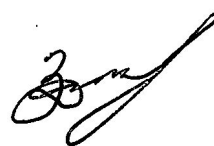


**ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

На правах рукописи

Згарбул Андрей Викторович



**ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛОВОЙ ЗАЩИТЫ
УСТАНОВОЧНЫХ ЭЛЕКТРОПРОВОДОВ 0,38 КВ
ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

Специальность 05.26.01 — «Охрана труда (по отраслям) (технические науки)»

**АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Донецк - 2020

Работа выполнена в ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» Министерства образования и науки Донецкой Народной Республики, г. Донецк

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент,
Бершадский Илья Адольфович
ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»,
профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий и городов»

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор

кандидат технических наук

Ведущее предприятие:

Защита состоится « » _____ 20__ г. в __ ч. __ мин. на заседании диссертационного совета Д 01.008.01 в ГОУВПО «ДОННТУ» по адресу: 283001, г. Донецк, ул. Артёма, 58, корпус 1, ауд. 203. Тел./факс: 380(62) 304-30-55, e-mail: uchensovet@donntu.org.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУВПО «ДОННТУ» по адресу: 283001, г. Донецк, ул. Артёма, 58, корпус 2. Адрес сайта университета: <http://donntu.org>

Автореферат разослан « » _____ 2020 г.

Ученый секретарь
ученого совета Д 01.008.01
доктор технических наук

И.А. Бершадский

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. По данным МЧС на территории Донецкой Народной Республики в 2016 г. произошло 5513 пожаров, что на 12,6% больше, чем в 2015 г. Из общего числа пожаров 11,1% возгораний возникло вследствие нарушения правил устройства и эксплуатации электроустановок (НПУиЭ). При этом от тепловых проявлений электрического тока было зафиксировано 125 пожаров, из них от повреждения кабельных сетей и проводов – 65. По данным НИИГД «Респиратор» (г. Донецк) в Донецкой области наибольшая доля пожаров кабельно-проводниковой продукции приходится на жилые здания (82,3%) и торгово-складские помещения (7,32%) (сведения за 2006 г.), в которых используются электрические сети 0,38 кВ с глухозаземленной нейтралью в виде проводов и кабелей сечением до 4 мм² (медь) и до 6 мм² (алюминий). При этом в 44,6% случаев короткому замыканию предшествовала перегрузка.

Во многих странах около 30% от общего числа составляют пожары, которые возникают из-за НПУиЭ. Так, в России в 2017 г. произошло 40390 пожаров при эксплуатации электротехнических изделий, что составляет 30,5% от общего их числа в стране. На них погиб 1765 человек. Основные причины гибели людей – выделение токсичных веществ (окиси углерода, хлористого водорода и др.), недостаток кислорода, жар, ожоги.

Среди электротехнических изделий наибольшую опасность возмущений занимают провода и кабели – в среднем 69,6% (по данным ФГБУ ВНИИПО МЧС России).

Средствами защиты указанных электрических сетей с использованием плавких предохранителей (Пр), модульных автоматических выключателей (АВ) и противопожарных УЗО не удается повысить уровень безопасности, а число пожаров и гибели на них людей остается стабильно высоким.

Приведенные данные о случаях возникновения пожаров в ДНР и России от инициирования их источниками электрического происхождения свидетельствуют о том, что проблема по обеспечению опасных ситуаций в помещениях, где эксплуатируются сети напряжением 0,38/0,22 кВ с глухозаземленной нейтралью на сегодняшний день полностью не решена. Поэтому работы, направленные на прогнозирование и оценку уровня безопасности возгорания технологических и бытовых объектов, связанных с жизнедеятельностью человека, которые используют сети 0,38/0,22 кВ с глухозаземленной нейтралью и разработка новых технических и организационных решений по недопущению возгорания кабельно-проводниковой продукции в узлах нагрузки является актуальной научно-технической задачей.

Работа выполнена по одному из основных научных направлений ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» в рамках разработок научно-исследовательских работ Н-22-15 «Развитие методов оценки пожарной безопасности электрических сетей 0,4/0,22 кВ, Н-10-16 «Параметры живучести узлов нагрузки и искробезопасности электроэнергетического оборудования, Н-22-17 «Развитие методов оценки и обеспечения пожаробезопасности электрифицированных помещений, искро- и электробезопасности шахтных электрических сетей».

Степень разработанности темы. Согласно действующим Правилам пожарной безопасности (п. 5.1.29) не разрешается складирование горючих материалов на расстоянии 1 м от электрооборудования и под электрощитами. Однако остается невыясненным, как влияет высота подвески проводников относительно расположения горючего материала и как эти нормы согласуются с явлением продолжительного к. з. (ПКЗ), при котором происходит разбрызгивание горячего металла и его перемещение в область горючего материала. Недостатком существующих методик определения параметров тепловых источников является также отсутствие универсального критерия их воспламеняющей способности, что существенно усложняет определение безопасного расстояния нахождения легковоспламеняющегося материала и способов защиты.

В ГОСТ 12.1.004–91 приводятся данные о зоне разлета алюминиевых частиц (капель) при коротких замыканиях. Рассчитывается количество теплоты, которое капля способна отдать горючей среде при остывании до температуры самовоспламенения. Тем не менее, этой информации недостаточно для определения и обоснования критерия воспламенения горючего материала, так как он зависит также от типов горючего материала и материала частицы, ее размеров. Для проводов, выполненных алюминиевыми жилами, в ФГБУ ВНИИПО экспериментально исследо-

валось влияние горящих частиц на возникновение воспламенения при их попадании на поверхность горючего материала. В то же время в известных методиках определения причастности аварийных режимов в электротехнических устройствах к возгораниям не рассматривалось влияние раскаленных частиц после их остывания и кристаллизации в процессе достижения ими горючего материала. Аналогичный вывод можно сделать и для медных проводников, которые согласно ПУЭ (п. 7.1.34) следует применять в жилых и административных зданиях.

Применяющийся в автоматических выключателях способ тепловой защиты (биметаллическая пластина или обратно-зависимая характеристика) электрических проводок от тепловых проявлений электрического тока в режиме перегрузок не в полной мере учитывает тепловые свойства кабелей и проводов. Это обусловлено особенностями согласования защиты от перегрузок в сетях с мощностями нагрузок и температурой токоведущих жил электропроводок различных сечений.

Реализация указанного способа защиты от режимов перегрузок в связи с влиянием внешних факторов на изгиб биметаллической пластины приводит к наличию значительной зоны разброса характеристик времени срабатывания автоматических выключателей при одном и том же токе (до 20 раз), обуславливая невысокую надежность способа. Необходимо обосновать такой подход к построению тепловой защиты электрической проводки 0,38/0,22 кВ с применением адаптивных алгоритмов и микропроцессорных multifunctional устройств, который обеспечивает настройку защитных характеристик при различных условиях эксплуатации и значениях токовых перегрузок, в частности, сечения, материала жилы провода и кабеля, количества слоев ПВХ изоляции, способа прокладки и т. д. Это позволит повысить чувствительность и уменьшить время срабатывания средств защиты, а также сократить количество случаев ошибочного выбора их номинальных параметров, не соответствующих требованиям защищаемой электропроводки.

