

На правах рукописи



Юренков Юрий Петрович

Специальность: 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Самара – 2022

Работа выполнена на кафедре «Электроснабжение» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ульяновский государственный технический университет».

Научный руководитель:

Кузнецов Анатолий Викторович,
доктор технических наук, старший научный сотрудник, профессор, заведующий кафедрой «Электроснабжение» Ульяновского государственного технического университета

Официальные оппоненты:

Соснина Елена Николаевна,
доктор технических наук, профессор кафедры «Электроэнергетика, электроснабжение и силовая электроника» ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева»

Киреев Кирилл Владимирович,
кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретическая и общая электротехника» ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»

Ведущая организация:

ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова» (г. Новочеркасск)

Защита диссертации состоится «28» февраля 2023 г. в 12 часов на заседании диссертационного совета 24.2.377.06 по адресу: 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, Самарский государственный технический университет, Главный корпус, ауд. 200.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Самарского государственного технического университета (ул. Первомайская, 18) и на сайте ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» <http://d24237706.samgtu.ru/>

Отзывы по данной работе в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: Россия, 443100, Самара, ул. Молодогвардейская 244, Главный корпус, Самарский государственный технический университет, ученому секретарю диссертационного совета 24.2.377.06; факс: (846) 278-44-00, e-mail: a-ezhova@yandex.ru

Автореферат разослан « » _____ 2023 г.

Учёный секретарь диссертационного
совета 24.2.377.06
кандидат технических наук



Е.В. Стрижакова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Важнейшим требованием к системам электроснабжения является высокая надежность, 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 все 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. Повышенные требования к отключающей способности коммутационной аппаратуры еще более возрастают.

Вполне возможно, что предельная отключающая способность коммутационной аппаратуры в ряде случаев будет не достаточной, не позволит включать на параллельную работу дополнительные источники питания, силовые трансформаторы, линии электропередач. Одним из вариантов решения проблемы является применение ограничителей тока. Большая протяженность 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). Их применение позволяет применять не дорогие упрощенные автоматические выключатели с пониженной отключающей способностью.

Значительный вклад в разработку теоретических основ разработки и применения токоограничивающих устройств на основе ЖСП внесли такие ученые как Андреев В.А., Васильев Б.Н., Воронин А.А., Крежевский Ю.С., Кужеков С.Л., Кузнецов А.В., Кулаков П.А., Куров Н.Н., Лавриненко А.И., Приходченко В.И., Танаев В.В. Среди зарубежных авторов, прежде всего, следует выделить труды таких исследователей, как Бергер В., Вада Ю., Ито Т., Крацшмар А., Кремерс У., Минчжэ Р., Миямото Т., Ниаеш К., Хуарен В.

К сожалению, 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 совершенствованием ограничителей тока на основе ЖСП в системах

электроснабжения напряжением до 1 кВ, их структурным и параметрическим синтезом является 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 системы электроснабжения 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.

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 ученых:

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 расчетов. 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».

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении аргументирована актуальность темы исследования, определена цель диссертационной работы, сформулированы задачи, определен круг решаемых задач, изложена краткая аннотация работы в целом.

В первой главе показано, что 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. В этой связи возрастают требования к надежности систем электроснабжения, обусловленной тепловым разрушающим воздействием на элементы электрической сети за время от возникновения тока короткого замыкания до его отключения средствами релейной защиты.

Проведен анализ способов повышения надежности систем электроснабжения при коротких замыканиях. 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 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 системы электроснабжения связано с излишним расходом материалов: меди, алюминия, драгоценных и полудрагоценных металлов. Это увеличивает металлоемкость сети, приводит к необходимости применять усложненные конструкции коммутационных аппаратов на участках защищаемой сети. В конечном счете увеличивается инвестиционная составляющая в системы электроснабжения. Завышение инвестиционной составляющей в СЭС напряжением до 1 кВ по отношению к общим затратам на производство и передачу электроэнергии достигает 2,7 %. Избежать этого можно применением устройств ограничения токов короткого замыкания.

Конструкций токоограничивающих устройств достаточно много. Часть из них производится в РФ и за рубежом и широко применяются 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.

Проведен анализ токоограничивающих устройств, в результате которого выяснено, что применение традиционных токоограничивающих устройств (автоматические выключатели) для проектируемых и вновь разрабатываемых систем электроснабжения (Smart Grid) низкого напряжения в ряде случаев не обеспечивает ограничение токов короткого замыкания до необходимого уровня.

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

Во второй главе проведен анализ состояния исследований в области разработки ограничителей тока на основе жидкометаллических самовосстанавливающихся предохранителей. Показано, что высокое быстроедействие и отличные токоограничивающие свойства ЖСП вызывают интерес в разработке и использованию ЖСП для ограничения токов короткого замыкания в системах электроснабжения. Рассмотренные известные на сегодняшний день варианты конструкций ЖСП разделяются на две основные группы с полным преобразованием плавкого элемента и с частичным преобразованием плавкого элемента.

У первого типа конструкции в канале диэлектрической втулки используется относительно небольшой объем 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.

Вопросом создания ЖСП первой конструкции занимались японские ученые ещё в начале 70-х годов прошлого века из компании «Мицубиси дэнки» и назвали его Power Permanently Fuse (PPF). Имеются результаты исследований, полученные в Ульяновском государственном техническом университете. Кроме уже названных исследовательских групп, исследованием данного типа конструкции занимались ученые из г. Новочеркаска, Украины, Германии.

