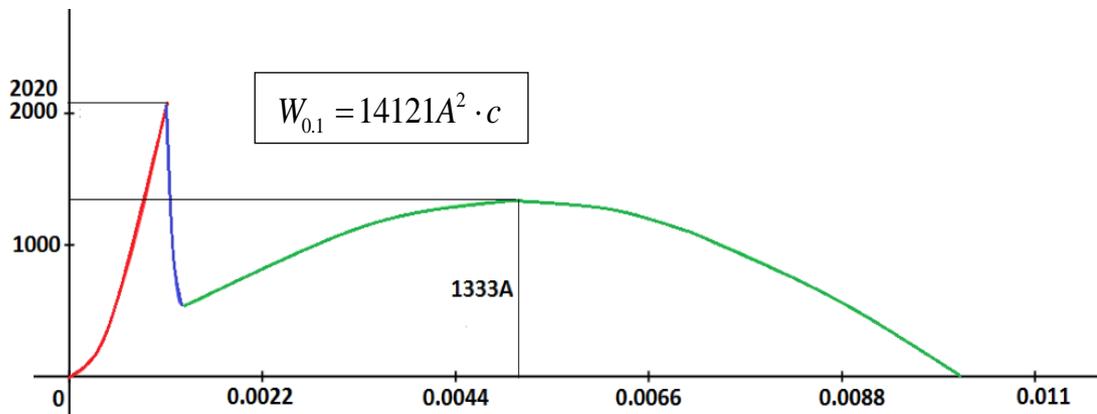


Рис. П2.15. График зависимости тока от времени в первом полупериоде при $R_d = 0,5 \text{ Ом}$.

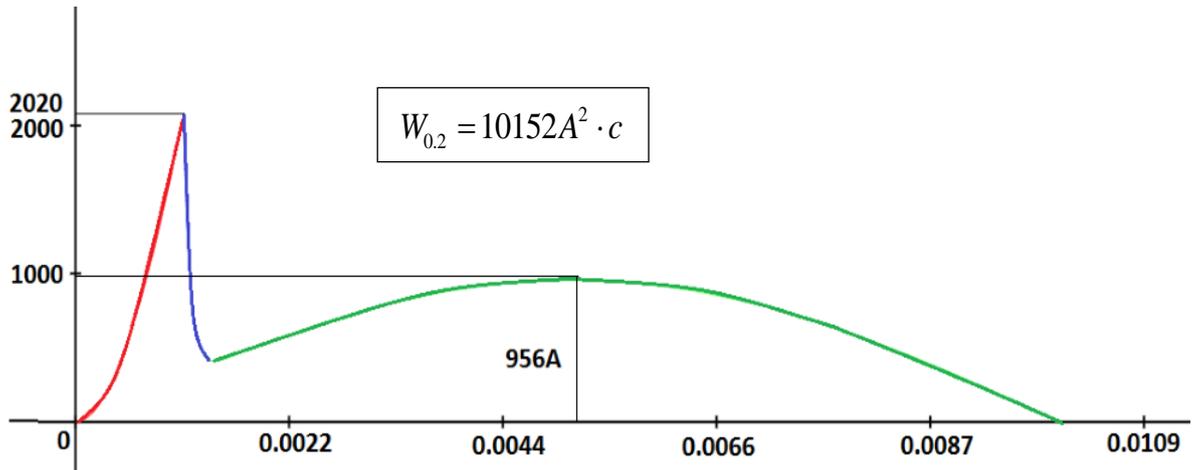


Рис. П2.16. График зависимости тока от времени в первом полупериоде при $R\partial = 10000 \text{ Ом}$.

В результате вычисления выяснено, что увеличенное шунтирующее сопротивление способствует уменьшению пропускаемого теплового импульса. Это соответствует физическому смыслу процесса, подтверждает адекватность модели.

П.3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОГРАНИЧИТЕЛЯ ТОКА

П.3.1. Исследование переходного сопротивления жидкого металла (натрий) с материалом контактного вывода (нержавеющая сталь – 08X18H10)

Для исследования переходного сопротивления жидкого металла (натрий) с материалом контактного вывода (нержавеющая сталь – 08X18H10) был разработан испытательный стенд, схема которого представлена на рисунке П3.1. Питание на стенд подаётся из пятиконтактного силового разъёма на 32 А по проводу ПВС 2х2,5. Для регулировки номинального тока в цепи используется автотрансформатор Т1 АОСН-20-220-75У4 и сварочный трансформатор Т2 ТС-500. Измерение первичного тока в цепи производится с помощью амперметра А1 Э538, включённого во вторичную цепь трансформатор тока ТА1 УТТ-5, класса точности 0,2. Класс точности амперметра 0,5. От сварочного трансформатора Т2 провода идут к концам контактных выводов ограничителя тока. Измерение вторичного тока в цепи производится с помощью амперметра А2 Э538, включённого во вторичную цепь трансформатор тока ТА2 УТТ-6М, класса точности 0,2. Падение напряжение на макете измеряется между поверхностями контактных выводов милливольтметром mV В3-38А.

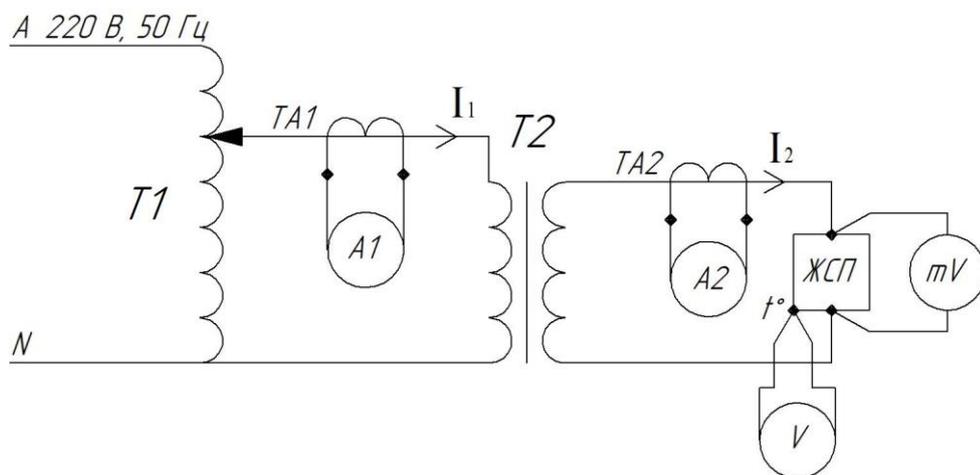


Рис. П3.1. Принципиальная схема испытательного стенда

Плавное увеличение тока I_2, A в цепи обеспечивается за счёт регулирования тока автотрансформатора и сварочного трансформатора в первичной цепи. Параметры тока отслеживаются с помощью трансформатора тока и амперметра. Ток повышается ступенями от 0 до 110 А. После повышения тока на каждой ступени делается пауза, записывается значение тока и падение напряжения на ЖСП U_{mV}, mB . Сопротивление ЖСП вычисляется делением значения падения напряжения на значение тока. После достижения током значения 110 А ток плавно снижается такими же ступенями с регистрацией тока и падения напряжения на ЖСП. Результаты измерения на каждой ступени записываются в таблицу ПЗ.1. По результатам измерения строится график зависимости сопротивления ЖСП от значения протекающего тока. См. рис. ПЗ.2.