Существенный вклад в разработку и развитие методов оценки, экспертизы и в создание новых способов обеспечения безопасности тепловых проявлений аварий в электрических проводках зданий и сооружений внесли ученые: Арещенко Б.В., Гудым В.И., Маслов А.В., Коваль А.М., Ковалев П.Ф., Ковалев А.П., Солёный С.В., Чешко И.Д., Шевченко О.А. В моделирование процесса воспламенения горючих веществ и нагрева электропроводки существенный вклад внесли ученые: Аушев И.Ю., Веревкин В.Н., Глушков Д.О., Пехотиков В.А., Рубис А.С., Смелков Г.И., Сошников С.А. и др.

Однако результаты работ указанных авторов не позволяли получить аналитические зависимости для оценки риска (вероятности) возникновения опасных для жизнедеятельности человека ситуаций от электрических искр (капель металла), образующихся при к. з. и способных воспламенить горючий материал с учетом влияния группы факторов в системе «защитный аппарат – электрический провод – горючая среда».

Кроме того, известные средства и способы защиты от перегрузок в электропроводках не контролируют допустимую температуру изоляции защищаемой сети в динамических режимах изменения тока нагрузки, что приводит к последующим к. з. с выделением хлористого водорода и опасности для людей, находящихся в электрифицированных помещениях.

Цель и задачи исследования. Целью исследования является усовершенствование методов оценки и прогноза опасности возгорания в помещениях, связанных с жизнедеятельностью человека, где эксплуатируются электрические сети 0,38/0,22 кВ с глухозаземленной нейтралью и обоснование параметров тепловой защиты от перегрузки электрической проводки с возможностью непрерывного контроля температуры изоляции.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Оценить уровень опасности возгорания в помещениях, связанных с жизнедеятельностью человека, где эксплуатируются электрические сети 0,38/0,22 кВ с глухозаземленной нейтралью из-за повреждений электрической проводки.

2. Обосновать критерий оценки устойчивого воспламенения горючего материала частицами, вылетающими из зоны дугового разряда или при случайном появлении ПКЗ в сети 0,38/0,22 кВ с глухозаземленной нейтралью между проводниками различных потенциалов.

3. Установить аналитическую зависимость вероятности возникновения воспламенений в помещениях, где эксплуатируются электрические сети 0,38/0,22 кВ с глухозаземленной нейтра-

лью в течение года от частоты появления токов короткого замыкания между силовыми проводниками, которые находятся под напряжением; времени существования ПКЗ; материала проводников; надежности автоматической системы отключения защитного коммутационного аппарата и сроков его диагностики, а также от высоты подвески проводников относительно расположения горючего материала на контролируемом объекте; типа горючего материала; расстояния горючего материала до возможного места появления экзогенного источника; расчетного тока короткого замыкания.

4. Используя методы физического моделирования, обосновать способ защиты электрической проводки 0,38/0,22 кВ от возможных перегрузок, позволяющий уменьшить диапазон вариации времени отключения, согласовать температурные характеристики с динамикой изменения нагрузочного тока и избежать возможных ошибок в выборе уставок путем настройки коэффициентов защитной характеристики согласно сечению отходящей линии.

5. Экспериментально подтвердить работоспособность предложенного способа защиты электрической проводки 0,38/0,22 кВ от случайных перегрузок с учетом нестационарного нагрева проводников; разработать алгоритм, программное обеспечение данного способа и схему его реализации; определить зону разброса тепловых характеристик проводов (кабелей) во время нагрева в зависимости от конструктивных факторов.

Объект исследования — процессы, которые протекают в электрической проводке 0,38/0,22 кВ в сети с глухозаземленной нейтралью, при случайном появлении в ней коротких замыканий и перегрузок проводников.

Предмет исследования — условия воспламенения окружающей электрическую проводку 0,38/0,22 кВ горючего материала при случайном появлении короткого замыкания в элементе сети и выбросе в результате динамических процессов из зоны дугового разряда нагретых металлических частиц; способ функционирования защиты электрической проводки от возгораний, который учитывает ее температурную зависимость от протекающего тока при изменении нагрузочных режимов, сечений и материала провода или кабеля, способа прокладки.

Научная новизна полученных результатов

1. Получены эмпирические зависимости постоянной времени (параболический характер) и установившейся температуры нагрева (квадратичный характер) электрической проводки 0,38/0,22 кВ зданий и сооружений от кратности тока перегрузки, что позволяет осуществлять непрерывный мониторинг ее температуры по величине протекающего тока и отключать защищаемый участок сети до возникновения опасных для эксплуатационного персонала факторов.

2. Впервые обоснован метод повышения безопасности промышленного персонала в контексте воздействия опасных производственных факторов, возникающих при перегрузках в электрической сети, позволяющий уменьшить инерционность отключения на основе адаптации устройств защиты условиям эксплуатации с учетом динамики изменения нагрузочного тока.

3. Впервые установлены размеры зон разлета продуктов к.з. в электрической сети 0,38/0,22 кВ с глухозаземленной нейтралью в зависимости от интенсивности появления и величины тока продолжительного к. з., геометрии расположения горючего материала заданного типа, которые необходимо учитывать при разработке методов и технических средств защиты персонала.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость работы состоит в развитии методов предотвращения опасности возгорания в производственных и жилых помещениях, связанных с жизнедеятельностью человека, оснащенными электрическими проводками напряжением до 0,38 кВ включительно, на основании применения научно обоснованных моделей прогнозирования состояний воспламенения компонентов электропроводки в местах повреждения и смежных объектов с учетом комплекса воспламеняющих факторов в их функциональной взаимосвязи.

Разработан алгоритм функционирования предлагаемого способа построения тепловой защиты при учете температурно-токовых характеристик проводника при изменении тепловой нагрузки.

Практическая значимость работы:

– результаты выполненной работы вошли в документ Методика оценки вероятности возникновения пожароопасных ситуаций в электрифицированных помещениях с напряжением 0,4/0,22 кВ (2019 г.), разработанный: ГОУВПО ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ (ДОННТУ) и Государственным научно-исследовательским институтом горноспасательного дела, пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» (ДНР).;

– с учетом результатов работы создан лабораторный образец микропроцессорной тепловой защиты электрической проводки напряжением до 0,38 кВ включительно от действия перегрузочных токов, отличающейся от известных тем, что предлагаемый способ защиты от указанных режимов основан на прогнозировании времени допустимой перегрузки при кратности тока больше единицы с использованием динамической модели нагрева-охлаждения; функциональность лабораторного образца подтверждена актом испытаний ГУ МакНИИ (г. Макеевка);

– результаты работы внедрены в учебный процесс кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий и городов» ГОУВПО ДОННТУ при подготовке бакалавров и магистров, обучающихся по направлению 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника по дисциплинам «Микропроцессорная техника» и «Противоаварийная автоматика электротехнических комплексов».

Методология и методы исследования

Для решения поставленных задач использовались: данные о статистике пожаров, причиной которых стали электротехнические изделия, математическое моделирование методом «сеток» тепловых процессов воспламенения горючих веществ частицами металла при коротких замыканиях в электрической проводке, а также процессов нестационарного нагрева проводов и кабелей в режиме перегрузок; экспериментальные исследования тепловых режимов жил электрической проводки под действием электрического тока; методы теории надежности; методы проектирования и программирования микропроцессорного устройства тепловой защиты электрической проводки.

Положения, выносимые на защиту

1. Впервые получена зависимость времени достижения допустимой температуры нагрева изоляции электропроводки 0,38/0,22 кВ от кратности тока перегрева с учетом типа провода, типа изоляции (одно или двуслойная). При этом установлено, что для провода марки ПВС 2х2,5, увеличение кратности тока с 1,5 до 3 приводит к уменьшению постоянной времени нагрева с 320 с до 200 с и увеличению максимального перегрева провода в 3,6 раза, что влечет за собой уменьшение времени достижения допустимой температуры (70°С) в 9,3 раза. Это позволяет на стадии проектирования оценить соответствие разработанной системы мониторинга опасных производственных факторов критериям допустимой инерционности.