Вопросом создания второго типа конструкции занимались в СамГТУ. С 2000 годов к исследованиям подключилась немецкая фирма по производству низковольтного электротехнического оборудования и средств автоматизации Moeller GmbH, основанная в 1899 году в г. Кёльне. Последние 10 лет в

исследовании активизировались ученые из Китая. Также имеются публикации ученых из Ирана, Словении.

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 желательнее отдать предпочтение металлам с низким удельным сопротивлением - щелочным металлам.

Приведены результаты коммутационных испытаний ограничителей тока, полученные различными инициативными группами ученых. Их анализ подтверждает хорошие токоограничивающие свойства и работоспособность токоограничителей в СЭС напряжением ниже 1 кВ.

Выяснено, что существенным недостатком всех конструкции является то, что во время коммутационного процесса канал диэлектрической втулки ЖСП подвергается дуговой эрозии при каждом срабатывании. Диаметр канала диэлектрической втулки из керамики на основе окиси бериллия увеличивается. Это равносильно увеличению диаметра плавкой вставки.

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. Коммутационный ресурс может быть увеличен за счет 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. Однако сведений об их использовании в настоящее время не обнаружено.

Коммутационный ресурс ЖСП может повышаться не только использованием материалов с повышенной стойкостью к воздействию электрической дуги. Он повышается как конструктивными, так и схемными решениями. Схемное решение предполагает шунтирование ЖСП низкоомным резистором, которое уменьшает энергию, выделенную в канале ЖСП во время дуговой стадии процесса. Часть энергии поглощается и рассеивается шунтирующим сопротивлением.

На рисунке 1. а, представлена упрощенная модель предохранителя с повышенным коммутационным ресурсом. 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.

Торцевая часть электрода в месте контакта с жидким образует участок подобный узкому перешейку в обычной плавкой вставке. Сечение узкого перешейка не изменяются при коммутационных процессах. Время срабатывания также остается постоянным. Коммутационный ресурс повышается. Подобные конструкции в литературе получили название жидкометаллический предохранитель со стабилизированной защитной характеристикой (ЖСПС).

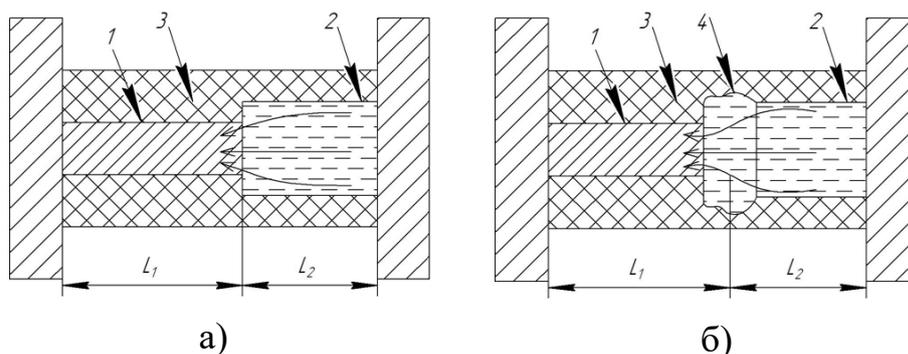


Рисунок 1. Упрощенная модель предохранителя с составной плавкой вставкой: а – до испытания; б – после нескольких срабатываний. Где: 1–электрод; 2 – жидкий металл; 3 – диэлектрическая втулка; 4 – зона эрозии; l_1 – длина электрода; l_2 – длина жидкометаллической вставки.

Коммутационные испытания макетных образцов, подтвердили, что довольно эффективным средством повышения коммутационного ресурса, стабилизации преддугового интеграла и интеграла отключения ЖСП является шунтирование его низкоомным резистором. При этом эффект еще больше повышается, если в суженной части канала диэлектрической втулки расположить тугоплавкий электрод.

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. 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, защищенное патентом РФ. См. рис. 2.

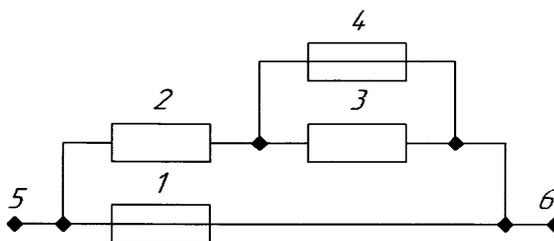


Рис. 2. Токоограничивающее устройство на основе двух ЖСП с двухступенчатым принципом токоограничения. Где: 1, 4 – ЖСП; 2, 3 – шунтирующее сопротивление; 5, 6 – контактные соединения.

Решение вопросов 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 – защищаемые элементы электрической сети» напряжением до 1 кВ в режиме короткого замыкания.

В третьей главе представлена уточненная математическая модель процесса короткого замыкания в рассматриваемом электротехническом комплексе и результаты ее исследования. При этом ограничитель тока представлен в нескольких вариантах. В первом варианте ЖСП с шунтирующим сопротивлением. Во втором варианте ЖСП с шунтирующим сопротивлением. В третьем варианте ограничитель тока представляет собой новое схемотехническое решение, реализующее двухступенчатый принцип токоограничения.

В отличие от известной модели содержащей ЖСП с шунтирующим сопротивлением 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 равным бесконечности). Новая модель представлена эквивалентной схемой цепи короткого замыкания на рис.3. 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_{SH} . В исходном состоянии ключи Q_1 разомкнуты, а ключ Q_2 замкнут в положении 1.

