

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

На правах рукописи

УДК 621.31:614:84

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)

Диссертация

на соискание степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
д-р техн. наук, доцент
Бершадский Илья Адольфович

Идентичность всех экземпляров
диссертации ПОДТВЕРЖДАЮ
Ученый секретарь диссертационного
совета Д 01.008.01



И. А. Бершадский

Донецк — 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
РАЗДЕЛ 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЗАЩИТЫ ОТ ВОСПЛАМЕНЕНИЙ ПРИ АВАРИЙНЫХ РЕЖИМАХ ЭЛЕКТРОСЕТИ	14
1.1 Анализ статистики пожаров, гибели и травматизма людей, обусловленных электротехническими причинами	14
1.2 Обзор существующих методов оценки и установления причин воспламенений, возникающих от искр и тепловых процессов в электрических проводках	22
1.2.1 Методы оценки и установления причин воспламенений при возникновении короткого замыкания	23
1.2.2 Методы оценки и установления причин воспламенений при возникновении большого переходного сопротивления	30
1.3 Обзор существующих способов и средств защиты установочных электропроводок от режимов перегрузки	31
1.4 Выводы по разделу 1. Постановка задач исследования	44
РАЗДЕЛ 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОВОДКИ 0,38 КВ И ГОРЮЧЕГО МАТЕРИАЛА В ОБЛАСТИ, ПРИЛЕГАЮЩЕЙ К ТОЧКЕ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ	47
2.1 Анализ особенностей нестационарного нагрева двухжильного изолированного проводника под действием электрического тока	47
2.1.1 Моделирование нагрева двухжильного изолированного проводника при открытой прокладке	48
2.1.2 Влияние изменения структуры провода или кабеля на характеристики нагрева в режиме перегрузки	50
2.2 Разработка математической модели воспламенения горючих веществ частицами металла, образующимися при к. з. в электрической проводке	53
2.3 Определение теоретического критерия воспламенения горючих материалов частицами металла	61

2.4	Выводы по разделу 2	65
РАЗДЕЛ 3. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРИЧАСТНОСТИ КЗ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОВОДКЕ 0,38/0,22 КВ К ВОСПЛАМЕНЕНИЮ ГОРЮЧИХ МАТЕРИАЛОВ		
68		
3.1	Исследования процесса воспламенения изоляции электрической проводки 0,38 кВ и горючего материала вблизи места короткого замыкания в сети	68
3.2	Определение вероятностных характеристик опасности раскаленных частиц токопроводящих жил при коротких замыканиях в электрических проводках	88
3.3	Построение «дерева формирования воспламенения» и схемы минимального совмещения для оценки безопасности частиц, образованных при к. з. в электрической проводке	96
3.4	Оценка причастности коротких замыканий в электрической проводке 0,38/0,22 кВ к воспламенения в электрифицированных помещениях	97
3.5	Выводы по разделу 3	103
РАЗДЕЛ 4. РАЗРАБОТКА МЕР ПО СНИЖЕНИЮ ОПАСНОСТИ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ В СЕТЯХ 0,38 КВ, СВЯЗАННЫХ С ПЕРЕГРУЗКОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОВОДКИ		
105		
4.1	Методика экспериментального исследования динамики нагрева электрической проводки 0,38/0,22 кВ	105
4.2	Экспериментальные исследования нагрева внутренней электрической проводки зданий в режимах перегрузки	108
4.3	Разработка устройства защиты от перегрузки во внутренней электрической проводке зданий	113
4.4	Выводы по разделу 4	129
ЗАКЛЮЧЕНИЕ		131
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ		134
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Расчет коэффициентов разностной сетки в цилиндрической системе с переменным шагом		146

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Программа моделирования нагрева горючего материала раскаленной частицей цилиндрической формы	149
ПРИЛОЖЕНИЕ В. Программа расчета вероятностных характеристик опасности раскаленных частиц	160
ПРИЛОЖЕНИЕ Г. Прошивка микроконтроллера МПТЗ (Rust, фрагмент)	167
ПРИЛОЖЕНИЕ Д. Моделирование процесса нагрева электропроводки в среде Comsol Multiphysics	174
ПРИЛОЖЕНИЕ Е. Результаты экспериментов нагрева 2-жильных проводов	176
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж. Документы, подтверждающие внедрение результатов диссертационной работы	181

ВВЕДЕНИЕ

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 (НПУЭЭ). При этом от тепловых проявлений электрического тока (короткие замыкания, ослабленные и опасно нагретые контактные соединения, перегрузки) 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 НПУЭЭ. 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 возмнений 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 удастся 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 исследовалось 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, а при кратности тока 1,2...1,4 возможен дополнительный недопустимый перегрев провода сети. Необходимо обосновать такой подход к построению тепловой защиты электрической проводки 0,38/0,22 кВ с применением адаптивных алгоритмов и микропроцессорных многофункциональных 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 продолжительного короткого замыкания 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 нейтралью в течение года от частоты появления токов короткого замыкания между силовыми проводниками, которые находятся под напряжением; времени существования продолжительного короткого замыкания; 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 факто-

ров.

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, оснащенных 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 состоит в следующем:

– 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 горно-спасательного 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 еди-

ницы с использованием динамической модели нагрева-охлаждения; функциональность лабораторного образца подтверждена актом испытаний ГУ МакНИИ (г. Макеевка);

– результаты работы внедрены в учебный процесс кафедры «Электро-снабжение 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, в частности, распределительные щиты электрической проводки зданий и сооружений; 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 и ее изоляции под действием электрического тока с последующей математической обработкой; 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, проложенного открыто, 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°C) 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 возникно-

вения 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.

РАЗДЕЛ 1

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЗАЩИТЫ ОТ ВОСПЛАМЕНЕНИЙ ПРИ АВАРИЙНЫХ РЕЖИМАХ ЭЛЕКТРОСЕТИ

1.1 Анализ статистики пожаров, гибели и травматизма людей, обусловленных электротехническими причинами

Статистику пожаров, в том числе, связанных с эксплуатацией электроустановок, ведут большинство стран мира. Главным мировым органом в этой области является «Международный технический комитете по предотвращению и тушению пожаров» (СТIF (КТИФ)). Непосредственно в России ведением статистики пожаров занимается отдел пожарной статистики ФГУ ВНИИПО МЧС России. В Украине статистику пожаров ведет непосредственно ГУ МЧС Украины.

Анализ статистических данных последних лет (таблица 1.1) [1] показывает, что ежегодно в России возникает около 150000 пожаров, приносящих огромный ущерб. Большинство пожаров сопровождаются травмами и гибелью людей. В среднем, каждый год общее количество погибших и получивших травмы составляет около 9000 человек и причиняется большой материальный ущерб, на 1 млн. населения каждый год приблизительно 19 человек погибают при пожаре разной природы возникновения.

Динамика погибших и травмированных людей от пожаров по данным ГУ МЧС Украины за 2006–2015 гг. представлена на рисунке 1.1.

Одними из наиболее опасных по фактору воспламенения, возбуждения пожара являются электрические изделия разного назначения и функций, устойчиво занимающие второе место по общему количеству источников пожаров и по количеству погибших в них. Можно выделить шесть основных групп электротехнических изделий, которые охватывают все возможные случаи их использования на практике: кабельные изделия; электронагревательные устройства; распределительные устройства и аппаратура; цифровая и электронная аппаратура; электрические машины; электроосветительное оборудование [2]. Возникновение пожара объясняется наличием горючих электроизоляционных материалов, которые подвергаются горению при появлении аварийных режимов. Во время такого аварийного режима можно наблюдать искры, дуги, нагрев

Таблица 1.1 – Распределение основных показателей обстановки с пожарами в Российской Федерации за 2013–2017 гг. по причинам возникновения пожаров

Причина возникновения пожара	Число пожаров и их последствия	Год				
		2013	2014	2015	2016	2017
1	2	3	4	5	6	7
Неосторожное обращение с огнем	Количество пожаров, ед.	52563	48843	47473	41923	39971
	Прямой материальный ущерб, тыс. руб.	2389359	3180030	2452658	1164214	1354959
	Погибло, чел.	6917	6298	5803	5106	4611
Неисправность производственного оборудования, нарушение технологического процесса производства	Количество пожаров, ед.	607	510	523	489	523
	Прямой материальный ущерб, тыс. руб.	327838	1345060	1942729	466523	199060
	Погибло, чел.	12	4	12	12	7
Нарушение правил устройства и эксплуатации электрооборудования	Количество пожаров, ед.	40388	40871	40767	41317	40528
	Прямой материальный ущерб, тыс. руб.	4523022	6517358	8073903	5435092	5468025
	Погибло, чел.	1858	2002	1879	1908	1765
Нарушение правил устройства и эксплуатации печей	Количество пожаров, ед.	21489	22506	21023	21972	20250
	Прямой материальный ущерб, тыс. руб.	654743	867175	738495	864824	682619
	Погибло, чел.	917	997	894	888	720
Нарушение правил устройства и эксплуатации теплогенерирующих агрегатов и установок	Количество пожаров, ед.	687	692	624	724	505
	Прямой материальный ущерб, тыс. руб.	37016	52961	56366	285804	36602
	Погибло, чел.	38	46	28	45	23
Нарушение правил пожарной безопасности при провед. электрогазо-сварочных работ	Количество пожаров, ед.	1098	1017	1036	935	944
	Прямой материальный ущерб, тыс. руб.	235784	399337	1914455	599582	319008
	Погибло, чел.	10	17	22	5	9
Всего	Количество пожаров, ед.	153466	150804	145942	139475	132844
	Прямой материальный ущерб, млн. руб.	14885,3	18246,6	22461,8	13418,4	13767,4
	Погибло, чел.	10601	10138	9405	8749	7816

деталей электрическим током, образование частиц расплавленного металла и открытого огня воспламенившейся изоляции.

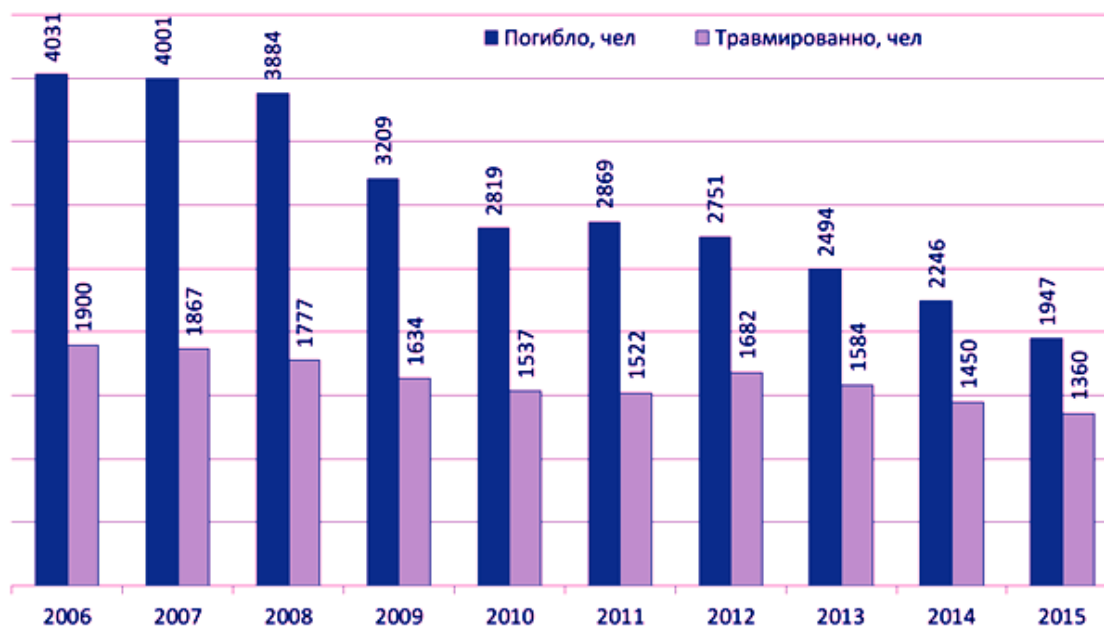


Рисунок 1.1 – Динамика погибших и травмированных людей от пожаров в Украине

Диаграмма количества пожаров по причине нарушения правил безопасности при установке и эксплуатации электроустановок в Российской Федерации за 2003–2017 гг. и количество погибших на них представлена на рисунке 1.2. График, приведенный на рисунке 1.2, показывает, что количество пожаров от нарушений правил устройства и эксплуатации электрооборудования (НПУЭЭ) с 2003 по 2009 гг. уменьшилось на 18%, а затем стабилизировалось и в течение последних 7 лет остается на уровне среднего значения 40900 ед. с отклонениями $\pm 1,5\%$. По нашему мнению это связано с тем, что в период до 2009 г. начали широко внедряться защитно-коммутационные аппараты современных фирм (ABB, Siemens, Schneider Electric), имеющие более высокие показатели надежности в случаях проявления аварийных ситуаций (*к. з.* и перегрузки); установка устройств защиты от утечек тока на землю (различные типы устройств защитного отключения, реагирующих на дифференциальный ток); частичная замена алюминиевых проводок на медные с изменением схемы питания бытовых электроприемников [3]. Несмотря на указанные мероприятия уровень количества пожаров от НПУЭЭ остается высоким [4], что обусловлено особенностями согласования защит от *к. з.* или перегрузок с мощностями нагрузок, временем действия защиты и выбором допустимых по температуре

сечений токоведущих жил электрических проводов.

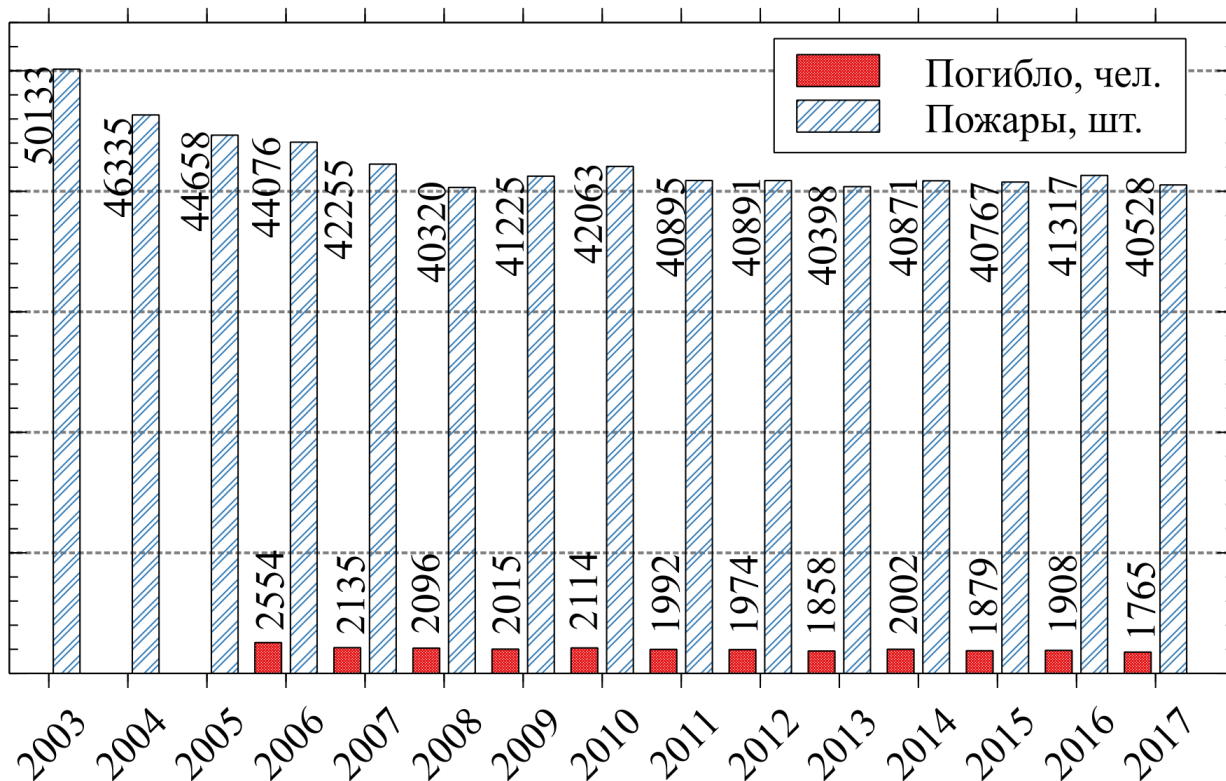


Рисунок 1.2 – Диаграмма пожаров от нарушения правил пожарной безопасности при установке и эксплуатации электроустановок в Российской Федерации и количество погибших на них

Результаты анализа, проведенные ВНИИПО МЧС России, показали, что в большинстве случаев причинами пожаров от электрических изделий как правило являются [5]:

- несовершенство противопожарных требований;
- несоответствие применяемой электротехнической продукции, материалов и комплектующих комплексным требованиям пожарной безопасности;
- низкий уровень эксплуатации.

На рисунке 1.3 приведено распределение пожаров в электроустановках по причинам их возникновения [6].

От электротехнических изделий в России происходит до 50000 пожаров. По данным статистики [7] в 2017 году произошло 40390 пожаров от электроизделий, или 30,5 % от общего количества пожаров в стране. По данным оценки эти пожары нанесли ущерб в размере 3,3 млрд. руб. Это приблизительно 73,5 % от ущерба всех пожаров. Приблизительно такое же процентное соотношение пожаров характерно также для многих промышленно развитых стран мира.

По всем видам электротехнической продукции ведущие места по чис-

лу пожаров занимают: а) изделия кабельной продукции — провода и кабели (69,6%), б) выключатели, вилки и др. разъемные элементы (6,7%). При этом число пожаров, возникших от загорания кабелей, в 20...30 раз меньше числа пожаров, возникших от загорания проводов.



Рисунок 1.3 – Среднегодовое распределение пожаров по причинам, связанным с неисправностью или неправильной эксплуатацией электроустановок

Это объясняется, во-первых, тем что протяженность электрической проводки (ЭП) на большинстве объектов во много раз превышает длину кабельных линий. Как правило, с увеличением длины увеличивается вероятность повреждения линии, а следовательно, и вероятность возникновения пожара. Во-вторых, требования при проектировании, монтажу и эксплуатации кабельных линий намного жестче, чем к электрическим проводам и все возможные работы контролируются специалистами; в-третьих, как показывает практика, в жилом секторе люди, не имеющие надлежащей квалификации, самостоятельно монтируют и устраняют неисправности ЭП, создавая узлы, которые становятся причиной воспламенения.

Анализ статистических данных показал, что на количество пожаров существенно влияет место и тип объекта, на котором произошло воспламенение. Так, наибольшее количество погибших в 2015 г. зарегистрировано в жилом секторе Украины — 1919 человек (98,6% от общего количества погибших вследствие пожаров).

Данные НИИ горноспасательного дела и пожарной безопасности «Респиратор» по Донецкой области в 2006 г. приведены в таблице 1.2 и рисунках

1.4–1.6. Наибольшую долю по месту возникновения пожара здесь занимают жилые здания и объекты частной собственности — 82,3 % (таблице 1.2).

Таблица 1.2 – Распределение пожаров, произошедших в 2006 г. в Донецкой области, причиной которых были кабельно-проводниковая продукция

Причина пожара		Количество	Доля, %
Режим эксплуатации провода/кабеля	токовая нагрузка соответствовала допустимой	301	53,75
	токовая нагрузка превышала допустимую	250	44,64
	не установлено	9	1,61
Устройства отключения	сработали	141	25,18
	не сработали по причине загробления	225	40,18
	не сработали по причине неправильного выбора	174	31,07
	не установлено	20	3,57
Место возникновения			
Объект, на котором произошло возмещение	жилое здание	461	82,3
	сооружение произв. назначения	31	5,54
	торгово-складские помещения	41	7,32
	административные сооружения	16	2,86
	сельско-хозяйственные сооружения	11	1,97
Всего		560	100

Большинство пожаров в Донецкой области с человеческими жертвами наблюдается с января по март месяц (рисунок 1.7). Это связано с отопительным сезоном и использованием электронагревателей различных типов.

По анализам статистики различных источников более 20% пожаров при эксплуатации электроустановок приходится на электрические аппараты управления и защиты [8]. Статистика указывает на то, что доля пожаров от электрооборудования на промышленных предприятиях достигает около 37%.

Данные о пожарах по причине возмещения электротехнической продукции показывает, что на втором месте после кабельных линий и ЭП находятся бытовые электроотопительные приборы. Третье место делят вводные устройства и разного рода электрические бытовые приборы. Вопросу повышения уровня пожарной безопасности бытовых электросетей посвящены многие труды [9, 10, 11, 12] в которых оценивают опасность от электрических изделий, ЭП в аварийных режимах.

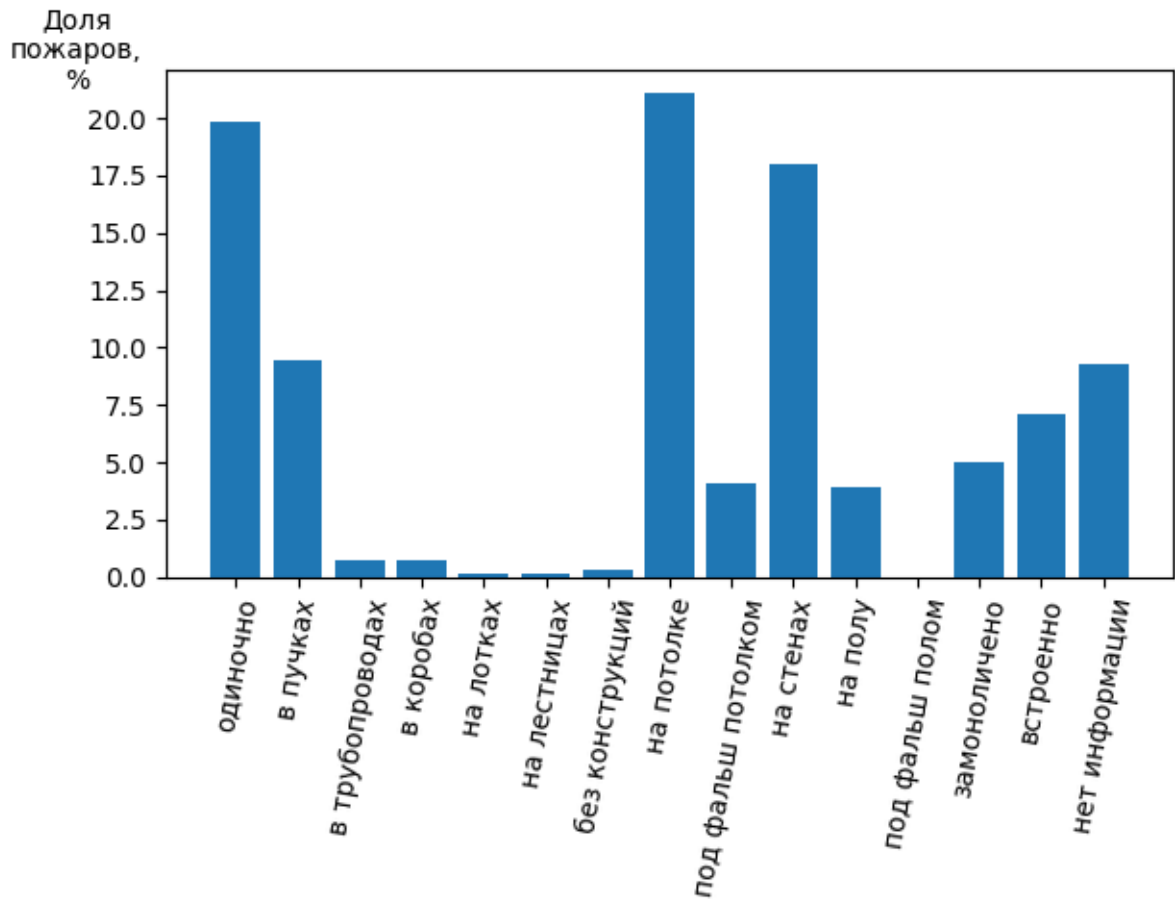


Рисунок 1.4 – Распределение пожаров, вызванных эксплуатацией электрооборудования применительно к способу прокладки провода или кабеля



Рисунок 1.5 – Распределение пожаров по режиму эксплуатации провода или кабеля

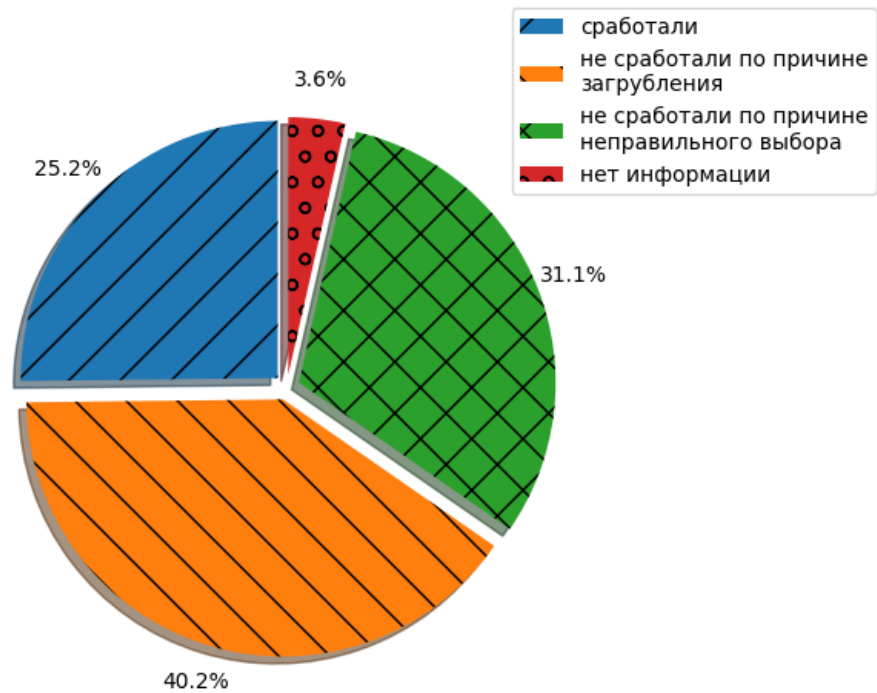


Рисунок 1.6 – Состояние устройств защитного отключения системы ЭП

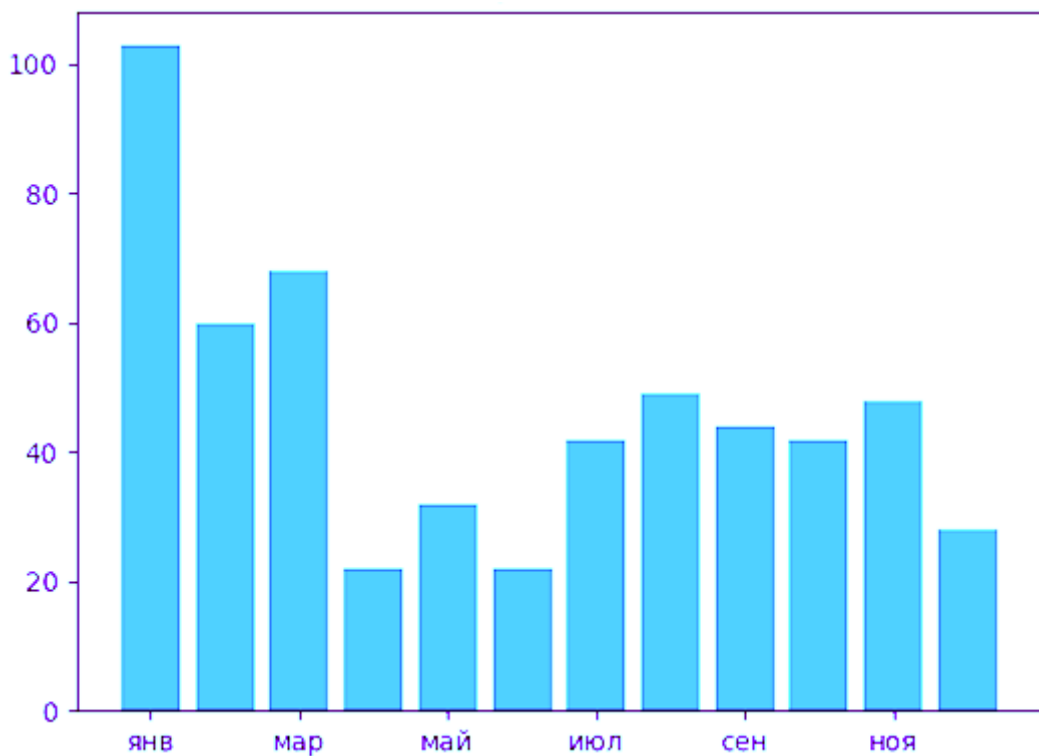


Рисунок 1.7 – Количество пожаров в Донецкой области по месяцам, причиной возникновения которых была кабельно-проводниковая продукция

1.2 Обзор существующих методов оценки и установления причин возмепенений, возникающих от искр и тепловых процессов в электрических проводках

Анализируя данные п. 1.1 можно сделать вывод, что наибольшее количество пожаров, материального ущерба и человеческих жертв происходит по двум причинам: неосторожное обращение с огнем и НПУЭЭ.

Последняя причина включает в себя повреждение низковольтной электросети до 1 кВ вследствие:

- короткого замыкания (к. з.);
- электрической дуги;
- электрического искрения (ЭИ) и изменения переходного сопротивления (ПС) силовых контактных соединений [13, 14, 15];
- токовой перегрузки;
- утечки тока на землю;
- возмепенения пыли, осевшей на изоляции и элементах конструкций низковольтных электросетей (НЭС), работающей в аварийном режиме;
- перенапряжения;
- перехода электрического тока на металлические заземленные конструкции зданий и сооружений;
- перехода электрического тока на слаботочные электрические линии (радио, телефонные и пр.);
- теплового воздействия электронагревательных приборов;
- теплового воздействия электрических ламп накаливания, их аварийного режима и проплавления колб;
- аварийного режим работы люминесцентных светильников.

Наиболее частыми причинами, вызывающими перегрузку электрических цепей являются:

- неполное или неметаллическое короткое замыкание через некоторое переходное сопротивление;
- перенапряжение в электрической сети;
- работа трехфазного двигателя на двух фазах вследствие обрыва третьей или срабатывания одного из предохранителей;
- заклинивание, перегрузка механизма, приводимого электродвигателем (например, двигателя транспортерной линии);

- неправильный выбор электродвигателя для заданного рабочего механизма (заниженная мощность по отношению к требуемой);
- заедание вала электродвигателя вследствие недостаточности смазки, или разрушении подшипников и перекос вала;
- включение в электрическую сеть не предусмотренных расчетом мощных потребителей электроэнергии, нарушение правил монтажа электроприемников [16].