Таблица ПЗ.1

Зависимость падения напряжения на ЖСП от тока

№	I_1, A	I_2, A	U_{mV}, mB – от 0 до $I_{НОМ}$	U_{mV}, mB – от $I_{НОМ}$ до 0
1	2	15	150	40
2	2,5	23	155	63
3	3,7	30	150	82
4	5,6	45	186	124
5	9,5	60	243	169
6	10,5	68	210	189
7	11,75	75	223	215
8	13	83	235	235
9	14	90	247	247
10	15	96	255	255
11	16	103	270	270
12	16,85	107	311	311
13	17,5	110	312	312

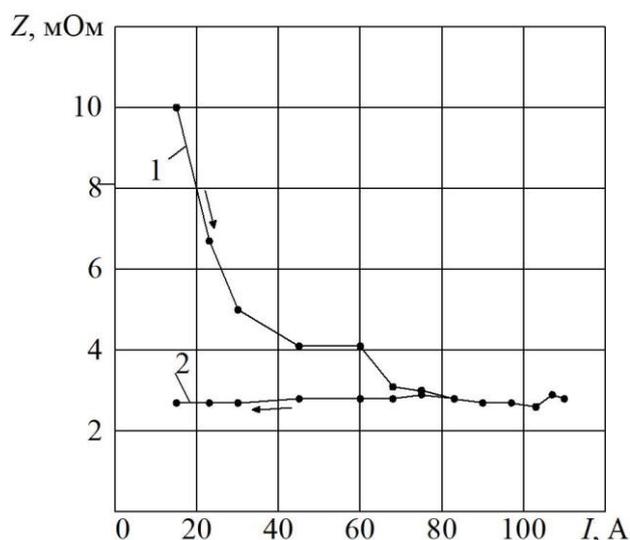


Рис. ПЗ.2. Зависимости сопротивления ЖСП от тока
 1 – зависимость при увеличении тока от 0 до 110 А;
 2 – зависимость при уменьшении тока от 110 до 0 А

Из рисунка ПЗ.2 видно, что переходное сопротивление в области малых токов довольно значительно порядка 10 мОм. С возрастанием тока сопротивление уменьшается. Это объясняется тем, что в области малых токов проводимость определяется в основном окисными и интерметаллическими плёнками, в которых при больших плотностях происходит фреттинг, приводящий к разрушению. Снижение тока ничего не изменяет в уже образовавшихся мостиках [12].

Выводы

1. Контакт натрия с нержавеющей сталью обладает переходным сопротивлением, зависящим от величины пропускаемого тока. В области малых токов проводимость определяется в основном окисными и интерметаллическими пленками, в которых при увеличении тока происходит фреттинг, приводящий к их разрушению.

2. Перед коммутационными и эксплуатационными испытаниями жидкометаллического предохранителя необходимо нагрузить его током для разрушения интерметаллических соединений и окисных пленок, свести переходное сопротивление к минимальному значению.

П.3.2. Определение номинального тока макетного образца жидкометаллического предохранителя.

Номинальный ток определяется по длительно допустимой рабочей температуре наиболее уязвимой части конструкции в установившемся температурном режиме. Наименьшая рабочая температура из всех деталей конструкции в макете соответствует текстолитовой втулке. См. рис. П1.1 и П1.6. Она изготавливается из электротехнического текстолита марки ЛТ. Диапазон рабочих температур составляет от -65 до $+85$ °С. По нагревостойкости текстолит относится к классу А [125]. Испытание на нагревание проводится по ГОСТ 2933-83 [126].

Для определения номинального тока ЖСП использовался испытательный стенд, схема которого представлена на рисунке П3.1. Температура нагрева макета отслеживается цифровым мультиметром V МУ-65 с использованием термопары К-типа, закреплённой на макете вблизи текстолитовой втулки. Температура макета ЖСП без учета поправки на температуру окружающей среды $T_{т.}$ °С и температура ЖСП $T_{т.+ос.}$ °С с учетом поправки записываются в табл. П3.2. Температура в помещении измеряется лабораторным настенным термометром.

Плавное увеличение тока $I_2, А$ в цепи обеспечивается за счёт регулирования тока $I_1, А$ автотрансформатора и сварочного трансформатора в первичной цепи. Параметры тока отслеживаются с помощью трансформатора тока и амперметра. Ток повышается ступенями. После повышения тока на каждой ступени делается пауза $t, мин$ до достижения температуры в контрольной точке установившегося значения. Результаты записываются в таблицу П3.2.

Вывод:

1. Определение номинального тока проводилось методом описанным в [126]. В результате его значение оказалось равным 110 А.

Зависимость установившегося значения температуры в контрольной точке
ЖСП от пропускаемого тока

№	I_1, A	I_2, A	$T_{Т.}, °C$	$T_{Т.+ос.}, °C$	$t, \text{мин}$
1	1,3	5	0,5	17,5	20
2	2	15	2	19	35
3	2,5	23	4	21	35
4	3,7	30	6	23	34
5	5,6	45	10,5	27,5	25
6	9,5	60	18	35	22
7	10,5	68	24	41	22
8	11,75	75	30	47,5	23
9	13	83	35	52,5	21
10	14	90	41	58,5	21
11	15	96	46	63,5	16
12	16	103	55,5	73,5	31
13	16,85	107	58	76	53
14	17,5	110	61,5	79,5	10

П.3.3. Исследование влияния шунтирующего сопротивления на интеграл дуги и энергию дуги жидкометаллического предохранителя

Исследования проводились путем проведения коммутационных испытаний. Коммутационные опыты проводились на заводе АО «Контактор» в г. Ульяновске в испытательном центре электрооборудования (ИЦЭО) в соответствии с «программой коммутационных испытаний» (см. ПЗ.5).

Для исследования использовались плавкие вставки из медной проволоки в открытом пространстве. Сечение плавкой вставки выбиралось таким, чтобы расчетный преддуговой интеграл W_m был приближен к значению расчетного преддугового интеграла ЖСП с плавкой вставкой из натрия W_m .

$$W_{\text{прд.м.}} = W_{\text{прд.н.}}$$

Или

$$A_{\text{м.}} \cdot S_{\text{м.}}^2 = A_{\text{н.}} \cdot S_{\text{н.}}^2,$$

где $A_m = 91600 \frac{\text{Дж}}{\text{Ом} \cdot \text{мм}^4}$, $A_n = 18000 \frac{\text{Дж}}{\text{Ом} \cdot \text{мм}^4}$, S_m – сечение плавкой вставки из меди, S_n – сечение плавкой вставки из натрия $0,39572 \text{ мм}^2$.

Отсюда:

$$S_m = \sqrt{\frac{A_n \cdot S_n^2}{A_m}}. \quad (\text{П3.1})$$

Постоянная A для медной плавкой вставки находится из справочных данных [127]. Постоянная A для плавкой вставки из натрия находится из справочных данных [12].