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.) соответствует состоянию ключа Q_2 в определенном положении 1,2 или 3.

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:

$$t_1 = t_{npd}. \quad (1)$$

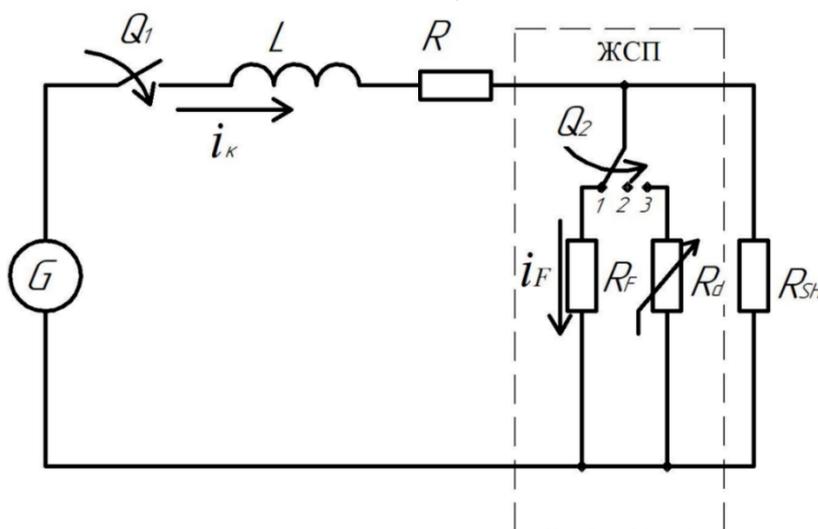


Рис. 3. Эквивалентная схема процесса короткого замыкания.

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 $I_{c,1}$.

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

Уравнение переходного процесса на первом этапе будет выглядеть следующим образом:

$$U_m \sin(\omega t + \psi) = L \frac{di}{dt} + Ri, \quad (2)$$

где U_m – амплитудное значение напряжения источника; ω – угловая частота; t – текущее время; ψ – начальная фаза источника, соответствующая моменту возникновения короткого замыкания или замыканию ключа Q_1 ; i – ток.

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. Длительность этапа не большая, определяется экспериментально, в ряде случаев этой длительностью можно пренебречь.

Уравнение переходного процесса на втором этапе будет выглядеть следующим образом:

$$U_m \sin(\omega t + \psi) = L \frac{di}{dt} + (R + R_{SH})i. \quad (3)$$

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 возникновению электрической дуги, что эквивалентно переключению ключа Q_2 из положения 2 в положение 3. В конце этапа в момент времени t_3 соответствующий естественному переходу тока через нуль электрическая дуга гасится. Длительность этого этапа определяется путем 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:

$$U_m \sin(\omega t + \psi) = L \frac{di}{dt} + Ri + u_{SH}(i_d), \quad (4)$$

где

$$u_d(i_d) = u_{SH}(i_{SH}). \quad (5)$$

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

В этой схеме нелинейное сопротивление R_d представлено набором линейных сопротивлений $R_{d,i}$ поочередно включаемых в цепь с помощью ключа Q_3 с промежутком времени Δt .

Уравнение переходного процесса на каждом из временных интервалов Δt :

$$U_m \sin(\omega t + \psi) = L \frac{di}{dt} + \left(R + \frac{R_{SH} R_{d,j}}{R_{SH} + R_{d,j}} \right) i. \quad (6)$$

Третий этап закончится при окончании дугового процесса во время естественного перехода тока через ноль при восстановлении диэлектрической прочности паровой пробки. Если к этому времени автоматический выключатель отключится, процесс КЗ заканчивается. Если отключение не происходит, то во втором полупериоде на протяжении четвертого, пятого, шестого и седьмого этапа процесс продолжается аналогичным образом. Седьмой этап закончится при гашении электрической дуги во время естественного перехода тока через ноль.

Результаты расчета при использовании математической модели представлены на рис. 4. Исходные данные схемы замещения при расчете приняты совпадающими с параметрами схемы испытательного контура, в котором проводился эксперимент. Сравнение результатов расчета с опытной осциллограммой показало практически полное совпадение расчетной 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.

Исследования модели (см. рис. 5) показали значительное влияние сопротивления дуги на значение пропускаемого теплового интеграла при соотношении сопротивления дуги к сопротивлению шунта меньше, чем 4. При значениях

$$\frac{R_d}{R_{SH}} \geq 4 \div 6 \quad (7)$$

изменение значения пропускаемого теплового интеграла не превышает 5-10%. Отсюда следует, что при разработке и проектировании токоограничивающих устройств указанное значение может быть критерием оценки принимаемого решения.

Показано, что снижение величины шунтирующего сопротивления позволяет в 2-3 раза снизить тепловой интеграл электрической дуги в ЖСП, снизить степень дуговой эрозии канала диэлектрической втулки, в конечном счете повысить коммутационный ресурс. Исследование математической модели ограничителя тока с составной плавкой вставкой и шунтирующим сопротивлением позволили определить критерий работоспособности ЖСПС:

$$\frac{R_d}{R_{SH}} = \frac{A_{\text{Э}} - \frac{W_{np}}{S^2}}{\sqrt{(A_{\text{вс}} - A_{\text{Э}}) \cdot \left(\sqrt{(A_{\text{вс}} - A_{\text{Э}})} + \sqrt{\left(A_{\text{вс}} - \frac{W_{np}}{S^2} \right)} \right)}}, \quad (8)$$

где $A_{\text{Э}}$ – энергия, необходимая для нагрева электрода до температуры плавления, $\frac{\text{Дж}}{\text{Ом} \cdot \text{мм}^4}$; $A_{\text{вс}}$ – энергия, необходимая для нагрева электрода до

температуры кипения жидкого металла или нагрева жидкого металла до температуры кипения и превращения в парообразное состояние, $\frac{Дж}{Ом \cdot мм^4}$; S – сечение плавкой вставки из жидкого металла, $мм^2$.