Количество пожаров в зданиях и сооружениях различного назначения, связанных с аварийными режимами в электросетях, во всем мире достигает 20...40%.

В ГОУВПО «ДОННТУ» вопросам установления причин воспламенений в проводниках и контактных соединениях особое внимание уделялось в работах ученых Ковалёва А. П., Солёного С. В., Солёной О. Я.

1.2.1 Методы оценки и установления причин воспламенений при возникновении короткого замыкания

По статистическим данным, *к. з.* в ЭП является наиболее частой причиной пожаров. *К. з.* представляет огромную опасность воспламенений, т. к. при этом происходит значительное увеличение температуры нагрева токоведущих частей и изоляции в зоне замыкания. Можно предполагать, что возможно, идет завышение процента пожаров от этого вида аварийного режима. Иногда это происходит по причине недостаточной квалификации экспертов. Также, существует версия, что установления причины пожара по вине *к. з.* может быть умышленна, т. к. ответственность за пожар от *к. з.* чаще всего минимальна.

Существует мнение, что наиболее ошибочные заключения экспертов возникают при определении причастности к пожарам *к. з.* в ЭП. Часто ошибка заключается в том, что в очаге пожара находятся проводники со следами оплавления аварийным током [17, 18], но не учитывается то, что *к. з.*, оплавившее проводники, могло возникнуть в ходе развития пожара и не может быть его причиной.

При возникновении *к. з.* возникают различные процессы по которым можно определить причастность *к. з.* к пожару. Это изменение химического состава среды, изменение структуры металлов токопроводящих жил.

Информация о составе газовой атмосферы в момент *к. з.* используется в

качестве исходной при определении причастности к пожару аварийных режимов в ЭП. Во время возникновения *к. з.* происходит локальное задымление зоны замыкания продуктами горячей изоляции, которое значительно стабильнее общего задымления помещения. Анализ дыма горячей изоляции производится с помощью химического масс-спектрометра типа МХ-1304.

Методика определения причастности к пожарам частиц металлов в процессе их разлета при *к. з.* состоит в следующем.

В соответствии с ГОСТ 12.1.004-91 [19] вероятность $Q_{\Pi}(t)$ возникновения пожаров в электрифицированном помещении от электротехнического изделия в течение года не должна превышать величины $1 \cdot 10^{-6}$ или величины, определяемой согласно [20, 21] и может быть определена с помощью формулы:

$$Q_{\Pi} = Q_{\text{П.Р.}} \cdot Q_{\text{П.З.}} \cdot Q_{\text{Н.З.}} \cdot Q_{\text{В}} \leq 1 \cdot 10^{-6}, \quad (1.1)$$

где $Q_{\text{П.Р.}}$ — вероятность возникновения характерного режима воспламенения в составной части изделия (возникновения *к. з.* перегрузки, повышения переходного сопротивления и т. п.), 1/год; $Q_{\text{П.З.}}$ — вероятность того, что значение характерного электротехнического параметра (тока, переходного сопротивления и др.) лежит в диапазоне пожароопасных значений; $Q_{\text{Н.З.}}$ — вероятность несрабатывания аппарата защиты (электрической, тепловой и т. п.); $Q_{\text{В}}$ — вероятность достижения горючим материалом критической температуры или его воспламенения.

Свое развитие формула (1.1) получила в методике определения причастности к пожарам частиц металлов в процессе их разлета при *к. з.* Она распространяется на открытые ЭП, выполненные изолированными проводами с алюминиевыми жилами в сетях до 1000 В, проложенными в местах нахождения (или возможного появления) горючих материалов [5].

Данная методика позволяет определить вероятность появления пожаров от частиц металлов при *к. з.* и актуальна при проведении пожарных экспертиз.

Первым этапом данной методики является подготовка к проведению экспертизы. С места пожара берется образец твердого горючего материала. Устанавливается в соответствии с ГОСТ 12.1.044-89 [22] группа горючести. По таблице 1.3 определяется средняя вероятность $Q_{\text{В}}$ воспламенения материала от частиц металла, вызванных *к. з.* в ЭП. По характерным оплавленным местам ЭП устанавливаются все возможные участки замыкания.

После определения истинного места *к. з.* определяется высота зоны короткого замыкания относительно уровня пола H_1 и средняя высота горючего материала H_2 в метрах.

Таблица 1.3 – Вероятность воспламенения горючих материалов в зависимости от группы горючести

Группа горючести материала	Характеристика горючести	Средняя по группе вероятность воспламенения Q_B
Легковоспламеняющееся вещество	Горючий материал, способный воспламенятся от кратковременных воздействий пламени спички, искры, накаливаемого электропровода и других подобных источника зажигания с низкой энергией	0,84
Горючий материал	Материал, способный самостоятельно гореть после удаления источника зажигания	0,37
Трудногорючий материал	Горючее вещество, способное гореть под воздействием источника зажигания, но не способное к самостоятельному горению после его удаления	0,08

На плане помещения (рисунок 1.8) наносятся точка проекции *к. з.* на горизонтальную плоскость O относительно верхнего уровня горючего материала и площадь, которую занимает горючий материал до момента возникновения пожара S_p . Если же горючий материал занимает определенную часть площади помещения, то на план наносятся окружности с центрами в точке проекции места *к. з.*: R_1 — расстояние до ближайшей границы горючего материала, м; R_2 — до самой удаленной точки горючего материала, м, H_1 — место расположения короткого замыкания относительно пола, м, H_2 — средняя высота горючего материала, м.

Вероятность пожара Q_{Π} от частиц металла [5]:

$$Q_{\Pi} = Q_{И} Q_B Q_{Т.З.}, \quad (1.2)$$

где $Q_{И}$ — вероятность появления источника воспламенения в области горючих материалов; $Q_{В}$ — вероятность воспламенения материала; $Q_{Т.З}$ — вероятность отказа противопожарной системы.

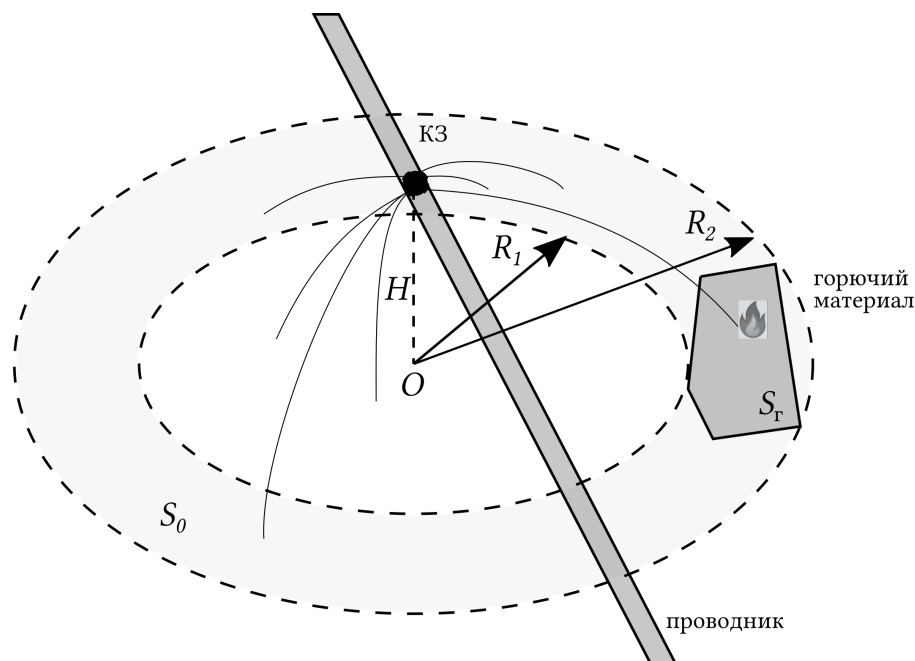


Рисунок 1.8 – Расположение горючего материала в помещении относительно ЭП

Вероятность $Q_{И}$ зависит от расположения горючего материала и ЭП.

В случае, если проекция места к. з. располагается над горючим материалом, то: $R_1 = 0$ и $Q_{И}(R_1) = 1$. Необходимое минимальное возможное значение радиуса в зависимости от разности $H = H_1 - H_2$ находится из условия $Q_{И}(R_2) = 0$ по [5, таблица 2.4]. В том случае если значение R_2 больше расстояния от места к. з. до удаленной точки размещения горючего материала $R_{м}$, принимается $R_2 = R_{м}$.

Зная H и расстояние по горизонтали от места к. з. до R_1, R_2 [5, таблица 2.4], находят составляющую вероятности наличия источника воспламенения $Q_{И}$.

Расчет начинают с определения [5, таблица 2.4] составляющих вероятности появления источника $\bar{Q}_{И}(R_1)$ и $\bar{Q}_{И}(R_2)$ при известном $H = H_1 - H_2 \geq 0$. Возможны три варианта:

1. $\bar{Q}_{И}(R_2) \neq 1$. Полная вероятность появления частиц металла в зоне горючих материалов:

$$Q_{И} = \frac{\bar{Q}_{И}(R_1) - \bar{Q}_{И}(R_2)S_{Г}}{1 - \bar{Q}_{И}(R_2)S_0}, \quad (1.3)$$

где S_{Γ} — площадь на плане, которую занимал горючий материал до пожара, м^2 ;
 S_0 — площадь помещения между окружностями с радиусами R_1 и R_2 , м^2 ;

$$2. \bar{Q}(R_2) = 1:$$

$$Q_{\text{И}} = \frac{S_{\Gamma}}{S_0}, \quad (1.4)$$

3. При условии, если $H = H_1 - H_2 < 0$, принимается наибольшее значение $\bar{Q}_{\text{И}}(R_1)$, а $Q_{\text{И}}$:

$$Q_{\text{И}} = \bar{Q}_{\text{И}}(R_1) \frac{S_{\Gamma}}{S_0}. \quad (1.5)$$

Установление причастности частиц металлов при *к. з.* в ЭП производится по значению вероятности $Q_{\text{П}}$. В случае, если $Q_{\text{П}}$ не меньше 0,3 можно говорить о причастности ЭП к пожару. Если $Q_{\text{П}}$ не более 0,01 — пожар маловероятен. В остальных случаях можно говорить о причастности к пожару ЭП, сравнивая вероятности воспламенения от других возможных источников.

В соответствии с ГОСТ Р 50571.15-97 [23], открытая прокладка таких проводов разрешается только в трубах, коробах и на изоляторах. В сельской местности и в дачном секторе в эксплуатации такие ЭП используются очень часто. Проблема возникновения и профилактика пожаров при этом продолжает оставаться актуальной.

Остановимся более детально на аварийных режимах в распределительной сети, представляющих важность с точки зрения выброса металлических частиц различного размера из зоны замыкания проводников. Частицы металла разлетаются на значительные расстояния и могут вызвать воспламенение горючего материала вблизи места *к. з.*

Причиной образования частиц металлов является «электрический взрыв» жидкой перемычки проводника с дальнейшим механизмом разбрасывания металла, что подтверждается экспериментальными исследованиями [24].

Так, в [5] приводится расчетное выражение для определения минимальной длительности *к. з.*, при котором происходит взрыв перемычки с вылетом раскаленных частиц металла из зоны *к. з.*:

$$\tau_{\text{к}} = \frac{\pi q_{\text{П}} \gamma d_{\text{П}}^2}{2\pi I_{\text{к}} J} \quad (1.6)$$

где τ_k — длительность тока *к. з.*, с; J — плотность тока при «электрическом взрыве», которая по данным [24] составляет $(1...5) \cdot 10^7$ А/см²; $q_{\text{п}}$ — удельная теплота плавления металла, Дж/кг; γ — плотность расплавленного металла, кг/м³; $d_{\text{п}}$ — диаметр перемычки, м; I_k — ток короткого замыкания, А.

При проведении пожарно-технических, электротехнических экспертиз и исследований нередко возникают вопросы о причастности к воспламенению различных веществ искрами, каплями металла, образовавшимися при *к. з.* в электроустановках, а также при газосварке, резке металла, плавлении электродов ламп накаливания [25]. Поэтому прогнозирование перемещения и температурной динамики искр является важной задачей по обеспечению пожарной безопасности.

Причастность искр (капель) металла к появлению воспламенения не может быть установлена из того факта, что частицы нагреваются до высоких температур (например, наибольшая доля горящих алюминиевых частиц лежит в интервале $2200 \div 2300^\circ\text{C}$ [5]; начальная температура капли стали при электро-сварке принимается 2100°C [5]; можно принять температуру медных частиц, образующихся в зоне *к. з.* в интервале $2050 \div 2700^\circ\text{C}$, хотя более точные данные требуют дальнейших исследований; при резке металла (стали) начальная температура искры составляет 1500°C [26]).

Это связано с тем, что капли металла имеют малые размеры и массы (полидисперсность от нескольких мкм до десятка мм), поэтому быстро остывают при падении со значительной высоты и не всегда могут привести к воспламенению.

В ГОСТ 12.1.004-91 методика определения параметров воспламенения тепловых источников основана на допущении о свободном падении искр (капель) в 3-х состояниях: жидком, кристаллизованном и твердом [19].

Время полета искры в раскаленном (жидком) состоянии:

$$t_p = \frac{c_p \cdot M_{\text{и}}}{\alpha \cdot S_{\text{и}}} \cdot \ln \frac{\Theta_{\text{и}} - \Theta_{\text{о.с.}}}{\Theta_{\text{пл}} - \Theta_{\text{о.с.}}}, \text{ с.} \quad (1.7)$$

Время полета искры, в течение которого происходит её кристаллизация:

$$t_{\text{кр}} = \frac{C_{\text{кр}} \cdot M_{\text{и}}}{\alpha \cdot S_{\text{и}} (\Theta_{\text{пл}} - \Theta_{\text{о.с.}})}, \text{ с} \quad (1.8)$$

где $M_{и}$ — масса искры (капли), кг; $C_{кр}$ — удельная теплота кристаллизации металла, Дж/кг ($C_{кр} = 393 \cdot 10^3$ для алюминия); c_p — удельная теплоёмкость расплавленного металла, Дж/(кг·К) ($c_p = 1090$ для алюминия); $\Theta_{и}$ — начальная температура искры, К; $\Theta_{о.с.}$ — температура окружающей среды, К; $\Theta_{пл}$ — температура плавления металла, К; $S_{и}$ — площадь поверхности искры, м² (для шара $S_{и} = \pi \cdot d^2$); α — коэффициент теплоотдачи искры, Вт/м²·К.

Для определения α находят число Рейнольдса:

$$Re = \frac{v_c \cdot D_{и}}{\nu}, \quad (1.9)$$

где $v_c = 0,5\sqrt{2 \cdot g \cdot h}$ — средняя скорости искры, м/с; h — высота падения искры, м; $D_{и}$ — диаметр искры, м; g — ускорение свободного падения, м/с², $\nu = 15,1 \cdot 10^{-6}$ — кинематическая вязкость окружающей среды (воздуха) при 20°C, м²/с.

Затем вычисляется критерий Нуссельта:

$$Nu = 0,62 \cdot Re^{0,5}. \quad (1.10)$$

Коэффициент теплоотдачи металла:

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda_{в}}{D_{и}}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}} \quad (1.11)$$

где $\lambda_{в} = 22 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ — коэффициент теплопроводности воздуха.

Время падения искры t сравнивается с t_p . Если $t \leq t_p$, то конечная температура искры (капли):

$$\Theta_{кон} = \Theta_{о.с.} + (\Theta_{и} - \Theta_{о.с.}) \exp \left(-\frac{\alpha S_{и}}{c_p \cdot M_{и}} \cdot t \right) \quad (1.12)$$

Если капля успевает кристаллизироваться, т. е. $\tau > (\tau_p + \tau_{кр})$, то конечная температура искры (капли) в твердом состоянии:

$$\Theta_{кон} = \Theta_{о.с.} + (\Theta_{и} - \Theta_{о.с.}) \exp \left(-\frac{\alpha S_{и}}{c_k \cdot M_{и}} \cdot [t - (t_p + t_{кр})] \right), \quad (1.13)$$

где c_k — удельная теплоёмкость металла, Дж/(кг·К) ($c_k = 903$ для алюминия).

При $t_p < t \leq (t_p + t_{кр})$ конечная температура искры (капли) принимается:

$$\Theta_{кон} = \Theta_{пл}. \quad (1.14)$$

1.2.2 Методы оценки и установления причин воспламенений при возникновении большого переходного сопротивления

Большое переходное сопротивление (в дальнейшем БПС) – аварийный режим, возникающий при переходе электрического тока с одного проводника на другой [27]. Выделение тепла в контактных переходах электрических цепей является одной из причин возникновения аварийных режимов в электрооборудовании и технологических установках. Явление БПС возникает в случае:

- недостаточной площади контакта или неплотного соединения между контактируемыми проводниками;
- излома провода при сохранении контакта жила-жила;
- дефектов токопроводящих шин, жил проводов и кабелей;
- старения электрических контактных соединений;
- некачественной сборки контактных узлов.

Опасность воспламенения электрического соединения в режиме БПС способна проявиться при номинальных значениях электрического тока или даже при значениях тока меньше номинального [14]. В режиме БПС создаются поля повышенных температур и концентраций продуктов пиролиза полимерных материалов. Источниками воспламенения при этом являются нагретые проводники, электрическая дуга, раскаленные или горящие частицы, при этом происходит оплавление деталей изоляции проводов и контакт-деталей.

Первым этапом при исследовании места пожара является визуальный осмотр возможных источников пожара (контактные узлы), который производится невооруженным глазом [28]. Сначала описывается состояние контактных узлов в целом (разрушение, оплавление, наличие или отсутствие дефектов соединения, состояние изоляции).

Предположительный вывод о наличии на данном контактном узле следов большого переходного сопротивления можно сделать тогда, когда элементы, находящиеся в контакте, имеют явно большие термические повреждения.

После визуального осмотра для дальнейших исследований отбираются контактные узлы, имеющие следующие признаки:

- термические повреждения изоляции;
- признаки плохого соединения контактов;
- визуально заметные неровности на контактирующих плоскостях;
- потемнение участка контакта вследствие образования копоти.

Далее отобранные элементы исследуются различными методами, позволяющими установить причину пожара.

Метод оптической микроскопии с компьютерным анализом изображения позволяет производить увеличение в 50...300 раз. Данный метод исследования структуры поверхностей контактирующих деталей способствует выявлению:

- «впадин», которые указывают на искрение;
- локальных микроплавлений (признак недостаточного электрического контакта).

В качестве дополнительного метода для обнаружения признаков локального нагрева медных проводников используется метод рентгеноструктурного анализа. Это актуально, если в ходе морфологических исследований было установлено, что поверхность контактов изменила свой вид из-за отслоения окисной пленки и предыдущие методы не позволяют сделать окончательный вывод о наличии большого переходного сопротивления.

Использование вышеперечисленных методов изучения контактных узлов позволяет делать выводы о причастности большого контактного сопротивления к возникновению пожара.

1.3 Обзор существующих способов и средств защиты установочных электропроводок от режимов перегрузки

Ввиду увеличения количества потребителей в квартирах и домах увеличивается и общая электрическая нагрузка на электросеть. Неумелое пользование электроприборами может привести к трагическим последствиям, в том числе и к пожару. Например, при включении в одну розетку нескольких бытовых приборов большой мощности, возникает перегрузка проводов и перегрев корпусов электроприборов. Как следствие, это может перерасти в более тяжелый аварийный режим - короткое замыкание с последующим возникновением пожара.

Одними из первых устройств защиты электропроводки и электроустано-

вок (в т. ч. электродвигателей) от возможных коротких замыканий и перегрузок использовались плавкие предохранители (рисунок 1.9).

Предохранитель (Пр) встраивается в разрыв электрической цепи. Его основной задачей является пропускание рабочего тока и обесточивание электрической цепи при появлении сверхтоков. Различают предохранители низковольтные (до 1 кВ) и высоковольтные (свыше 3 кВ), однако по назначению и принципу действия они полностью совпадают. Также выделяют предохранители на основе электронных компонентов (e-Fuse) [29] и самовосстанавливающиеся с нелинейными обратными характеристиками (PolySwitch) [30]. На текущий момент известны PolySwitch с напряжением до 250 В и током срабатывания до 4 А, что недостаточно для защиты установочных электропроводок производственных и жилых помещений.

Низковольтные предохранители конструктивно представляют собой токопроводящий элемент (плавкая вставка), который под воздействием тока, значение которого выше номинальной величины, нагревается, расплавляется в дугогасящей среде (чаще всего это кварцевый песок SiO₂ с определенными размерами кристаллов и его оптимальным уплотнением) и испаряется, создавая разрыв в защищаемой электрической цепи.

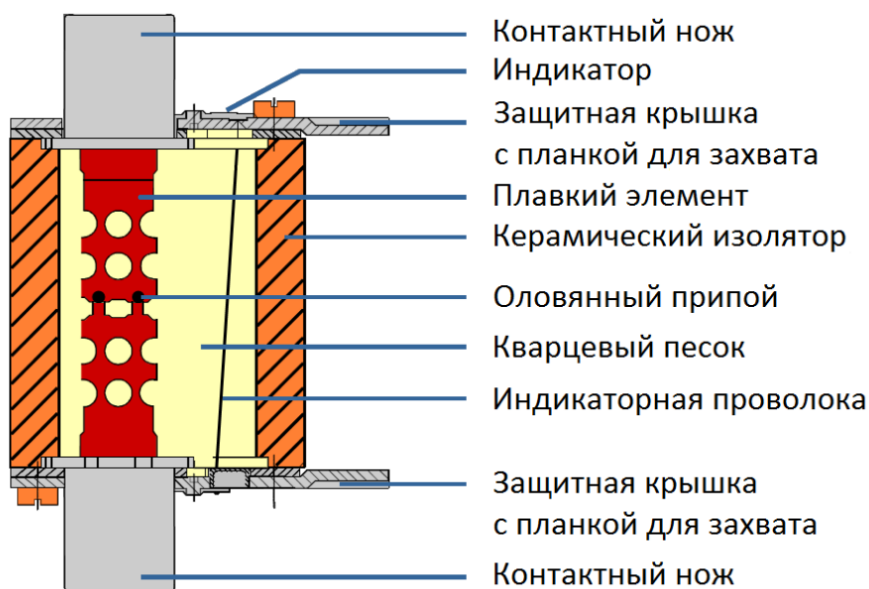


Рисунок 1.9 – Устройство плавкого предохранителя

Изолятор из высокосортной технической керамики препятствует выходу горячих газов и жидкого металла в окружающую среду, и, вместе с керамическим корпусом, они создают взрывонепроницаемую оболочку для коммутационной электрической дуги.

Основная привлекательность при использовании плавких предохранителей - возможность отключения весьма больших токов КЗ (высокая коммутационная способность), достаточно быстрое срабатывание (около 5..10 мс) в случае большой величины отношения тока КЗ к номинальному току предохранителя (около 10) и значительный токоограничивающий эффект (рисунок 1.10).

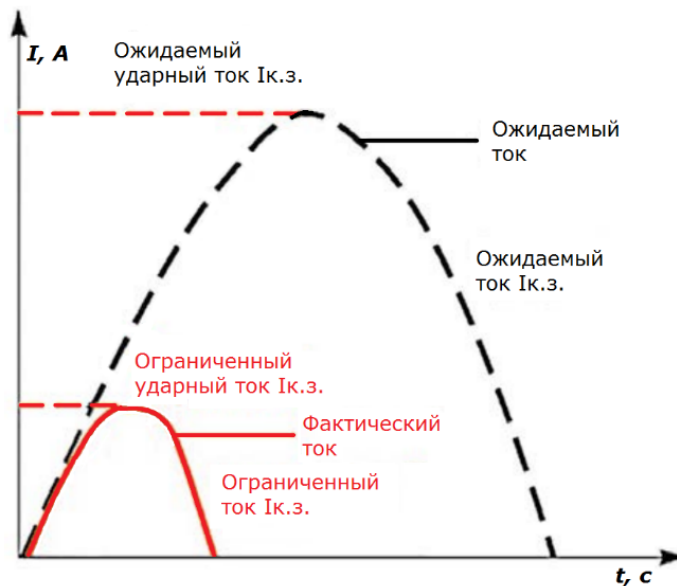


Рисунок 1.10 – Явление токоограничения плавкого предохранителя

Однако, несмотря на вышеуказанные достоинства, плавкие предохранители имеют и определенные недостатки. К ним, например, относится опасность несинхронного обесточивания плавких вставок во всех трех фазах, что может привести к опасному перекосу фаз в цепи.

При выборе предохранителей по условию отсутствия ложного срабатывания от пусковых токов номинальный ток оказывается в несколько раз больше, чем номинальный ток защищаемого двигателя, поэтому плавкий предохранитель совершенно не способен защищать двигатель при умеренных кратностях перегрузки и обязательно должен дополняться электроаппаратом с функцией теплового реле [31]. Более того, даже не вызывающие перегорания плавкого предохранителя пусковые токи электродвигателя могут вести к постепенной деградации характеристик предохранителей, что вынуждает выбирать предохранители с большими запасами по номинальному току. При сравнительно легких условиях пуска номинальный ток плавкой вставки выбирается на уровне $(0,4...0,5) \times I_{АДКЗР \text{ пуск}}$, а для тяжелых пусков – $(0,5...0,6) \times I_{АДКЗР \text{ пуск}}$, то есть в 3...5 раз больше, чем номинальный ток защищаемого электродвига-

теля.

Следует учесть, что после однократного срабатывания плавкого предохранителя обязательна последующая замена, что увеличивает время перерыва электроснабжения потребителей.

Также отсутствует возможность автоматического управления такого рода средством защиты. Оно необходимо, например, для дистанционного включения/отключения защищаемой цепи (устройства автоматического включения резерва, отключение системы вентиляции при пожаре согласно СНиП 41-01-2003, п.12.4). Также в системе защиты от режима перегрузки может подаваться предупреждающий сигнал о превышении допустимого уровня мощности и последующая разгрузка.

Кроме того, нельзя забывать, что в хозяйствах часто устанавливают предохранители со значительно завышенным номинальным током (имеющиеся в наличии) [32]. Такие предохранители не только не защищают электропотребители, но сами часто являются причиной возникновения обрыва фазы или пожара, если не перегорят при токах короткого замыкания.

Для преодоления недостатков плавких предохранителей началось применение автоматических выключателей (АВ), предназначенных для многократного срабатывания. Традиционный АВ с комбинированным расцепителем — это электроаппарат с механической коммутацией, главные контакты которого способны надежно отключать большие токи (рисунок 1.11).

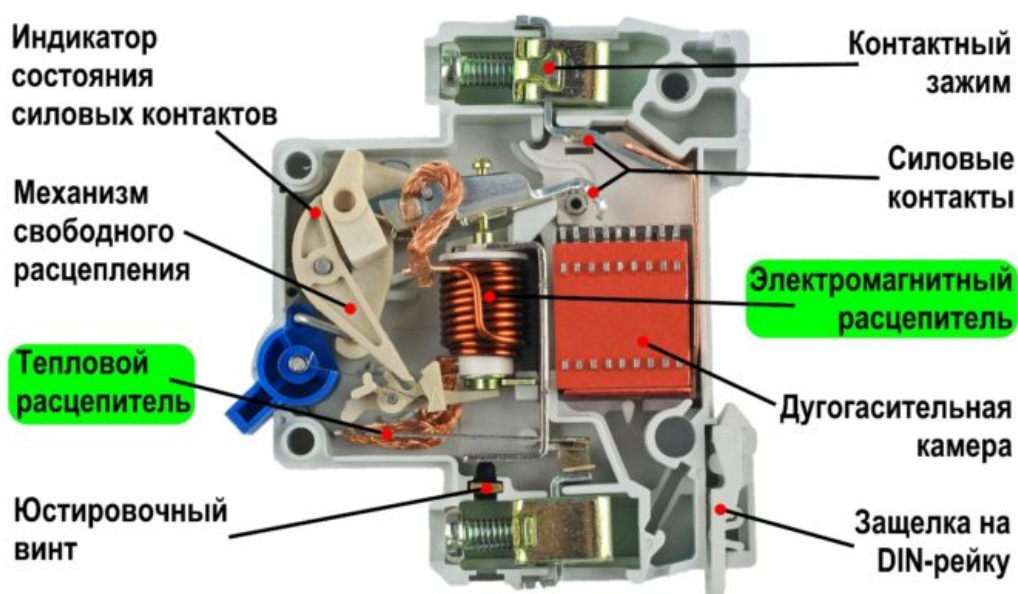


Рисунок 1.11 – Структурная схема автоматического выключателя

Все АВ имеют в своем составе расцепитель максимального тока, ко-

торый без задержки срабатывает, если ток силовой цепи превышает установленный пороговый уровень. Время срабатывания максимального расцепителя обычно не превышает 20 мс и почти не зависит от величины тока, если он больше порогового значения. С другой стороны, токи, значение которых меньше уставки срабатывания максимального расцепителя, не вызывают его переключения независимо от длительности их протекания. Таким образом, эффективно решается проблема, имеющаяся у плавких предохранителей при питании электродвигателя: выбрав уставку максимального расцепителя АВ больше, чем пусковой ток электродвигателя, можно надежно исключить ложные срабатывания защиты даже при длительных тяжелых пусках. В классическом варианте АВ максимальный расцепитель выполняется в виде электромагнитного механизма, катушки которого обтекаются токами силовых цепей. Для современных АВ с большими номинальными токами (>160 А) и возможностью регулирования кратности срабатывания максимального расцепителя все чаще применяется электронное измерение токов силовых цепей с принятием решения о расцеплении.

С целью уменьшения количества защитных электроаппаратов в фидере потребителя часто АВ имеют в своем составе тепловой расцепитель. По назначению, функционалу и принципу действия он довольно близок к тепловым реле (реле перегрузки). Основное отличие теплового расцепителя в составе АВ от теплового реле, работающего вместе с силовым контактором, заключается в алгоритме возврата в рабочее состояние: для большинства АВ необходимо последовательное ручное переключение между состояниями «Расцеплено», «Отключено», «Включено». Однако имеются специальные серии АВ, например, 3RV11 производства компании Siemens, с автоматическим возвратом в положение «Включено» после остывания биметаллических пластин теплового расцепителя, что аналогично соответствующему режиму теплового реле.

Помимо двух встроенных расцепителей, предназначенных для защиты электродвигателей, функциональные возможности АВ можно расширить за счет применения дополнительных модулей, таких как расцепитель минимального напряжения, независимый расцепитель, а также различные варианты дополнительных вспомогательных контактов, элементов сигнализации и индикации состояния АВ и др. Расцепитель минимального напряжения срабатывает при критически низком снижении напряжения питания и, таким образом, защищает электропривод от некорректной работы при потере питания, а также

блокирует несакционированный пуск в работу электродвигателя после восстановления питания.