С учетом найденных значений $S_m = 0,17542 \text{ мм}^2$. Это значение соответствует диаметру $d_m = 0,473 \text{ мм}$, ближайшее стандартное значение диаметра проволоки $0,5 \text{ мм}$.

Ниже на рис. П3.3 приведено две осциллограммы срабатывания медной плавкой вставки с разными шунтирующими сопротивлениями. По ним можно наглядно увидеть, что при снижении значения шунтирующего сопротивления увеличивается ток дуги, время горения дуги. Результаты обработки осциллограмм представлены графиком зависимости интеграла дуги и энергии дуги от значения шунтирующего сопротивления.

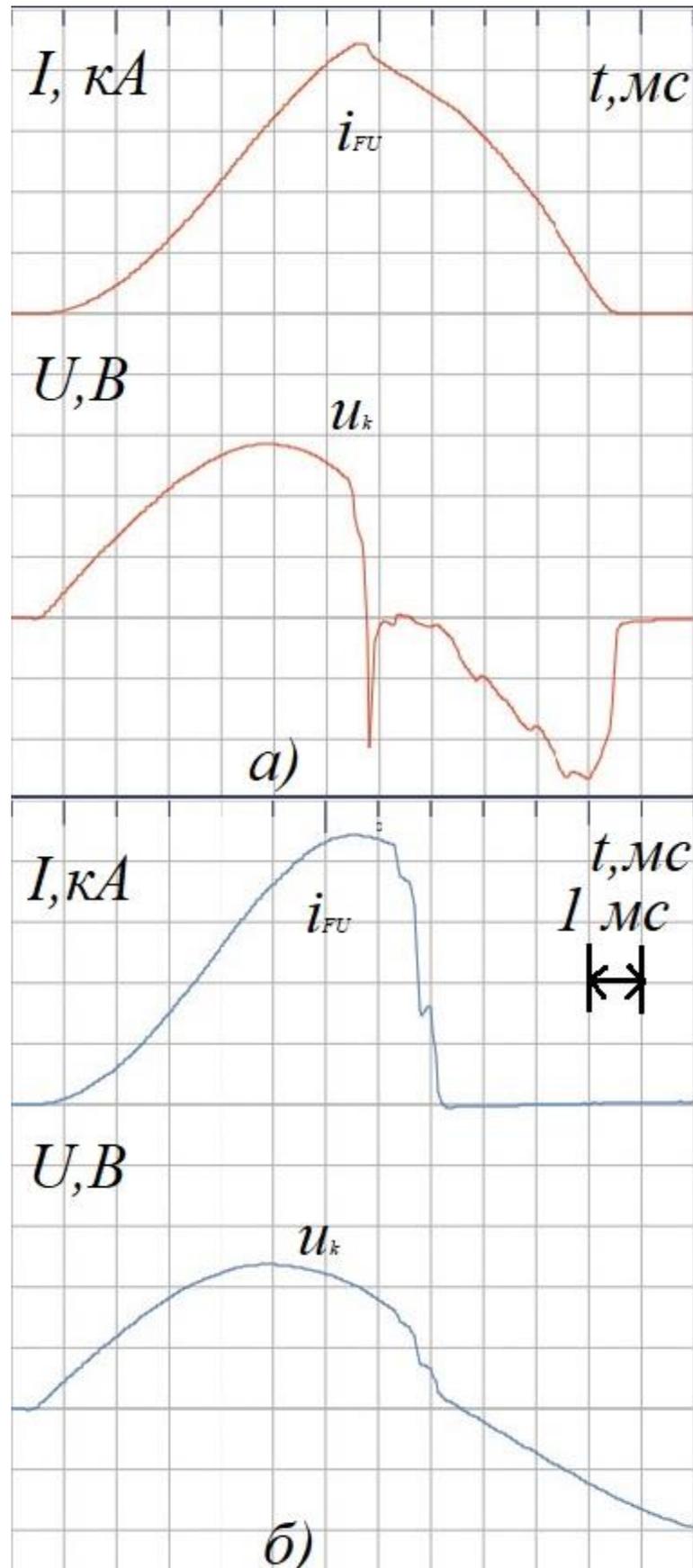


Рис. ПЗ.3. Опыт с плавкой вставки из меди.

а) $R_{ui} = \infty \text{ Ом}$, $t_{np\partial} = 5,8349 \text{ мс}$, $t_{\partial} = 5,186 \text{ мс}$; б) $R_{ui} = 0,05 \text{ Ом}$, $t_{np\partial} = 6,87 \text{ мс}$, $t_{\partial} = 1,271 \text{ мс}$.

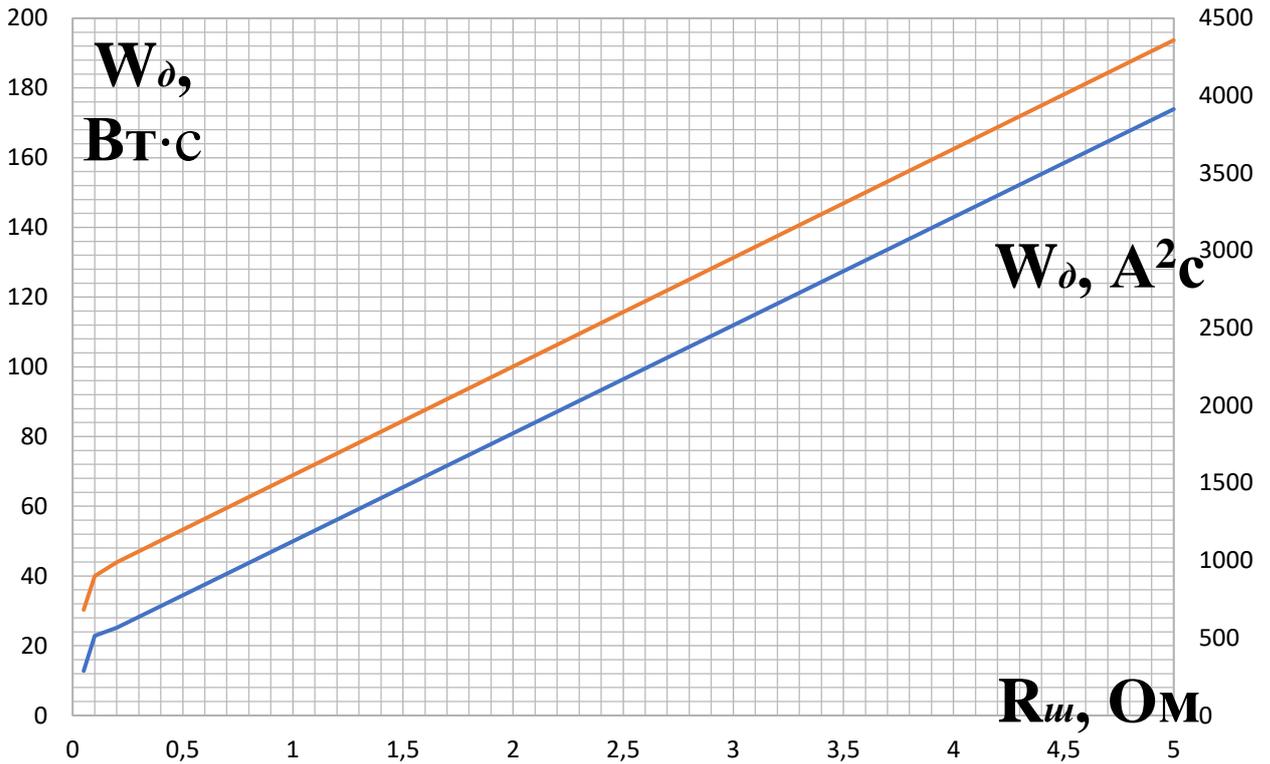


Рис. ПЗ.4. Зависимость интеграла дуги (синяя кривая) и энергии дуги (оранжевая кривая) от значения шунтирующего сопротивления