При значениях величины $\frac{R_d}{R_{SH}}$ ниже критических разрушения тугоплавкого электрода не происходит. Критерий может оказаться полезными при разработке конструкций ЖСПС. Например, при выборе материала электрода и жидкого металла и т.п.

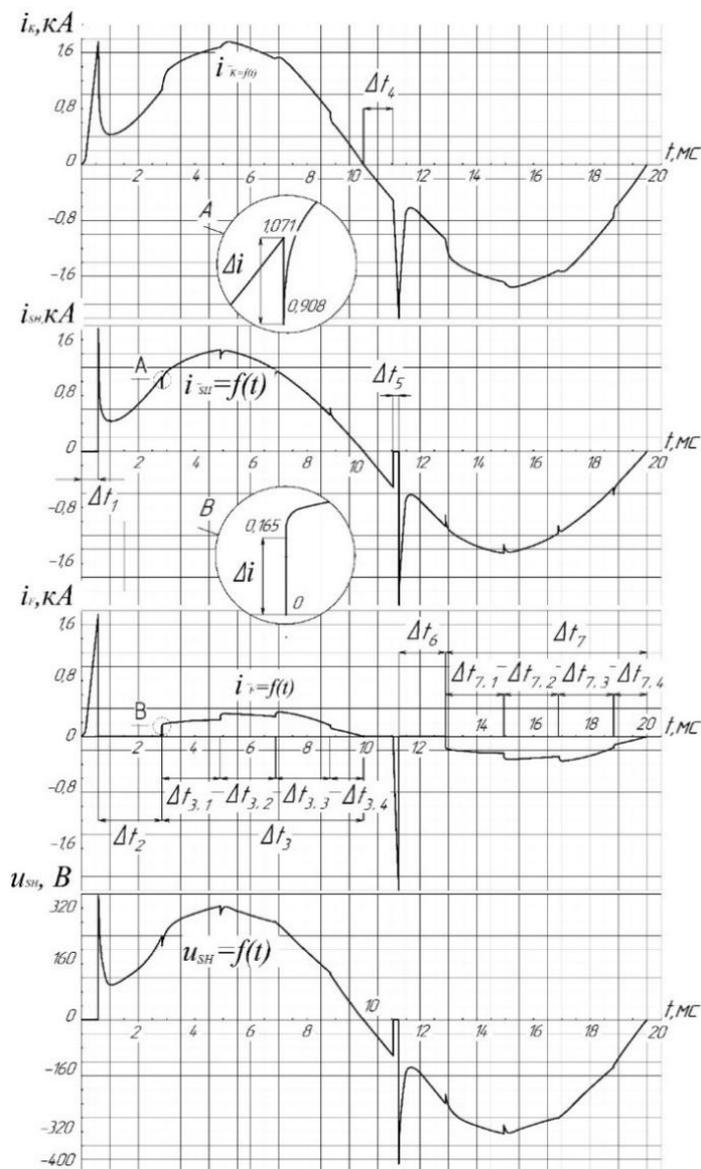


Рис. 4. Расчетные зависимости в ветвях схемы замещения. Результаты представлены в виде зависимостей тока в сети $i_k = f(t)$, тока через ЖСП $i_F = f(t)$, тока через шунтирующее сопротивление $i_{SH} = f(t)$, а также падения напряжения на шунтирующем сопротивлении от времени $u_{SH} = f(t)$ с учетом рассмотренных этапов процесса.

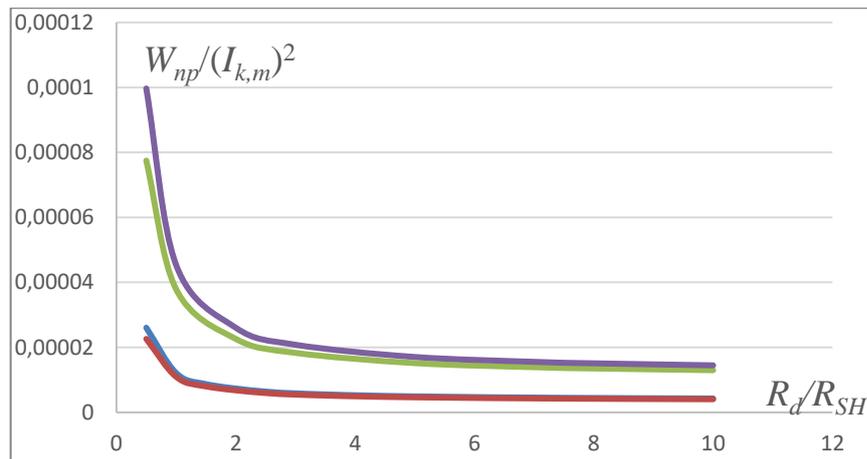


Рис. 5. Зависимости пропускаемого теплового интеграла от соотношения сопротивления электрической дуги и сопротивления шунтирующего сопротивления. Кривые построены при постоянном значении $\frac{R}{\omega \cdot L} = 0,001$ (синяя и фиолетовая кривые) и при $\frac{R}{\omega \cdot L} = 100$ (зеленая и красная кривые), что соответствует чисто индуктивному и активному сопротивлению сети.