Для бытовых условий электrorаспределения (в жилом доме, квартире) применяются номинальные токи автоматических выключателей от 0,5 до 63 А. Такие параметры автоматических выключателей являются достаточными для обеспечения защиты и правильного распределения электрических линий.

Типовая защитная характеристика автоматического выключателя с комбинированным расцепителем делится на виды в зависимости от пределов настройки электромагнитного расцепителя (отсечки) [33]. Они приведены в таблице 1.4.

Таблица 1.4 – Защитная характеристика автоматического выключателя

Кривая	Настройка электромагнитного расцепителя $I_p/I_{ном}$	Область применения
«В»	3..5	освещение, нагревательных приборы (электрочайник, бойлер, тостер) и другие электроприборы
«С»	5..10	бытовые электроприборы с большими пусковыми токами: стиральная машина, пылесос, холодильник, блендер
«D»	10..20	электрических двигателей в однофазной и трёхфазной сети

Актуальность оценки тепловых режимов работы кабельно-проводниковой продукции (КПП) при протекании сверхтока (ток перегрузки или к.з.) подтверждается статистическими данными пожаров, причинами которых послужили кабельные изделия.

В процессе работы фидера при превышении допустимой нагрузки происходит нагрев провода или кабеля вследствие потерь активной мощности в его жиле и других элементах конструкции, в частности, изоляции.

Безопасная эксплуатация кабельных изделий во многом зависит от эффективной работы аппаратов защиты, служащих для ограничения времени протекания сверхтока. Применение аппаратов защиты невозможно без оценки теплового воздействия протекающего сверхтока на кабельные изделия, в частности, в режимах перегрузки, предшествующих к. з., которым посвящена данная работа. Анализ литературных источников показал, что существующие техни-

ческие нормативные правовые акты, регламентирующие выбор аппаратов защиты от длительных перегрузок и токов короткого замыкания, не учитывают температуру проводника, до которой он успеет нагреться на момент отключения [34, 35, 36].

Если температура в наиболее нагретой критической точке (на границе жила-изоляция) приближается к максимально длительно допустимой температуре нагрева жилы, составляющей $+70^{\circ}\text{C}$ для провода или кабеля с ПВХ изоляцией, то начинается процесс ее интенсивного теплового износа, т. е. тепловое старение, в результате которого может произойти тепловой пробой [37, 38].

Известно, так называемое, 8-градусное правило, заключающееся в том, что при превышении температуры перегрева на 8 градусов относительно длительно допустимой температуры перегрева в нормальном режиме срок службы изоляции сокращается вдвое [39].

Для всех типов изоляции допустимо кратковременное повышение температуры в аварийном или пусковом режиме (перегрузки). При этом допустимые значения температуры ПВХ изоляции и полимерной композиции в режиме перегрузки составляет $+80^{\circ}\text{C}...+95^{\circ}\text{C}$.

В случае же достижения температурой в указанной точке значения $+120^{\circ}\text{C}$ появляется дым, оплавление и размягчение изоляции, что делает ее практически непригодной для дальнейшего использования в эксплуатации [40].

Основной функциональной характеристикой любого аппарата защиты электрических проводок является его времятоковая характеристика (ВТХ) [5, 41].

Поскольку в действительности наблюдаются существенные отклонения от средних значений характеристик, вызванных производственными и эксплуатационными факторами (допуск на качество материала термоэлементов и контактов, различное старение элементов плавкой вставки предохранителя и т. п.), ВТХ изображают не одной линией, а полосой между нижней и верхней границами, в пределах которой лежит возможное время отключения конкретного отдельно взятого аппарата [41]. Зона между верхней и нижней границами ВТХ является зоной неопределенности. На рисунке 1.12 она показана кривыми 1, 1' и 2, 2' для предохранителей марок ППН16 и ППН25 соответственно, а для автоматических выключателей - промежутком между кривыми 3, 4 («горячее» состояние автоматического выключателя, который только что был в работе или сразу же после его срабатывания) и кривыми 3', 4' соответственно («холод-

ное» состояние теплового биметаллического расцепителя без предварительного пропуска тока через автоматический выключатель).

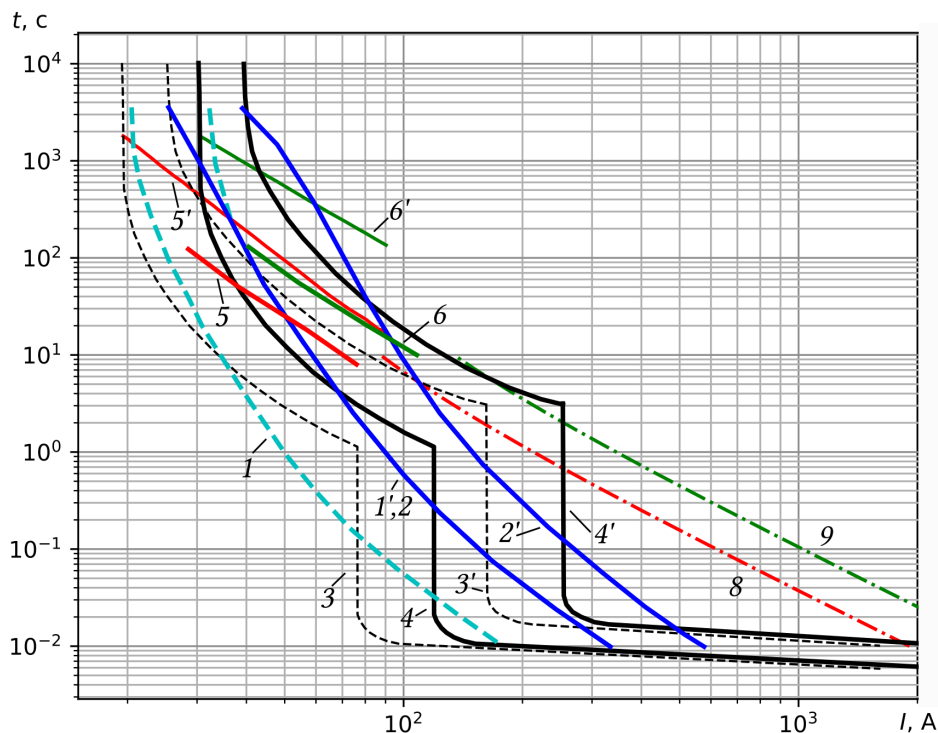


Рисунок 1.12 – Совмещенные ВТХ предохранителей марок ППН16 — 1, 1' и ППН25 — 2, 2'; АВ с характеристикой «С» и $I_{\text{ном}} = 16 \text{ А}$ — 3, 3' и $I_{\text{ном}} = 25 \text{ А}$ — 4, 4'; тепловые характеристики проводов марок ППВ $2 \times 1,5 \text{ мм}^2$ — 5, 5', 8 и ППВ $2 \times 2,5 \text{ мм}^2$ — 6, 6', 9 (нагрев от 20°C до 70°C , до появления дыма и согласно ГОСТ Р МЭК 60949-2009 соответственно)

Известно, что при выборе аппаратов защиты электропроводок необходимо учитывать взаимное расположение ВТХ аппаратов защиты и тепловых характеристик кабельных изделий [42]. Однако до настоящего времени нет методики выбора аппаратов защиты, учитывающей данный подход, так как тепловые характеристики кабельных изделий остаются, за небольшим исключением, неизвестными.

Предварительно в результате экспериментальных исследований, методика которых изложена в разделе 4, были получены тепловые характеристики провода бытового марки ППВ различного сечения ($2 \times 1,5 \text{ мм}^2$ – кривая 5 для $+70^\circ\text{C}$, кривая 5' для $+120^\circ\text{C}$; $2 \times 2,5 \text{ мм}^2$ — аналогично кривые 6 и 6'; $2 \times 4 \text{ мм}^2$ — аналогично кривые 7 и 7'), часто используемых в электропроводках жилых и административных помещений, и построены совместно с индивидуальными ВТХ аппаратов защиты разных номинальных токов - 16; 25 и 32 А (рисунки 1.12...1.15).

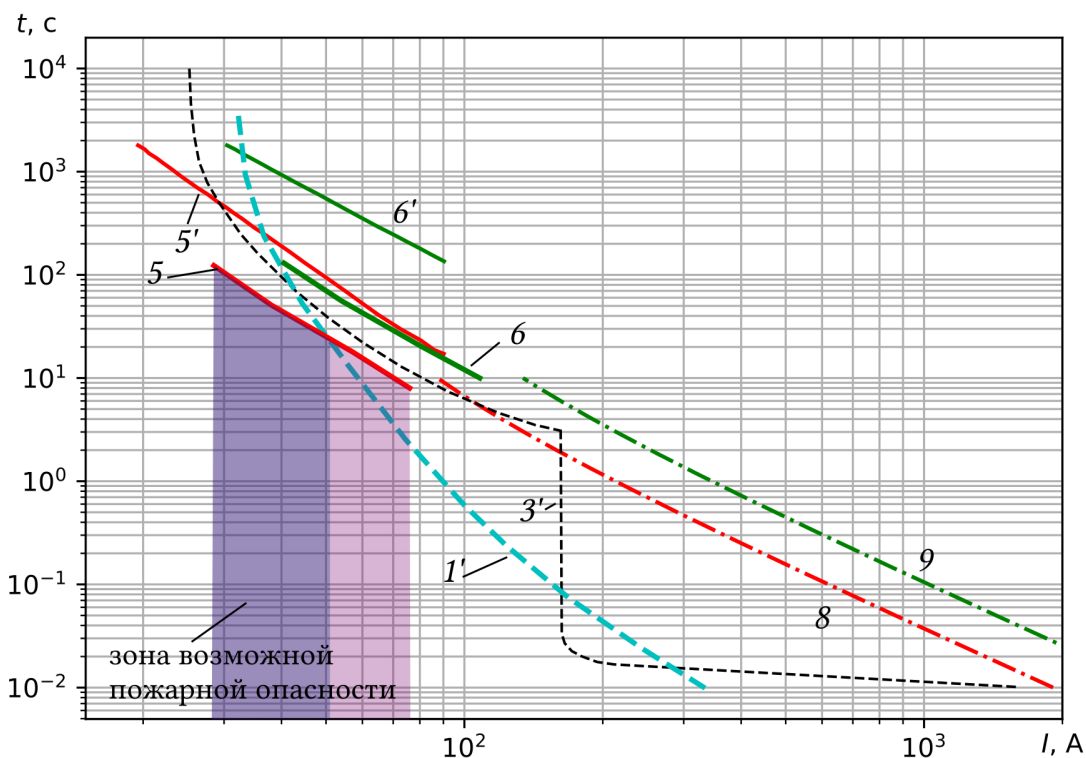


Рисунок 1.13 – Совмещенные ВТХ предохранителя марки ППН16 — 1'; АВ с характеристикой «С» и $I_{\text{НОМ}} = 16 \text{ А}$ — 3'; тепловые характеристики проводов марок ППВ 2x1,5 мм² — 5, 5', 8 и ППВ 2x2,5 мм² — 6, 6', 9 аналогично рисунку 1.12

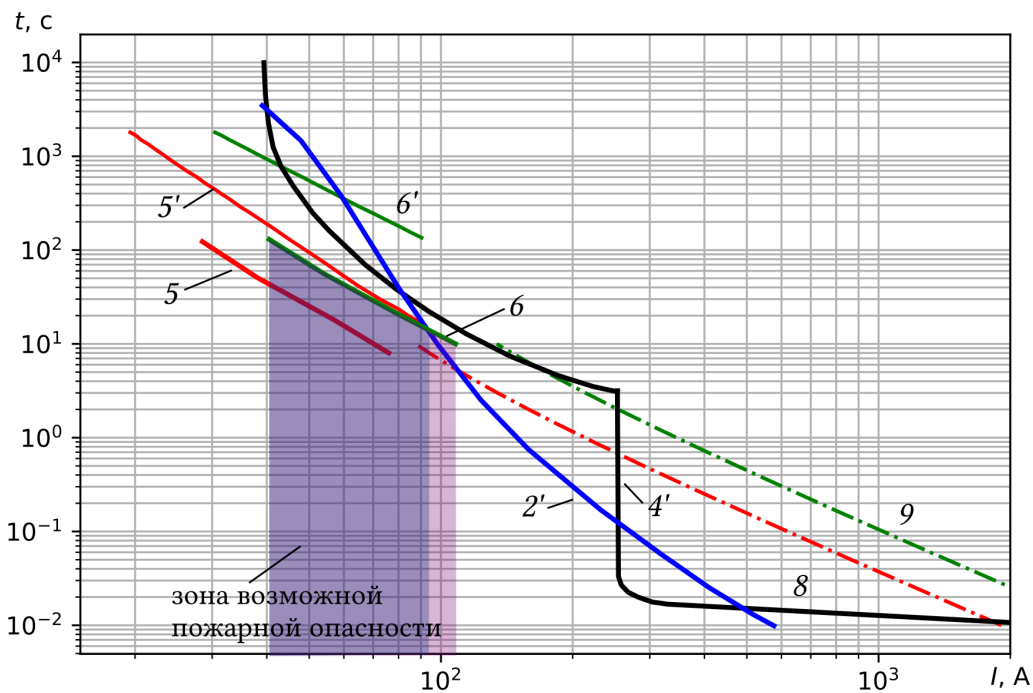


Рисунок 1.14 – Совмещенные ВТХ предохранителя марки ППН25 — 2'; АВ с характеристикой «С» и $I_{\text{НОМ}} = 25 \text{ А}$ — 4, 4'; тепловые характеристики проводов марок ППВ 2x1,5 мм² — 5, 5', 8 и ППВ 2x2,5 мм² — 6, 6', 9 аналогично рисунку 1.12

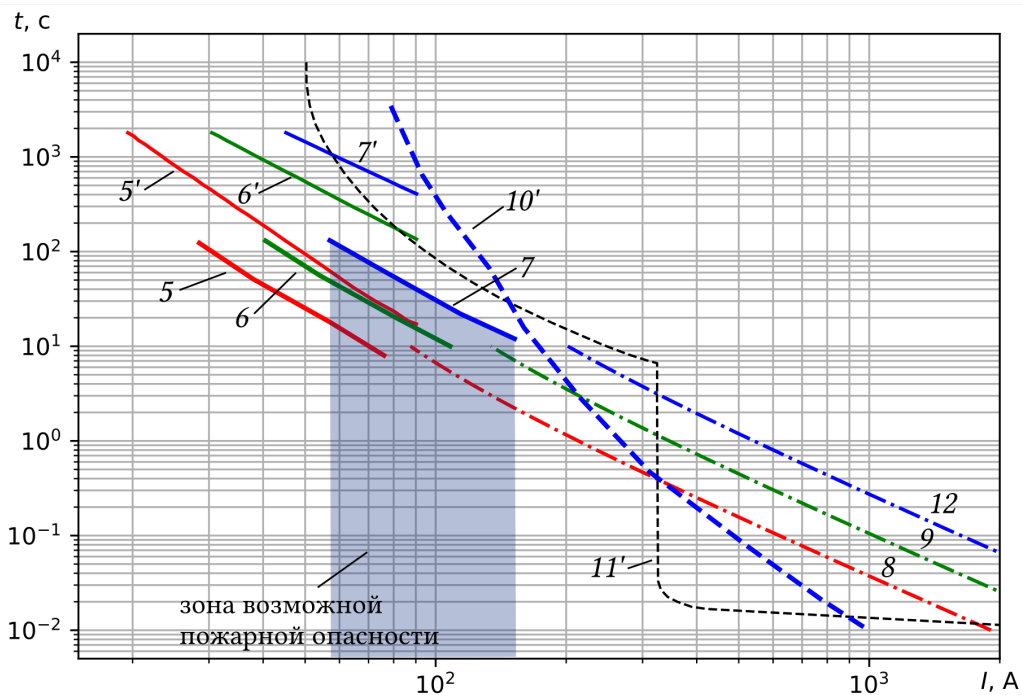


Рисунок 1.15 – Совмещенные ВТХ предохранителя марки ППН32 — 10'; АВ с характеристикой «С» и $I_{\text{ном}} = 32 \text{ А}$ — 11'; тепловые характеристики проводов марок ППВ 2x1,5 мм² — 5, 5', 8, ППВ 2x2,5 мм² — 6, 6', 9 и ППВ 2x4 мм² — 7, 7', 12 (нагрев от 20°C до 70°C, до появления дыма и согласно ГОСТ Р МЭК 60949-2009 соответственно)

Установлено, что достижение жилой кабельных изделий предельно допустимой температуры +120 °С начинается при протекании сверхтока кратностью $1,5I_{\text{доп}}$ и выше.

Для корректного сравнения указанных ВТХ необходимо рассмотреть их исходное «холодное» состояние, т. е. без предварительного пропускания тока при контрольной температуре калибровки окружающего воздуха (+30 °С), к которой относится времятоковая характеристика автоматического выключателя. Испытания КППР проводились при начальной температуре окружающей среды +20 °С, что представляет более опасный режим при сравнении с ВТХ защитного аппарата.

Сравнительный анализ взаимного расположения построенных по паспортным данным ВТХ автоматических выключателей, предохранителей и экспериментально полученных тепловых характеристик КППР, показал следующие результаты.

Провод бытовой марки ППВ 2x1,5 мм² не защищен от режима, приводящего к воспламенению при протекании сверхтока кратностью $< 2,6 \cdot I_{\text{н}}$ как АВ, так и Пр, а при кратности $< 3,7 \cdot I_{\text{н}}$ АВ (рисунок 1.13), выбранными в со-

ответствии в действующими техническими нормативными правовыми актами, так как тепловая характеристика провода располагается на графике ниже индивидуальных ВТХ защитных аппаратов. Следовательно, время нагрева ППВ $2 \times 1,5 \text{ мм}^2$ до максимально допустимой температуры $+70^\circ\text{C}$ меньше времени полного отключения соответствующих защитных аппаратов.

В аналогичных условиях провод бытовой марки ППВ $2 \times 2,5 \text{ мм}^2$ не защищен от перегрева до максимально допустимой температуры $+70^\circ\text{C}$ при протекании сверхтока кратностью $< 3,3 \cdot I_n$ Пр, а АВ защищает только в области электромагнитного расцепителя (рисунок 1.14).

Провод бытовой марки ППВ $2 \times 4 \text{ мм}^2$ также не защищен АВ и Пр от режима, приводящего к воспламенению нагрева до максимально допустимой температуры $+70^\circ\text{C}$ вплоть до срабатывания электромагнитного расцепителя (рисунок 1.15).

Дополнительно к этим выводам следует учесть, что для АВ с характеристикой «С» согласно [35] электромагнитная отсечка устойчиво срабатывает при протекании сверхтока кратностью $> 6,5 \cdot I_n$, а из-за того, что отсутствует контроль температуры нагрева жилы кабеля, появляются незащищенные зоны ВТХ при сверхтоке выше $5 \cdot I_n$ вплоть до срабатывания электромагнитного расцепителя.

Для более полного представления ВТХ проводов сечением $1,5 \dots 4 \text{ мм}^2$, при которых температура жил при к. з. достигает 160°C согласно ГОСТ Р МЭК 60949-2009 проведены расчеты допустимого времени отключения защитных аппаратов — кривые 8, 9, 12 на рисунках 1.12...1.15. Эти данные могут быть полезны конструкторам автоматических выключателей, проектировщикам электросетей и эксплуатационному персоналу объектов, хотя целью данной работы является совершенствование защитных характеристик в области токов перегрузки.

Анализ показал, что в установочных электропроводках сетей напряжением до $0,38 \text{ кВ}$ включительно, защищаемых автоматическими выключателями со стандартными защитными характеристиками не удастся избежать опасных проявлений теплового воздействия электропроводок. Это связано со следующим:

- не предусмотрена *настройка* защитных характеристик АВ при варьировании условий эксплуатации, в частности, сечения, материала жилы провода или кабеля, количества слоев ПВХ изоляции, способа прокладки и т. д. Это

может приводить к ошибочному выбору номинальных параметров АВ, не соответствующих требованиям защищаемой электропроводки;

- зависимость параметров автомата от условий окружающей среды;
- отсутствие прогнозирования темпа нагрева провода или кабеля в зависимости от величины тока возмущения, а также «тепловой памяти»;
- существенный разброс характеристик как в зоне защиты от перегрузок, так и в зоне отсечки, что может привести к недостаточному быстродействию;
- наличие зоны нечувствительности в диапазоне токов $1...1,45 \cdot I_n$, что может привести к нагреву жилы с ПВХ изоляцией до 114°C ;
- отсутствие возможности мониторинга и дистанционного управления.

Оригинальный способ усовершенствования ВТХ защитного аппарата от перегрузки был предложен в Южно-Уральском государственном университете (национальный исследовательский университет) [43]. Сущность этого подхода состоит в учете того факта, что при модернизации объекта нагрузки электросети могут вырасти или же наоборот снизиться. Замена защитных аппаратов может привести к значительным финансовым затратам.

Алгоритм работы защиты от перегрузки отталкивается от номинального или допустимого тока. При первой установке номинальный ток приравнивается к максимальному возможному току на данном участке электросети. Согласно времятоковой характеристике «С», срабатывание от перегрузки должно начинаться при токе от $1,45 \cdot I_n$. На протяжении длительного времени необходимо анализировать ток нагрузки с целью выяснения максимального значения тока, протекающего более 10 минут, более 1 минуты, более 10 секунд и более пяти секунд. После данного анализа будет сформирована индивидуальная времятоковая характеристика, позволяющая наиболее точно защитить участок электросети. При этом необходимо учесть тот момент, что в момент обучения продолжает работать тепловая защита от перегрузки (первая ступень), следовательно получившаяся времятоковая характеристика не может быть выше времятоковой характеристики «С».

Во время анализа, описанного в предыдущем пункте так же проводится анализ минимального тока в сети. В дальнейшем при длительном превышении минимального тока необходимо сигнализировать об этом пользователю устройства. При отсутствии реакции пользователя новое значение следует считать нормальным. Данный пункт позволит обнаружить длительное замыкание через какое-либо сопротивление, например, каплю грязи на месте поврежде-

ния изоляции проводов. Следует заметить, что данный метод не подходит для полноценного анализа изоляции проводов и служит запасным вариантом для обнаружения развивающегося пожара проводки. Также необходимо соблюдать условие, что минимальное значение тока не должно равняться нулю.

Реле защиты от токов перегрузки, зависящие характеристики которого (обычно обратная (normally), очень обратная (very inverse) и крайне обратная (extremely inverse)) согласованы с приведенными в стандарте МЭК 60255-151 рассмотрено в работе [44, 45].

Следующие стандартные характеристики моделируются в программе согласно приведенным уравнениям:

$$T = \frac{K_1}{M^{K_2} - 1} \cdot TDS; \quad (1.15)$$

$$M = \frac{I_f}{I_{pickup}}, \quad (1.16)$$

где T — время срабатывания реле, I_f — значение аварийного тока, I_{pickup} — ток уставки, M — множитель тока, K_1 , K_2 — параметры кривой.

Очевидно, что подобные реле защиты от токов перегрузки имеют недостаток, связанный с необходимостью предварительной настройки и подбора коэффициентов характеристик, согласно уравнениям (1.15) и 1.16. Это невозможно сделать без моделирования ВТХ защищаемых КПП. Кроме того, такие стандартные обратозависимые характеристики лишены свойства «тепловой памяти», т. е. не различают «холодное» и «предварительно нагретое состояние» жилы провода в момент повреждения, что приводит к значительной погрешности при определении времени отключения и подачи предупреждающего сигнала устройством защиты.

Таким образом, необходим непрерывный (в режиме реального времени) мониторинг тепловых процессов кабеля или провода для повышения его безопасности, что является целью данной работы. Однако жила, на поверхности которой находится наиболее нагретая точка изоляции, не доступна для непосредственного измерения температуры.

Есть два способа косвенного измерения температуры поверхности жилы кабеля: на основе зависимости электрического сопротивления жилы от тем-

пературы и на основе математической модели тепловых процессов. Вторым способом более предпочтителен в плане аппаратных затрат, но требует соответствующей математической базы. В работах [46, 47] Зализного Д. И. и др. рассмотрены варианты математической модели тепловых процессов силовых кабелей на основе синтезирования тепловых схем замещения, что требует громоздкого решения систем дифференциальных уравнений в операторной форме.

Значительная часть публикаций по исследуемой тематике посвящена расчету стационарных тепловых процессов в кабеле, а МЭК и ГОСТ рассматривают только эти процессы. Нестационарные режимы освещены в литературе достаточно слабо. Это связано прежде всего со сложностью получения адекватных соотношений и алгоритмов на их основе.

Альтернативным вариантом, принятым в данной работе, может стать расчет тепловых процессов в КППП сеточными методами с использованием программных пакетов ANSYS, MATLAB, Comsol Multiphysics и др., что позволяет характеризовать тепловой процесс всего одним уравнением перегрева в заданной критической точке с учетом изменяющихся в зависимости от параметров КППП и режима работы постоянной времени нагрева (охлаждения) и установившейся температуры перегрева.

Такая математическая модель при дальнейшем развитии может быть использована в алгоритмах программного обеспечения устройств непрерывного диагностирования этих видов КППП.

1.4 Выводы по разделу 1. Постановка задач исследования

Статистические исследования показывают, что основной причиной пожаров в электроустановках становятся короткие замыкания, вызванные различными факторами, а ведущее место по числу объектов воспламенения занимают провода и кабели. Одна из составляющих опасности кабелей и электрических проводок сетей напряжением 0,38 кВ — это появление расплавленных частиц проводников, которые могут поджечь легковоспламеняющиеся материалы.

Существующие в настоящее время зависимости вероятности возникновения пожаров от повреждения электрической проводки в течение времени t не учитывают в комплексе материал проводников (алюминий, медь), высоту под-

вески проводников относительно горючего материала, тип горючего материала и его расстояние от возможного появления экзогенного источника, надежность защитного коммутационного аппарата, средний интервал времени между появлениями *к. з.*, среднее время безотказной работы системы отключения автоматического выключателя, интервал между диагностиками системы отключения защитного коммутационного аппарата, что в значительной мере загроуляет оценку и прогноз вероятности появления таких событий, как воспламенение горючих веществ в течение времени t при эксплуатации электрифицированных помещений.

В связи с этим к актуальным задачам могут быть отнесены методы численного моделирования твердофазного воспламенения горючего материала и способы выделения области инициирования его устойчивого горения от одиночной, нагретой до высокой температуры металлической частицы в форме диска малого размера и получения зависимостей, которые расширят перечень критериев определения факта воспламенения при аварийных режимах в электрических проводках.

Кроме того, в существующих методиках определения параметров тепловых источников упрощен учет времени движения и охлаждения частицы и отсутствует универсальный критерий ее воспламеняющей способности. Необходимо предложить статистический метод проверки версии возникновения пожара от искр при коротких замыканиях в ЭП.

Среди основных причин пожаров от электроустановок (п. 1.2), наряду с *к. з.*, выделяется перегрузка электрической цепи. Опасность перегрузок вызвана значительной температурой нагрева токопроводящих жил. Изоляция проводов и кабелей нагревается на всем аварийном участке цепи и загорается чаще всего в месте обрыва (перегорания) токопроводящей жилы.

Стандартные способы защиты установочных электропроводок (плавкие предохранители, автоматические выключатели, автоматы дифференциального тока) не предусматривают адаптацию защитных характеристик [48], в частности, в зоне тепловых перегрузок к условиям эксплуатации (марка и сечение подключаемого провода или кабеля).

В отдельных случаях при грубых ошибках в выборе сечения питающих проводов кратность перегрузки может иметь такое высокое значение, что длительность существования аварийного режима (до срабатывания защиты или перегорания жилы провода) может составлять доли секунды, т. е. быть соизмери-

мой с длительностью обычного к. з, что часто приводит к опасным для жизнедеятельности человека ситуациям.

Тенденцией развития современных средств защиты установочных электропроводок напряжением до 0,38 кВ является увеличение и совмещение принципов защит от аварийных режимов (например, использование плавких предохранителей для увеличения коммутационных способностей защитного аппарата). Это позволяет усовершенствовать характеристики защиты, основанной на электронных и микропроцессорных расцепителях [49], за счет применения математических моделей защищаемого объекта (электропроводки) в алгоритмах, заданных программно.

К числу таких задач, стоящих в рассматриваемой области, относится обеспечение прогнозирования нагрева защищаемого кабеля или провода в зависимости от величины тока фазы I_{ϕ} в целях недопущения превышения нормированных ГОСТ Р МЭК 60949–2009 [50] температур, а также прогнозирование темпа нагрева в зависимости от величины тока возмущения dI_{ϕ} в режиме перегрузки.

РАЗДЕЛ 2

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОВОДКИ 0,38 КВ
И ГОРЮЧЕГО МАТЕРИАЛА В ОБЛАСТИ, ПРИЛЕГАЮЩЕЙ К ТОЧКЕ
КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

2.1 Анализ особенностей нестационарного нагрева двухжильного
изолированного проводника под действием электрического тока

Нагрев и охлаждение провода или кабеля является сложным динамическим процессом, который зависит от многих факторов, полный учет которых затруднителен [51]. Как показали результаты математического моделирования при кратностях тока $K_i \leq 2$ могут с достаточной для практики точностью выполняются следующие допущения:

- температура окружающей среды $\Theta_{o.c.}$ неизменна в течение всего неустановившегося режима;
- плотность материала проводника $\rho_m = 8900 \text{ кг/м}^3$, ПВХ изоляции $\rho_{из} = 1400 \text{ кг/м}^3$, воздуха $\rho_v = 1,23 \text{ кг/м}^3$, удельная теплоемкость проводника $c_m = 400 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$, ПВХ изоляции $c_{из} = 1600 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$, воздуха $c_v = 1000 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$, теплопроводность проводника $\lambda_m = 400 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, теплопроводность ПВХ изоляции $\lambda_{из} = 0,15 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, теплопроводность воздуха $\lambda_v = 0,026 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ не зависят от времени и температуры тела. Электрическое сопротивление проводника зависит от текущей температуры Θ :

$$\rho_{эл}(\Theta) = \rho_{эл}(\Theta_{o.c.}) [1 + 0,0043 \cdot (\Theta - \Theta_{o.c.})], \quad (2.1)$$

где $\rho_{эл}(\Theta_{o.c.}) = 1,72 \cdot 10^{-8} \text{ Ом}\cdot\text{м}$.

Численное моделирование тепловой задачи [52, 53] проводится в области, которую занимают жила, изоляция и оболочка провода или кабеля с учетом условия симметрии. Промежуток области между оболочкой и изоляцией заполнен воздухом. Физические свойства изоляции и оболочки предполагаются одинаковыми, соответствующими поливинилхлориду. На внешней границе кабеля задается условие свободно-конвективного теплообмена с окружающей средой, на линии симметрии граничное условие состоит в равенстве нулю попе-

речных компонент теплового потока (условие симметрии). В момент включения тока кабель имеет температуру внешнего воздуха. Коэффициент свободно-конвективного теплообмена двухжильного кабеля можно аппроксимировать соотношением для горизонтального цилиндра эллиптического сечения. В зависимости от ориентации большой оси различают горизонтально и вертикально расположенный эллипс.