Из графика следует что интеграл дуги без шунтирующего сопротивления $W_{д} = 3913 A^2c$, интеграл дуги при $R_{ш}=0,2$ Ом $W_{д} = 566 A^2c$, интеграл дуги при $R_{ш}=0,1$ Ом $W_{д} = 515 A^2c$, интеграл дуги $R_{ш}=0,05$ Ом $W_{д} = 287 A^2c$. Энергия дуги уменьшается, без шунтирующего сопротивления энергия дуги $W_{д} = 193,7$ Вт·с, энергия дуги при $R_{ш}=0,2$ Ом $W_{д} = 43,9$ Вт·с, энергия дуги при $R_{ш}=0,1$ Ом $W_{д} = 40$ Вт·с, энергия дуги при $R_{ш}=0,05$ Ом $W_{д} = 30,3$ Вт·с.

Выводы

1. Снижение величины шунтирующего сопротивления довольно значительно влияет на уменьшение интеграла дуги и энергию дуги. При изменении сопротивления от бесконечности до значения 0,05 Ом интеграл дуги и энергия дуги уменьшаются на 92,66 %.

2. Применение шунтирующего сопротивления необходимо для увеличения коммутационного ресурса жидкометаллического предохранителя, вызванного дуговой эрозией диэлектрического канала.

П.3.4. Коммутационные испытания ограничителя тока на основе жидкометаллического предохранителя.

Коммутационные испытания макетного образца ЖСП (рис. П1.1) проводились в испытательном центре электрооборудования (ИЦЭО) в соответствии с «программой коммутационных испытаний» (см. П3.5). При следующих параметрах цепи короткого замыкания:

$$X = 0.1727 \text{ Ом} (0,00055 \text{ Гн});$$

$$R = 0.115 \text{ Ом};$$

$$\cos\varphi = 0,554;$$

$$U_c = 235 \text{ В};$$

Ожидаемый ударный ток: 1,85 кА.

При испытаниях моделировалось ограничение тока короткого замыкания. Для чего через ЖСП пропусклась одна полуволна тока короткого замыкания, угол включения 0 градусов. Для того, чтобы обеспечить угол включения 0 градусов и отключение тока короткого замыкания при первом естественном переходе через нулевое значение было использовано устройство собственной разработки. Устройство состоит из тиристорного блока и блока управления тиристорами (рис. П3.5).

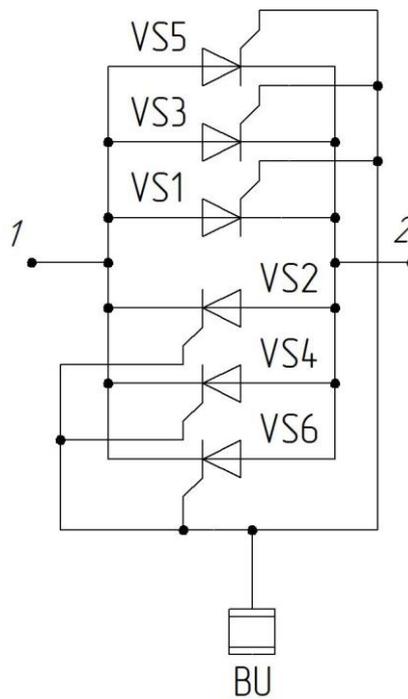


Рис. ПЗ.5. Устройство управления током короткого замыкания.
 VS1 – VS6 – тиристорный блок; BU – блок управления тиристорным блоком; 1,2 – зажимы.

Тиристорный блок позволяет включать в два, четыре и шесть тиристоров для увеличения пропускаемого тока короткого замыкания. Блок управления тиристорным блоком позволяет регулировать длительность времени короткого замыкания интервалом времени один, два, три полупериода.

При опытах регистратором аварийных процессов ПАРМА РП4.06М через трансформаторы тока ТНШЛ 4000/5 регистрировалась величина тока в цепи i_k , величина тока в цепи шунтирующего сопротивления i_{SH} , величина тока в цепи ЖСП i_F , величина напряжения питания U , величина напряжения короткого замыкания U_k . См. рис. ПЗ.6 и ПЗ.7. В одном контуре и с одним макетом было произведено 9 опытов. Опыты проводились при различных значениях начального давления жидкого металла, создаваемого пружинным механизмом (см. рис. ПЗ.13) при значении шунтирующего сопротивления 0,1 Ом. Осциллограмма опыта с минимальным начальным давлением приведена на рис. ПЗ.6. Из осциллограммы видно, что при низком начальном давлении 0,25 мПа ток дуги изменяется значительно во время дуговой стадии процесса. Это говорит о том,

что сопротивление электрической дуги не стабильно и имеет сравнительно большое значение. Возникает его значительное снижение во время дуговой стадии процесса от начала возникновения до естественного перехода тока короткого замыкания через ноль.