Зависимость 1 (синяя) и зависимость 2 (красная) соответствуют при $R_{SH} = 0,1$ Ом и $\frac{I_{0,m}}{I_{k,m}} = 0,047$; зависимость 3 (зеленая) и 4 (фиолетовая), соответствуют $R_{SH} = 0,2$ Ом и $\frac{I_{0,m}}{I_{k,m}} = 0,023$.

Принято допущение, что сопротивление электрической дуги постоянно на всем интервале горения электрической дуги.

Представлена разработанная математическая модель рассматриваемого электротехнического комплекса с использованием нового ограничителя тока, структурная схема которого реализует двухступенчатый принцип токоограничения. См рис. 2. Математическая модель является усовершенствованной моделью электротехнического комплекса, с ограничителем тока с ЖСП и шунтирующим сопротивлением.

Исследование математической модели с ограничителем тока двухступенчатого принципа токоограничения показали, что в сравнении с одноступенчатым принципом токоограничения тепловой интеграл дуги ЖСП1 первой ступени уменьшается. Степень уменьшения определяется сечением плавкой вставки ЖСП2 второй ступени токоограничения и значением шунтирующего сопротивления первой ступени токоограничения. Степень уменьшения теплового интеграла дуги ЖСП1, степень дуговой эрозии канала диэлектрической втулки ЖСП1, а в конечном счете увеличение коммутационного ресурса достигает 30% и более.

В четвертой главе представлен параметрический синтез электротехнического комплекса «источник питания - ограничитель тока – защищаемые элементы электрической сети» напряжением до 1 кВ. Структура комплекса включает в себя защищаемый элемент сети. Это может быть автоматический выключатель или линия электропередачи.

Защищаемый элемент сети обладает определенной перегрузочной способностью или динамической и термической стойкостью к воздействию

тока короткого замыкания. Параметрами динамической и термической стойкости являются – максимально допустимое значение тока короткого замыкания. Для проводников и кабелей допустимое тепловое воздействие определяется допустимым значением времени протекания тока короткого замыкания I_k :

$$t_{\text{доп}} = \left(\frac{k \cdot F_{\text{НОМ}}}{I_k} \right)^2, \quad (9)$$

где $F_{\text{НОМ}}$ – площадь поперечного сечения, мм²; k – является фактором, учитывающим удельное сопротивление, температурный коэффициент и теплоемкость проводникового материала, и соответствующие начальные и конечные значения температуры.

При фиксированном времени равном одному полупериоду частоты сети 0,01 допустимое действующее значение тока $I_{k,\text{доп}}$ определяется следующим образом:

$$I_{k,\text{доп}}^2 = \frac{(k \cdot F_{\text{НОМ}})^2}{t_{\text{доп}}}; \quad (10)$$

$$I_{k,\text{доп}} = \sqrt{\frac{(k \cdot F_{\text{НОМ}})^2}{t_{\text{доп}}}} = \frac{k \cdot F_{\text{НОМ}}}{\sqrt{t_{\text{доп}}}} = \frac{k \cdot F_{\text{НОМ}}}{\sqrt{0,01}} = \frac{k \cdot F_{\text{НОМ}}}{0,1} = 10 \cdot k \cdot F_{\text{НОМ}}. \quad (11)$$

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

Надежность рассматриваемого электротехнического комплекса обеспечивается, если токоограничивающее устройство обеспечивает снижение мгновенного значения тока короткого замыкания до значений допустимых для защищаемого элемента сети, при которых не происходит механических и тепловых повреждений в результате электродинамического и теплового воздействия тока короткого замыкания. Токоограничивающие свойства ограничителя тока характеризуются максимальным значением пропускаемого ограничителем тока $I_{\text{П}}$.

В первом варианте токоограничивающего устройства, представляющим собой ЖСП с шунтирующим сопротивлением, а также втором варианте токоограничивающего устройства, представляющим 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 (см. рис. 6) максимальный ток ограничителя в период дуговой стадии процесса $I_{\text{max.d}}$.

Надежность электротехнического комплекса будет обеспечиваться, если пропускаемый ток не будет превышать допустимого. Для автоматического выключателя это:

$$I_{\text{П}} \leq k_{\text{уд}} \cdot \sqrt{2} \cdot I_{\text{НОМ,откл}}, \quad (12)$$

где $k_{\text{уд}}$ – ударный коэффициент. Приводится в справочных материалах.

Для проводников и кабелей:

$$I_{II} \leq k_{y\partial} \cdot \sqrt{2} \cdot I_{k, \text{дон}}. \quad (13)$$

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_{SH} . Остальные параметры, характеризующие материал плавкой вставки (A), параметры цепи короткого замыкания (U, R, L, ψ) могут быть приняты константами. 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 (8).

Значение S и R_{SH} находится при использовании разработанной математической модели итерационным методом. При отсутствии данных сопротивление электрической дуги принимается в соответствии с (7).