2. Впервые разработана математическая модель процесса нагревания электрического провода, учитывающая сечение провода, конвективный теплообмен между поверхностью нагретого провода и окружающим воздухом, кратность тока перегрузки, что позволяет прогнозировать вероятность возникновения аварийной ситуации.

3. Предложен новый критерий оценки вероятности возникновения опасных ситуаций и границ опасных зон вследствие разлета раскаленных частиц металла при продолжительном дуговом разряде в электросети 0,38/0,22 кВ, который учитывает величину тока к.з., надежность автоматической системы отключения защитного коммутационного аппарата и сроки его диагностики, вид горючего материала и позволяет оценить опасность для обслуживающего персонала. При этом установлено, что при вероятности возникновения возгорания от к.з. в электросети в течение года $<10^{-6}$, помещение заданной категории взрыво- и пожарной опасности относится к безопасным в отношении аварийных ситуаций для обслуживающего персонала.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций обеспечивается обоснованностью принятых допущений, использованием апробированных методов математического моделирования и современных методов статистической обработки результатов наблюдений, а также приемлемой сходимостью результатов анализа и эксперимента. Погрешность определения времени задержки воспламенения в зависимости от начальной температуры источника энергии для

образцовых видов горючего материала составила 10,2%. Сопоставление расчетного и измеренного значений температур жил изолированного кабеля в условиях открытой прокладки показывает их совпадение с точностью 6..16%.

Основные положения диссертационной работы докладывались, обсуждались и получили положительные отзывы на IX Евразийском научном форуме Интеграция науки и образования как основа эволюции Евразийского экономического союза, г. Санкт-Петербург (2017 г.), на XIII Всероссийской открытой молодежной научно-практической конференции «Диспетчеризация и управление в электроэнергетике», г. Казань (2018 г.), на круглом столе в МакНИИ Новые способы и средства обеспечения безопасности применения электрической энергии в шахтах, г. Макеевка (2019 г.), на III и IV Международных научно-практических конференциях Инновационные перспективы Донбасса, г. Донецк (2017 г., 2018 г.).

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы в 12 печатных работах: 6 в специальных научных журналах и сборниках, 5 в докладах и тезисах конференций, 1 нормативная методика.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из вступления, 4 разделов с выводами по каждому разделу, общих выводов, списка использованных источников и приложений. Она изложена на 189 страницах сквозной нумерации, в том числе включает 72 рисунков, 16 таблиц, список использованных источников из 104 наименований на 12 страницах и 5 приложений на 44 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первом разделе «Постановка задачи обеспечения защиты от воспламенений при аварийных режимах электрической сети» проанализированы статистика основных причин пожаров, вызванных НПУиЭ, существующие методы оценки и установления причин воспламенений, возникающих от искр и тепловых процессов в электрических проводках. Показаны необходимость совершенствования существующих способов и средств защиты в сетях 0,38/0,22 кВ с глухозаземленной нейтралью.

Среди основных причин пожаров в электроустановках (рисунок 1), наряду с к. з., выделяется перегрузка электрической цепи. Предварительно в результате экспериментальных исследований были получены тепловые характеристики провода бытового марки ППВ различного сечения.

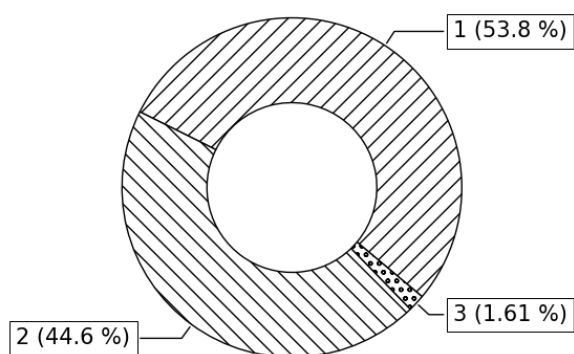


Рисунок 1 — Распределение пожаров по режиму эксплуатации провода или кабеля: 1 — токовая нагрузка соответствовала допустимой; 2 — токовая нагрузка превышала допустимую; 3 — нет информации

Анализ показал, что в установочных электропроводках сетей напряжением до 0,38 кВ включительно, защищаемых автоматическими выключателями со стандартными защитными характеристиками не удастся избежать опасных проявлений теплового воздействия электропроводок. Это связано с несовершенством защитных характеристик АВ при варьировании условий эксплуатации. Это может приводить к несоответствию времени отключения АВ и Пр требованиям ПУЭ (в частности п. 1.7.79).

Если температура на границе жила-изоляция приближается к максимально длительно допустимой температуре (+70°C для провода или кабеля с ПВХ изоляцией), то начинается процесс интенсивного теплового износа изоляции, в результате которого может произойти

тепловой пробой. При достижении температурой в указанной точке значения +120°C появляется дым, оплавление и размягчение изоляции, что делает ее практически непригодной для дальнейшей эксплуатации.

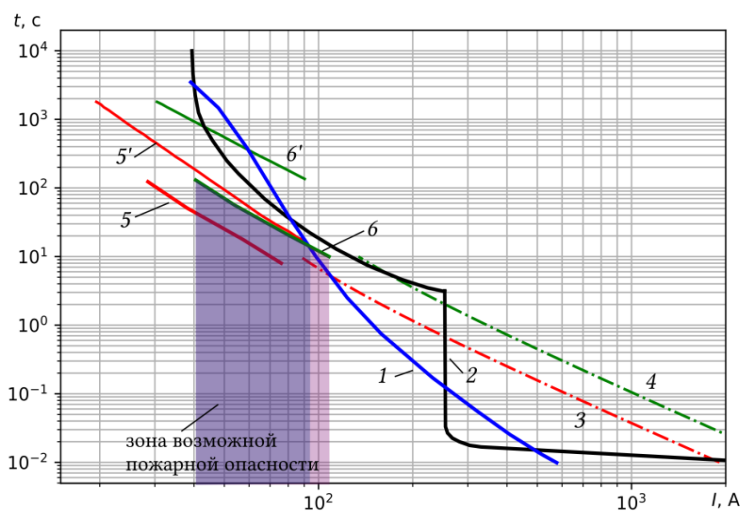


Рисунок 2 — Совмещенные ВТХ предохранителя марки ППН25 — 1; АВ с характеристикой С и $I_{ном} = 25 А$ — 2; тепловые характеристики проводов марок ППВ $2 \times 1,5 \text{ мм}^2$ — 3, 5, 5' и ППВ $2 \times 2,5 \text{ мм}^2$ — 4, 6, 6' (нагрев согласно ГОСТ Р МЭК 60949-2009, от 20°C до 70°C и до появления дыма соответственно)

рость нагрева КПП, установлены критерии определения факта воспламенения при аварийных режимах в электрических проводках.

На внешней границе кабеля задается условие свободно-конвективного теплообмена с окружающей средой, на линии симметрии граничное условие состоит в равенстве нулю поперечных компонент теплового потока (условие симметрии).