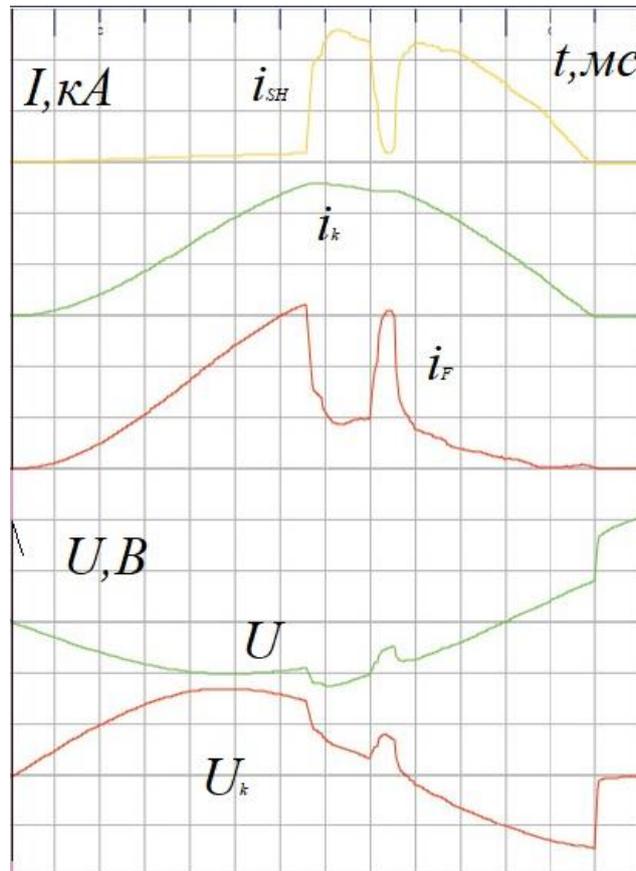


Рис. ПЗ.6. Осциллограмма опыта №1

Одна из осциллограмм срабатывания ЖСП при начальном давлении 1,75 мПа (опыт №3) приведена на рис. ПЗ.7. Из осциллограммы видно, что ток короткого замыкания сначала течет через ЖСП. А затем в момент, соответствующий испарению плавкой вставки, начинает переключаться в цепь шунтирующего сопротивления. Через ЖСП ток резко ограничивается. К моменту окончания переключения ток в цепи ЖСП значительно снижается, а в цепи короткого замыкания увеличивается до заданного значения, гашение электрической дуги происходит после естественного перехода тока через нулевое значение.

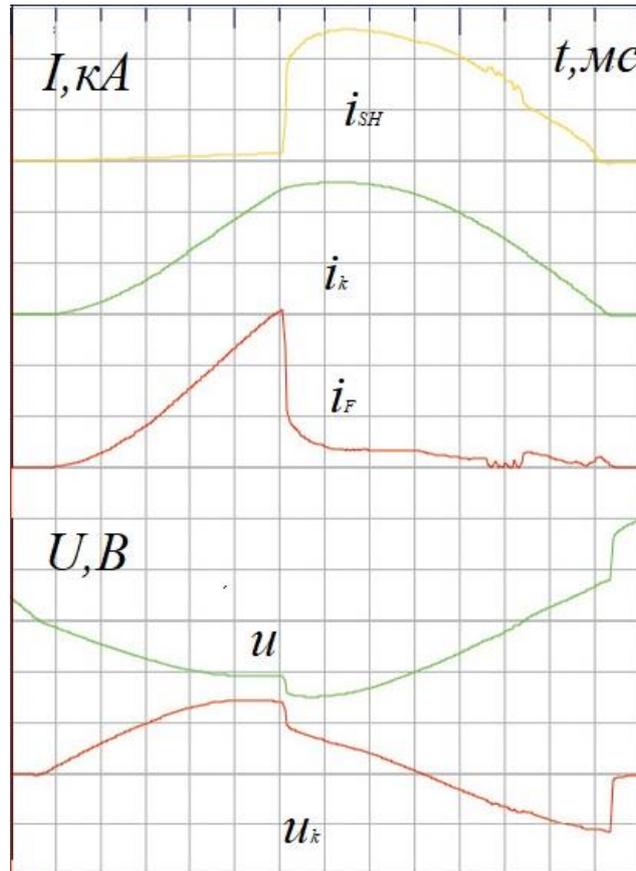


Рис. ПЗ.7. Осциллограмма опыта №3

Анализ осциллограмм (См. рис ПЗ.6, ПЗ.7) показывает, что при более высоких начальных давлениях чем 0,25 мПа ток дуги снижается, что говорит об увеличении сопротивления. Сопротивление электрической дуги увеличивается и стабильно на протяжении всей стадии дугового процесса. Минимальное начальное давление для стабилизации дугового процесса по данным эксперимента составило 1,75 мПа. Это подтверждается результатами обработки осциллограмм опытов.

Результаты обработки осциллограмм приведены в таблицах ПЗ.3, ПЗ.4, ПЗ.5.

Результаты обработки осциллограмм опытов макетного образца ЖСП при включении в цепь короткого замыкания с шунтирующее сопротивление $R_{ш} = 0,1$

Ом.

№ опыта	Время преддугового этапа $t_{прд}$, с	Время паровой пробки Δt_2 , с	Время дугового этапа Δt_3 , с	Ток обрыва $I_{с,1}$, А	Напряжение зажигания электрической дуги $U_{заж}$, В	Давление на сильфон $P_{нач}$, $\frac{кг}{см^2}$ (МПА)
1	0,006320	0,000103	0,006458	1610	84	2,54 (0,25)
2	0,003142	0,000069	0,009514	550,4	122	12,73 (1,25)
3	0,005049	0,000172	0,007248	1330	88	17,82 (1,75)
4	0,004397	0,000103	0,00814	985,6	131	17,82 (1,75)
5	0,006011	-	0,006046	1450	-	19,1 (1,873)
6	0,006835	-	0,006046	1670	-	19,1 (1,873)
7	0,006046	-	0,006835	1500	-	19,1 (1,873)
8	0,00698	-	0,005917	1640	-	19,1 (1,873)
9	0,003125	-	0,009756	652	-	19,1 (1,873)

Зависимость интеграла дуги от начального давления жидкого металла.

№ опыта	Преддуговой интеграл $W_{прд.}, A^2c$	Интеграл дуги $W_{д.}, A^2c$	Давление на сильфон $\frac{кг}{см^2}$ $P_{нач}, см^2$ (МПА)
1	5579	2323	2,54 (0,25)
2	317,3	1145	12,73 (1,25)
3	3098	218	17,82 (1,75)
4	1424	986	17,82 (1,75)

На основе обработки осциллограммы опытов №1 и №3 получены вольт-амперные характеристики (ВАХ) дуги в парах натрия (рис.П.3.8 и рис.П.3.9). Они имеют динамический характер. При расчете ВАХ дуги линейная аппроксимация зависимости тока дуги от времени проводилась на бесконечно малых участках времени.