При таких значениях обеспечивается выполнение условий (12), (13), обеспечивающих надежность при динамическом и термическом воздействии тока короткого замыкания.

$$S_{\min} = F(I_c, A_{Ж}, U, R, L, \psi);$$

$$R_{SH} = F(S_{\min}, I_{\max.d}, A_{Ж}, U, R, L, \psi, R_d).$$

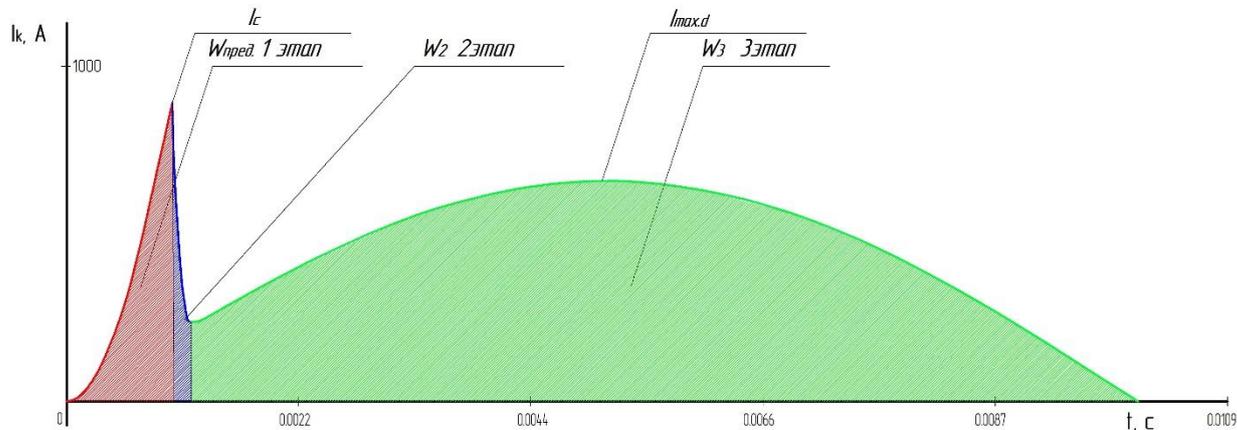


Рис. 6. Оциллограмма пропускаемого ограничителем тока короткого замыкания. Ограничитель тока первого и второго варианта.

Для третьего варианта токоограничивающего устройства представляющем собой новое схмотехническое решение, реализующее двухступенчатый принцип токоограничения (рис. 2) необходимо определить следующие параметры.

1. Сечение плавкой вставки S_1 ЖСП1.
2. Сумму сопротивлений $R_{SH1} + R_{SH2}$.
3. Соотношение сопротивлений $\frac{R_{SH1}}{R_{SH1} + R_{SH2}}$.
4. Сечение плавкой вставки S_2 в ЖСП2.

Значение S_1 в ЖСП1 и $R_{SH1} + R_{SH2}$ находится по аналогии с определением S и R_{SH} ограничителя тока при одноступенчатом принципе токоограничения. Для этого используется математическая модель, в соответствии с условиями определения максимального пропускаемого тока (12), (13). При этом интеграл дуги и пропускаемый ограничителем тепловой интеграл могут использоваться для сравнения с аналогичными параметрами при использовании ЖСП1 в двухступенчатой схеме токоограничения. Эти величины являются как бы эталонными. Степень износа канала диэлектрической втулки характеризуется эталонной величиной интеграла дуги $W_{d,\varepsilon}$.

После определения значений S_1 в ЖСП1 и $R_{SH1} + R_{SH2}$ остаются не известными еще два параметра $\frac{R_{SH1}}{R_{SH1} + R_{SH2}}$ и S_2 ЖСП2. Для их расчета используется критерий снижения интеграла дуги $W_{d,1}$ в ЖСП1:

$$\frac{W_{d,1}}{W_{d,\varepsilon}} \rightarrow \min. \quad (14)$$

Методом итераций при различных значениях $\frac{R_{SH1}}{R_{SH1} + R_{SH2}}$ и S_2 определяются максимальные значения пропускаемого тока на первой и второй ступени токоограничения. Они не должны превышать допустимого значения тока для защищаемого элемента сети. Окончательно выбирается сечение S_2 и $\frac{R_{SH1}}{R_{SH1} + R_{SH2}}$ с учетом условия (14).

На основе результатов исследования математической модели (Рис. 6.) предложена упрощенная инженерная методика расчета сечений плавкой вставки и значений шунтирующих сопротивлений для двух рассматриваемых вариантов токоограничивающего устройства. В методике используется графическая зависимость. См. рис.7. Для ее построения протекаемый ток в модели преобразован в относительные единицы

$$i^* = \frac{i}{I_{k,m}}. \quad (15)$$

В (15) $I_{k,m}$ - амплитудное значение тока короткого замыкания в установившемся режиме.

Соответствующее преобразование получит тепловой интеграл, в частности преддуговой интеграл ЖСП

$$W_{\text{прд}}^* = \frac{W_{\text{прд}}}{I_{k,m}^2}. \quad (16)$$

Расчетная зависимость $\frac{I_c}{I_{k,m}}$ от $\frac{W_{\text{прд}}}{I_{k,m}^2}$ изображена на рис.7.

1. По справочным данным определяется допустимое значение тока $I_{\text{дон}}$ для защищаемого элемента сети.
2. Для определения допустимого пропускаемого тока используется формула (12) или (13).

3. Рассчитывается установившееся амплитудное значение тока короткого замыкания $I_{k,m}$, находится отношение $\frac{I_c}{I_{k,m}}$ при и отношение активного и реактивного сопротивления сети $\frac{R}{\omega L}$.