Поставленная задача может быть решена в программе Comsol Multiphysics 5.3а методом конечных элементов. Преимущество программы состоит в том, что источник выделения тепла (жила проводника) задается путем его функциональной взаимосвязи с удельной выделяемой мощностью. Для каждого расчетного сечения моделируется процесс нагрева провода или кабеля, вычисляются температуры в характерных точках, рассчитывается постоянная времени нагрева. Таким образом, формируется база данных для различных типов проводов и кабелей и их сечений.

2.1.1 Моделирование нагрева двухжильного изолированного проводника при открытой прокладке

Расчетная зависимость коэффициента теплообмена α характеризуются плотностью теплового потока с поверхности провода или кабеля в воздух при открытом способе прокладки. Коэффициент теплообмена α обусловлен свободной конвекцией и зависит от перепада температур провода или кабеля и воздуха, а также размера поверхности охлаждения [54]:

$$S = \alpha (\Theta_c(B) - \Theta_{o.c.}), \quad (2.2)$$

где B — размер большой полуоси горизонтально расположенного эллипса, м; Θ_c — температура наружной поверхности провода или кабеля, K ; $\Theta_{o.c.}$ — температура окружающей среды, $K(^{\circ}C)$; α — коэффициент теплоотдачи, $Вт/(м^2 \cdot K)$.

Математическое моделирование динамики нагрева приведено на примере двухжильного кабеля ВВГ 2х2,5, сечение которого представлено на рисунке 2.1. Его размеры: диаметр медной жилы $2R_w = 1,9$ мм, толщина изоляции $\Delta R_{и} = 0,8$ мм, толщина оболочки $\Delta R_{об} = 1,4$ мм, размер большой полуоси эллипса $B = 4,9$ мм.

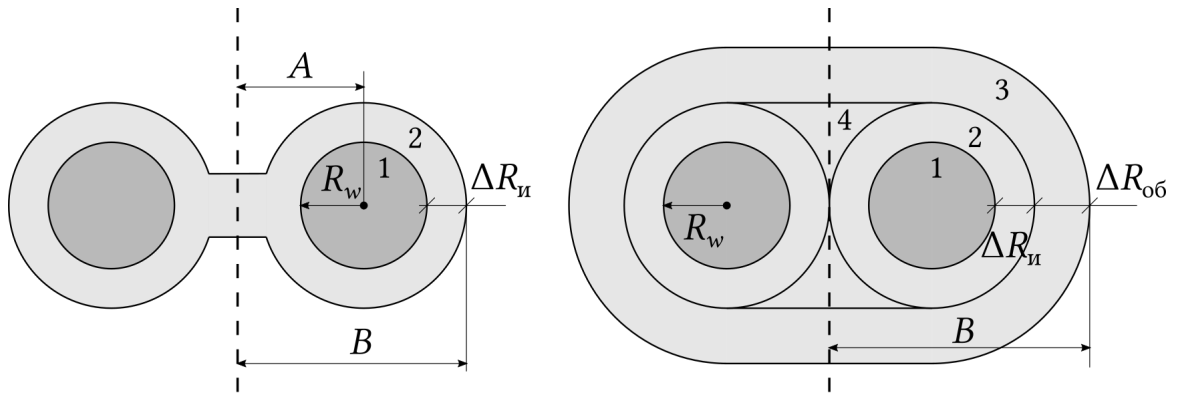


Рисунок 2.1 – Сечение двухжильного провода марки ППВ (слева) и двухжильного кабеля марки ВВГ (справа); 1 — медная жила, 2 — изоляция, 3 — оболочка кабеля, 4 — воздушный промежуток

Согласно [55], число Нуссельта в ламинарном и переходном к турбулентному режиме свободной конвекции описывается выражением:

$$Nu = 0,494 \cdot Gr^{1/4}, \quad (2.3)$$

$$Gr = \frac{g \cdot B^3 \cdot \beta \cdot (\Theta_c - \Theta_{o.c.})}{\nu}, \quad (2.4)$$

где Gr — число Грасгофа; g — ускорение свободного падения, m/s^2 ; ν — коэффициент кинематической вязкости воздуха, $\nu = 15,06 \cdot 10^{-6} m^2/s$; β — температурный коэффициент объемного расширения $\beta = (273 + \Theta_{o.c.})^{-1}, K^{-1}$.

По [56] коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{B}. \quad (2.5)$$

Аппроксимация коэффициента теплоотдачи \tilde{a} (рисунок 2.2) и числа Нуссельта проводилась в диапазоне температур $\Delta\Theta = \Theta_c - \Theta_{o.c.} \leq 300 K$ выражением:

$$\tilde{a} = 4,3664 \cdot \log [\Delta\Theta + 3,766], \frac{Вт}{м^2 \cdot К} \quad (2.6)$$

Рассмотрим пример выполнения моделирования в среде Comsol Multiphysics 5.3a для кабеля ВВГ 2x2,5 (приложение Д). На рисунке Д.1 представлены скриншоты программы с установленными параметрами материалов кабеля. На рисунке Д.2 представлены свойства источника тока, на рисунке Д.3 — свойства теплообмена.

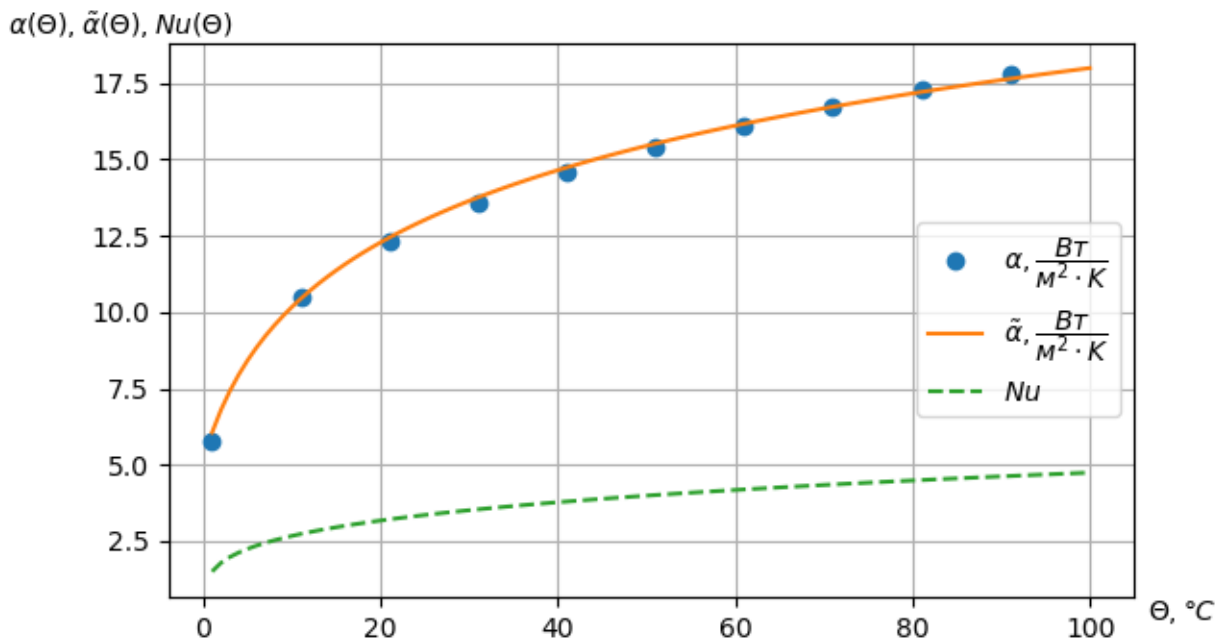


Рисунок 2.2 – Число Нуссельта и коэффициент теплоотдачи для двухжильного кабеля ВВГ 2x2.5

Коэффициенты теплообмена для проводов ВВГ и ППВ различных сечений (таблица 2.1) нелинейно уменьшаются с ростом размера большой полуоси горизонтально расположенного эллипса B и логарифмически растет с увеличением температуры (рисунок 2.2).

Таблица 2.1 – Исходные данные для расчета теплового поля в режиме перегрузки в пакете Comsol Multiphysics 5.3a

ВВГ					
	$\tilde{\alpha} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$	$R_w, \text{ мм}$	$\Delta R_{\text{И}}, \text{ мм}$	$\Delta R_{\text{ОБ}}, \text{ мм}$	$B, \text{ мм}$
2x1,5	$4,477 \cdot \log [\Delta\Theta + 3,766]$	0,69	0,8	1,6	4,58
2x2,5	$4,366 \cdot \log [\Delta\Theta + 3,766]$	0,892	0,8	1,7	5,08
2x4	$4,223 \cdot \log [\Delta\Theta + 3,766]$	1,13	1	1,7	5,96
ППВ					
	$\tilde{\alpha} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$	$R_w, \text{ мм}$	$\Delta R_{\text{И}}, \text{ мм}$	$A, \text{ мм}$	$B, \text{ мм}$
2x2,5	$4,607 \cdot \log [\Delta\Theta + 3,766]$	0,69	0,8	1,9	3,39
2x4	$4,451 \cdot \log [\Delta\Theta + 3,766]$	0,892	0,8	2,2	3,89

2.1.2 Влияние изменения структуры провода или кабеля на характеристики нагрева в режиме перегрузки

При моделировании по пункту 2.1.1 сравнивались многослойный кабель ВВГ с однослойным проводом ППВ. Отличие данных марок КППП состоит в

их строения (рисунок 2.1). У провода марки ППВ, в отличие от кабеля ВВГ отсутствует воздушная прослойка, так же отсутствует дополнительный слой изоляции вокруг жилы провода (кабеля).

Результаты расчетов зависимости температуры нагрева от времени и тока перегрузки в точке на границе жила-изоляция (рисунок Д.4) для ВВГ и ППВ сечений $2 \times 1,5 \dots 2 \times 4 \text{ мм}^2$, проложенных открыто показали (рисунки 2.3–2.5), что провода ППВ всех сечений по сравнению с аналогичными кабелями ВВГ имеют меньшую постоянную времени нагрева, но близкую установившуюся температуру перегрева [57].

Установленные по этим зависимостям характеристики процесса нагрева (установившийся перегрев провода $\tau_{уст}$ и постоянная времени нагрева T_n) приводятся в пункте 4.3 в виде аппроксимирующих выражений (4.3) и (4.4) и используются в алгоритмах микропроцессорной тепловой защиты.

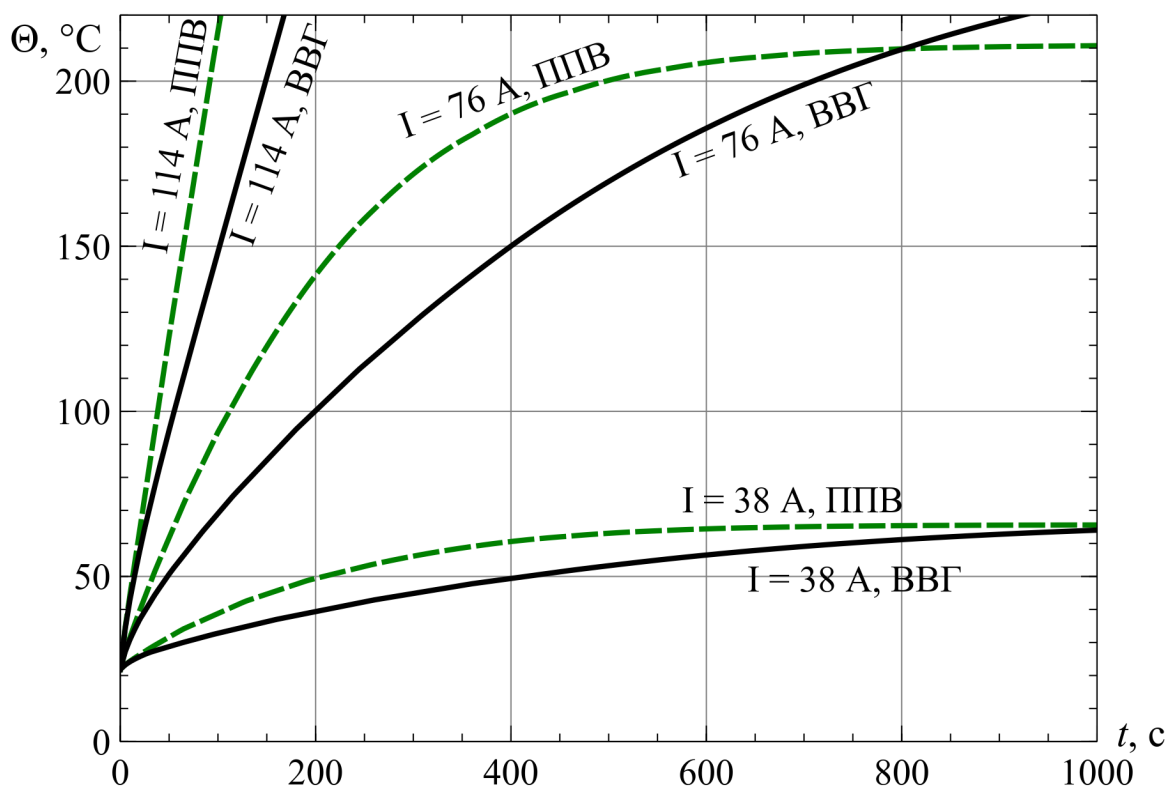


Рисунок 2.3 – Моделирование динамики нагрева кабеля марки ВВГ 2х4 и провода марки ППВ 2х4 при открытой прокладке

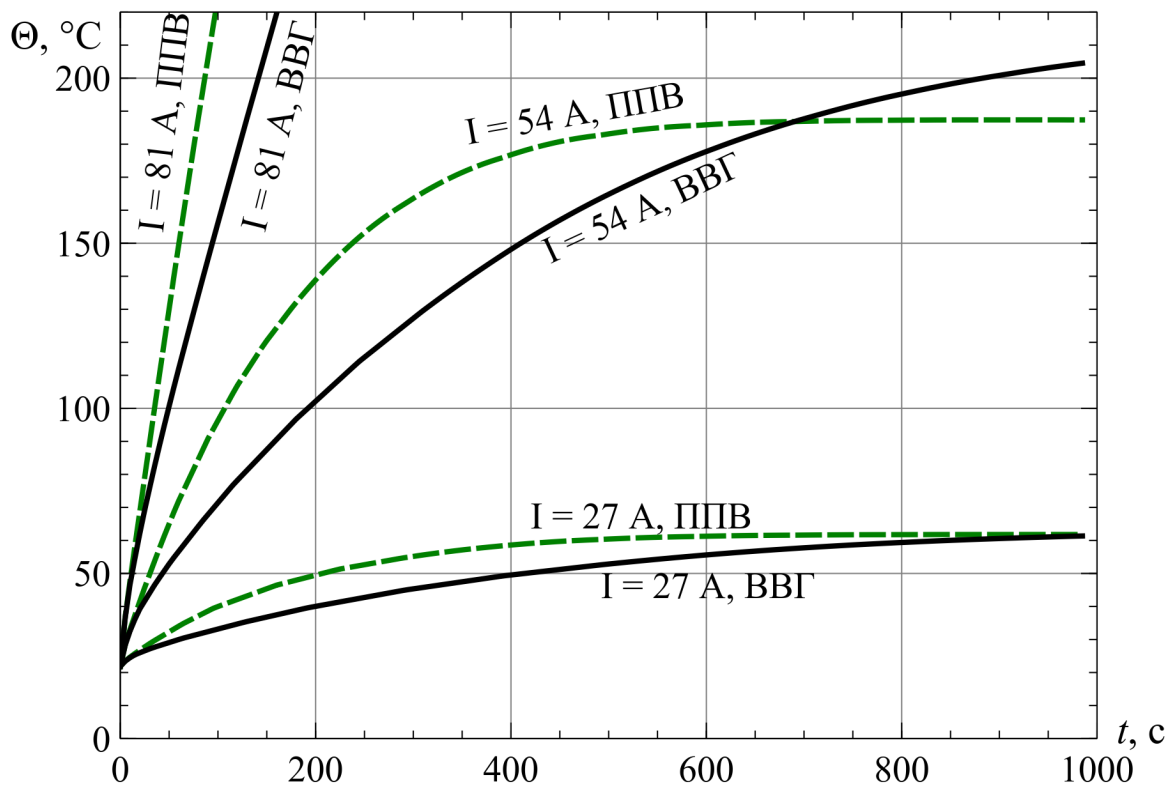


Рисунок 2.4 – Моделирование динамики нагрева кабеля марки ВВГ 2x2,5 и провода марки ППВ 2x2,5 при открытой прокладке

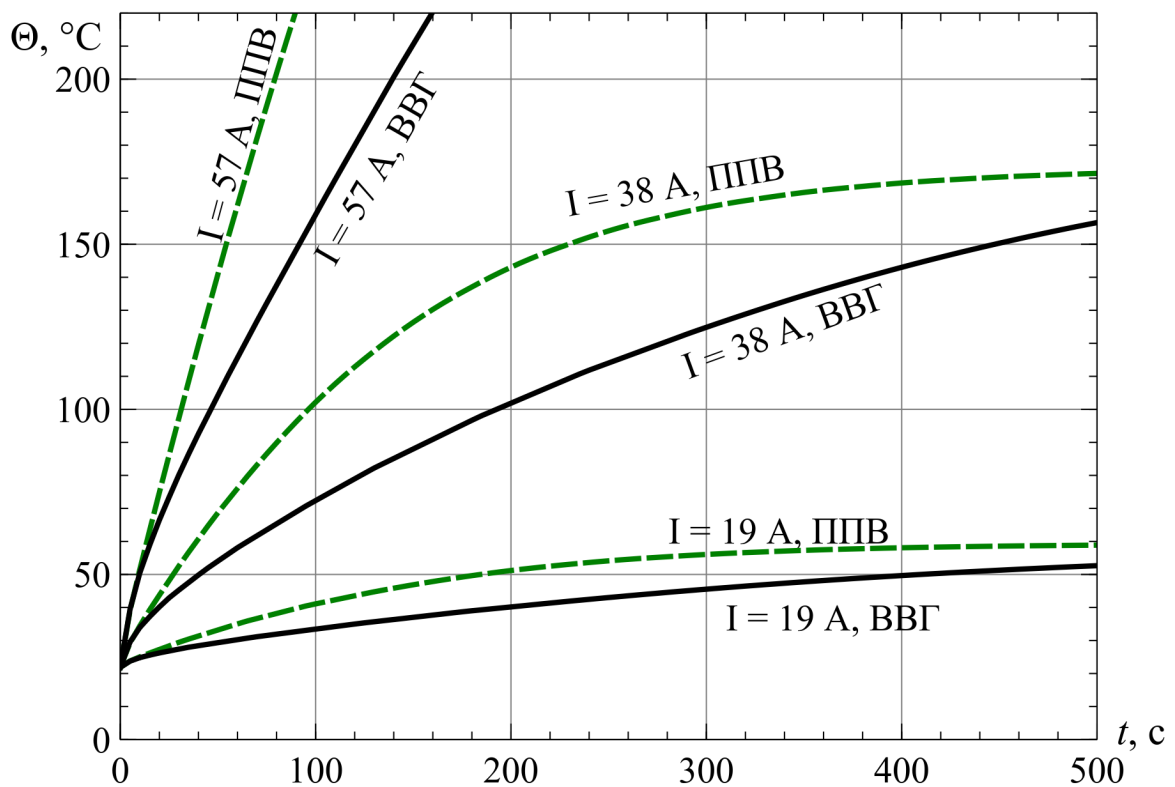


Рисунок 2.5 – Моделирование динамики нагрева кабеля марки ВВГ 2x1,5 и провода марки ППВ 2x1,5 при открытой прокладке

2.2 Разработка математической модели воспламенения горючих веществ частицами металла, образующимися при к. з. в электрической проводке

Как показал анализ нормативной документации, одной из наиболее распространенных причин пожара из-за неисправности ЭП может стать короткое замыкание, т. е. замыкание между двумя фазами или между фазой и землей. В этом случае сила тока увеличивается в сотни раз, выделяется большое количество тепла, способное воспламенить изоляцию и расплавить металлические жилы электрических проводов, капли которых воспламеняют горючий материал [5, 58].

В методике [59] приводятся данные о зоне разлета алюминиевых частиц при к. з., которая зависит от высоты расположения провода, начальной скорости, угла вылета частиц и носит вероятностный характер. Однако этой информации недостаточно для определения критерия воспламенения, т. к. он зависит также от типов горючего материала и частицы, её размеров, степени остывания в процессе полета горючей частицы и тока к. з..

Если для проводов, выполненных алюминиевыми жилами экспериментально изучалось воздействие горящих частиц на возникновение пожара при их попадании в область горючего материала [59], то влияние раскаленных алюминиевых, медных и стальных частиц после кристаллизации в известных методиках определения причастности к пожарам аварийных режимов в электротехнических устройствах не рассматривалось.

Чтобы установить обоснованность критерия воспламенения частицами металла горючих материалов и времени задержки воспламенения в зависимости от вида, теплофизических характеристик горючего материала и нагретого тела, размеров, первоначальной температуры частицы металла, необходимо раскрыть механизм нагрева и воспламенения твердого вещества от локального источника энергии [5].

Принимаем, что тело (частица) в форме диска помещено на поверхность реагирующего вещества и конвективным теплообменом можно пренебречь. Распределение температуры внутри тела и теплофизические характеристики системы постоянны. Кинетические параметры реагентов и размеры частиц определялись экспериментально [60]. Схема области решения представлена на рисунке 2.6.

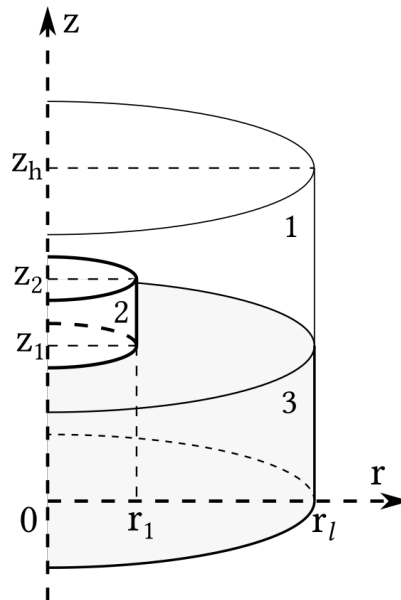


Рисунок 2.6 – Схема области решения задачи воспламенения:

1 — окружающая среда (воздух), 2 — горячая частица, 3 — горючий материал

Уравнение теплового баланса в очаге воспламенения в цилиндрической системе с учетом выделения тепла имеет вид:

$$c \cdot \rho \cdot \frac{\partial \Theta}{\partial t} = \lambda \cdot \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \Theta}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \Theta}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial z^2} \right] + Q \cdot W, \quad (2.7)$$

где t — время, с; r, z — координаты цилиндрической системы, м; φ — угловая координата цилиндрической системы, рад; c — удельная теплоемкость, Дж/(кг·К); ρ — плотность, кг/м³; λ — теплопроводность, Вт/(м·К); Θ — температура, К; Q — тепловой эффект экзотермической реакции в прогретой области приповерхностного слоя горючего материала, 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 в прогретой области по закону Аррениуса:

$$W = \rho \cdot k^0 \cdot e^{-\frac{E}{R_t \Theta}} \quad (2.8)$$

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

В силу симметрии задачи принимаем $\frac{\partial^2 \Theta}{\partial \varphi^2} = 0$, получаем:

$$c \cdot \rho \frac{\partial \Theta}{\partial t} = \lambda \cdot \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \Theta}{\partial t} \right) + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial z^2} \right] + Q \cdot W \quad (2.9)$$

В дальнейших выражениях индекс 1 соответствует воздуху, 2 — горячей частице, 3 — горючему материалу.

Уравнение теплопроводности для воздуха ($r_1 < r < r_l$, $z_1 < z < z_2$; $0 < r < r_l$, $z_2 < z < z_h$) имеет вид:

$$c_1 \rho_1 \frac{\partial \Theta_1}{\partial t} = \lambda \cdot \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \Theta_1}{\partial t} \right) + \frac{\partial^2 \Theta_1}{\partial z^2} \right]; \quad (2.10)$$

Уравнение теплопроводности для горячей частицы ($0 < r < r_1$, $z_1 < z < z_2$) имеет вид:

$$c_2 \rho_2 \frac{\partial \Theta_2}{\partial t} = \lambda \cdot \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \Theta_2}{\partial t} \right) + \frac{\partial^2 \Theta_2}{\partial z^2} \right]; \quad (2.11)$$

Уравнение теплопроводности для горючего материала ($0 < r < r_l$, $0 < z < z_1$) имеет вид:

$$c_3 \rho_3 \frac{\partial \Theta_3}{\partial t} = \lambda \cdot \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \Theta_3}{\partial t} \right) + \frac{\partial^2 \Theta_3}{\partial z^2} \right] + Q_3 W_3, \quad (2.12)$$

Для аппроксимации частных производных используем неявную четырехточечную разностную схему [61].

Введем пространственно-временную сетку:

$$t_n = n \cdot \tau, \quad \tau = \frac{t_d}{N_t}, \quad (2.13)$$

где n — номер временного интервала; τ — шаг дискретизации по времени, с; t_d — время задержки воспламенения, с; N_t — количество интервалов времени.

В пространстве строим сетку с координатами r_i и z_j , где $i = 0, \dots, N_r - 1$, $j = 0, \dots, N_z - 1$ — номера слоев по осям r, z ; N_r, N_z — количество точек сетки.

В случае постоянного шага сетки по координатам r и z , имеем:

$$r_i = i \cdot h_r, \quad h_r = \frac{r_L}{N_r - 1}; \quad (2.14)$$

$$z_j = j \cdot h_z, \quad h_z = \frac{z_H}{N_z - 1}. \quad (2.15)$$

Для уменьшения объема матриц сетки при сохранении точности расчета критериев воспламенения горючего материала от горячей частицы в областях изменения характеристик λ , ρ , c (границы раздела сред) достаточно провести сгущение сетки в 3 раза.

Вместо постоянного шага h_r , h_z в каждой точке сетки введем предшаг и постшаг h_{r+} и h_{r-} для координаты r и h_{z+} и h_{z-} для координаты z , соответственно. Обозначим $h_r = (h_{r-} + h_{r+})/2$ и $h_z = (h_{z-} + h_{z+})/2$.

Дискретизацию уравнения (2.7) (приведение к разностному виду 2.16 по осям r и z) будем проводить на основе локально одномерной схемы А.А. Самарского [62]. Разделяем шаг по времени на две составляющие. На первом полушаге от n до $n + \frac{1}{2}$ проводим дискретизацию двумерного уравнения (2.7) только в направлении оси r и получаем одномерное уравнение 2.16. В этом уравнении учитываем источник тепла в виде термического разложения. После его решения снова проводим дискретизацию уравнения (2.7) в направлении оси z (второй полушаг от $n + \frac{1}{2}$ до $n + 1$) и получаем одномерное уравнение 2.16. После его решения определяем поле температур на шаге по времени $n + 1$.

Разностные уравнения сводятся к стандартному трехдиагональному виду и решаются последовательно методом прогонки.

$$\begin{cases} A_r \Theta_{i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} - B_r \Theta_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + C_r \Theta_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}} = F_r; \\ A_z \Theta_{i,j+1}^{n+1} - B_z \Theta_{i,j}^{n+1} + C_z \Theta_{i,j-1}^{n+1} = F_z. \end{cases} \quad (2.16)$$

где:

$$F_r = -c\rho\Theta_{i,j}^n - Qk^0\rho \cdot e^{-\frac{E}{Rt\Theta_{i,j}^n}}; \quad (2.17)$$

$$F_z = -c\rho\Theta_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}. \quad (2.18)$$

Распределение температур на следующем шаге итерации определяется

по формулам:

$$\Theta_i^{n+\frac{1}{2}} = \alpha_{r,i}^{n+\frac{1}{2}} \Theta_i^n + \beta_{r,i}^{n+\frac{1}{2}}; \quad (2.19)$$

$$\Theta_j^{n+1} = \alpha_{z,j}^{n+1} \Theta_j^{n+\frac{1}{2}} + \beta_{z,j}^{n+1}, \quad (2.20)$$

где для оси r :

$$\alpha_{r,i} = \frac{A_{r,i}}{B_{r,i} - C_{r,i} \cdot \alpha_{r,i-1}} \quad (2.21)$$

$$\beta_{r,i} = \frac{C_{r,i} \cdot \beta_{r,i-1} + F_{r,i}}{B_{r,i} - C_{r,i} \cdot \alpha_{r,i-1}} \quad (2.22)$$

Аналогично для оси z .

Для аппроксимации функции температуры по оси z в условной точке z_0 многочленом второй степени, и соответственно, нахождения коэффициентов A_z , B_z и C_z в этой точке, используем соседние точки пространственной сетки $z_0 - h_{z-}$ и $z_0 + h_{z+}$. Для цилиндрической системы с переменным шагом дискретизации по осям r и z (приложение А) [63], получаем:

$$A_r = \frac{2 \cdot r_i + h_{r-}}{2 \cdot r_i} \cdot \frac{\lambda}{h_r \cdot h_{r+}}; \quad (2.23)$$

$$B_r = A_r + C_r + \frac{\rho \cdot c}{\tau} \quad (2.24)$$

$$C_r = \frac{2 \cdot r_i - h_{r+}}{2 \cdot r_i} \cdot \frac{\lambda}{h_r \cdot h_{r-}}. \quad (2.25)$$

$$A_z = \frac{\lambda}{h_z \cdot h_{z+}}. \quad (2.26)$$

$$B_z = A_z + C_z + \frac{\rho \cdot c}{\tau} = \frac{2 \cdot \lambda}{h_{z+} \cdot h_{z-}} + \frac{\rho \cdot c}{\tau}; \quad (2.27)$$

$$C_z = \frac{\lambda}{h_z \cdot h_{z-}}. \quad (2.28)$$

Начальные условия ($t = 0$):

$$\begin{aligned} \Theta = \Theta_0 : 0 < r < r_1, 0 < z < z_1; r_1 < r < r_l, z_1 < z < z_2; \\ 0 < r < r_l; z_2 < z < z_h; \end{aligned} \quad (2.29)$$

$$\Theta = \Theta_p : 0 < r < r_1, z_1 < z < z_2, \quad (2.30)$$

где Θ_p — начальная температура частицы в момент ее попадания в область горячего материала; Θ_0 — начальная температура воздуха и горячего материала.