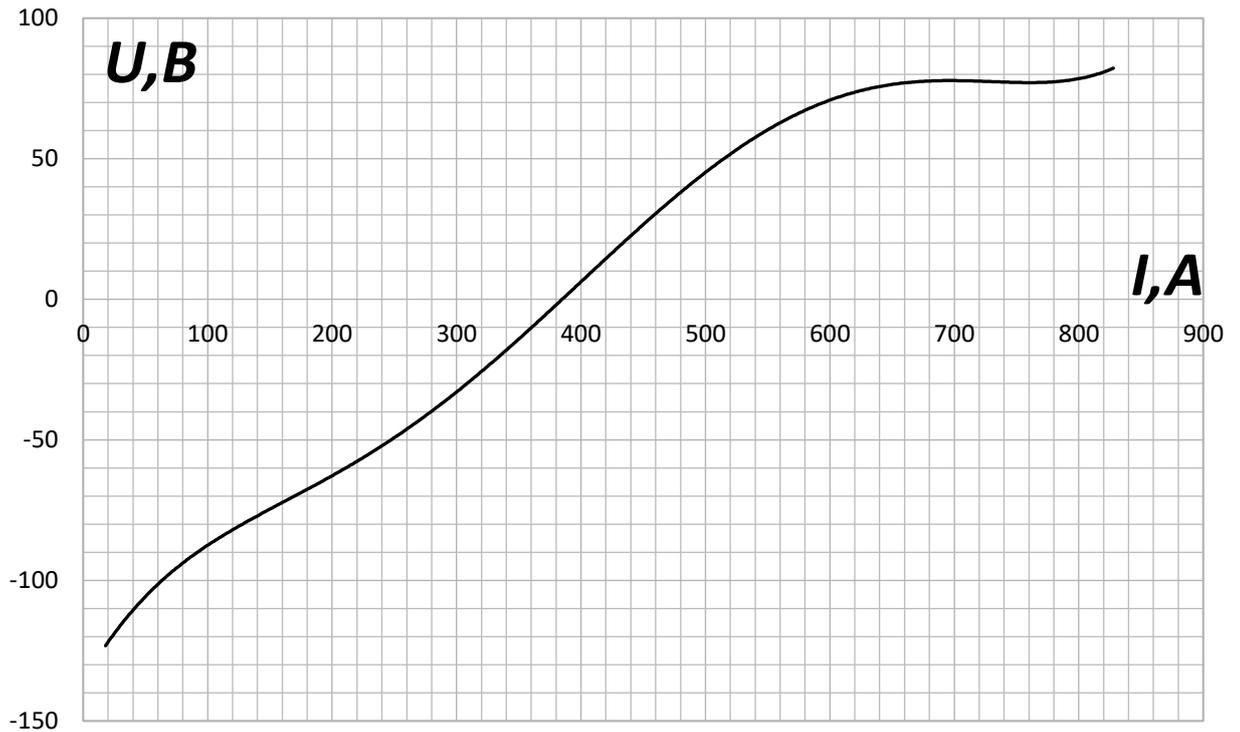


Рис. ПЗ.8. Воль-амперная характеристика электрической дуги в парах натрия полученная экспериментальным путём (опыт 1)

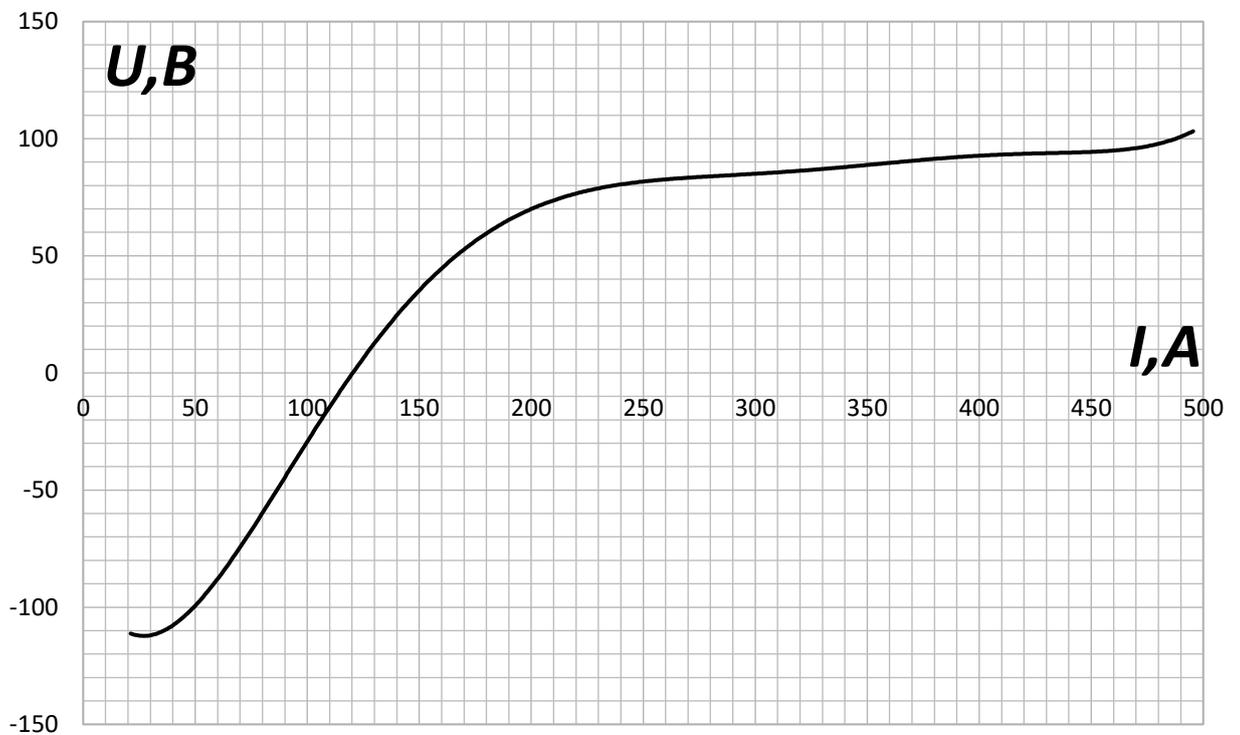


Рис. ПЗ.9. Воль-амперная характеристика электрической дуги в парах натрия полученная экспериментальным путём (опыт 3)

На основании анализа осциллограмм (рис. ПЗ.8 и рис. ПЗ.9) в табл. ПЗ.5. представлена расчетная зависимость сопротивления дуги на интервалах усреднения 0,5 мс.

Таблица ПЗ.5

Значение сопротивления на интервалах разбиения времени горения
электрической дуги

$R_{\partial,1}$	$R_{\partial,2}$	$R_{\partial,3}$	$R_{\partial,4}$	$R_{\partial,5}$	$R_{\partial,6}$	$R_{\partial,7}$	$R_{\partial,8}$	$R_{\partial,9}$	$R_{\partial,10}$	$R_{\partial,11}$	$R_{\partial,12}$	$R_{\partial,13}$	$R_{\partial,14}$
Опыт №1 ($P_{нач}=0,25$ МПА), мОм													
-	108	99	62	34	35	127	295	506	898	3112	4711	3398	2763
Опыт №3 ($P_{нач}=1,75$ МПА), мОм													
275	360	363	285	179	56	177	362	1464	4987	724	1276	3154	2174

Полученные экспериментальные данные использованы для проверки адекватности разработанной математической модели (см гл.3). Результат показал, что модель адекватна.

Выводы

1. Экспериментально получены осциллограммы срабатывания ограничителя тока включая преддуговую и дуговую стадии коммутационного процесса жидкометаллического предохранителя, зашунтированного активным сопротивлением 0,1 Ом.

2. При низком начальном давлении 0,25 мПА сопротивление электрической дуги не стабильно и имеет сравнительно большое значение. Возникает его значительное снижение во время дуговой стадии процесса от начала возникновения до естественного перехода тока короткого замыкания через ноль.

3. При более высоких начальных давлениях сопротивление электрической дуги увеличивается и стабильно на протяжении всей стадии дугового процесса. Минимальное начальное давление для стабилизации дугового процесса по данным эксперимента составили 1,75 мПА.

4. Обработка осциллограмм позволила представить вольт амперную характеристику дуги и значение сопротивления на интервалах разбиения времени горения электрической дуги. Полученные зависимости могут быть использованы как исходные данные для разработанной модели процесса срабатывания ограничителя тока на основе ЖСП (см. п. 3).

5. Проведен сравнительный анализ экспериментальных и расчетных осциллограмм. Анализ показал полное совпадение результатов с учетом полученных экспериментальных данных.