4. На рис. 7. выбирается кривая с найденным значением $\frac{R}{\omega L}$. Координата точки $\frac{I_c}{I_{k,m}}$ этой кривой соответствует координате $W_{\text{прд}}^* = \frac{W_{\text{прд}}}{I_{k,m}^2}$. Значение этой величины используется для вычисления сечения суженной части плавкой вставки S :

$$S = \sqrt{\frac{W_{\text{прд}}^* \cdot I_{k,m}^2}{A}}, \quad (17)$$

где A – постоянная для каждого металла плавкой вставки величина. Сечение найдено.

5. Значение шунтирующего сопротивления находится по формулам: для проводников и кабелей

$$R_{SH} \geq \frac{\sqrt{U_m^2 - I_{k,\text{дон}}^2 \cdot \omega L^2} - I_{k,\text{дон}} \cdot R}{I_{k,\text{дон}}}; \quad (18)$$

для автоматических выключателей

$$R_{SH} \geq \frac{\sqrt{U_m^2 - I_{\text{ном.откл}}^2 \cdot \omega L^2} - I_{\text{ном.откл}} \cdot R}{I_{\text{ном.откл}}}. \quad (19)$$

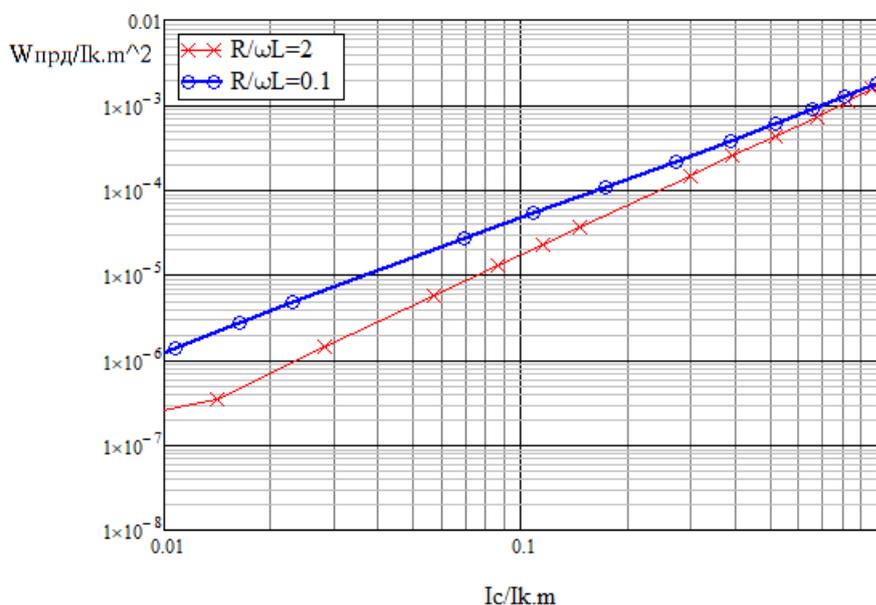


Рис. 7. Семейство зависимостей $W_{\text{прд}}/I_{k,m}^2 = f(I_c/I_{k,m})$.

В приложении 1 представлена конструкция физической модели ЖСП. технология подготовки к лабораторным исследованиям. Конструкция разработанной физической модели представляет собой два соединенных друг с другом независимых блока. См. рис. 8. Один из них – это физическая модель ЖСП.

Физическая модель состоит из контактных выводов 1 и 2, демпфирующего узла 3 в виде сильфона, диэлектрической втулки 4 из керамики на основе

оксида бериллия (BeO), изоляционной втулки 5, пробковых краников 6, 7, прокладки 8, упорного подшипника 9, изоляционной втулки 5. Для герметичности конструкции между контактными выводами 1, 2 и диэлектрической втулкой 4 расположены герметизирующие прокладки 10. Все детали конструкции помещены в металлический корпус, состоящий из втулки 11, гайки 12, стакана 13. Герметичность жидкого металла - натрия, расположенного в канале диэлектрической втулки ЖСП и внутренних отверстиях контактных выводов от внешней среды, обеспечивается перекрытыми пробковыми краниками 6 и 7.

Второй блок (рис. 8) 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 посредством гидроцилиндра 14, заполненного трансформаторным маслом. Учитывая тот факт, что жидкость является не сжимаемой и не может обеспечить демпфирующий эффект при срабатывании ЖСП конструкцией предусматривается соединение ЖСП с блоком давления гибким резиновым шлангом высокого давления 15. Этот шланг выполняет роль демпфера. При разработке конструкции авторы старались предусматривать сборно-разборные конструктивные решения, позволяющие использовать физическую модель многократно с возможностью производить ревизию и замену изношенных во время коммутационных исследований внутренних частей ЖСП.

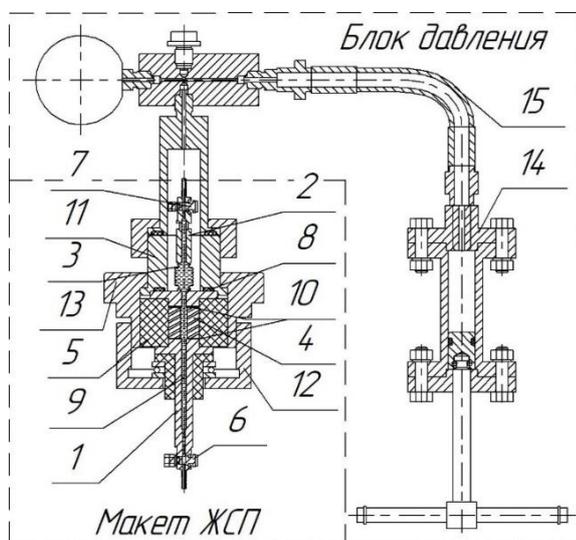


Рис. 8. Конструкция макетного образца ЖСП

Процесс заправки макета натрием требует особой осторожности и внимания в силу химической активности. Все манипуляции с натрием производились в перчаточном боксе в среде инертного газа – аргона.