Граничные условия на границах области решения для $0 < t < t_d$:

$$z = 0, 0 < r < r_1 : \quad \frac{\partial \Theta_3}{\partial z} = 0; \quad (2.31)$$

$$z = z_h, 0 < r < r_l : \quad \frac{\partial \Theta_1}{\partial z} = 0; \quad (2.32)$$

$$r = 0, r = r_l, 0 < z < z_1 : \quad \frac{\partial \Theta_3}{\partial r} = 0; \quad (2.33)$$

$$r = 0, z_1 < z < z_2 : \quad \frac{\partial \Theta_2}{\partial r} = 0; \quad (2.34)$$

$$r = 0, z_2 < z < z_h : \quad \frac{\partial \Theta_1}{\partial r} = 0; \quad (2.35)$$

$$r = r_l, z_1 < z < z_h : \quad \frac{\partial \Theta_1}{\partial r} = 0. \quad (2.36)$$

Используя формулы [62], можем записать граничные условия задачи:

– граничное условие $z = 0$:

$$\begin{cases} \alpha_1 = \frac{2 \cdot a \cdot \tau}{h^2 + 2 \cdot a \cdot \tau}; \\ \beta_1 = \frac{h^2}{h^2 + 2 \cdot a \cdot \tau} \cdot \Theta_1^n + \frac{2 \cdot a \cdot \tau \cdot h \cdot q_1}{\lambda \cdot (h^2 + 2 \cdot a \cdot \tau)}, \end{cases}$$

где $a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c}$ — коэффициент температуропроводности.

– граничное условие $z = z_h$:

$$\Theta_N^{n+1} = \frac{2 \cdot a \cdot \tau \cdot \lambda \cdot \beta_{N-1} - 2 \cdot a \cdot \tau \cdot h \cdot q_2 + h^2 \cdot \lambda \cdot \Theta_N^n}{\lambda \cdot h^2 + 2 \cdot a \cdot \tau \cdot \lambda \cdot (1 - \alpha_{N-1})}$$

Примем тепловые потоки $q_1 = q_2 = 0$.

Граничные условия на границах раздела сред описывается выражениями:

$$z = z_1, 0 < r < r_1 : \quad \lambda_3 \frac{\partial \Theta_3}{\partial z} = \lambda_2 \frac{\partial \Theta_2}{\partial z}, \quad \Theta_3 = \Theta_2; \quad (2.37)$$

$$z = z_1, r_1 < r < r_l : \quad \lambda_3 \frac{\partial \Theta_3}{\partial z} = \lambda_1 \frac{\partial \Theta_1}{\partial z}, \quad \Theta_3 = \Theta_1; \quad (2.38)$$

$$z = z_2, 0 < r < r_1 : \quad \lambda_2 \frac{\partial \Theta_2}{\partial z} = \lambda_1 \frac{\partial \Theta_1}{\partial z}, \quad \Theta_2 = \Theta_1; \quad (2.39)$$

$$r = r_1, z_1 < z < z_h : \quad \lambda_2 \frac{\partial \Theta_2}{\partial z} = \lambda_1 \frac{\partial \Theta_1}{\partial z}, \quad \Theta_2 = \Theta_1; \quad (2.40)$$

Для оси z имеем соотношение [62]:

$$\begin{cases} \alpha_{j^*} = \frac{2 \cdot a_1 \cdot a_2 \cdot \tau \cdot \lambda_2}{2 \cdot a_1 \cdot a_2 \cdot \tau \cdot (\lambda_2 + \lambda_1 \cdot (1 - \alpha_{j-1})) + h^2 \cdot (\lambda_1 \cdot a_2 + \lambda_2 \cdot a_1)}, \\ \beta_{j^*} = \frac{2 \cdot a_1 \cdot a_2 \cdot \tau \cdot \lambda_1 \cdot \beta_{j-1} + h^2 \cdot (\lambda_1 \cdot a_2 + \lambda_2 \cdot a_1)}{2 \cdot a_1 \cdot a_2 \cdot \tau \cdot (\lambda_2 + \lambda_1 \cdot (1 - \alpha_{j-1})) + h^2 \cdot (\lambda_1 \cdot a_2 + \lambda_2 \cdot a_1)}. \end{cases} \quad (2.41)$$

где индексы 1 и 2 соответствуют параметрам материалов на соседних клетках пространственной сетки по оси z .

$$\alpha_{j^*} = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 + \lambda_1 \cdot (1 - \alpha_{j-1}) + \frac{h^2 \cdot (\lambda_1 \cdot a_2 + \lambda_2 \cdot a_1)}{2 \cdot \tau \cdot a_1 \cdot a_2}}; \quad (2.42)$$

$$\alpha_{j^*} = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 + \lambda_1 \cdot (1 - \alpha_{j-1}) + \frac{h^2 \cdot (\lambda_1 \cdot \frac{\lambda_2}{\rho_2 \cdot c_2} + \lambda_2 \cdot \frac{\lambda_1}{\rho_1 \cdot c_1})}{2 \cdot \tau \cdot \frac{\lambda_1}{\rho_1 \cdot c_1} \cdot \frac{\lambda_2}{\rho_2 \cdot c_2}}} \quad (2.43)$$

$$\lambda_1 \cdot \frac{\lambda_2}{\rho_2 \cdot c_2} + \lambda_2 \cdot \frac{\lambda_1}{\rho_1 \cdot c_1} = \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2}{\rho_1 \cdot c_1 \cdot \rho_2 \cdot c_2} (\rho_1 \cdot c_1 + \rho_2 \cdot c_2) \quad (2.44)$$

$$\alpha_{j^*} = \frac{\frac{\lambda_2}{h^2}}{\left[\frac{\lambda_2}{h^2} + \frac{\lambda_1}{h^2} + \frac{\rho_1 \cdot c_1 + \rho_2 \cdot c_2}{2 \cdot \tau} \right] - \frac{\lambda_1}{h^2} \cdot \alpha_{j-1}} = \frac{A}{B - C \cdot \alpha_{j-1}} \quad (2.45)$$

Аналогично, для β_{i^*}

Окончательно получим, на границах между материалами:

$$A_{z^*} = \frac{\lambda_2}{h_z^2}; \quad (2.46)$$

$$C_{z^*} = \frac{\lambda_1}{h_z^2}; \quad (2.47)$$

$$B_{z^*} = A_{z^*} + C_{z^*} + \frac{\rho_1 \cdot c_1 + \rho_2 \cdot c_2}{2 \cdot \tau}; \quad (2.48)$$

$$F_{z^*} = -\frac{\rho_1 \cdot c_1 + \rho_2 \cdot c_2}{2 \cdot \tau} \cdot \Theta_{i^*}^n \quad (2.49)$$

2.3 Определение теоретического критерия воспламенения горючих материалов частицами металла

Критерии воспламенения твердого горючего материала при взаимодействии с источником ограниченной энергоемкости малых размеров принимаем с учетом исследований А. Г. Мержанова и Г. В. Кузнецова:

1. Температура горючего материала в области реакции окисления 3 (рисунок 2.6) выше начальной температуры источника воспламенения:

$$\Theta_{3,i,j} > \Theta_p \quad (2.50)$$

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

$$dQ_{\text{э}} > dQ_{\text{к}} \quad (2.51)$$

$$dQ_{\text{к}} = 2\pi \cdot \frac{c_2 \rho_2}{\tau} \cdot \int_0^{r_1} \int_{z_1}^{z_2} (\Theta^n(r,z) - \Theta^{n+1}(r,z)) \cdot r \cdot dr \cdot dz \quad (2.52)$$

$$dQ_{\text{э}} = 2\pi \cdot Q_3 \cdot \rho_3 \cdot k_3^0 \cdot \int_0^{r_i} \int_0^{z_1} e^{-\frac{E_3}{R_t \Theta^n(r,z)}} \cdot r \cdot dr \cdot dz \quad (2.53)$$

Особенности моделирования воспламенения горючего материала локальным источником энергии в виде цилиндрического тела показан на примере данных из таблицы 2.2.

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 опреде-

лялась критическая температура $\Theta_{кр}$ этой частицы, при превышении которой происходит воспламенение горючего материала (таблица 2.3).

Математическое моделирование осуществлялось путем программирования в среде Anaconda (язык Python 3) и на языке Rust для наиболее ресурсоемких вычислительных операций. Исходные данные и результаты хранятся в базе данных SQLite (рисунки 2.7–2.9). Опрос базы данных производится в автоматическом режиме.

task_id	E_S	LO	VE	EGF	GAS	PARTICLE	FUEL	Tr	Rp	Zp	T0	Nr	Nz	dt	sizeR	sizeZ	kR	kZ	gridPerc	gridK	tmax
37	114	1	0	N...	Воздух	Cu	Сосновые опилки	N...	0.15	0.15	293	501	801	0.0005	NULL	NULL	3	8	0.1	3	10
38	115	1	0	N...	Воздух	Cu	Сосновые опилки	N...	0.15	0.1	293	501	801	0.0005	NULL	NULL	3	8	0.1	3	10
39	128	1	0	N...	Воздух	Fe	Хлопок3	N...	1.5	3	293	501	801	0.0005	NULL	NULL	3	8	0.1	3	10
40	129	1	0	N...	Воздух	Fe	Хлопок3	N...	1.5	1.5	293	501	801	0.0005	NULL	NULL	3	8	0.1	3	10
41	130	1	0	N...	Воздух	Fe	Хлопок3	N...	1.5	1	293	501	801	0.0005	NULL	NULL	3	8	0.1	3	10
42	131	1	0	N...	Воздух	Fe	Хлопок3	N...	0.9	1.8	293	501	801	0.0005	NULL	NULL	3	8	0.1	3	10
43	132	1	0	N...	Воздух	Fe	Хлопок3	N...	0.9	0.9	293	501	801	0.0005	NULL	NULL	3	8	0.1	3	10
44	133	1	0	N...	Воздух	Fe	Хлопок3	N...	0.9	0.6	293	501	801	0.0005	NULL	NULL	3	8	0.1	3	10
45	134	1	0	N...	Воздух	Fe	Хлопок3	N...	0.6	1.2	293	501	801	0.0005	NULL	NULL	3	8	0.1	3	10
46	135	1	0	N...	Воздух	Fe	Хлопок3	N...	0.6	0.6	293	501	801	0.0005	NULL	NULL	3	8	0.1	3	10
47	136	1	0	N...	Воздух	Fe	Хлопок3	N...	0.6	0.4	293	501	801	0.0005	NULL	NULL	3	8	0.1	3	10
48	137	1	0	N...	Воздух	Fe	Хлопок3	N...	0.15	0.3	293	501	801	0.0005	NULL	NULL	3	8	0.1	3	10
49	138	1	0	N...	Воздух	Fe	Хлопок3	N...	0.15	0.15	293	501	801	0.0005	NULL	NULL	3	8	0.1	3	10
50	139	1	0	N...	Воздух	Fe	Хлопок3	N...	0.15	0.1	293	501	801	0.0005	NULL	NULL	3	8	0.1	3	10
51	140	1	0	N...	Воздух	Cu	Хлопок3	N...	1.5	3	293	501	801	0.0005	NULL	NULL	3	8	0.1	3	10
52	141	1	0	N...	Воздух	Cu	Хлопок3	N...	1.5	1.5	293	501	801	0.0005	NULL	NULL	3	8	0.1	3	10
53	142	1	0	N...	Воздух	Cu	Хлопок3	N...	1.5	1	293	501	801	0.0005	NULL	NULL	3	8	0.1	3	10
54	143	1	0	N...	Воздух	Cu	Хлопок3	N...	0.9	1.8	293	501	801	0.0005	NULL	NULL	3	8	0.1	3	10
55	144	1	0	N...	Воздух	Cu	Хлопок3	N...	0.9	0.9	293	501	801	0.0005	NULL	NULL	3	8	0.1	3	10
56	145	1	0	N...	Воздух	Cu	Хлопок3	N...	0.9	0.6	293	501	801	0.0005	NULL	NULL	3	8	0.1	3	10
57	146	1	0	N...	Воздух	Cu	Хлопок3	N...	0.6	1.2	293	501	801	0.0005	NULL	NULL	3	8	0.1	3	10
58	147	1	0	N...	Воздух	Cu	Хлопок3	N...	0.6	0.6	293	501	801	0.0005	NULL	NULL	3	8	0.1	3	10
59	148	1	0	N...	Воздух	Cu	Хлопок3	N...	0.6	0.4	293	501	801	0.0005	NULL	NULL	3	8	0.1	3	10
60	149	1	0	N...	Воздух	Cu	Хлопок3	N...	0.15	0.3	293	501	801	0.0005	NULL	NULL	3	8	0.1	3	10
61	150	1	0	N...	Воздух	Cu	Хлопок3	N...	0.15	0.15	293	501	801	0.0005	NULL	NULL	3	8	0.1	3	10
62	151	1	0	N...	Воздух	Cu	Хлопок3	N...	0.15	0.1	293	501	801	0.0005	NULL	NULL	3	8	0.1	3	10
63	152	1	0	N...	Воздух	Al	Хлопок3	N...	1.5	3	293	501	801	0.0005	NULL	NULL	3	8	0.1	3	10
64	153	1	0	N...	Воздух	Al	Хлопок3	N...	1.5	1.5	293	501	801	0.0005	NULL	NULL	3	8	0.1	3	10
65	154	1	0	N...	Воздух	Al	Хлопок3	N...	1.5	1	293	501	801	0.0005	NULL	NULL	3	8	0.1	3	10
66	155	1	0	N...	Воздух	Al	Хлопок3	N...	0.9	1.8	293	501	801	0.0005	NULL	NULL	3	8	0.1	3	10
67	156	1	0	N...	Воздух	Al	Хлопок3	N...	0.9	0.9	293	501	801	0.0005	NULL	NULL	3	8	0.1	3	10
68	157	1	0	N...	Воздух	Al	Хлопок3	N...	0.9	0.6	293	501	801	0.0005	NULL	NULL	3	8	0.1	3	10
69	158	1	0	N...	Воздух	Al	Хлопок3	N...	0.6	1.2	293	501	801	0.0005	NULL	NULL	3	8	0.1	3	10
70	159	1	0	N...	Воздух	Al	Хлопок3	N...	0.6	0.6	293	501	801	0.0005	NULL	NULL	3	8	0.1	3	10

Рисунок 2.7 – Исходные данные для моделирования: task_id — номер решаемой задачи, E_S — состояние решения задачи (0 — не решена, 1 — решена, 2 — в процессе решения), GAS — окружающая среда, PARTICLE — материал горячей частицы, FUEL — горючий материал; Tr — начальная температура частицы, K, Rp, Zp — радиус и высота частицы соответственно, м, dt — шаг по времени, с, tmax — время моделирования, с, Nr, Nz — размер сетки, sizeR, sizeZ, kR, kZ, gridPerc, gridK — плотность и диапазон сгущения шага сетки

Пример 2.1. Рассматривается задача с такими исходными данными:

$\Theta_p = 807$ К, $\Theta_0 = 293$ К, $r_p = 1,5$ мм, $z_p = 3$ мм, $r_l = 4,5$ мм, $z_h = 24$ мм, $\tau = 5 \cdot 10^{-4}$ с, размер сетки $N_r \times N_z = 501 \times 801$.

Материал частицы — алюминий, горючий материал — хлопок, окружающая среда — воздух.

Характеристики материалов и среды заданы в таблице 2.2.

	name	lam	rho	c	E	Qk0	Q	k0
8	Уголь Д	0.125	1300		16084		7.042	0.8
9	Уголь КЖ	0.125	1331		17536		5.469	0.67
10	Уголь К	0.125	1342	1510	18061		6.459	1.51
11	Уголь Т	0.125	1381		16688		8.177	0.59
12	Уголь А	0.125	1374	930	14846		1.018	0.26
13	Опилки сосна	0.054	190	1700	93450		0.421	900000
14	Дрожжи 8	0.043	220		106144		0.112	72900000
15	Дрожжи 15	0.054	250		92285		0.112	2580000
16	Мука ржаная	0.152	655	1590	88054		0.112	285000
17	Мука костная крупнозернистая	0.14	660	780	50740		0.112	98.3
18	Пыль костной муки	0.2	660		71623		0.112	49700
19	Сено	0.024	70		178050		0.112	6e+15
20	Силос	0.048	227		112896		0.112	3.17e+8
21	Хлопок	0.025	80	1675	121825		5.6	6.38e+8
22	Al		220	2700	880	NULL	NULL	NULL
23	Cu		401	8920	385	NULL	NULL	NULL
24	Воздух		0.03	1140	1006	NULL	NULL	NULL
25	Fe		49	7831	470	NULL	NULL	NULL
26	Сосновые опилки	0.086	190	1786	93441	1.946e+9	1716	NULL
27	Хлопок2	0.025	80	1675	121825		1727000	6.38e+8
28	Хлопок3	0.042	80	1505	132473		17501000	6.32e+8

Рисунок 2.8 – Теплофизические характеристики материалов: Q — тепловой эффект экзотермической реакции в прогретой области приповерхностного слоя горючего материала, Дж/кг; k_0 — предэкспоненциальный множитель, c^{-1} ; E — энергия активации, Дж/моль

Таблица 2.2 – Теплофизические характеристики материалов и среды

Материал	Коэф. теплопроводности λ , Вт/(м·К)	Плотность ρ , кг/м ³	Удельная теплоемкость c , Дж/(кг·К)	Энергия активации E , Дж/моль	Теплота реакции окисления Q , Дж/моль	Предэкспоненциальный множитель k^0
Воздух	0,03	1140	1006	—	—	—
Медь	401	8920	385	—	—	—
Алюминий	220	2700	8800	—	—	—
Сталь	49	7831	470	—	—	—
Хлопок	0,042	80	1505	132473	17501000	$6,32 \cdot 10^8$

На рисунке 2.10 показано расчетное поле температур в момент выполнения одного из критериев воспламенения. Время задержки воспламенения составило 0,249 с.

Варьирование размеров горячей частицы r_p и z_p , их соотношения r_p/z_p приводится в таблице 2.3. Анализируя зависимость $\Theta_{кр}$ от объема частицы $V_p = \pi r_p^2 z_p$ (рисунок 2.11) можно сделать вывод, что степенной характер сохраняется для всех соотношений радиуса к высоте r_p/z_p (рисунок 2.11).

task_id	GAS	ARTICI	FUEL	FIRE	Tp	Rp	Zp	tend	depth	T0	
653	159	Воздух	Al	ХлопокЗ	1	3000	0.0006	0.0006	0.001	0.000171850...	293
654	159	Воздух	Al	ХлопокЗ	1	2205	0.0006	0.0006	0.001	0.000142450...	293
655	159	Воздух	Al	ХлопокЗ	1	1648	0.0006	0.0006	0.001	0.000120400...	293
656	159	Воздух	Al	ХлопокЗ	1	1258	0.0006	0.0006	0.0015	0.000130200...	293
657	159	Воздух	Al	ХлопокЗ	1	985	0.0006	0.0006	0.0075	0.000240450...	293
658	159	Воздух	Al	ХлопокЗ	0	794	0.0006	0.0006	10	0.0021	293
659	159	Воздух	Al	ХлопокЗ	1	927	0.0006	0.0006	0.0225	0.000402150...	293
660	159	Воздух	Al	ХлопокЗ	1	887	0.0006	0.0006	0.09	0.000784350...	293
661	159	Воздух	Al	ХлопокЗ	0	859	0.0006	0.0006	10	0.0021	293
662	159	Воздух	Al	ХлопокЗ	0	878	0.0006	0.0006	10	0.0021	293
663	160	Воздух	Al	ХлопокЗ	1	3000	0.0006	0.0004	0.001	0.000170100...	293
664	160	Воздух	Al	ХлопокЗ	1	2205	0.0006	0.0004	0.001	0.000140700...	293
665	160	Воздух	Al	ХлопокЗ	1	1648	0.0006	0.0004	0.001	0.000121100...	293
666	160	Воздух	Al	ХлопокЗ	1	1258	0.0006	0.0004	0.0015	0.000129266...	293
667	160	Воздух	Al	ХлопокЗ	1	985	0.0006	0.0004	0.0085	0.000253400...	293
668	160	Воздух	Al	ХлопокЗ	0	794	0.0006	0.0004	10	0.0014	293
669	160	Воздух	Al	ХлопокЗ	1	927	0.0006	0.0004	0.0275	0.000439600...	293
670	160	Воздух	Al	ХлопокЗ	0	887	0.0006	0.0004	10	0.0014	293
671	160	Воздух	Al	ХлопокЗ	1	915	0.0006	0.0004	0.0405	0.000532700...	293

Рисунок 2.9 – Результаты моделирования воспламенения горючего материала: FIRE — наличие устойчивого воспламенения, tend — время фиксации воспламенения, depth — «глубина прогрева» горючего материала в момент tend, м, T0 — температура окружающей среды, К.

В дальнейших исследованиях дальности полета частиц удобнее принимать сферическую форму тела. Поэтому пересчитываем эквивалентный диаметр горячей частицы $d_p = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot V_p}{\pi}}$. Зависимость $\Theta_{кр}$ от d_p для алюминия, меди, стали и горючего материала хлопка представлена на рисунке 2.12. Линии тренда приведены в таблице 2.4.

С использованием метода, рассмотренного выше, проводилось тестирование адекватности модели на примере смесового твердого топлива и горячей частицы с заданными характеристиками [64]. Верификация численного моделирования с экспериментальными данными [65] показала, что погрешность

Таблица 2.3 – Критическая температура частиц $\Theta_{кр}$ в зависимости от материалов и размеров

Материал частицы	$\frac{r_p}{z_p}$	0,5				1				1,5			
	$r_p, \text{мм}$	0,15	0,6	0,9	1,5	0,15	0,6	0,9	1,5	0,15	0,6	0,9	1,5
	$V, \text{мм}^3$	0,02	1,36	4,58	21,2	0,01	0,68	2,29	10,6	0,01	0,45	1,53	7,07
Алюминий		1025	859	825	781	1050	878	839	794	1069	896	853	805
Медь		992	839	802	759	1010	853	815	773	1030	868	825	781
Сталь		987	834	794	754	1006	848	806	768	1025	859	825	781

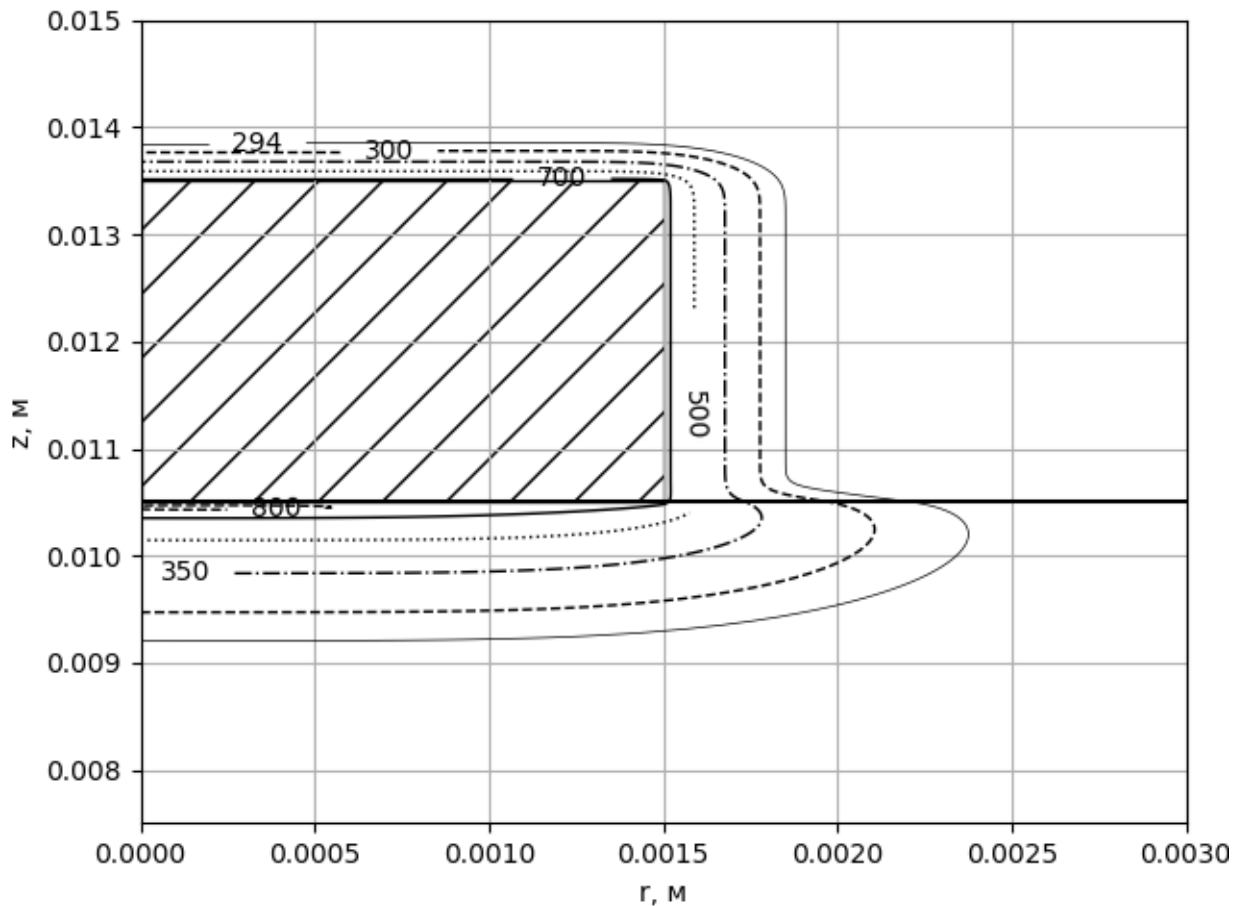


Рисунок 2.10 – Распределение температур в момент регистрации воспламенения

Таблица 2.4 – 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	$863 \cdot d_p^{-0,118}$

Примечание, к таблице 2.4. Единицы измерения d_p — мм, $\Theta_{кр}$ — К.

определения времени задержки воспламенения t_d в зависимости от начальной температуры источника энергии составила 10,2% при $\Theta_p = 900$ К.

2.4 Выводы по разделу 2

1. С помощью численного моделирования в программной среде Comsol Multiphysics 5.3a и экспериментальных измерений получены характеристики динамики нагрева электрическим током двухжильного изолированного кабеля ВВГ 2x2,5, 2x1,5, 2x4 с 2-слойной изоляцией и провода ППВ 2x1,5, 2x2,5, 2x4 с 1-слойной изоляцией, охлаждаемых в результате свободно-конвективного теп-

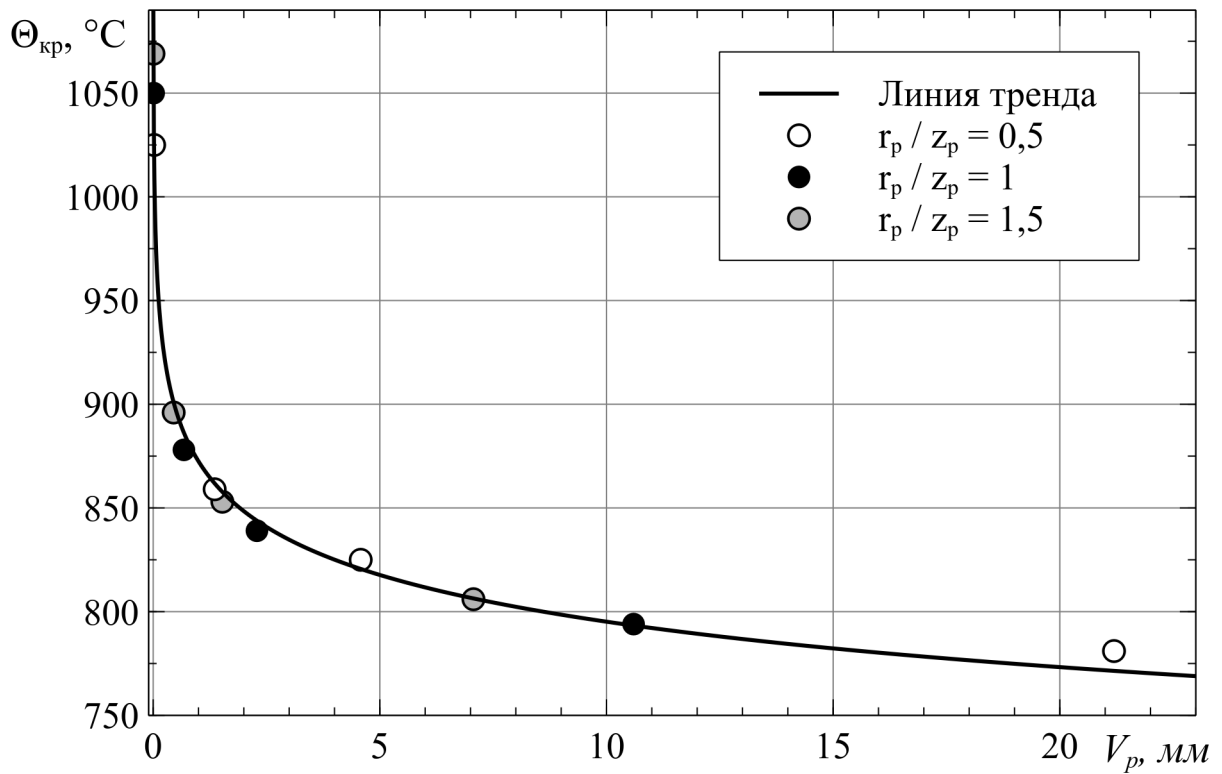


Рисунок 2.11 – Зависимость $\Theta_{кр}$ от объема алюминиевой частицы

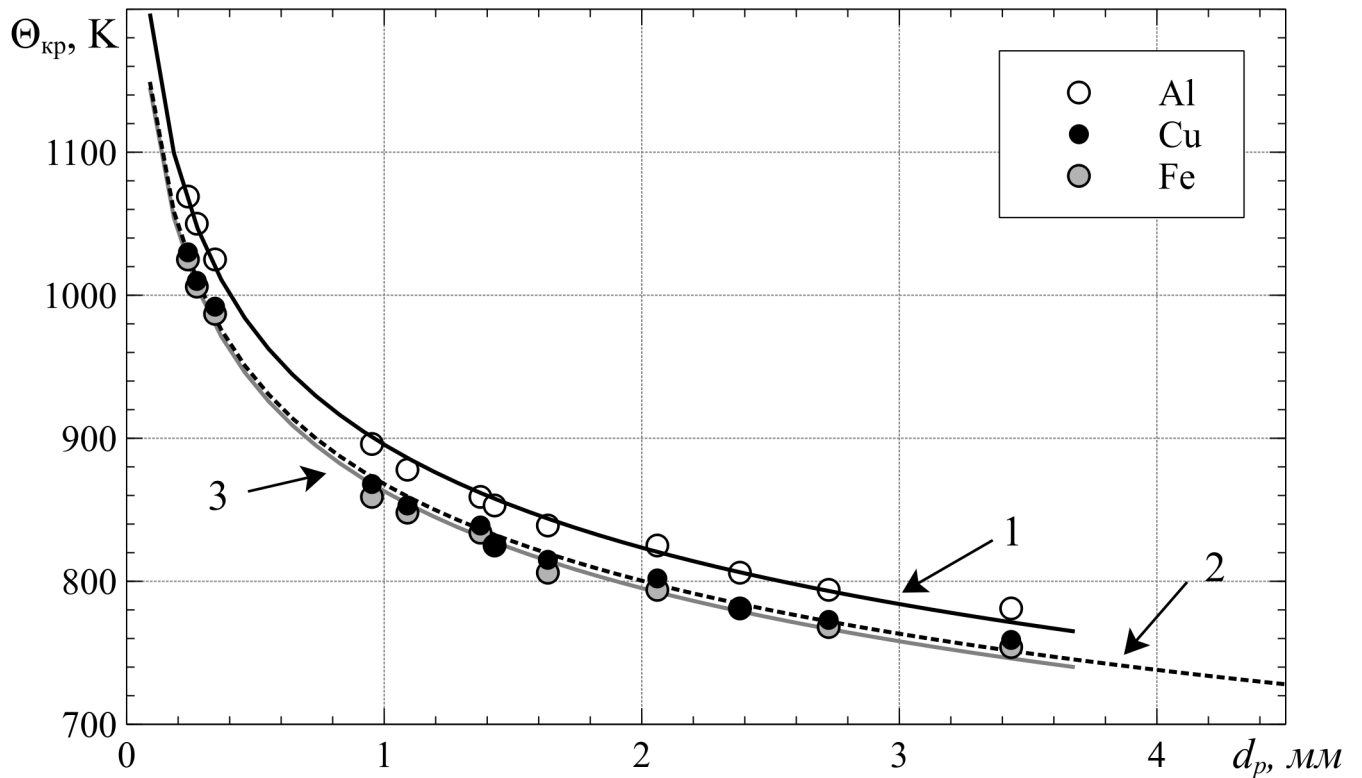


Рисунок 2.12 – Зависимость $\Theta_{кр}$ от эквивалентного диаметра $d_{ш}$ шарообразной частицы: 1–3 — линии тренда критической температуры для (1 — алюминия, 2 — меди, 3 — стали)

лообмена с окружающим воздухом с коэффициентом $R_a = 5 \cdot 10^4$ (открытый способ прокладки).