П.3.5. Программа коммутационных испытаний ограничителя тока

Цель испытаний.

1. Экспериментально получить осциллограммы преддуговой и дуговой стадии коммутационного процесса плавких вставок, зашунтированных активным сопротивлением (0,05; 0,1; 0,2 Ом)

2. Провести сравнительный анализ экспериментальных и расчетных осциллограмм.

Для испытаний предоставляются.

1. Блок крепления плавкой вставки из меди и шунтирующего сопротивления с выводами для болтового присоединения к испытательному контуру (рис. ПЗ. 11).

2. Блок крепления макета ограничителя тока с жидкометаллической плавкой вставкой из натрия и шунтирующего сопротивления с выводами для болтового присоединения к испытательному контуру.

3. Дополнительный блок для создания начального давления жидкого металла (от 0 до 1,9 МПа) в виде пружинного механизма (рис. П.3.12).

4. Сменные плавкие вставки из меди 10 шт.

5. Сменные шунтирующие сопротивления (0,05; 0,1; 0,2 Ом). См. рис. ПЗ.13.

6. Макет ограничителя тока с жидкометаллической плавкой вставкой из натрия (рис. П1.1).

Схема испытания представлена на рисунке П3.10.

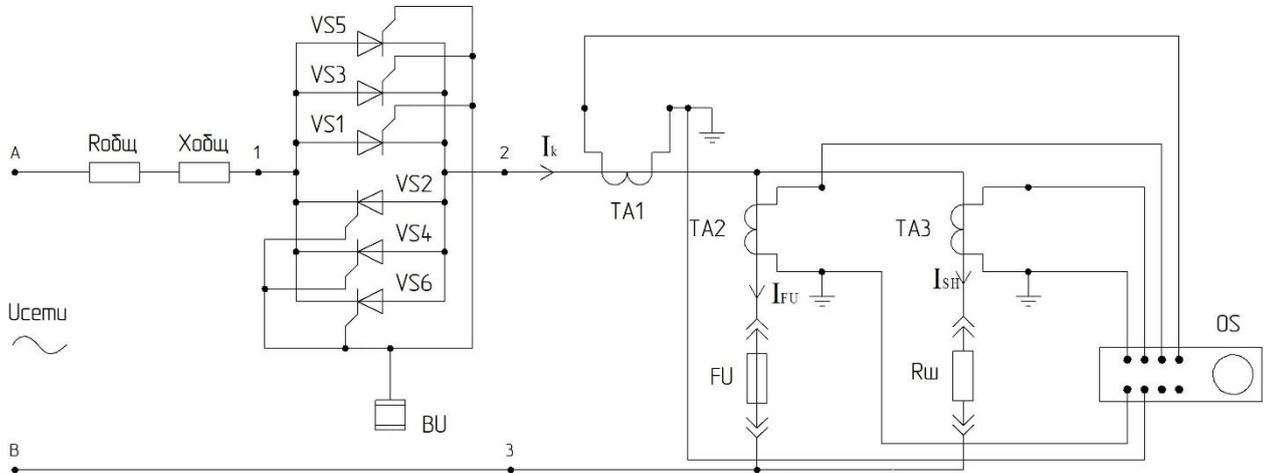


Рис. П3.10. Схема для проведения коммутационных испытаний:

$U_{сети}$ – напряжение сети; $R_{общ}$, $X_{общ}$ – активное и индуктивное сопротивление сети короткого замыкания; TA1 – трансформатор тока для измерения тока короткого замыкания в общей цепи; TA2 – трансформатор тока для измерения тока в цепи плавкой вставкой (ограничителя тока); TA3 – трансформатор тока для измерения тока в цепи шунтирующего сопротивления; FU – плавкая вставка (ограничитель тока); $R_{ш}$ – шунтирующее сопротивление; OS – осциллограф.

Требования к испытательному контуру.

1. Угол включения тока короткого замыкания - ноль градусов.
2. Время отключения тока короткого замыкания – момент первого естественного перехода тока через ноль.

3. Параметры цепи короткого замыкания:

$X = 0.1727 \text{ Ом}$ ($0,00055 \text{ Гн}$);

$R = 0.115 \text{ Ом}$;

$\cos\varphi = 0,554$;

$U_c = 235 \text{ В}$;

Ожидаемый ударный ток: 1,85 кА.

4. Контролировать осциллографом.

- Ток через плавкую вставку.
- Ток через шунтирующее сопротивление.
- Ток в цепи короткого замыкания.
- Падение напряжение на параллельном соединении плавкой вставки и

шунтирующем сопротивлении.

Настройка контура.

- Провести опыт при закоротке вместо плавкой вставки и параллельного шунтирующего сопротивления. Длительность тока короткого замыкания 0,1 с.

- Провести 3 опыта при отсутствии в цепи плавкой вставки и наличии контуре шунтирующего сопротивления (0,05; 0,1; 0,2 Ом). Длительность тока короткого замыкания 0,1 с.

- Провести 3 опыта при закоротке вместо плавкой вставки и наличии контуре шунтирующего сопротивления (0,05; 0,1; 0,2 Ом). Длительность тока короткого замыкания 0,1 с.

Таблица ПЗ.6

Испытания плавких вставок.

Номер опыта	Материал плавкой вставки	Значение шунтирующего сопротивления (Ом)	Начальное давление жидкого металла (МПА)
1.	Медь	∞	
2.	Медь	0,05	
3.	Медь	0,1	
4.	Медь	0,2	
5.	Натрий	0,1	0,25
6.	Натрий	0,1	1,25
7-8.	Натрий	0,1	1,75
9-13.	Натрий	0,1	1,873

Итого 13 опытов в одном контуре.

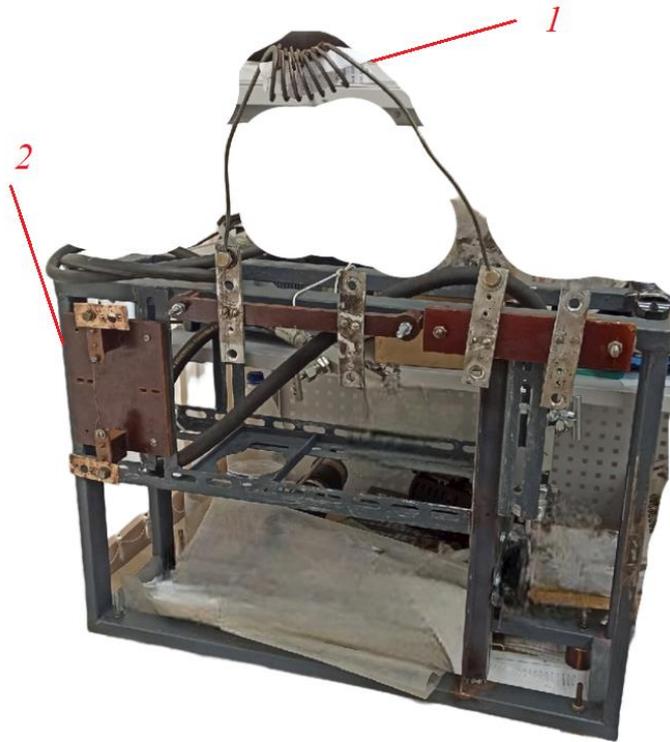


Рис. ПЗ.11. Блок крепления плавкой вставки из меди и шунтирующего сопротивления с выводами для болтового присоединения к испытательному контуру: 1 – шунтирующее сопротивление; 2 – блок для крепления плавких ставок