Расчетная зависимость коэффициента теплообмена α характеризуется плотностью теплового потока с поверхности провода (кабеля) в воздух при открытом способе прокладки. Коэффициент теплообмена α обусловлен свободной конвекцией и зависит от перепада температур провода (кабеля) и воздуха, а также размера поверхности охлаждения:

$$S = \alpha(\theta_c(B) - \theta_{oc}), \text{ Вт/м}^2 \quad (1)$$

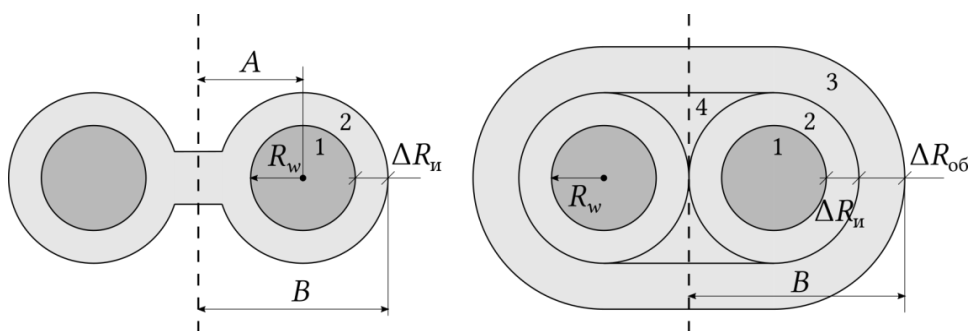


Рисунок 3 — Структура провода ППВ (слева) и кабеля ВВГ (справа)

проводом марки ППВ (рисунок 3). У провода ППВ, в отличие от ВВГ отсутствует воздушная прослойка, также отсутствует дополнительный слой изоляции вокруг жилы кабеля. Провода ППВ всех сечений демонстрируют более скоротечный нагрев, чем кабель ВВГ (рисунок 4).

Сравнительный анализ взаимного расположения построенных по паспортным данным ВТХ АВ, Пр и экспериментально полученных тепловых характеристик кабельно-проводниковых изделий (КПП), показал наличие зон, где тепловая характеристика провода располагается на графике ниже индивидуальных ВТХ защитных аппаратов (рисунок 2).

Во втором разделе «Исследование теплофизических процессов воспламенения изоляции электрической проводки 0,38 кВ и горючего материала, в области, прилегающей к точке короткого замыкания» было проведено математическое моделирование электротепловых процессов в электрической сети, а также воспламенения горючих веществ частицами металла, образующимися при к.з. в электрической проводке, оценена скорость

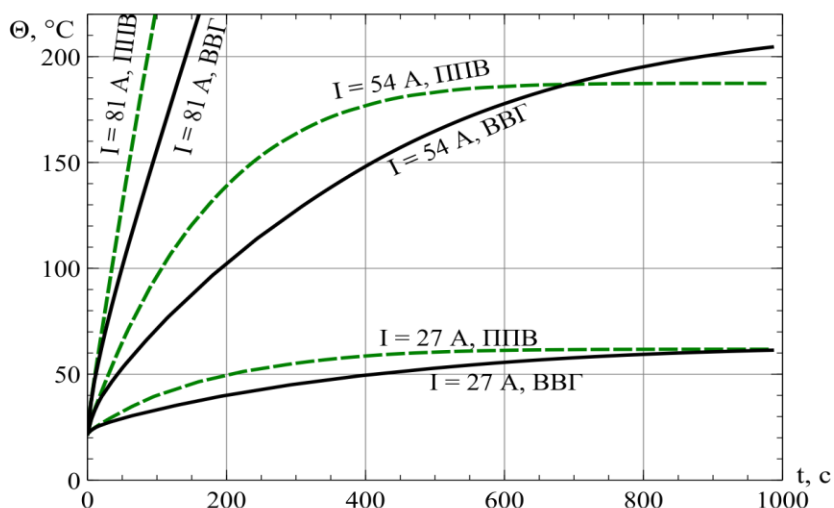


Рисунок 4 — Сравнительная динамика нагрева двужильных кабеля ВВГ и провода ППВ 2х2,5 мм² при открытой прокладке (расчет)

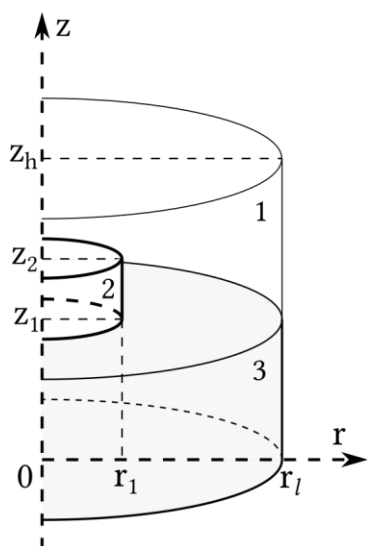


Рисунок 5 — Схема области решения задачи воспламенения:

1 — воздух, 2 — горячая частица, 3 — горючий материал

$$c \cdot \rho \frac{\partial \Theta}{\partial t} = \lambda \cdot \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \Theta}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial z^2} \right] + Q \cdot W \quad (2)$$

где t — время, с; r, z — координаты цилиндрической системы, м (рисунок 5); c — удельная теплоемкость, Дж/(кг·К); ρ — плотность, кг/м³; λ — теплопроводность, Вт/(м·К); Θ — температура, К; Q — тепловой эффект экзотермической реакции, Дж/кг; r_L, z_H — размеры области решения, м; r_p, z_p — размеры источника нагрева ($r_p = r_1, z_p = z_2 - z_1$); W — массовая скорость экзотермической реакции по закону Аррениуса:

$$W = \rho \cdot k^0 \cdot e^{\frac{-E}{R_t \cdot \Theta}} \quad (3)$$

где k^0 — предэкспоненциальный множитель, с⁻¹; E — энергия активации, Дж/моль; R_t — универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К).

Принимаем граничные условия 2 рода на границах области решения:

$$\frac{\partial \Theta}{\partial r} = 0, \quad \frac{\partial \Theta}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

Критерии воспламенения твердого горючего материала при взаимодействии с источником ограниченной энергоемкости малых размеров:

1. Температура горючего материала в области реакции окисления 3 выше начальной температуры источника воспламенения:

$$\Theta_{3,i,j} > \Theta_p \quad (5)$$

где Θ_p — начальная температура частицы в момент ее попадания в область горючего материала.

Одной из наиболее распространенных причин воспламенения из-за неисправности электрической проводки может стать к.з., способное расплавить металлические проводники, капли которых, разлетаясь на значительное расстояние (до 6...9 м), воспламеняют горючий материал.

Уравнение теплового баланса в очаге возгорания в цилиндрической системе с учетом выделения тепла в случае симметрии по координате φ :

2. Скорость теплоприхода в области 3 за счет экзотермической реакции dQ_3 превышает скорость изменения теплосодержания горячей частицы dQ_k во времени:

$$dQ_k = 2 \frac{\pi \cdot c_2 \rho_2}{\tau} \cdot \int_0^{r_1} \int_{z_1}^{z_2} (\Theta^n(r, z) - \Theta^{n+1}(r, z)) \cdot r \cdot dr \cdot dz \quad (6)$$

$$dQ_3 = 2\pi \cdot Q_3 \cdot \rho_3 \cdot k_3^0 \cdot \int_0^{r_1} \int_0^{z_1} e^{\frac{-E_3}{Rr\Theta^n(r,z)}} \cdot r \cdot dr \cdot dz \quad (7)$$

Задача решалась в 2-х постановках:

1. Задана начальная температура частицы Θ_p . Определяется факт и время задержки воспламенения t_d .

2. Для заданных материалов и размеров горячей частицы r_p и z_p определялась критическая температура $\Theta_{кр}$ этой частицы, при превышении которой происходит воспламенение горючего материала.