2. Сопоставление расчетов, выполненных методом конечных элементов в указанных программных средах с данными экспериментов показывает соответствие с расчетами на уровне $\pm 6\%$ при кратности тока по отношению к длительно допустимому $K_i = 0,5 \dots 2$ и $\pm 12\%$ при $K_i = 3 \dots 5$. Математические модели можно использовать при установлении причин возникновения локальных перегревов и возможных воспламенений в электрических сетях.

3. Численно установлено, что нагретые металлические частицы малого размера, вылетающие из зоны к. з. являются источниками устойчивого воспламенения хлопка в случае, если температура превышает определенное значение $\Theta_{кр}$ от 754 до 1069 К.

4. Установлено, что параметр $\Theta_{кр}$ не зависит от формы горячей частицы при соотношении ее радиуса и длины от 0,5 до 1,5, и может быть представлен в виде зависимости от эквивалентного диаметра шара d_p .

5. Полученные линии тренда зависимости $\Theta_{кр} = f(d_p)$ для алюминиевых, медных, стальных нагретых частиц расширяют перечень критериев определения факта воспламенения при аварийных режимах в электрических проводках и могут быть использованы для совершенствования методики определения причастности к пожарам аварийных режимов в электротехнических устройствах [59, 66], а также ГОСТ 12.1.004.

РАЗДЕЛ 3

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРИЧАСТНОСТИ КЗ В
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОВОДКЕ 0,38/0,22 КВ К ВОСПЛАМЕНЕНИЮ
ГОРЮЧИХ МАТЕРИАЛОВ

3.1 Исследования процесса воспламенения изоляции электрической
проводки 0,38 кВ и горючего материала вблизи места короткого
замыкания в сети

В ходе исследования предположим, что воспламенение изоляции проводника происходит всякий раз, когда совпадут в пространстве и времени следующие случайные события:

- произошло к. з. в электрической проводке (рисунок 3.1);
- отказал в срабатывании ближайший к месту к. з. защитный коммутационный аппарат (ЗКА).

Если общее время отключения к. з. будет больше 0,2 сек, изоляция в конструкции кабеля загорится и произойдет разбрызгивание металла проводника в месте его повреждения [67].

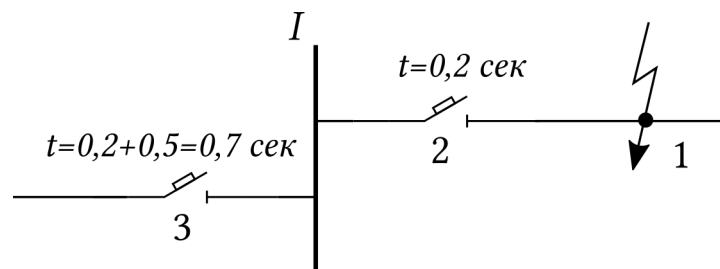


Рисунок 3.1 – Выдержки времени резервируемого и резервирующего аппаратов защиты: 1 — защищаемая сеть; 2 — ЗКА; 3 — ЗКА, который обеспечивает продольное резервирование при к. з. в элементе 1

Изменение состояния отрезка кабельной сети представим в виде регулярного однородного марковского процесса $\xi(t)$ (рисунок 3.2) с двумя дискретными состояниями и непрерывным временем [68]:

- “0” — в защищаемой сети не наблюдается повреждения типа к. з.;
- “1” — в защищаемой кабельной сети произошло к. з.

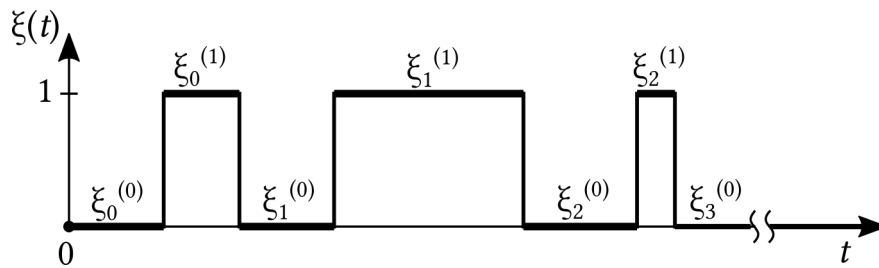


Рисунок 3.2 – Возможная реализация регулярного однородного марковского процесса с двумя дискретными состояниями и непрерывным временем, которая описывает изменение состояния электрической проводки в течение времени t .

Величины λ_1 и μ_1 являются параметрами процесса $\xi(t)$:

$$\lambda_1 = \frac{1}{\bar{d}_1}; \quad (3.1)$$

$$\mu_1 = \frac{1}{d_1}, \quad (3.2)$$

где λ_1 — параметр потока появления *к. з.* в подконтрольных узлах нагрузки; \bar{d}_1 — средний интервал времени между появлениями *к. з.* в проводнике; μ_1 — параметр потока существования *к. з.* при повреждении элемента сети; d_1 — средняя длительность существования тока *к. з.* (среднее время аварийного отключения системы автоматического отключения ЗКА);

Аналогичным регулярным однородным марковским процессом $\eta(t)$ с дискретным числом состояний и непрерывным временем представим изменение состояния защитного коммутационного аппарата.

Обозначим:

- “0” — состояние защиты, когда она находится в работоспособном состоянии;
- “1” — состояние защиты, когда она находится в необнаруженном отказавшем состоянии.

Величины λ_2 и μ_2 — параметры процесса $\eta(t)$ (рисунок 3.3):

$$\lambda_2 = \frac{1}{\bar{d}_2}; \quad (3.3)$$

$$\mu_2 = \frac{1}{\bar{d}_2}, \quad (3.4)$$

где λ_2 — параметр потока повреждений автоматической системы отключения защитного коммутационного аппарата; \bar{d}_2 — среднее время безотказной работы системы отключения автоматического выключателя; μ_2 — параметр потока обнаружения и восстановления поврежденной автоматической системы отключения защитного коммутационного аппарата; d_2 — среднее время нахождения системы отключения автоматического выключателя в необнаруженном отказавшем состоянии.

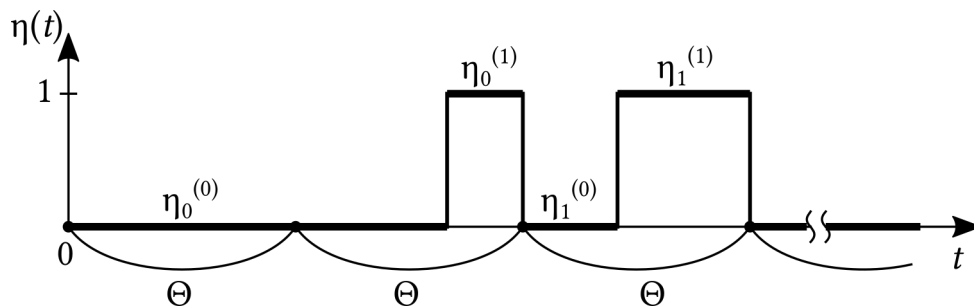


Рисунок 3.3 – Возможная реализация регулярного однородного марковского процесса, который описывает изменение состояния системы отключения автоматического выключателя.

Введем интервал времени между диагностикой системы отключения защитного коммутационного аппарата Θ_F (рисунок 3.3).

Если известно среднее время безотказной работы системы отключения защитного коммутационного аппарата \bar{d}_2 и задан интервал времени между его диагностикой Θ_F , то среднее время нахождения системы отключения ЗКА в необнаруженном отказавшем состоянии можно определить используя рисунок 3.3 следующим образом [69]:

$$d_2 = \Theta_F - \bar{d}_2 = \Theta_F - \int_0^{\Theta_F} p(t) dt = \Theta_F - \int_0^{\Theta_F} e^{-\lambda_2 t} dt = \Theta_F - \frac{1}{\lambda_2} (1 - e^{-\lambda_2 \Theta_F}). \quad (3.5)$$

где $p(t)$ — вероятность безотказной работы системы защиты в течение времени t .

В случае, если $\lambda_2 \cdot \Theta < 0,1$, при разложении экспоненты в ряд Макло-

рена, получим:

$$d_2 \approx \Theta_F - \frac{1}{\lambda} \left[1 - \left(1 - \lambda \cdot \Theta_F + \frac{\lambda^2 \cdot \Theta_F^2}{2} + \dots \right) \right] \approx \Theta - \Theta + \frac{\lambda \cdot \Theta_F^2}{2} = \frac{\lambda \cdot \Theta_F^2}{2}. \quad (3.6)$$

Подставим в формулу (3.6) формулу (3.4), получим:

$$\mu_2 = \frac{1}{\Theta_F - \frac{1}{\lambda_2} [1 - e^{-\lambda_2 \Theta_F}]}; \quad (3.7)$$

$$\mu_2 \approx \frac{2}{\lambda \Theta_F^2}. \quad (3.8)$$

Следует определить:

- вероятность воспламенения изоляции проводника в течение времени t ;
- среднее время τ_1 до первого воспламенения изоляции проводника;
- дисперсию D_1 времени до первого воспламенения;
- вероятность того, что горючий материал, который находится на расстоянии l от источника воспламенится от расплавленных частиц металла, разбрасываемых при дуговом разряде.

Совокупность процессов $\xi(t)$ и $\eta(t)$ рассмотрим как один регулярный однородный марковский процесс с 4 дискретными состояниями и непрерывным временем (рисунок 3.4).

Следовательно система «электрическая дуга–защита» может находиться в одном из четырех состояний:

1. $e_1(0,0)$ — в защищаемой сети не наблюдается к. з.; система отключения автоматического выключателя работоспособна и находится в «ждущем» режиме;
2. $e_2(1,0)$ — в защищаемой сети произошло к. з.; система отключения автоматического выключателя работоспособна и готова отключить поврежденный участок сети;
3. $e_3(0,1)$ — в защищаемой сети не наблюдается к. з.; система отключения автоматического выключателя повреждена и находится в отказавшем состоянии;
4. $e_4(1,1)$ — в защищаемой сети появилось к. з.; система отключения автоматического выключателя находится в отказавшем состоянии.

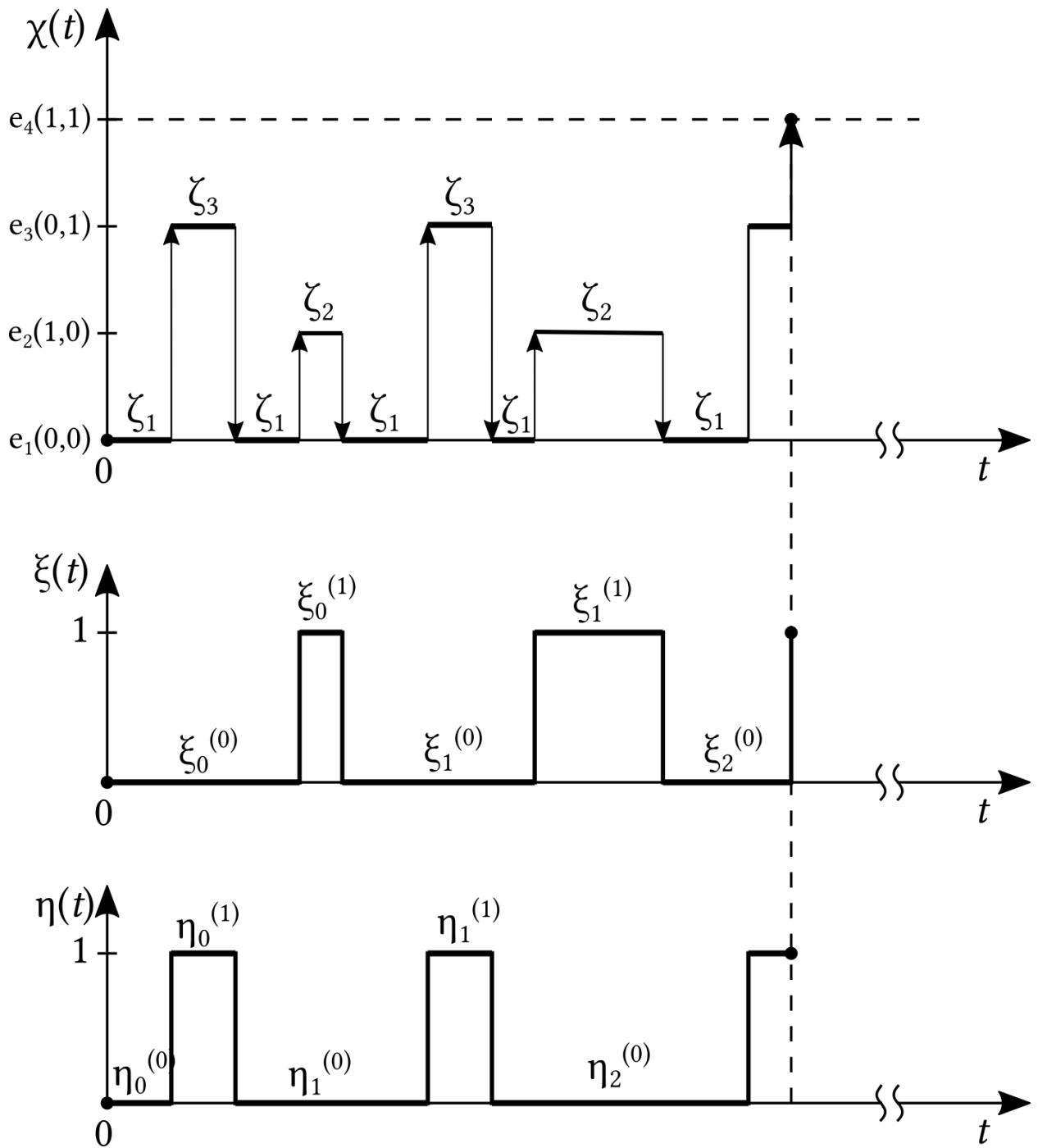


Рисунок 3.4 – Возможная реализация регулярного однородного марковского процесса с четырьмя дискретными состояниями и непрерывным временем, которая описывает поведение системы защиты защищаемой сети

Эта задача будет решена в том случае, если будет построена матрица вероятностей переходов $P(\Delta t)$ и определена функция распределения времени нахождения системы в каждом из возможных состояний $F_{\zeta_i}(t) = 1 - e^{-at}$ [70].

$$P(\Delta t) = \begin{bmatrix} P_{11}(\Delta t) & P_{12}(\Delta t) & P_{13}(\Delta t) & P_{14}(\Delta t) \\ P_{21}(\Delta t) & P_{22}(\Delta t) & P_{23}(\Delta t) & P_{24}(\Delta t) \\ P_{31}(\Delta t) & P_{32}(\Delta t) & P_{33}(\Delta t) & P_{34}(\Delta t) \\ P_{41}(\Delta t) & P_{42}(\Delta t) & P_{43}(\Delta t) & P_{44}(\Delta t) \end{bmatrix}. \quad (3.9)$$

На рисунке 3.4 приведена возможная реализация регулярного однородного марковского процесса, объясняющая процесс воспламенения изоляции проводника.

Определим вероятность изменения состояния защищаемой сети за время Δt . За время Δt сеть может находиться в состоянии «0», либо перейти в состояние «1». Если сеть находится в состоянии «1», то за время Δt она может остаться в состоянии «1», либо перейти в состояние «0». Граф вероятности переходов системы «источник–защита» за время Δt можно представить в виде (рисунок 3.5).

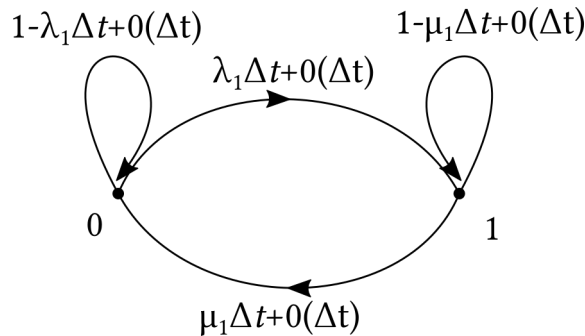


Рисунок 3.5 – Граф вероятностей переходов защищаемой сети за время Δt

Вероятности переходов за время Δt определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} p_1(0 \xrightarrow{\Delta t} 0) &= e^{-\lambda_1 \Delta t} = 1 - \lambda_1 \Delta t + o(\Delta t), \\ p_1(0 \xrightarrow{\Delta t} 1) &= 1 - e^{-\lambda_1 \Delta t} = \lambda_1 \Delta t + o(\Delta t), \\ p_1(1 \xrightarrow{\Delta t} 0) &= 1 - e^{-\mu_1 \Delta t} = \mu_1 \Delta t + o(\Delta t), \\ p_1(1 \xrightarrow{\Delta t} 1) &= e^{-\mu_1 \Delta t} = 1 - \mu_1 \Delta t + o(\Delta t). \end{aligned} \quad (3.10)$$

Определим изменения состояния системы отключения защитного коммутационного аппарата за время Δt . Защита за время Δt может остаться в состоянии «0» или перейти в «1», либо остаться в состоянии «1», или из «1» перейти в «0».

Граф вероятности переходов защиты за время Δt представим в виде (рисунок 3.6).

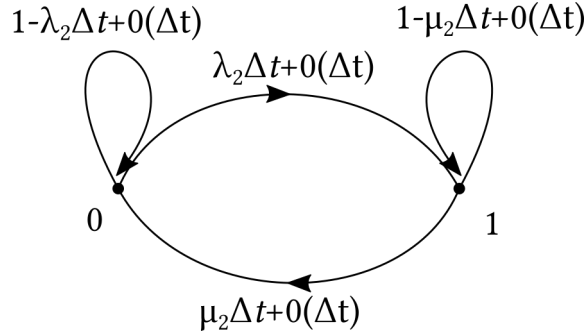


Рисунок 3.6 – Граф вероятностей переходов системы отключения защитного коммутационного аппарата за время Δt

Аналогичным образом находим:

$$\begin{aligned}
 p_2(0 \xrightarrow{\Delta t} 0) &= e^{-\lambda_2 \Delta t} = 1 - \lambda_2 \Delta t + o(\Delta t), \\
 p_2(0 \xrightarrow{\Delta t} 1) &= 1 - e^{-\lambda_2 \Delta t} = \lambda_2 \Delta t + o(\Delta t), \\
 p_2(1 \xrightarrow{\Delta t} 0) &= 1 - e^{-\mu_2 \Delta t} = \mu_2 \Delta t + o(\Delta t), \\
 p_2(1 \xrightarrow{\Delta t} 1) &= e^{-\mu_2 \Delta t} = 1 - \mu_2 \Delta t + o(\Delta t).
 \end{aligned} \tag{3.11}$$

Используя общие формулы для определения вероятностей переходов системы за время Δt находим элементы матрицы переходов $P_{ij}(\Delta t)$ [70].

$$\begin{aligned}
 P_{ij}(\Delta t) &= p[\lambda(t + \Delta t) = e_j / \lambda(t) = e_i] = p\left\{e_i \xrightarrow{\Delta t} e_j\right\} = a_{ij} \Delta t + o(\Delta t), \\
 P_{ii}(\Delta t) &= p[\lambda(t + \Delta t) = e_i / \lambda(t) = e_i] = p\left\{e_i \xrightarrow{\Delta t} e_i\right\} = 1 - a_{ii} \Delta t + o(\Delta t).
 \end{aligned} \tag{3.12}$$

Получим:

$$\begin{aligned}
 P_{11}(\Delta t) &= p[\lambda(t + \Delta t) = e_1(0,0) / \lambda(t) = e_1(0,0)] = p\left\{e_1(0,0) \xrightarrow{\Delta t} e_1(0,0)\right\} = \\
 &= p_1(0 \xrightarrow{\Delta t} 0) \cdot p_2(0 \xrightarrow{\Delta t} 0) = e^{-\lambda_1 \Delta t} \cdot e^{-\lambda_2 \Delta t} = e^{-(\lambda_1 + \lambda_2) \Delta t} = \\
 &= 1 - (\lambda_1 + \lambda_2) \Delta t + o(\Delta t);
 \end{aligned} \tag{3.13}$$

$$\begin{aligned}
P_{12}(\Delta t) &= p[\lambda(t + \Delta t) = e_2(1,0)/\lambda(t) = e_1(0,0)] = p\left\{e_1(0,0) \xrightarrow{\Delta t} e_2(1,0)\right\} = \\
&= p_1(0 \xrightarrow{\Delta t} 1) \cdot p_2(0 \xrightarrow{\Delta t} 0) = [\lambda_1 \Delta t + 0(\Delta t)] \cdot [1 - \lambda_2 \Delta t + 0(\Delta t)] = \\
&= \lambda_1 \Delta t + \lambda_1 \lambda_2 \Delta t^2 + \lambda_1 \cdot 0(\Delta t) + 0(\Delta t) - \lambda_2 \Delta t \cdot 0(\Delta t) + 0^2(\Delta t) = \\
&= \lambda_1 \Delta t + 0(\Delta t). \tag{3.14}
\end{aligned}$$

Аналогичным образом определяются и все остальные вероятности переходов:

$$\begin{aligned}
P_{13}(\Delta t) &= p\left\{e_1(0,0) \xrightarrow{\Delta t} e_3(0,1)\right\} = p_1(0 \xrightarrow{\Delta t} 0) \cdot p_2(0 \xrightarrow{\Delta t} 1) = \\
&= [1 - \lambda_1 \Delta t + 0(\Delta t)] \cdot [\lambda_2 \Delta t + 0(\Delta t)] = \lambda_2 \Delta t + 0(\Delta t); \tag{3.15}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
P_{14}(\Delta t) &= p\left\{e_1(0,0) \xrightarrow{\Delta t} e_4(1,1)\right\} = p_1(0 \xrightarrow{\Delta t} 1) \cdot p_2(0 \xrightarrow{\Delta t} 1) = \\
&= [\lambda_1 \Delta t + 0(\Delta t)] \cdot [\lambda_2 \Delta t + 0(\Delta t)] = \\
&= \lambda_1 \lambda_2 \Delta t^2 + \lambda_1 \Delta t \cdot 0(\Delta t) - \lambda_2 \Delta t \cdot 0(\Delta t) + 0^2(\Delta t) = \tag{3.16} \\
&= 0(\Delta t); \tag{3.17}
\end{aligned}$$

$$P_{21}(\Delta t) = p\left\{e_2(1,0) \xrightarrow{\Delta t} e_1(0,0)\right\} = \mu_1 \Delta t + 0(\Delta t); \tag{3.18}$$

$$P_{22}(\Delta t) = p\left\{e_2(1,0) \xrightarrow{\Delta t} e_2(1,0)\right\} = 1 - (\mu_1 + \lambda_2) \Delta t + 0(\Delta t); \tag{3.19}$$

$$P_{23}(\Delta t) = p\left\{e_2(1,0) \xrightarrow{\Delta t} e_3(0,1)\right\} = 0(\Delta t); \tag{3.20}$$

$$P_{24}(\Delta t) = p\left\{e_2(1,0) \xrightarrow{\Delta t} e_4(1,1)\right\} = \lambda_2 \Delta t + 0(\Delta t); \tag{3.21}$$

$$P_{31}(\Delta t) = p \left\{ e_3(0,1) \xrightarrow{\Delta t} e_1(0,0) \right\} = \mu_2 \Delta t + o(\Delta t); \quad (3.22)$$

$$P_{32}(\Delta t) = p \left\{ e_3(0,1) \xrightarrow{\Delta t} e_2(1,0) \right\} = o(\Delta t); \quad (3.23)$$

$$P_{33}(\Delta t) = p \left\{ e_3(0,1) \xrightarrow{\Delta t} e_3(0,1) \right\} = 1 - (\lambda_1 + \mu_2) \Delta t + o(\Delta t); \quad (3.24)$$

$$P_{34}(\Delta t) = p \left\{ e_3(0,1) \xrightarrow{\Delta t} e_4(1,1) \right\} = \lambda_1 \Delta t + o(\Delta t); \quad (3.25)$$

$$P_{41}(\Delta t) = p \left\{ e_4(1,1) \xrightarrow{\Delta t} e_1(0,0) \right\} = 0; \quad (3.26)$$

$$P_{42}(\Delta t) = p \left\{ e_4(1,1) \xrightarrow{\Delta t} e_2(1,0) \right\} = 0; \quad (3.27)$$

$$P_{43}(\Delta t) = p \left\{ e_4(1,1) \xrightarrow{\Delta t} e_3(0,1) \right\} = 0; \quad (3.28)$$

$$P_{44}(\Delta t) = p \left\{ e_4(1,1) \xrightarrow{\Delta t} e_4(1,1) \right\} = 1. \quad (3.29)$$

В том случае, если состояние $e_4(1,1)$ будет не поглощающим, а возвратным, тогда:

$$P_{41}(\Delta t) = p \left\{ e_4(1,1) \xrightarrow{\Delta t} e_1(0,0) \right\} = o(\Delta t); \quad (3.30)$$

$$P_{42}(\Delta t) = p \left\{ e_4(1,1) \xrightarrow{\Delta t} e_2(1,0) \right\} = \mu_2 \Delta t + o(\Delta t); \quad (3.31)$$

$$P_{43}(\Delta t) = p \left\{ e_4(1,1) \xrightarrow{\Delta t} e_3(0,1) \right\} = \mu_1 \Delta t + o(\Delta t); \quad (3.32)$$

$$P_{44}(\Delta t) = p \left\{ e_4(1,1) \xrightarrow{\Delta t} e_4(1,1) \right\} = 1 - (\mu_1 + \mu_2) \Delta t + o(\Delta t), \quad (3.33)$$

где $o(\Delta t)$ означает, что вероятность двух переходов системы «электрическая дуга–защита» за время Δt есть величина бесконечно малая.

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{o(\Delta t)}{\Delta t} \rightarrow 0 \quad (3.34)$$

Используя полученные вероятности переходов $P_{ij}(\Delta t)$, для случая когда состояние $e_4(1,1)$ поглощающее, матрицу вероятностей переходов представим в виде (3.35):

$$P(\Delta t) = \begin{pmatrix} 1 - (\lambda_1 + \lambda_2) \Delta t + o(\Delta t) & \lambda_1 \Delta t + o(\Delta t) & & & \\ \mu_1 \Delta t + o(\Delta t) & 1 - (\mu_1 + \lambda_2) \Delta t + o(\Delta t) & & & \\ \mu_2 \Delta t + o(\Delta t) & & 0(\Delta t) & & \\ 0 & & & 0 & \\ & \lambda_2 \Delta t + o(\Delta t) & & 0(\Delta t) & \\ & 0(\Delta t) & & \lambda_2 \Delta t + o(\Delta t) & \\ \dots & 1 - (\lambda_1 + \mu_2) \Delta t + o(\Delta t) & & \lambda_1 \Delta t + o(\Delta t) & \\ & 0 & & & 1 \end{pmatrix}. \quad (3.35)$$

Используя матрицу вероятностей переходов (3.35), граф вероятностей переходов системы («электрическая дуга–защита») за время Δt представлен на рисунке (3.7).

Матрица $Q(\Delta t)$ получается из матрицы $P(\Delta t)$ путем исключения поглощающего состояния (строки, состоящей из элементов $0, 0, \dots, 1$ и соответ-

ствующего столбца):

$$Q(\Delta t) = \begin{pmatrix} 1 - (\lambda_1 + \lambda_2)\Delta t + o(\Delta t) & \lambda_1 \Delta t + o(\Delta t) & & \\ \mu_1 \Delta t + o(\Delta t) & 1 - (\mu_1 + \lambda_2)\Delta t + o(\Delta t) & & \\ \mu_2 \Delta t + o(\Delta t) & & 0(\Delta t) & \\ \lambda_2 \Delta t + o(\Delta t) & & & \\ \dots & & & \\ 0(\Delta t) & & & \\ 1 - (\lambda_1 + \mu_2)\Delta t + o(\Delta t) & & & \end{pmatrix} \quad (3.36)$$

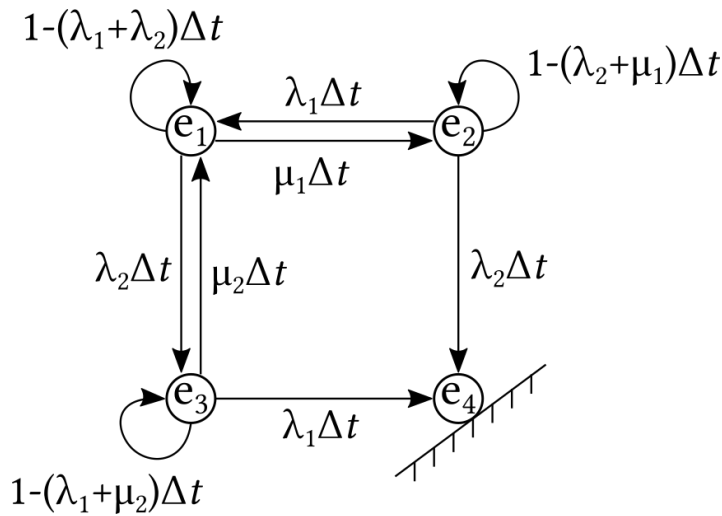


Рисунок 3.7 – Граф вероятности переходов системы «защита–защищаемый элемент» за время Δt

Используя матрицу $Q(\Delta t)$ определим матрицу интенсивности переходов между событиями A [71]:

$$A = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{Q(\Delta t) - I}{\Delta t}. \quad (3.37)$$

где I — единичная матрица.