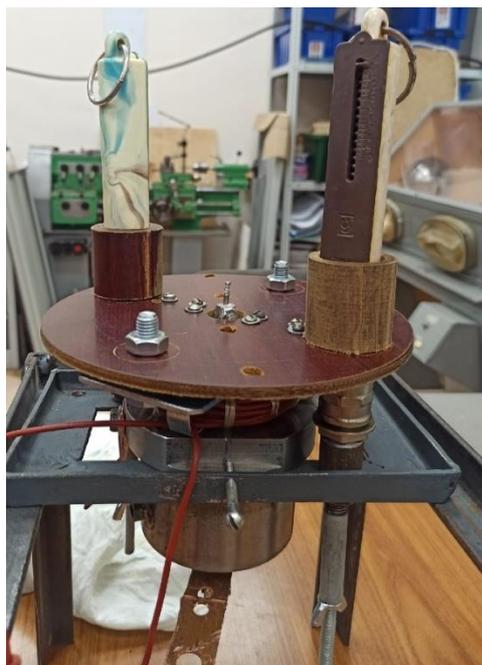


Рис. ПЗ.12. Пружинный блок установленный на макете ЖСП

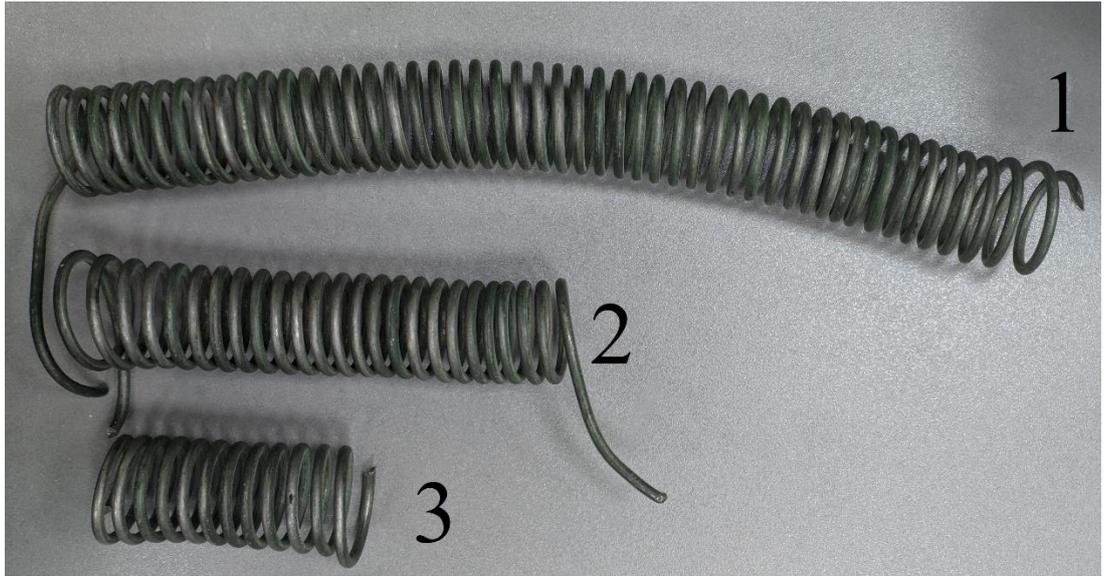


Рис. ПЗ.13. Сменные шунтирующие сопротивления.
1 – 0,2 Ом, 2 – 0,1 Ом, 3 – 0,05 Ом.

II.4. ДОКУМЕНТЫ О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение
высшего образования
«УЛЬЯНОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(УлГТУ)
Северный Венец ул., д.32,
г.Ульяновск, 432027, Россия
Тел.: (8422) 43-06-43; факс (8422) 43-02-37
e-mail: rector@ulstu.ru <http://www.ulstu.ru>
ОКПО 02069378, ОГРН 1027301160226
ИНН/КПП 7325000052/732501001

На 21.10.2022 № 1746/19-02
от _____

УТВЕРЖДАЮ:
Ректор УлГТУ

Н.Г. Ярушкина

«12» _____ 10 2022 г.



АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы Юренкова Ю.П.
«Совершенствование ограничителей тока на основе жидкометаллических
самовосстанавливающихся предохранителей в системах электроснабжения до 1
кВ» в учебном процессе

Мы, нижеподписавшиеся, заведующий кафедрой «Электроснабжение», доктор технических наук, профессор Кузнецов А.В. и декан энергетического факультета, кандидат технических наук, доцент Дубов А.Л. составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы соискателя Юренкова Ю.П. внедрены: в лабораторные работы по дисциплинам «Электроснабжение», «Релейная защита и автоматика» для бакалавров направления «Электроэнергетика и электротехника» (профиль «Электроснабжение») 13.03.02; в практические работы по дисциплине «Электрические аппараты в электроэнергетических системах» для магистрантов направления «Электроэнергетика и электротехника» (профиль «Электроэнергетические системы, сети, их режимы, устойчивость и надежность») 13.04.02.

Заведующий кафедрой
«Электроснабжение»

А.В.Кузнецов

Декан энергетического факультета

А.Л. Дубов



АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО

«ПРОМЕТЕЙ»

Россия, 432071 г. Ульяновск, ул. Крымова, 67, тел. 8 9510 97 29 05

УТВЕРЖДАЮ:

Генеральный директор
Акционерного общества
«Прометей»

Ю.П. Свиридов
« 13 » 2022 г.



АКТ

Об использовании результатов диссертационной работы
Юренкова Юрия Петровича

«Совершенствование ограничителей тока на основе жидкометаллических самовосстанавливающихся предохранителей в системах электроснабжения до 1 кВ», представленной на соискание учёной степени кандидата технических наук.

Мы, нижеподписавшиеся, технический директор АО «Прометей» Царёв А. А. и заместитель генерального директора Попов А. А., составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы соискателя Юренкова Ю.П. в виде программы (Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ 2021616865 Российская Федерация. Расчет процесса короткого замыкания в сети с жидкометаллическим самовосстанавливающимся ограничителем тока [Текст] /Ю.П. Юренков (RU), А.В. Кузнецов (RU); заявитель и правообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ульяновский государственный технический университет» (RU). – №2021616020; заявл. 21.04.2021; опубл. 28.04.2021.– 1 с.) использованы при расчёте уставок релейной защиты в системе электроснабжения АО «Прометей».

Использование программы позволяет уменьшить время расчёта уставок релейной защиты, повысить точность расчёта и надежность системы электроснабжения.

Технический директор
АО «Прометей»
Заместитель генерального
директора АО «Прометей»

Царёв А. А.

Попов А. А.