На рисунке 6 показано расчетное поле температур в момент выполнения одного из критериев воспламенения хлопка алюминиевой частицей 3×4 мм с $T_0 = 293$ К. Время задержки воспламенения составило **0,249** с.

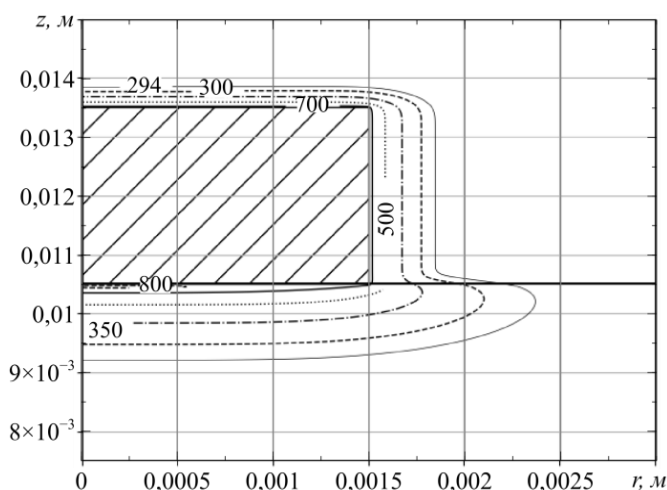


Рисунок 6 — Распределение температур в момент регистрации воспламенения

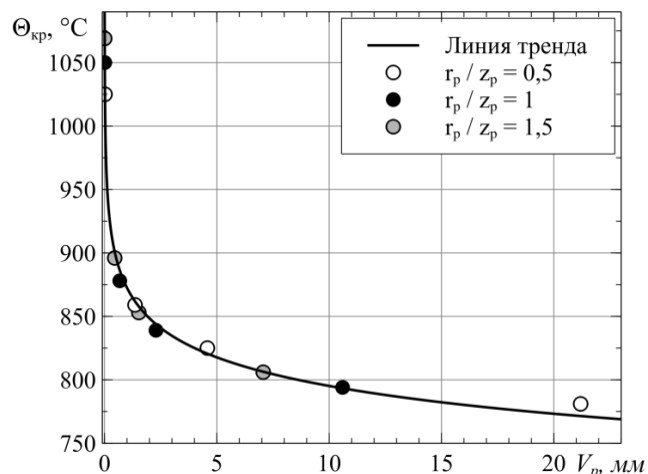


Рисунок 7 — Зависимость $\Theta_{кр}$ от объема алюминиевой частицы

Анализируя зависимость $\Theta_{кр}$ от объема частицы $V_p = \pi r_p^2 z_p$ (рисунок 7), можно сделать вывод, что степенной характер сохраняется для всех соотношений радиуса к высоте r_p/z_p .

В дальнейших исследованиях принимаем, что в полете частица имеет форму сферы с эквивалентным диаметром $d_p = \sqrt[3]{6 \cdot V_p / \pi}$. Зависимость $\Theta_{кр}$ от d_p для алюминия, меди, стали и горючего материала хлопка в виде линий тренда приведены в таблице 1.

Таблица 1: Линии тренда для зависимости $\Theta_{кр} = f(d_p)$

Материал частицы	Горючий материал	$\Theta_{кр} = f(d_p)$
Алюминий	Хлопок	$895,6 \cdot d_p^{-0,121}$
Медь	Хлопок	$868 \cdot d_p^{-0,117}$
Сталь	Хлопок	$863 \cdot d_p^{-0,118}$

В третьем разделе «Разработка методики определения причастности к. з. в электрической проводке 0,38/0,22 кВ к воспламенению горючих материалов» было проведено исследование по

совершенствованию методик оценки и определения вероятности появления воспламенения при возникновении к. з. .

Допускаем, что процесс возгорания изоляции электрической проводки 0,38 кВ и горючего материала вблизи места короткого замыкания в сети (поглощающее состояние) происходит, когда совпадут в пространстве и времени следующие случайные события:

- к. з. в электрической проводке;
- отказал в срабатывании ближайший к месту к. з. защитный коммутационный аппарат (ЗКА).

Изменение состояния отрезка кабельной сети представим в виде регулярного однородного марковского процесса $\xi(t)$ с двумя дискретными состояниями и непрерывным временем (рисунок 8): («0» — в защищаемой сети отсутствует к. з., «1» — в защищаемой кабельной сети присутствует к. з.).

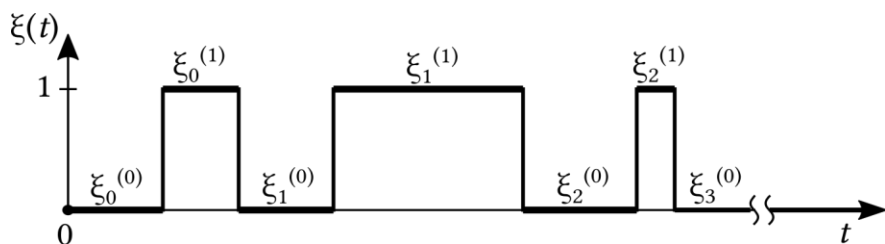


Рисунок 8 — Возможная реализация регулярного марковского процесса с двумя дискретными состояниями, описывающая изменение состояния электрической проводки в течение времени

узлах нагрузки; λ_2 — параметр потока повреждений автоматической системы отключения ЗКА.

Совокупность процессов $\xi(t)$ и $\eta(t)$ рассмотрим как один регулярный однородный марковский процесс с 4 дискретными состояниями и непрерывным временем.

В разрабатываемой методике учитывается факт, что при взрывообразном разрушении жидкой перемычки проводникового металла в зоне к. з. происходит ускорение частиц металла.

Динамика движения каждой частицы металла, разлетающейся из зоны к. з. описывается системой уравнений:

$$\begin{cases} x'' = -\left(\frac{\alpha_1 \cdot v}{m} + \frac{\beta_1 \cdot v^2}{m}\right) \frac{v_x}{v} = -\frac{1}{m}(\alpha_1 + \beta_1 \cdot v)v_x; \\ y'' = -g - \left(\frac{\alpha_1 \cdot v}{m} + \frac{\beta_1 \cdot v^2}{m}\right) \frac{v_y}{v} = -g - \frac{1}{m}(\alpha_2 + \beta_2 \cdot v)v_y. \end{cases} \quad (8)$$

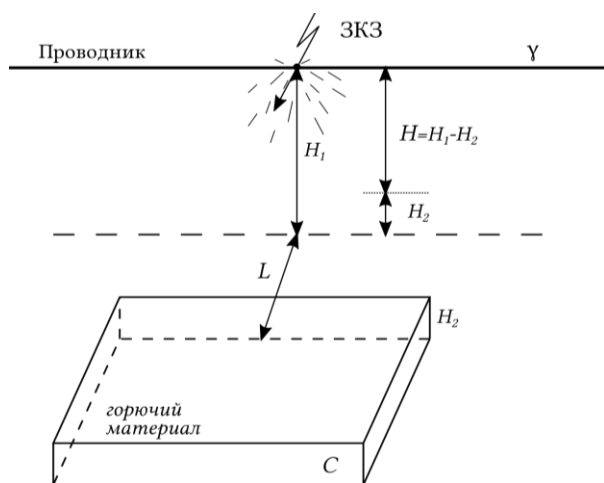


Рисунок 9 — Схема расположения горючего материала относительно КЗ в электро-сети

Аналогичным процессом $\eta(t)$ представим изменение состояния ЗКА («0» — защита в работоспособном состоянии, «1» — защита в необнаруженном отказавшем состоянии).