Подставим матрицу (3.36) в (3.37), получим:

$$A = \begin{pmatrix} -(\lambda_1 + \lambda_2) & \lambda_1 & \lambda_2 \\ \mu_1 & -(\mu_1 + \lambda_2) & 0 \\ \mu_2 & 0 & -(\lambda_1 + \mu_2) \end{pmatrix}. \quad (3.38)$$

Фундаментальную матрицу переходов N находим следующим образом:

$$N = \left\{ \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{I - Q(\Delta t)}{\Delta t} \right\}^{-1}, \quad (3.39)$$

где I — единичная матрица.

Подставив матрицу (3.36) в (3.39) получим:

$$N = \left(\begin{array}{ccc} \lambda_1 + \lambda_2 & -\lambda_1 & -\lambda_2 \\ -\mu_1 & \mu_1 + \lambda_2 & 0 \\ -\mu_2 & 0 & \lambda_1 + \mu_2 \end{array} \right)^{-1}. \quad (3.40)$$

Среднее время до воспламенения изоляции в месте появления к. з. найдем из общей системы алгебраических уравнений для поглощающих цепей Маркова [72].

$$\tau = N \cdot \xi, \quad (3.41)$$

где τ — вектор-столбец, который состоит из трех элементов τ_1, τ_2, τ_3 ; ξ — вектор-столбец, все три элемента которого равны 1.

Систему линейных алгебраических уравнений (3.40) с учетом матрицы (3.39) запишем в виде:

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix} = \left(\begin{array}{ccc} \lambda_1 + \lambda_2 & -\lambda_1 & -\lambda_2 \\ -\mu_1 & \mu_1 + \lambda_2 & 0 \\ -\mu_2 & 0 & \lambda_1 + \mu_2 \end{array} \right)^{-1} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (3.42)$$

Из системы уравнений (3.42) находим:

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{\lambda_1 \lambda_2 (\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_1 + \mu_2)} \times \quad (3.43)$$

$$\times \left(\begin{array}{ccc} (\mu_1 + \lambda_2)(\lambda_1 + \mu_2) & \lambda_1(\lambda_1 + \mu_2) & \lambda_2(\mu_1 + \lambda_2) \\ \mu_1(\lambda_1 + \mu_2) & \lambda_1(\lambda_1 + \mu_2 + \lambda_2) & \lambda_2 \mu_1 \\ \mu_2(\mu_1 + \lambda_2) & \lambda_1 \mu_2 & \lambda_2(\lambda_1 + \mu_1 + \lambda_2) \end{array} \right) \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

Из системы уравнений (3.43) находим [73]:

$$\tau_1 = \frac{(\mu_1 + \lambda_2)(\lambda_1 + \mu_2) + \lambda_1(\lambda_1 + \mu_2) + \lambda_2(\lambda_2 + \mu_1)}{\lambda_1 \lambda_2 (\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_1 + \mu_2)}; \quad (3.44)$$

$$\tau_2 = \frac{\mu_1(\lambda_1 + \mu_2) + \lambda_1(\lambda_1 + \mu_2 + \lambda_2) + \lambda_2 \mu_1}{\lambda_1 \lambda_2 (\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_1 + \mu_2)}; \quad (3.45)$$

$$\tau_2 = \frac{\mu_2(\mu_1 + \lambda_2) + \lambda_1 \mu_2 + \lambda_2(\lambda_1 + \mu_1 + \lambda_2)}{\lambda_1 \lambda_2 (\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_1 + \mu_2)}, \quad (3.46)$$

где τ_1 — средний интервал времени до воспламенения изоляции проводника, если в начальный момент времени система («электрическая дуга–защита») находилась в состоянии $e_1(0,0)$; τ_2 — средний интервал времени до воспламенения изоляции проводника, если в начальный момент времени система («электрическая дуга–защита») находилась в состоянии $e_2(1,0)$; τ_3 — средний интервал времени до воспламенения изоляции проводника, если в начальный момент времени система («электрическая дуга–защита») находилась в состоянии $e_3(0,1)$.

Подставим в формулу (3.44) соотношения (3.1)–(3.4). Формула примет вид:

$$\tau_1 = \frac{\left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{\bar{d}_2}\right) \left(\frac{1}{\bar{d}_1} + \frac{1}{d_2}\right) + \frac{1}{\bar{d}_1} \left(\frac{1}{\bar{d}_1} + \frac{1}{d_2}\right) + \frac{1}{\bar{d}_2} \left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{\bar{d}_2}\right)}{\frac{1}{\bar{d}_1} \cdot \frac{1}{\bar{d}_2} \cdot \left(\frac{1}{\bar{d}_1} + \frac{1}{\bar{d}_2} + \frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2}\right)}. \quad (3.47)$$

Получим:

$$\begin{aligned} \tau_1 &= \frac{\frac{(\bar{d}_2 + d_1)}{d_1 \bar{d}_2} \cdot \frac{(d_2 + \bar{d}_1)}{d_1 d_2} + \frac{d_2 + \bar{d}_1}{\bar{d}_1^2 d_2} + \frac{d_1 + \bar{d}_2}{\bar{d}_2^2 d_1}}{\frac{\bar{d}_2 d_1 d_2 + \bar{d}_1 d_1 d_2 + \bar{d}_1 \bar{d}_2 d_2 + \bar{d}_1 \bar{d}_2 d_1}{\bar{d}_1^2 \bar{d}_2^2 d_1 d_2}} = \\ &= \frac{\left[\frac{(\bar{d}_2 + d_1)}{d_1 \bar{d}_2} \cdot \frac{(d_2 + \bar{d}_1)}{d_1 d_2} + \frac{d_2 + \bar{d}_1}{\bar{d}_1^2 d_2} + \frac{d_1 + \bar{d}_2}{\bar{d}_2^2 d_1}\right] \bar{d}_1^2 \bar{d}_2^2 d_1 d_2}{\bar{d}_2 d_1 d_2 + \bar{d}_1 d_1 d_2 + \bar{d}_1 \bar{d}_2 d_2 + \bar{d}_1 \bar{d}_2 d_1} = \\ &= \frac{(\bar{d}_2 + d_1)(d_2 + \bar{d}_1) \bar{d}_1 \bar{d}_2 + \bar{d}_2^2 d_1 (d_2 + \bar{d}_1) + \bar{d}_1^2 d_2 (d_1 + \bar{d}_2)}{\bar{d}_2 d_1 d_2 + \bar{d}_1 d_1 d_2 + \bar{d}_1 \bar{d}_2 d_2 + \bar{d}_1 \bar{d}_2 d_1}. \quad (3.48) \end{aligned}$$

При $d_1 \rightarrow 0$ выражение может быть упрощено:

$$\tau_1 = \frac{\bar{d}_2(d_2 + \bar{d}_1)\bar{d}_1\bar{d}_2 + \bar{d}_1^2 d_2 \bar{d}_2}{\bar{d}_1 \bar{d}_2 d_2} = \frac{\bar{d}_2(d_2 + \bar{d}_1) + \bar{d}_1 d_2}{d_2}. \quad (3.49)$$

Или

$$\tau_1 = \mu_2 \left[\frac{1}{\lambda_2} \left(\frac{1}{\mu_2} + \frac{1}{\lambda_1} \right) + \frac{1}{\lambda_1} \cdot \frac{1}{\mu_2} \right] = \mu_2 \left[\frac{\lambda_1 + \mu_2}{\lambda_1 \lambda_2 \mu_2} + \frac{1}{\lambda_1 \mu_2} \right].$$

$$\tau_1 = \frac{\lambda_1 + \mu_2}{\lambda_1 \lambda_2} + \frac{1}{\lambda_1} = \frac{\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_2}{\lambda_1 \lambda_2}. \quad (3.50)$$

Дисперсию времени до воспламенения изоляции найдем пользуясь общей системой алгебраических уравнений для поглощающих цепей Маркова [72]:

$$D = (2N - I) \cdot \tau - \tau_{sq}, \quad (3.51)$$

где τ_{sq} — матрица–столбец квадратов интервалов времени.

В нашем случае система алгебраических уравнений (3.51) примет вид:

$$\begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \left[2 \cdot \begin{pmatrix} \lambda_1 + \lambda_2 & -\lambda_1 & -\lambda_2 \\ -\mu_1 & \mu_1 + \lambda_2 & 0 \\ -\mu_2 & 0 & \lambda_1 + \mu_2 \end{pmatrix}^{-1} - \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \right] \cdot \begin{pmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \tau_1^2 \\ \tau_2^2 \\ \tau_3^2 \end{pmatrix}. \quad (3.52)$$

Систему уравнений (3.52) запишем в виде:

$$\begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2A_{11}}{\Delta} - 1 & \frac{2A_{21}}{\Delta} & \frac{2A_{31}}{\Delta} \\ \frac{2A_{12}}{\Delta} & \frac{2A_{22}}{\Delta} - 1 & \frac{2A_{32}}{\Delta} \\ \frac{2A_{13}}{\Delta} & \frac{2A_{23}}{\Delta} & \frac{2A_{33}}{\Delta} - 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \tau_1^2 \\ \tau_2^2 \\ \tau_3^2 \end{pmatrix}. \quad (3.53)$$

Из системы уравнений (3.53) находим:

$$D_1 = \left(\frac{2A_{11}}{\Delta} - 1 \right) \tau_1 + \frac{2A_{21}}{\Delta} \tau_2 + \frac{2A_{31}}{\Delta} \tau_3 - \tau_1^2; \quad (3.54)$$

$$D_2 = \frac{2A_{12}}{\Delta} \tau_1 + \left(\frac{2A_{22}}{\Delta} - 1 \right) \tau_2 + \frac{2A_{32}}{\Delta} \tau_3 - \tau_2^2; \quad (3.55)$$

$$D_3 = \frac{2A_{13}}{\Delta}\tau_1 + \frac{2A_{23}}{\Delta}\tau_2 + \left(\frac{2A_{33}}{\Delta} - 1\right)\tau_3 - \tau_3^2. \quad (3.56)$$

Формулы (3.54)–(3.56) перепишем в виде:

$$D_1 = \left(\frac{2A_{11}}{\Delta} - 1 - \tau_1\right)\tau_1 + \frac{2}{\Delta}(A_{21}\tau_2 + A_{31}\tau_3); \quad (3.57)$$

$$D_2 = \left(\frac{2A_{22}}{\Delta} - 1 - \tau_2\right)\tau_2 + \frac{2}{\Delta}(A_{12}\tau_1 + A_{32}\tau_3); \quad (3.58)$$

$$D_3 = \left(\frac{2A_{33}}{\Delta} - 1 - \tau_3\right)\tau_3 + \frac{2}{\Delta}(A_{13}\tau_1 + A_{23}\tau_2). \quad (3.59)$$

Формулы (3.57)–(3.59) представим в виде:

$$D_1 = \left[\frac{2(\mu_1 + \lambda_2)(\lambda_1 + \mu_2)}{\Delta} - 1 - \tau_1\right]\tau_1 + \frac{2}{\Delta}[\lambda_1(\lambda_1 + \mu_2)\tau_2 + \lambda_2(\mu_1 + \lambda_2)\tau_3]; \quad (3.60)$$

$$D_2 = \left[\frac{2\lambda_1(\lambda_1 + \mu_2 + \lambda_2)}{\Delta} - 1 - \tau_2\right]\tau_2 + \frac{2}{\Delta}[\mu_1(\lambda_1 + \mu_2)\tau_1 + \lambda_2\mu_1\tau_3]; \quad (3.61)$$

$$D_3 = \left[\frac{2\lambda_2(\lambda_1 + \mu_1 + \lambda_2)}{\Delta} - 1 - \tau_3\right]\tau_3 + \frac{2}{\Delta}[\mu_2(\mu_1 + \lambda_2)\tau_1 + \lambda_1\mu_2\tau_2], \quad (3.62)$$

где $\Delta = \lambda_1\lambda_2(\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_1 + \mu_2)$.

В том случае, если выполняется условие (3.63) (свойство экспоненциального распределения случайной величины),

$$\tau_1 \approx \sqrt{D_1} \quad (3.63)$$

тогда вероятность воспламенения изоляции проводника в течение времени t при продолжительном к. з. определим по формуле:

$$\tilde{Q}_1(t) = 1 - e^{-\frac{1}{\tau_1}t}. \quad (3.64)$$

В том случае, если условие (3.63) не соблюдается, тогда вероятность воспламенения изоляции проводника в течение времени t при продолжительном к. з. определим по формуле:

$$Q_1(t) = 1 - [P_1(t) + P_2(t) + P_3(t)], \quad (3.65)$$

где $P_1(t)$, $P_2(t)$, $P_3(t)$ — вероятности нахождения системы «электрическая дуга–защита» в течение времени t в состояниях $e_1(0,0)$, $e_2(1,0)$ и $e_3(0,1)$ соответственно.

Вероятности $P_1(t)$, $P_2(t)$, $P_3(t)$ в нашем случае находятся из общей системы линейных дифференциальных уравнений для марковских процессов [72].

$$P'(t) = P(t) \cdot A \quad (3.66)$$

Подставив в систему линейных дифференциальных уравнений (3.66) матрицу (3.38), получим:

$$\begin{bmatrix} P_1'(t) \\ P_2'(t) \\ P_3'(t) \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} P_1(t) \\ P_2(t) \\ P_3(t) \end{bmatrix}^T \cdot \begin{pmatrix} -(\lambda_1 + \lambda_2) & \lambda_1 & \lambda_2 \\ \mu_1 & -(\mu_1 + \lambda_2) & 0 \\ \mu_2 & 0 & -(\lambda_1 + \mu_2) \end{pmatrix} \quad (3.67)$$

Система уравнений (3.67) решается при начальных условиях: $P_1(0) = 1$; $P_2(0) = 0$; $P_3(0) = 0$.

Систему уравнений (3.67) с помощью преобразования Лапласа приводим к алгебраическому уравнению вида [71]:

$$P(s) = P(0) [s \cdot I - A]^{-1}, \quad (3.68)$$

где $P(s) = [P_1(s), P_2(s), P_3(s)]$ — вектор–строка; $P(0) = [1,0,0]$ — вектор–строка начальных условий.

Подставив в систему уравнений (3.68) матрицу (3.38) получим:

$$\begin{bmatrix} P_1(s) \\ P_2(s) \\ P_3(s) \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}^T \cdot \begin{pmatrix} s + \lambda_1 + \lambda_2 & -\lambda_1 & -\lambda_2 \\ -\mu_1 & s + \mu_1 + \lambda_2 & 0 \\ -\mu_2 & 0 & s + \lambda_1 + \mu_2 \end{pmatrix}^{-1}. \quad (3.69)$$

Систему уравнений (3.69) запишем в виде:

$$\begin{bmatrix} P_1(s) \\ P_2(s) \\ P_3(s) \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}^T \cdot \begin{pmatrix} \frac{\Delta_{11}}{\Delta} & \frac{\Delta_{21}}{\Delta} & \frac{\Delta_{31}}{\Delta} \\ \frac{\Delta_{12}}{\Delta} & \frac{\Delta_{22}}{\Delta} & \frac{\Delta_{23}}{\Delta} \\ \frac{\Delta_{31}}{\Delta} & \frac{\Delta_{32}}{\Delta} & \frac{\Delta_{33}}{\Delta} \end{pmatrix}. \quad (3.70)$$

Из системы уравнений (3.70) находим:

$$P_1(s) = \frac{\Delta_{11}}{\Delta}, \quad (3.71)$$

$$P_2(s) = \frac{\Delta_{21}}{\Delta}, \quad (3.72)$$

$$P_3(s) = \frac{\Delta_{31}}{\Delta}. \quad (3.73)$$

Находим миноры Δ_{11} , Δ_{21} , Δ_{31} и определитель Δ_1 матрицы, которая входит в систему:

$$\Delta_{11} = \begin{vmatrix} s + \mu_1 + \lambda_2 & 0 \\ 0 & s + \lambda_1 + \mu_2 \end{vmatrix} = (s + \mu_1 + \lambda_2) \cdot (s + \lambda_1 + \mu_2), \quad (3.74)$$

$$\Delta_{21} = - \begin{vmatrix} -\lambda_1 & -\lambda_2 \\ 0 & s + \lambda_1 + \mu_2 \end{vmatrix} = \lambda_1(s + \lambda_1 + \mu_2), \quad (3.75)$$

$$\Delta_{31} = \begin{vmatrix} -\lambda_1 & -\lambda_2 \\ s + \mu_1 + \lambda_2 & 0 \end{vmatrix} = \lambda_2(s + \mu_1 + \lambda_2), \quad (3.76)$$

$$\Delta = \begin{vmatrix} -(s + \lambda_1 + \lambda_2) & \lambda_1 & \lambda_2 \\ \mu_1 & -(s + \mu_1 + \lambda_2) & 0 \\ \mu_2 & 0 & -(s + \lambda_1 + \mu_2) \end{vmatrix} =$$

$$= s^3 + s^2(2\lambda_1 + 2\lambda_2 + \mu_1 + \mu_2) +$$

$$+ s[\lambda_1\lambda_2 + (\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_2)(\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_1)] + \quad (3.77)$$

$$+ \lambda_1\lambda_2(\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_1 + \mu_2). \quad (3.78)$$

Определим коэффициенты кубического уравнения $\Delta = s^3 + as^2 + bs + c = 0$:

$$a = 2\lambda_1 + 2\lambda_2 + \mu_1 + \mu_2;$$

$$b = \lambda_1\lambda_2 + (\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_2)(\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_1);$$

$$c = \lambda_1\lambda_2(\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_1 + \mu_2).$$

Подставляем полученные значения Δ_{11} , Δ_{12} , Δ_{13} и Δ в формулы (3.71)–(3.73):

$$P_1(s) = \frac{(s + \lambda_1 + \mu_2) \cdot (s + \mu_1 + \mu_2)}{s^3 + a \cdot s^2 + b \cdot s + c}; \quad (3.79)$$

$$P_2(s) = \frac{\lambda_1 \cdot (s + \lambda_1 + \mu_2)}{s^3 + a \cdot s^2 + b \cdot s + c}; \quad (3.80)$$

$$P_3(s) = \frac{\lambda_2 \cdot (s + \lambda_2 + \mu_1)}{s^3 + a \cdot s^2 + b \cdot s + c}. \quad (3.81)$$

Подставим в формулу (3.65) значения $P_1(s)$, $P_2(s)$ и $P_3(s)$, полученные с помощью формул (3.79)–(3.81), тогда $Q_1(s)$ примет вид:

$$Q_1(s) = 1 - \frac{(s + \lambda_1 + \mu_2)(s + \lambda_2 + \mu_1) + \lambda_1(s + \lambda_1 + \mu_2) + \lambda_2(s + \lambda_2 + \mu_1)}{s^3 + as^2 + bs + c}. \quad (3.82)$$

Формулу (3.82) представим в виде:

$$Q_1(s) = 1 - \frac{s^2 + as + c_1}{s^3 + as^2 + bs + c}, \quad (3.83)$$

где $c_1 = \lambda_1(\lambda_1 + \mu_2) + \lambda_2(\lambda_2 + \mu_1) + (\lambda_1 + \mu_2)(\lambda_2 + \mu_1)$.

Вероятность того, что в течение времени t произойдет воспламенение изоляции проводника при появлении продолжительного к. з.:

$$\begin{aligned} Q_1(t) &= 1 - \mathcal{L}^{-1} \left\{ \frac{s^2 + as + c_1}{s^3 + as^2 + bs + c} \right\} = \\ &= 1 - \mathcal{L}^{-1} \{R(s)\} = 1 - \mathcal{L}^{-1} \left\{ \frac{G(s)}{Z(s)} \right\}, \end{aligned} \quad (3.84)$$

где $G(s) = s^2 + as + c_1$; $Z(s) = s^3 + as^2 + bs + c$.

Для получения оригинала функции $R(t)$ воспользуемся обратным преобразованием Лапласа функции $R(s)$ [71]:

$$R(t) = \mathcal{L}^{-1} \{R(s)\} = \sum_{k=1}^n \frac{G(s_k)}{Z'(s_k)} \cdot e^{s_k \cdot t}, \quad (3.85)$$

где s_k — корни алгебраического уравнения $Z(s) = 0$.

Используя формулы (3.83) и (3.84) получим:

$$Q_1(t) = 1 - \left[\frac{G(s_1)}{Z'(s_1)} \cdot e^{-s_1 t} + \frac{G(s_2)}{Z'(s_2)} \cdot e^{-s_2 t} + \frac{G(s_3)}{Z'(s_3)} \cdot e^{-s_3 t} \right]. \quad (3.86)$$

Корни s_1, s_2, s_3 кубического уравнения находим, используя [].

Из формулы (3.84) находим:

$$G(s_1) = s_1^2 + as_1 + c_1; \quad (3.87)$$

$$G(s_2) = s_2^2 + as_2 + c_1; \quad (3.88)$$

$$G(s_3) = s_3^2 + as_3 + c_1; \quad (3.89)$$

$$Z'(s) = \frac{d}{ds}(s^3 + as^2 + bs + c) = 3s^2 + 2as + b;$$

$$Z'(s_1) = 3s_1^2 + 2as_1 + b; \quad (3.90)$$

$$Z'(s_2) = 3s_2^2 + 2as_2 + b; \quad (3.91)$$

$$Z'(s_3) = 3s_3^2 + 2as_3 + b. \quad (3.92)$$

Формулу (3.86) представим в виде [73]:

$$Q_1(t) = 1 - \left[\frac{s_1^2 + as_1 + c_1}{3s_1^2 + 2as_1 + b} \cdot e^{-s_1 t} + \frac{s_2^2 + as_2 + c_1}{3s_2^2 + 2as_2 + b} \cdot e^{-s_2 t} + \right. \\ \left. + \frac{s_3^2 + as_3 + c_1}{3s_3^2 + 2as_3 + b} \cdot e^{-s_3 t} \right]. \quad (3.93)$$

где $a = 2\lambda_1 + 2\lambda_2 + \mu_1 + \mu_2$, $b = \lambda_1\lambda_2 + (\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_2)(\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_1)$,
 $c = \lambda_1\lambda_2(\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_1 + \mu_2)$, $c_1 = \lambda_1(\lambda_1 + \mu_2) + \lambda_2(\lambda_2 + \mu_1) + (\lambda_1 + \mu_2)(\lambda_2 + \mu_1)$.

Параметры процессов: $\xi(t)$ и $\eta(t)$ находятся следующим образом:

$$\lambda_1 = \frac{n_1}{N_1 t_1} = \frac{1}{\bar{d}_1}, \quad (3.94)$$

$$\mu_1 = \frac{1}{d_1}, \quad (3.95)$$

$$\lambda_2 = \frac{n_1}{N_2 t_2} = \frac{1}{\bar{d}_2}, \quad (3.96)$$

$$\mu_2 = \frac{1}{\Theta_F - \frac{1}{\lambda_2} (1 - e^{-\lambda_2 \Theta_F^2})}, \quad (3.97)$$

где n_1 — число зафиксированных к. з., произошедших в узле нагрузки электрифицированного помещения за время наблюдения; N_1 — число узлов нагрузки взятых под наблюдение; t_1 — время наблюдения за состоянием узла нагрузки; n_2 — число выявленных повреждений в системе отключения защитного коммутационного аппарата в результате диагностических проверок за время наблюдения; N_2 — число автоматических защитных систем, которые находились под наблюдением; t_2 — время наблюдения за состоянием автоматического выключателя.

3.2 Определение вероятностных характеристик опасности раскаленных частиц токопроводящих жил при коротких замыканиях в электрических проводках

Недостаток методики, описанной в п. 1.2.1 состоит в том, что она не учитывает, что при взрывообразном разрушении жидкой перемычки проводникового металла в зоне к. з. образуется ударная волна, а дуговой разряд вызывает газодинамический удар, который приводит к ускорению частиц металла.

Следовательно, расчетное время $\tau_{\text{пол}}$ и средняя скорость v_c полета искры должна вычисляться с учетом следующих факторов [66, 74]:

- размер частиц (диаметр) d_p (0,1 ÷ 3 мм для алюминия);
- $v_{\text{и}}$ — начальная скорость вылета капли (0,5 ÷ 10 м/с для Al);
- δ — угол, под которым вылетает капля металла (случайная равновероятная величина $\delta = 2\pi \cdot Z_c$, Z_c — случайное число).

В [25] задача в данной постановке решена упрощенно. Так, время полета определялось без учета силы трения, оказываемой воздухом:

$$\tau_{\text{пол}} = \frac{v_{\text{и}} \cdot \sin \delta}{g} + \sqrt{\left(\frac{v_{\text{и}} \cdot \sin \delta}{g}\right)^2 + \frac{2H}{g}}, \quad (3.98)$$

где g — ускорение свободного падения, м/с²; H — высота, на которой располагается источник разлета искр, м.

Средняя скорость полета капли по модулю:

$$v_c = \frac{1}{\tau_{\text{пол}}} \int_0^{\tau_{\text{пол}}} \left(\sqrt{(v_{\text{и}} \cdot \cos \delta)^2 + (v_{\text{и}} \cdot \sin \delta - g\tau)^2} \right) d\tau. \quad (3.99)$$

Дальность разлета капли металла:

$$L = v_{\text{и}} \cos \delta \cdot \left[\frac{v_{\text{и}} \cdot \sin \delta}{g} + \sqrt{\left(\frac{v_{\text{и}} \cdot \sin \delta}{g}\right)^2 + \frac{2H}{g}} \right]. \quad (3.100)$$

Формулы (3.98)–(3.100) дают больше информации о возможности попадания капли металла в очаг пожара, но все равно не в полной мере отражают главные факторы, влияющие на методику определения безопасной зоны удаления горючих материалов от ЭП и причастности к пожарам частиц металлов

при к. з.

Для создания более совершенной методики определения опасности образования электрических искр при коротком замыкании ЭП, электросварке и при плавлении электродов электрических ламп накаливания общего назначения принимаем допущения:

– размеры частиц распределены в соответствии с экспериментально определенной функцией вида (для алюминия — рисунок 3.8) [5, 75]:

$$D_f(d_p) = 12,8 \cdot d_p^{0,8} \cdot \exp(-3,8 \cdot d_p^{0,9}); \quad (3.101)$$

– начальные скорости вылета капли металла распределены в соответствии с экспериментально определенной функцией вида (для алюминия — рисунок 3.8):

$$V_f(v_{ин}) = 0,2289 \cdot v_{ин}^2 \cdot \exp(-0,728 \cdot v_{ин}^{1,05}); \quad (3.102)$$

– в качестве угла вылета частицы δ принимаем равномерно распределенное случайное число в интервале $[-\frac{\pi}{2}; \frac{\pi}{2}]$;

– при каждом к. з. образуется $N_{ч}$ частиц (принимаем в соответствии с таблицей 3.1), а число опытов к. з. принимаем равным 100 для усреднения результатов;

– расчет параметров частиц металла при разлете проводится, исходя из допущения, что частица в полете принимает форму шара;

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

$$\begin{cases} m \frac{dv_x}{d\tau} = -(\alpha_1 \cdot v + \beta_1 \cdot v^2) \frac{v_x}{v}; \\ m \frac{dv_y}{d\tau} = -mg - (\alpha_1 \cdot v + \beta_1 \cdot v^2) \frac{v_y}{v}, \end{cases} \quad (3.103)$$

где m — масса частицы; v_x, v_y — составляющие скорости по осям координат; α_2, β_2 — коэффициенты сопротивления среды движению частиц:

$$\alpha_1 = 3\pi \cdot \mu \cdot d_p, \quad (3.104)$$

$$\beta_1 = \frac{C_x \cdot \pi \cdot d_p^2 \cdot \rho}{8}, \quad (3.105)$$

где $C_x = 0,47$ — коэффициент сопротивления формы для шарообразного тела [76]; $\mu = 1,85 \cdot 10^{-5}$ — коэффициент динамической вязкости воздуха при 25°C , $\text{Н}\cdot\text{с}/\text{м}^2$; $\rho = 1,184$ — плотность воздуха при 25°C , $\text{кг}/\text{м}^3$.

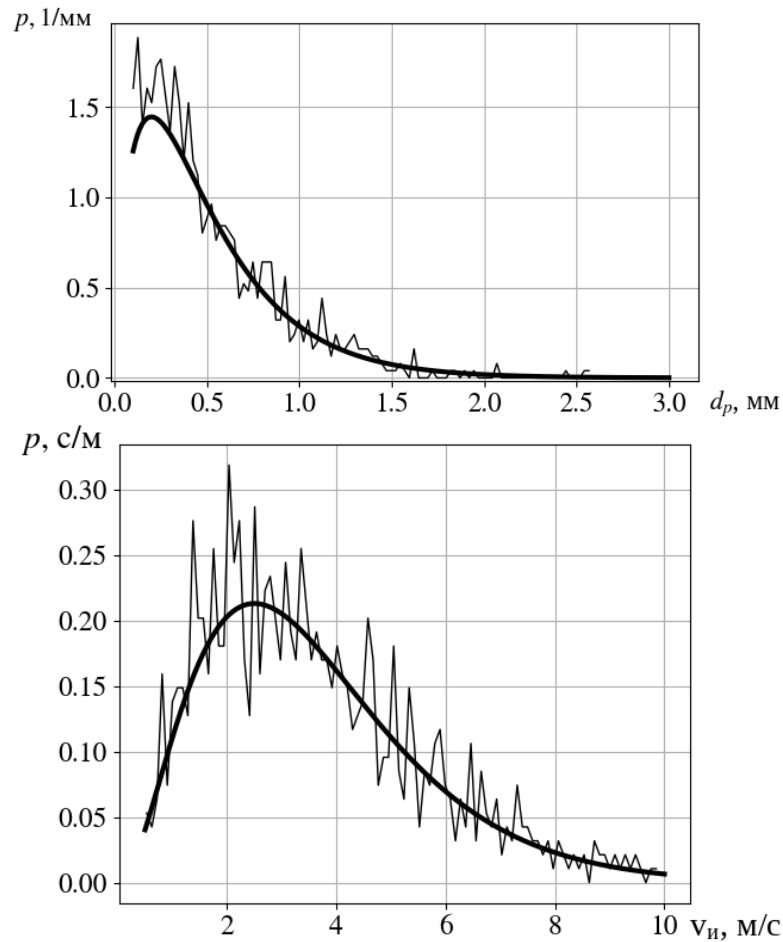


Рисунок 3.8 – Кривые плотности распределения вероятностей для диаметра и скорости алюминиевых частиц: жирная линия — плотность вероятности по формулам 3.101 и 3.102, тонкая линия — пример реализации методом Неймана

Из 3.103 получаем:

$$\begin{cases} x'' = -\left(\frac{\alpha_1}{m} \cdot v + \frac{\beta_1}{m} \cdot v^2\right) \frac{v_x}{v} = -\frac{1}{m}(\alpha_1 + \beta_1 \cdot v)v_x; \\ y'' = -g - \left(\frac{\alpha_1}{m}v + \frac{\beta_1}{m}v^2\right) \frac{v_y}{v} = -g - \frac{1}{m}(\alpha_2 + \beta_2 \cdot v)v_y. \end{cases} \quad (3.106)$$

Начальные условия $x(0) = 0$, $y(0) = H$, $x'(0) = v_n \cos \gamma$, $y'(0) = v_n \sin \gamma$.