В **приложении 2** представлена программная модель электротехнического комплекса «источник питания - ограничитель тока – защищаемые элементы электрической сети» напряжением до 1 кВ в режиме короткого замыкания и ее исследования в отладочном режиме.

В **приложении 3** представлены результаты испытаний физической модели ЖСП. Тепловые исследования проводились для определения номинального

тока, при протекании которого температура токоведущих частей ЖСП достигает предельно допустимых значений. Номинальный ток оказался равным 110 А.

Коммутационные исследования проводились на заводе АО «Контактор» в г. Ульяновске в испытательном центре электрооборудования (ИЦЭО) в соответствии с «Программой коммутационных испытаний» в цепи короткого замыкания, состоящей из источника тока, сопротивления цепи короткого замыкания и физической модели ЖСП. Угол включения принят равным нулю и обеспечивается включением цепи короткого замыкания через тиристорный блок. Отключение цепи предусмотрено после окончания либо первого, либо второго, либо третьего полупериода. Было сделано 9 опытов с разным начальным давлением.

Обработка осциллограмм токов и напряжений позволила получить вольт-амперную характеристику электрической дуги в парах натрия при начальном давлении 1,75 МПа (рис. 9). При низком начальном давлении 0,25 мПа сопротивление электрической дуги не стабильно и имеет сравнительно не большое значение. 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.

В результате сделан вывод о возможности повышать сопротивление дуги путем повышения давления до значений обеспечивающих работоспособность ЖСП в рассматриваемом электротехническом комплексе.

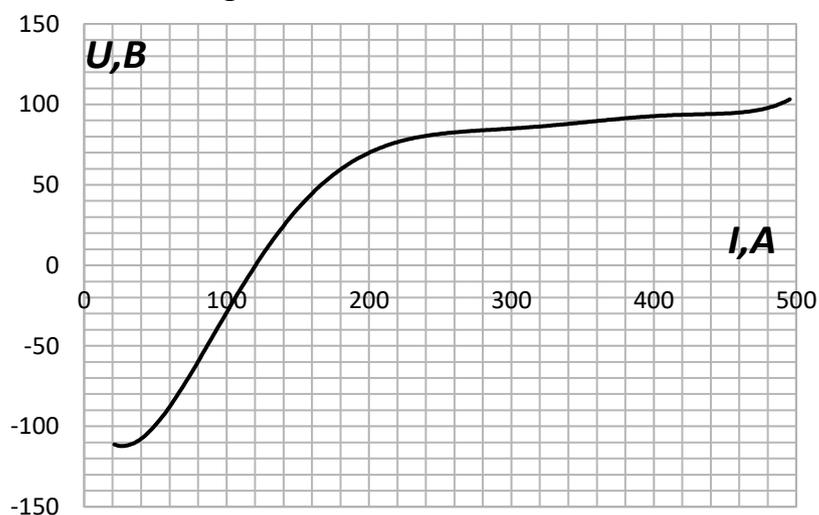


Рис.9. Вольт-амперная характеристика электрической дуги в парах натрия полученная экспериментальным путём (опыт 3)

В **приложении 4** представлены акты использования результатов работы на промышленных предприятиях Ульяновской области и учебном процессе кафедры «Электроснабжения УлГТУ».

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. Это позволяет избежать завышения инвестиционной составляющей в электрические сети до 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 системах 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.

Основное содержание диссертации отражено в следующих публикациях:

Статьи в изданиях из перечня ВАК

1. 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.

2. 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. – Т. 29. – №3(71). – С. 111 – 121.

3. Кузнецов А.В. Возможность увеличения коммутационного ресурса жидкометаллических самовосстанавливающихся предохранителей с составной плавкой вставкой [Текст] / Кузнецов А.В., **Юренков Ю.П.**// Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2021. – Т. 23. – №5. – С. 139 – 149.

Статьи в изданиях, рецензируемых Scopus и Web of science

4. 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

5. A.V. Kuznetsov and **Y.P. Yurenkov**, "Analysis of research and area of application of self-resetting liquid metal fuse," IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng., International Scientific Electric Power Conference (ISEPC-2019), 2019, pp. 012034, doi: 10.1088/1757-899X/643/1/012034

6. 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

7. 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.

Патенты на изобретения

8. Патент 2713641 С1 (RU), МКИЗ H02H 3/08, H02H 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.

Свидетельства на регистрацию программ для ЭВМ

9. 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.

Другие статьи и тезисы докладов

10. 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.

11. 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.

12. 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.

13. 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.

14. **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.

15. 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.

Автореферат отпечатан с разрешения диссертационного совета 24.2.377.06
ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»
(протокол № 4 от 20.12 2022 г.)

Юренков Юрий Петрович

Совершенствование ограничителей тока на основе жидкометаллических самовосстанавливающихся предохранителей в системах электроснабжения до 1 кВ
Автореферат

Подписано в печать 20.12.2022. Формат 60×84/16.

Усл. печ. л. ____

Тираж 100 экз. Заказ ____.

ИПК «Венец» УлГТУ, 432027, г. Ульяновск, Северный Венец, 32