Величины λ_1 и λ_2 являются параметрами процессов $\xi(t)$ и $\eta(t)$ соответственно, где λ_1 — параметр потока появления к. з. в подконтрольных

узлах нагрузки; λ_2 — параметр потока повреждений автоматической системы отключения ЗКА. где m — масса частицы; v_x, v_y — составляющие скорости по осям координат; α_1, β_1 - коэффициенты сопротивления среды движению частиц.

В качестве критерия опасности воспламенения горючих материалов принимаем зависимость $\Theta_{кр} = f(d_p)$ (раздел 2).

Для выяснения причастности появления ПКЗ к возгоранию горючего материала C частицами раскаленного металла γ в электрифицированном помещении необходимо знать (рисунок 9): вероятность появления ПКЗ в течение времени t ; вероятность поджигания горючего материала в зависимости от материала проводников γ , высоты подвески H провода (кабеля) и расстояния трассы прокладки электрической проводки L до ближайшей границы

нахождения горючего материала; расчетный ток короткого замыкания I .

В этом случае вероятность появления возгорания в электрифицированном помещении в течение времени t определяется с помощью формулы:

$$Q(t) = Q^*(t) \cdot q(C, \gamma, H, L, I) = [1 - \exp(-0,5\lambda_1\lambda_2^2\theta_F^2 t)] \cdot [1 - (1 - q_0(C, \gamma, H, L))^{N_q(I)}]. \quad (9)$$

где $Q^*(t)$ — вероятность появления ПКЗ в узле нагрузки (рисунок 10), θ_F — интервал времени между диагностикой системы отключения ЗКА, $q_0(C, \gamma, H, L)$ — средняя вероятность поджигания горючего материала одной частицей раскаленного металла (рисунок 11); количество частиц раскаленного металла, возникающих в зоне к. з. определяем по формулам $N_q(I) = 0,0002 \cdot I^2 + 0,6391 \cdot I - 476,83$ (время существования к. з. 100 мс).

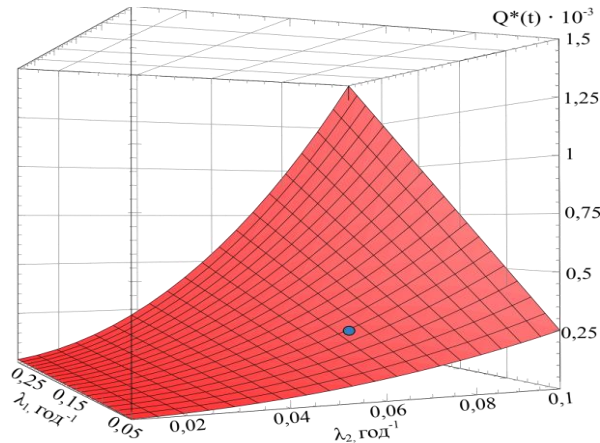


Рисунок 10 — Вероятность появления ПКЗ в узле нагрузки от параметров λ_1 и λ_2

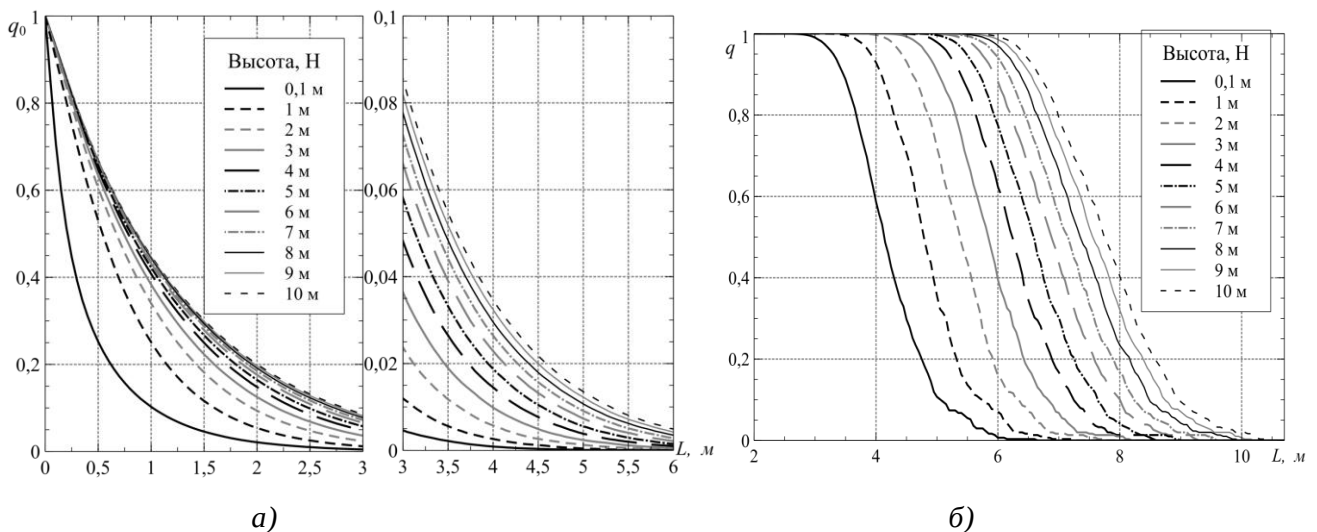


Рисунок 11 — Вероятность воспламенения хлопка раскаленными алюминиевыми частицами, образовавшимися в результате «электрического взрыва» жидкой перемычки между проводниками различных фаз в зависимости от высоты H подвески (провод, кабель), расстояния L от места появления ПКЗ и до ближайшей границы нахождения хлопка: а) одна частица, б) 1000 частиц

Формула (9) позволяет ответить на вопрос является ли появившееся ПКЗ источником возникновения возгорания в электрифицированном помещении. Если при расчетах получится, что $Q(t) \leq 1 \cdot 10^{-6}$, где $t = 1$ год, тогда ПКЗ не будет являться источником возгорания в электрифицированном помещении; в противном случае — является.

Четвертый раздел «Разработка мер по снижению опасности воспламенения в сетях 0,38 кВ, связанных с перегрузкой электрической проводки» посвящен экспериментальным ис-

следованиям динамики нагрева электрической проводки 0,38/0,22 кВ, а также разработке устройства ее защиты от перегрузок.

Оперируя значениями интервалов времени до плавления изоляции электропроводки при различных кратностях токов перегрузок, можно усовершенствовать технические условия на разработку защит от перегрузок

В большинстве случаев для прокладки внутренней проводки электрифицированных помещений используется гибкий и негибкий монтаж при помощи проводов и силовых кабелей следующих типов: ППВ, АППВ, ВВГ, АВВГ, ПВС, ШВВП.

Для проведения необходимых измерений была разработана принципиальная схема экспериментального стенда (рисунок 12).

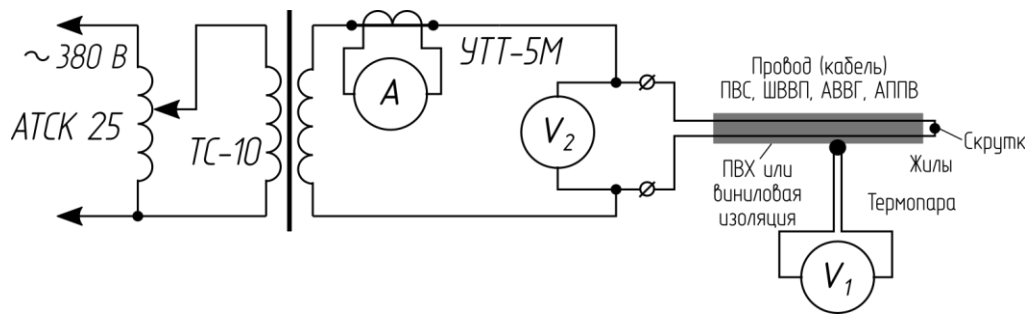


Рисунок 12 — Принципиальная схема экспериментального стенда для определения интервалов времени до плавления ПВХ изоляции КПП и динамики их нагрева

Для I типа экспериментов выбирались КПП марок ВВГ, ППВ (сечения 1,5; 2,5; 4 мм²), АВВГ, АППВ (сечения 2,5; 4 мм²), ПВС, ШВВП (сечения 0,75; 1,5; 2,5; 4 мм²) при изменении нагрузочного тока 20...100 А (таблица 2).

Таблица 2: Разброс интервалов времени (в секундах) до плавления ПВХ изоляции КПП марок ВВГ, ШВВП, ПВС, ППВ (сечением медной жилы 2x1,5 мм²)

Кратность тока K_i	0,9	1,3	1,7	2,2	2,6	3	3,5	3,9
Ток I , А	20	30	40	50	60	70	80	90
Δ , с	150	125	70	40	30	15	15	10
δ , %	9,1	27,8	38,9	40	60	37,5	60	66,7

II тип экспериментов был направлен на получение базы данных динамических температурно-токовых характеристик жил КПП на границе с изоляцией. Среднее значение этой температуры по трем рядам измерений сравнивалось с численным моделированием (раздел 2) в аналогичных условиях (открытая прокладка). Здесь были выбраны двухжильные КПП марок ПВС сечением 1,5...4 мм²; АВВГ сечением 2,5...4 мм²; ШВВП сечением 1,5...2,5 мм².

Сходимость экспериментальных и расчетных данных наблюдается в пределах $\pm 6\%$ при кратностях тока $K_i < 2$ по отношению к длительно допустимому $I_{доп}$. Для $K_i = 3; 4; 5$ расхождения достигают 16%.

Отмечено отличие характера нагрева кабельно-проводникового изделия, помещенного в защитную гофру. Так, при одинаковых перегрузочных токах установившаяся температура нагрева $\Theta_{уст}$ превышает аналогичную для открытой прокладки. Например, для ПВС 2x4 мм² с $I = 38$ А после нагрева в течение 400 с $\Theta_{уст} = 52^\circ\text{C}$ (открытая прокладка) и $\Theta_{уст} = 65^\circ\text{C}$ (прокладка в гофрированной трубе). Вместе с тем, если принять номинальный нагрузочный ток открытой прокладки $I_{доп1} = 38$ А и прокладки в гофре $I_{доп2} = 32$ А, то динамические температурно-временные характеристики практически совпадают, что необходимо учитывать при разработке алгоритма микропроцессорной тепловой защиты сети 380/220 В.

Предлагаемый способ защиты распределительной электрической сети от токов перегрузки включает дискретное измерение мгновенных значений фазного тока провода сети и преобразование их в действующие значения фазного тока, определение кратности тока K_i , определение текущего перегрева провода τ , отключение защищаемого участка сети при превышении значений определенных параметров над допустимыми; дополнительно определяются установившийся перегрев провода $\tau_{уст}$, постоянная времени нагрева провода T_n и прогнозируемое время допустимой перегрузки t_{off} .

При этом текущий перегрев провода определяется по зависимости:

$$\tau = \tau_{уст} - (\tau_{уст} - \tau_i) \cdot \exp\left(\frac{-\Delta t}{T_n}\right), \quad (10)$$

где τ_i — текущий перегрев провода на предыдущем шаге дискретизации по времени, °С, Δt — шаг дискретизации по времени, с.

Прогнозируемое время допустимой перегрузки определяют по зависимости:

$$t_{off} = -T_n \cdot \left(\frac{\tau_{уст} - \tau_{off}}{\tau_{уст} - \tau} \right), \quad (11)$$

где τ_{off} — максимально допустимый перегрев провода, °С.

Затем t_{off} сравнивают с допустимым временем отключения T_{off} , и определяют необходимость отключения защищаемого участка сети ($t_{off} \leq T_{off}$), либо подачи предупреждающего сигнала ($t_{off} \leq T_{warn}$).

Целесообразно установившуюся температуру определять по зависимости:

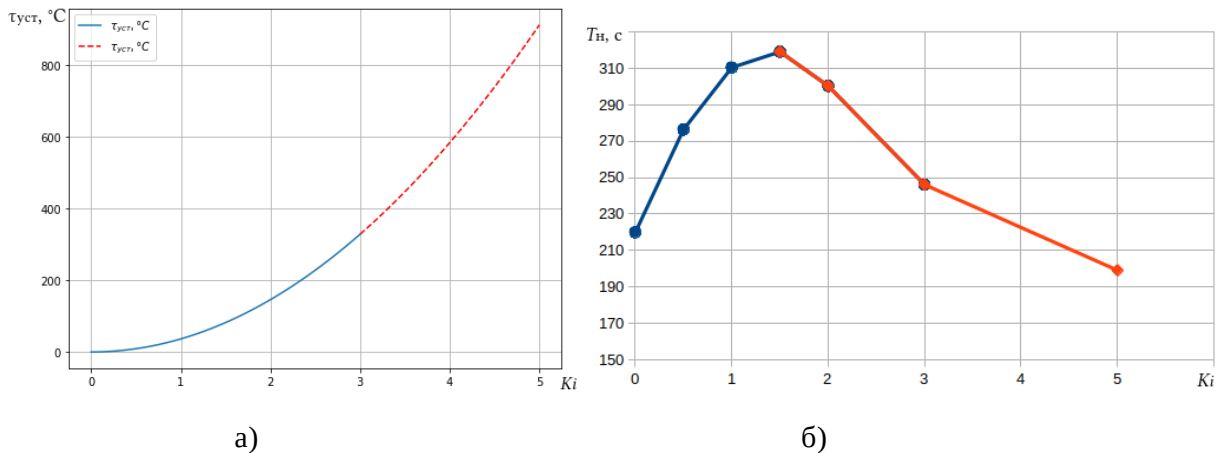
$$\tau_{уст} = \tau_{\theta} \cdot K_i^2 = C_0 \cdot I^2, \quad (12)$$

где τ_{θ} — установившийся перегрев провода при $K_i = 1$, °С.

Постоянную времени нагрева провода можно определить по зависимости:

$$\begin{cases} T_n = T_{n0} + T_{n1} \cdot K_i^2, & K_i \leq 1, \\ T_n = T_{n1} + C_1 \cdot (K_i - 1) + C_2 \cdot (K_i^2 - 1) & K_i > 1; \end{cases} \quad (13)$$

где T_{n0} и T_{n1} — постоянная времени охлаждения ($K_i = 0$) и нагрева при $K_i = 1$ соответственно; C_0, C_1, C_2 — эмпирические коэффициенты, зависящие от материала провода и условий его прокладки (рисунок 13).



а)

б)

Рисунок 13— Зависимости установившегося перегрева а) и постоянной времени нагрева б) провода ПВС 2х2,5 мм² от кратности тока при открытой прокладке

2. На количество погибших на пожарах существенное влияние оказывает тип объекта, на котором произошло возгорание. Так, больше всего погибших в 2015 году было в жилом секторе (98,6% от общего количества погибших по данным Государственной службы Украины по чрезвычайным ситуациям). Также наибольшую долю по месту возникновения пожаров занимают жилые здания и объекты частной собственности (82,3% по данным НИИГД «РЕСПИРАТОР» (г. Донецк) за 2006 г.).
3. Путем численного моделирования в программной среде ComsolMultiphysics 5.3a получены динамические характеристики нагрева электрическим током двухжильных кабельно-проводниковых изделий марок ВВГ 2x1,5...2x4 мм² с двуслойной изоляцией и ППВ 2x1,5...2x4 мм² с однослойной изоляцией в условиях открытой прокладки. Экспериментальная проверка показала сходимость температур наружной поверхности жилы в пределах 6...16 % в зависимости от кратности тока.
4. Установлено, что критическая температура горячей частицы малого размера, вылетающей из зоны к. з. $\theta_{кр}$, практически не зависит от формы частицы при соотношении ее радиуса и длины от 0,5 до 1,5, и может быть представлена в виде зависимости от эквивалентного диаметра шара d_p . Получены линии тренда зависимости $\theta_{кр} = f(d_p)$ для нагретых металлических частиц (медных, алюминиевых, стальных), образующихся при коротком замыкании в электрической проводке.
5. Разработана методика определения причастности коротких замыканий в электрической проводке 380/220 В к возгоранию горючих материалов, отличающаяся тем, что учитывает вероятность наличия источника воспламенения на заданном расстоянии (0...10 м) и высоте (0,1...10 м), тип горючего материала, тип материала электрической проводки, параметры потоков появления короткого замыкания в узле нагрузки λ_1 , существования короткого замыкания при повреждении элемента сети μ_1 , повреждения автоматической системы ЗКА λ_2 , обнаружения и восстановления поврежденной автоматической системы отключения μ_2 , интервал времени между диагностиками системы ЗКА θ_F , расчетный ток к. з.
6. Широко используемые кабельно-проводниковые изделия марок ПВС, ВВГ, ШВВП, АВВГ, АППВ имеют конструктивные отличия, поэтому их установившиеся температуры нагрева подвержены разбросу до $\pm 66,7\%$, причем этот разброс возрастает при увеличении кратности тока по отношению к длительно допустимому K_i .
7. Разработан и изготовлен лабораторный образец микропроцессорной тепловой защиты (МПТЗ), которая позволяет предотвращать опасное тепловое воздействие режимов перегрузки в электрических проводках 220 В и увеличивать срок их эксплуатации за счет оптимизации контроля ВТХ и динамики теплового режима провода. Учет особенностей темпа нагрева кабельно-проводниковых изделий, применяемых в жилых и административных зданиях, проводится с помощью обоснованного коэффициента запаса K_z , который изменяет вид температурно-токовой защитной характеристики МПТЗ и согласовывает ее с типом провода или кабеля.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых изданиях

1. Бершадский, И. А. Разработка САПР для проектирования электроснабжения цеха на напряжении 0,4 кВ / И. А. Бершадский, А. П. Ковалёв, **А. В. Згарбул** // ЭЛЕКТРО. — 2015. — № 4. — С. 47—52.
2. Згарбул, А. В. Пожарная опасность раскаленных частиц алюминиевых токопроводящих жил при коротких замыканиях в электропроводах / **А. В. Згарбул**, И. А. Бершадский, А. П. Ковалёв // Вестник института гражданской защиты Донбасса. — 2016. — 2(6). — С. 21—30.
3. Бершадский, И. А. Анализ статистики пожаров по электротехническим причинам и состояния устройств защиты в сетях 0,4 кВ / И. А. Бершадский, **А. В. Згарбул** // Пожарная безопасность. — 2017. — № 4. — С. 119—125.

4. Ковалёв, А. П. О причастности коротких замыканий в электрической проводке 0,4/0,22 кВ к пожарам в электрифицированных помещениях / А. П. Ковалёв, И. А. Бершадский, А. В. Згарбул // Промышленная энергетика. — 2018. — № 4. — С. 60—65.
5. Бершадский, И. А. Математическая модель зажигания горючих веществ частицами металла, образующимися при КЗ в электропроводке / И. А. Бершадский, А. В. Згарбул, Н. М. Халявинская // Вестник СПб университета ГПС МЧС России. — 2018. — № 3. — С. 54—64. — URL: <http://vestnik.igps.ru/wp-content/uploads/V103/8.pdf>.
6. Бершадский, И. А. Обоснование способа защиты электрической сети напряжением 220 В от перегрузок с учетом нестационарного нагрева электропроводки / И. А. Бершадский, А. В. Згарбул, А. А. Кулиш // Вестник Донецкого национального технического университета. — 2019. — 2(16). — С. 71—79. — URL: <http://vestnik.donntu.org/dl/2019/02/bershadski.pdf>.

Тезисы

7. Згарбул, А. В. Источники пожаров в системах электроснабжения напряжением 380-220 В с глухозаземленной нейтралью / А. В. Згарбул, А. Ю. Гладков // Инновационные перспективы Донбасса. Т. 2: Перспективы развития электротехнических, электромеханических и энергосберегающих систем. — 2016. — С. 35—39.
8. Перспективы создания микропроцессорной защиты от возгораний электропроводки бытовых потребителей / А. В. Згарбул [и др.] // Инновационные перспективы Донбасса, г. Донецк, 24-26 мая 2017 г. Т. 2: Перспективы развития электротехнических, электромеханических и энергосберегающих систем. — 2017. — С. 111—115.
9. Згарбул, А. В. Оценка вероятности возникновения пожара от частиц металла при коротком замыкании в электропроводках зданий / А. В. Згарбул, И. А. Бершадский // Интеграция науки и образования как основа эволюции Евразийского экономического союза: сб. ст. из материалов Евразийского научного форума 08 декабря 2017 г. — СПб.: Университет при МПА ЕврАзЭС, 2017. — С. 236—243.
10. Згарбул, А. В. Метод оценки пожарной безопасности электрической проводки при коротких замыканиях в электрифицированных помещениях / А. В. Згарбул, И. А. Бершадский // Диспетчеризация и управление в электроэнергетике: матер. XIII Всерос. открытой молод. науч.-практ. конф. (Казань 2–4 октября 2018 г.) — Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2018. — С. 194—199.
11. Бершадский, И. А. Расчет нестационарного нагрева электропроводки 0,4 кВ / И. А. Бершадский, А. В. Згарбул, Е. Я. Наглюк // Инновационные перспективы Донбасса, г. Донецк, 21-23 мая 2019 г. Т. 2: Перспективы развития электротехнических, электромеханических и энергосберегающих систем. — 2019. — С. 31—39.

Нормативные документы

12. Методика оценки вероятности возникновения пожароопасных ситуаций в помещениях, где эксплуатируются электрические сети напряжением 0,4/0,22 кВ. — Донецк: ГОУВПО «ДОННТУ» и НИИГД «Респиратор», 2019. — 40 с.

В публикациях, написанных в соавторстве, соискателю принадлежит: [1] – расчет токов к. з. на примере сети здания; [2] – анализ влияния параметров частицы на вероятность наличия источника воспламенения на заданном расстоянии; [3] – идея совершенствования характеристик защитных аппаратов от перегрузок; [4] – применение методики для расчета опасности возгораний горючего материала в электрифицированном помещении; [5] – разработка модели воспламенения горючего материала частицами малого размера; [6] – разработка функциональной схемы и алгоритма работы МПТЗ. [7-10] – апробация научных положений исследований.