Положим, что

$$Y = \begin{bmatrix} x \\ v_x \\ y \\ v_y \end{bmatrix}$$

Система уравнений (3.103) примет вид:

$$Y' = \begin{bmatrix} v_x \\ -(k_1 + k_2 v) \cdot Y[2] \\ v_y \\ -(k_1 + k_2 v) \cdot Y[4] \end{bmatrix}, \quad (3.107)$$

где $k_1 = \alpha/m$, $k_2 = \beta/m$.

В качестве критерия опасности воспламенения горючих материалов принимаем зависимость $\Theta_{кр} = f(d_p)$, определенную по результатам моделирования п. 2.2.

Для определения момента времени, при котором координата y обращается в ноль при её убывании используется обработчик событий при решении ОДУ методом Дормана–Принса с помощью функции `ode23` Matlab 2015 [77] или `integrate.ode` из пакета Python SciPy. Пример интегрирования показан на рисунке 3.9.

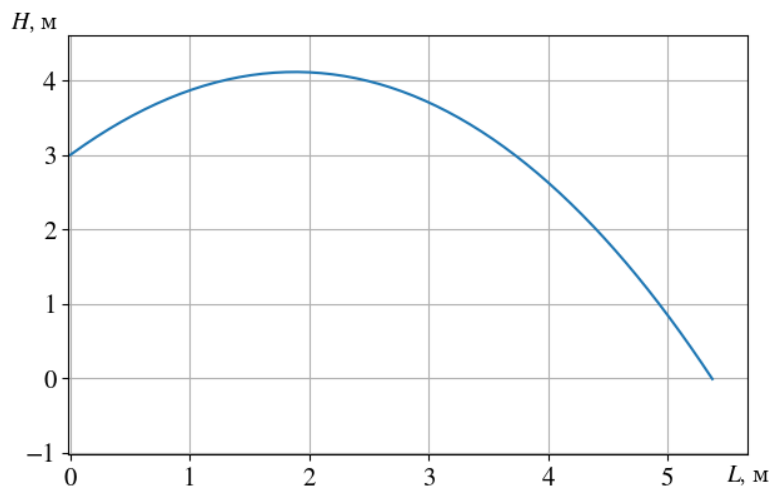


Рисунок 3.9 – Пример траектории полета капли металла

Структурная схема программы для расчета зоны поражения горячих частиц при к. з. приведена на рисунке 3.10.

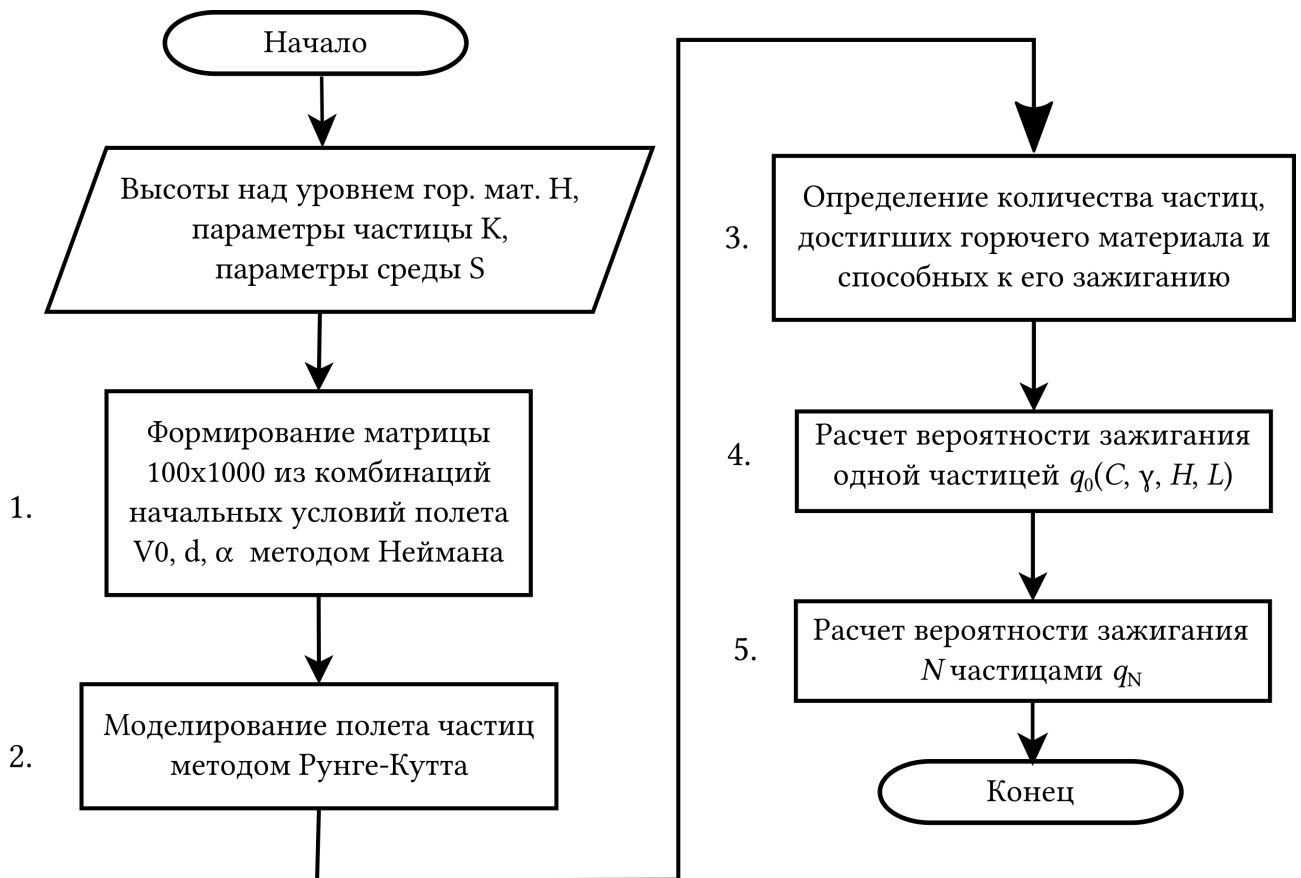


Рисунок 3.10 – Блок-схема расчета вероятности воспламенения горючего материала

Моделирование случайных значений диаметра частицы d_p и её начальной скорости $v_{и}$ проведено с использованием метода Неймана (рисунок 3.11) [78].

Метод Неймана, является методом, позволяющим получить значения случайной величины в соответствии с заданным законом распределения $f(x)$ на интервале $[a, b]$, исходя из равномерно распределенных случайных чисел x_1 и x_2 , распределенных равномерно на интервале $[0, 1]$.

1. Находится максимум теоретической кривой функции распределения f_{max} .
2. Формируются преобразованные пары чисел по формулам:

$$\begin{cases} x_1^* = a + (b - a) \cdot x_1 \\ x_2^* = f_{max} \cdot x_2 \end{cases}, \quad (3.108)$$

3. Проверяется условие $x_2^* \leq f(x_1^*)$. В случае его выполнения x_1^* принимаем в качестве искомой случайной величины. В противном случае возвращаемся к шагу 1.

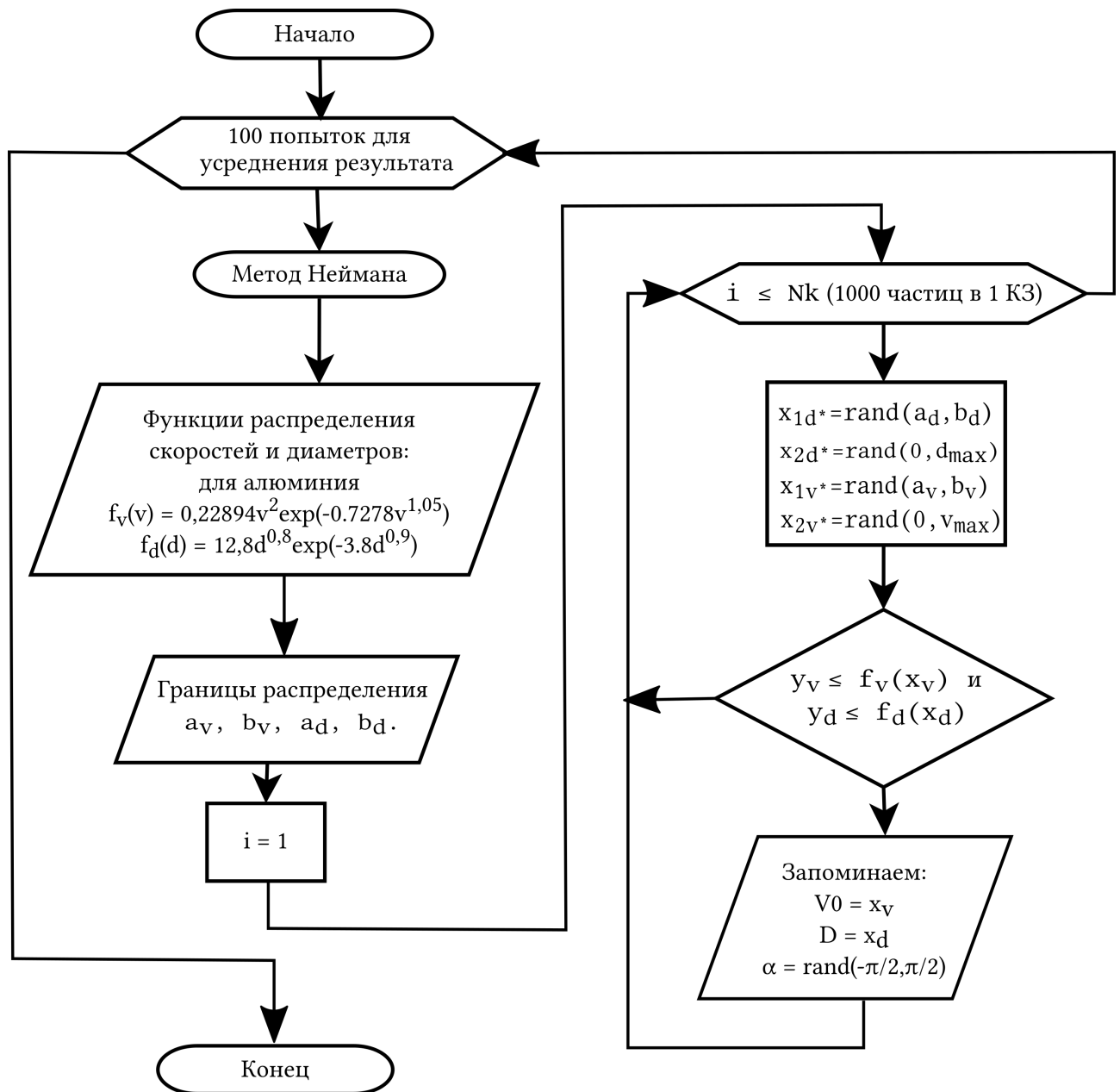


Рисунок 3.11 – Блок-схема алгоритма согласно блока 1 на рисунке 3.10

Вероятность поджигания горючего материала C частицами раскаленного металла γ , образовавшегося в результате электрического взрыва в зависимости от материала проводников, высоты подвески H провода или кабеля, расстояния от места появления продолжительного дугового к. з. и до ближайшей границы нахождения горючего материала L , расчетного тока короткого замыкания I , $q(C, \gamma, H, L, I)$ определим по формуле:

$$q(C, \gamma, H, L, I) = 1 - (1 - q_0(C, \gamma, H, L))^{N_q(I)}, \quad (3.109)$$

где $q_0(C, \gamma, H, L)$ — вероятность поджигания горючего материала одной среднестатистической частицей раскаленного металла. Количество частиц раска-

ленного металла, возникающих в зоне *к. з* определяем по формулам $N_q(I) = 0,0002 \cdot I^2 + 0,6391 \cdot I - 476,83$ (согласно таблице 3.1) и $N_q(I) = 0,99 \cdot I - 42,33$ (согласно таблице 3.2) [79, 80, 81].

Таблица 3.1 – Количество частиц раскаленного алюминия, возникающих в зоне *к. з.* в зависимости от тока *к. з.* для сети, защищаемой предохранителем с $I_H = 160$ А

Ток <i>I</i> , А	650	750	850	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700
N_q	40	110	190	240	350	460	570	690	810	920	1050	1150

Таблица 3.2 – Количество частиц раскаленного алюминия, возникающих в зоне *к. з.* за время 100 мс в зависимости от тока *к. з.*

Ток <i>I</i> , А	100	200	300
N_q	57	155	255

Вероятность $q(C, \gamma, H, L, I)$ для горючего материала хлопка и раскаленного металла (алюминий и медь) представлена на рисунках 3.12, 3.13 и 3.14, и в таблицах 3.3 и 3.4, построенных на основании разработанной методики.

Таблица 3.3 – Вероятность воспламенения алюминиевой частицей хлопчатых изделий на расстоянии *L*

Высота <i>H</i> , м	Расстояние <i>L</i> , м									
	6	6,25	6,5	6,75	7	7,25	7,5	7,75	8	8,25
0,1	0,01	0,0066	0,0066	0,0033	0,0033	0	0	0	0	0
1	0,0614	0,0328	0,0231	0,01	0,0066	0,0033	0,0033	0	0	0
2	0,1975	0,119	0,08	0,0392	0,0263	0,0132	0,01	0,0033	0,0033	0
3	0,3603	0,2763	0,1786	0,1248	0,083	0,0392	0,0231	0,01	0,0066	0,0033
4	0,4763	0,3771	0,3185	0,2134	0,1393	0,1042	0,0738	0,036	0,0198	0,0165
5	0,5582	0,4763	0,3996	0,3364	0,2518	0,1675	0,116	0,0861	0,0519	0,0263

Таблица 3.4 – Вероятность воспламенения медной частицей хлопчатых изделий на расстоянии *L*

Высота <i>H</i> , м	Расстояние <i>L</i> , м									
	3,5	3,75	4	4,25	4,5	4,75	5	5,25	5,5	5,75
3	0,0582	0,036	0,0198	0,01	0,0033	0	0	0	0	0
4	0,5068	0,4364	0,3624	0,2977	0,2417	0,184	0,1277	0,0891	0,0519	0,328
5	0,8415	0,8030	0,768	0,725	0,675	0,5936	0,5262	0,4568	0,3976	0,3252
6	0,9624	0,9474	0,9291	0,9095	0,877	0,8451	0,8108	0,7756	0,7419	0,694
7	0,9926	0,9891	0,9833	0,9766	0,9668	0,9552	0,9372	0,9193	0,8935	0,8645
8	0,999	0,9983	0,9969	0,9947	0,9918	0,9878	0,9831	0,9763	0,9664	0,9553

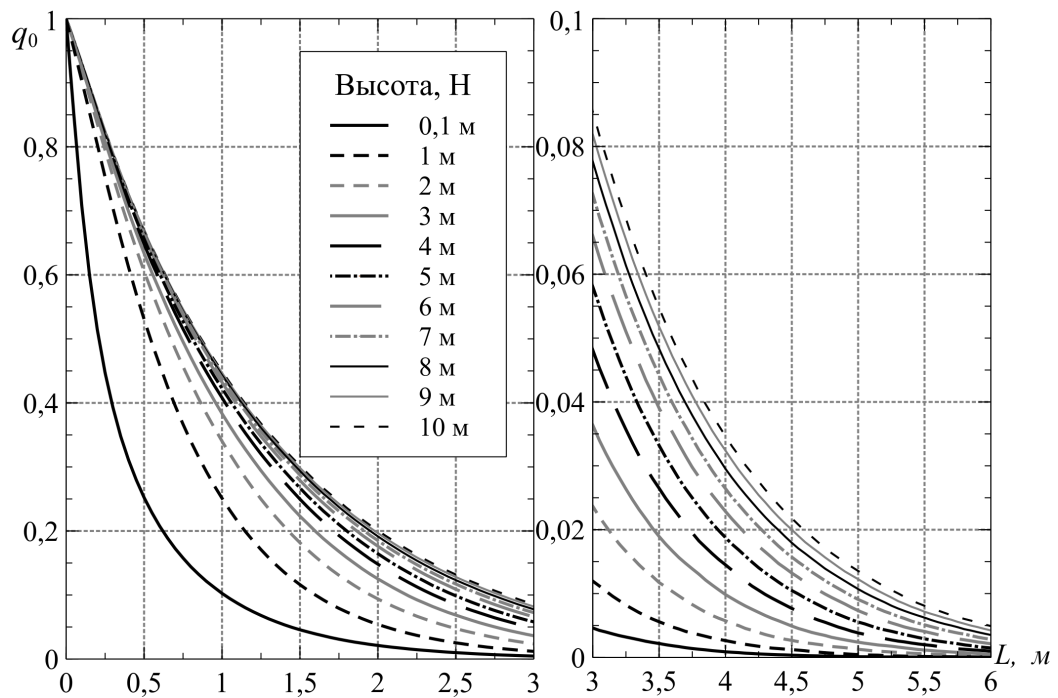


Рисунок 3.12 – Вероятность воспламенения хлопка раскаленной алюминиевой частицей, образовавшейся в результате «электрического взрыва» жидкой перемычки между проводниками различных фаз в зависимости от высоты H подвески (провод, кабель), расстояния L от места появления продолжительного к. з. и до ближайшей границы нахождения хлопка.

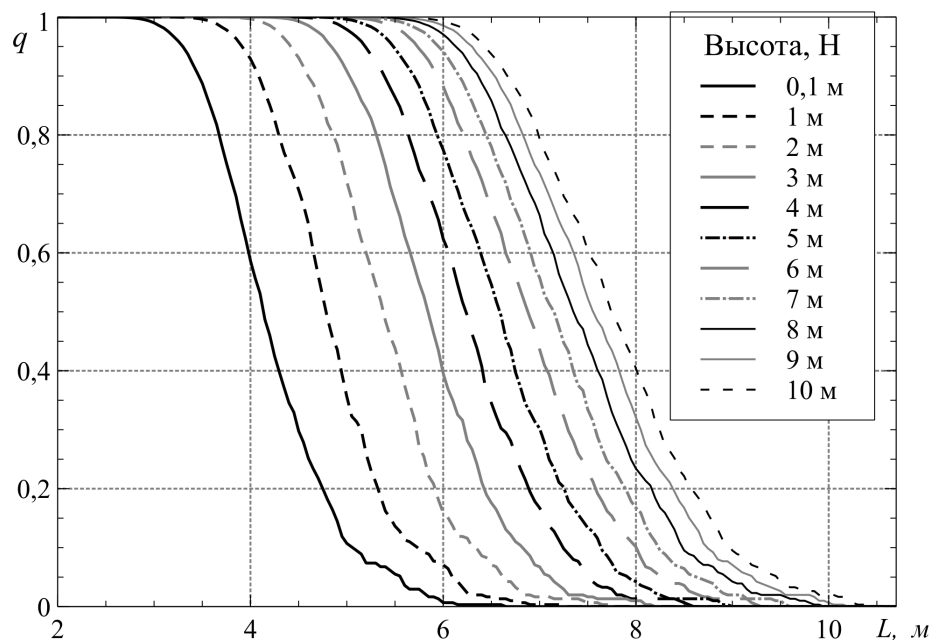


Рисунок 3.13 – Вероятность воспламенения хлопка не менее 1 из 1000 алюминиевых частиц, образовавшихся в результате «электрического взрыва» жидкой перемычки между проводниками различных фаз в зависимости от высоты H подвески (провод, кабель), расстояния L от места появления продолжительного к. з. и до ближайшей границы нахождения хлопка.

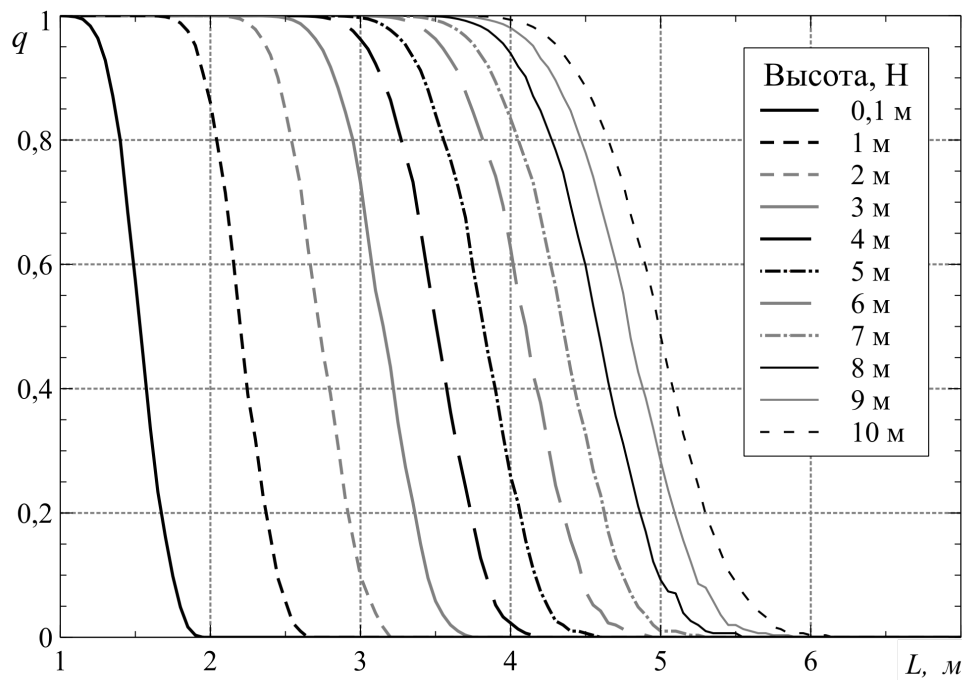


Рисунок 3.14 – Вероятность воспламенения хлопчатобумажной ткани не менее 1 из 1000 медных частиц, образовавшихся в результате «электрического взрыва» жидкой перемычки между проводниками различных фаз в зависимости от высоты H подвески (провод, кабель), расстояния L от места появления продолжительного к. з. и до ближайшей границы нахождения хлопчатобумажной ткани.

Из графиков 3.13 и 3.14 видно, что алюминиевые частицы, образованные при к. з. способны спровоцировать воспламенение горючего материала на большем расстоянии, а значит являются более опасными.

Следует отметить, что данная методика не учитывает скорость движения потоков воздуха, и может иметь значительную погрешность на открытом пространстве.

3.3 Построение «дерева формирования воспламенения» и схемы минимального совмещения для оценки безопасности частиц, образованных при к. з. в электрической проводке

В общем случае событие, связанное с воспламенением горючего материала при коротком замыкании в ЭП 0,38/0,22 кВ в электрифицированном помещении, можно представить в виде «дерева формирования воспламенения» (рисунок 3.15).

Обозначим параметрами \bar{X} , \bar{Y} и \bar{Z} следующие события:

– \bar{X} — появление повреждения изоляции проводника электрической сети, которое сопровождается к. з.;

– \bar{Y} — отказ в срабатывании вводного автоматического выключателя системы обеспечения ПБ электрифицированного помещения (срабатывает при появлении к. з. в сети);

– \bar{Z} — нахождение горючего материала на расстоянии возможного воспламенения в зоне разбрызгивания металла.

Используя «дерево формирования воспламенения» в электрифицированном помещении (рисунок 3.15) составляем схему минимальных совмещений (рисунок 3.16).

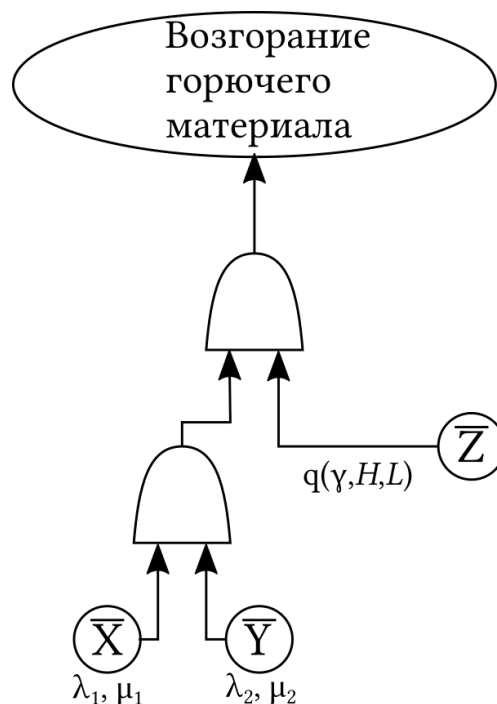


Рисунок 3.15 – «Дерево формирования» воспламенения горючего материала в узле нагрузки при появлении к. з.

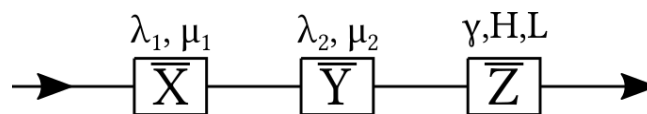


Рисунок 3.16 – Схема минимальных совмещений для узла нагрузки

3.4 Оценка причастности коротких замыканий в электрической проводке 0,38/0,22 кВ к воспламенения в электрифицированных помещениях

Всю сеть рассматриваемого электрифицированного помещения, начиная от потребителей электрической энергии и до вводного коммутационного аппарата, будем воспринимать как один узел нагрузки.

Любое короткое замыкание (*к. з.*) в элементе этого узла приводит в действие токовую защиту вводного автоматического выключателя [82].

Под отказом электрической проводки, которая находится под напряжением, будем понимать появление в электрической сети такого события, которое может привести к *к. з.* в элементе сети.

Если происходит *к. з.* в узле нагрузки, а ближайший к месту повреждения защитный коммутационный аппарат, через который прошел сквозной аварийный ток, отказывает в срабатывании, то этот поврежденный узел сети будет отключен с выдержкой времени другим автоматическим выключателем, который обеспечивает продольное резервирование (либо происходит отгорание проводников). Такие повреждения будем относить к продолжительным коротким замыканиям.

За время существования продолжительного *к. з.* между проводниками различных фаз образуется жидкая перемычка, образованная из расплавленного металла проводников, и под воздействием динамических процессов в сети происходит электрический взрыв, что приводит к выбросу из зоны дугового разряда нагретых металлических частиц в различные стороны, которые способны поджигать расположенный рядом горючий материал [24, 67].

Под горючим материалом в данном случае будем понимать материал в твердом, жидком или газообразном состоянии, который может воспламениться при случайном попадании на него частичек раскаленного металла, который образуется при появлении продолжительного *к. з.* в электрической проводке.

В соответствии с ГОСТ 12.1.004-91 вероятность возникновения пожаров в электрифицированном помещении от электротехнического изделия в течение года не должна превышать величины 10^{-6} [19].

Математическая модель (1.1) основана на использовании понятия случайное событие. Из предлагаемой математической модели не ясно: каким образом интервалы между диагностиками Θ системы отключения защитного коммутационного аппарата (автоматического выключателя) влияют на вероятность появления в сети 0,38/0,22 кВ *к. з.* длительностью более 0,2 с; каким образом вероятность появления пожаров в электрифицированном помещении зависит от γ — материала проводов, кабеля (алюминий, медь); H — высоты подвески в помещении проводов (кабеля) относительно горючего материала; L — расстояния от источника инициирования пожаров до ближайшей границы нахождения горючего материала в электрифицированном помещении, что

делает формулу (1.1) бесполезной с практической точки зрения.

Для выяснения причастности появления продолжительного *к. з.* (время существования более 0,2 с) к воспламенению горючего материала в электрифицированном помещении необходимо знать: вероятность появления продолжительного *к. з.* в течение времени t ; вероятность воспламенения (от продолжительного *к. з.*) горючего материала в зависимости от материала проводников γ , высоты подвески H проводов (кабеля) и расстояния трассы прокладки электрической проводки L до ближайшей границы горючего материала, который находится в помещении, расчетный ток короткого замыкания I [83, 84].

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

$$Q(t) = Q^*(t) \cdot q(C, \gamma, H, L, I), \quad (3.110)$$

где $Q^*(t)$ — вероятность появления продолжительного дугового *к. з.* в узле нагрузки.

Вероятность $Q^*(t)$ появления продолжительного дугового *к. з.* в узле нагрузки определим, пользуясь формулой (3.93).

Параметры s_1, s_2, s_3 из формулы (3.93) находятся из решения кубического уравнения вида:

$$s^3 + a \cdot s^2 + b \cdot s + c = 0. \quad (3.111)$$

Необходимо определить среднее время τ_1 до появления продолжительного *к. з.* в рассматриваемом узле нагрузки по формуле (3.44) или упрощенной формуле (3.50), а также дисперсию D_1 времени до появления продолжительного *к. з.* в узле нагрузки по формуле (3.60).

В том случае, если при расчетах получится, что $\tau_1 = \sqrt{D_1}$ (свойство экспоненциального распределения), тогда:

$$Q^*(t) = 1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}}. \quad (3.112)$$

Для случая, когда: $\lambda_1 < 100 \cdot \mu_1$, $\lambda_2 < 100 \cdot \mu_2$, $\mu_1 \gg \mu_2$ и $\lambda_2 \Theta < 0,1$

формула (3.112) примет вид (рисунок 3.17):

$$Q^*(t) = 1 - e^{-0,5\lambda_1\lambda_2^2\Theta_F^2 t}. \quad (3.113)$$

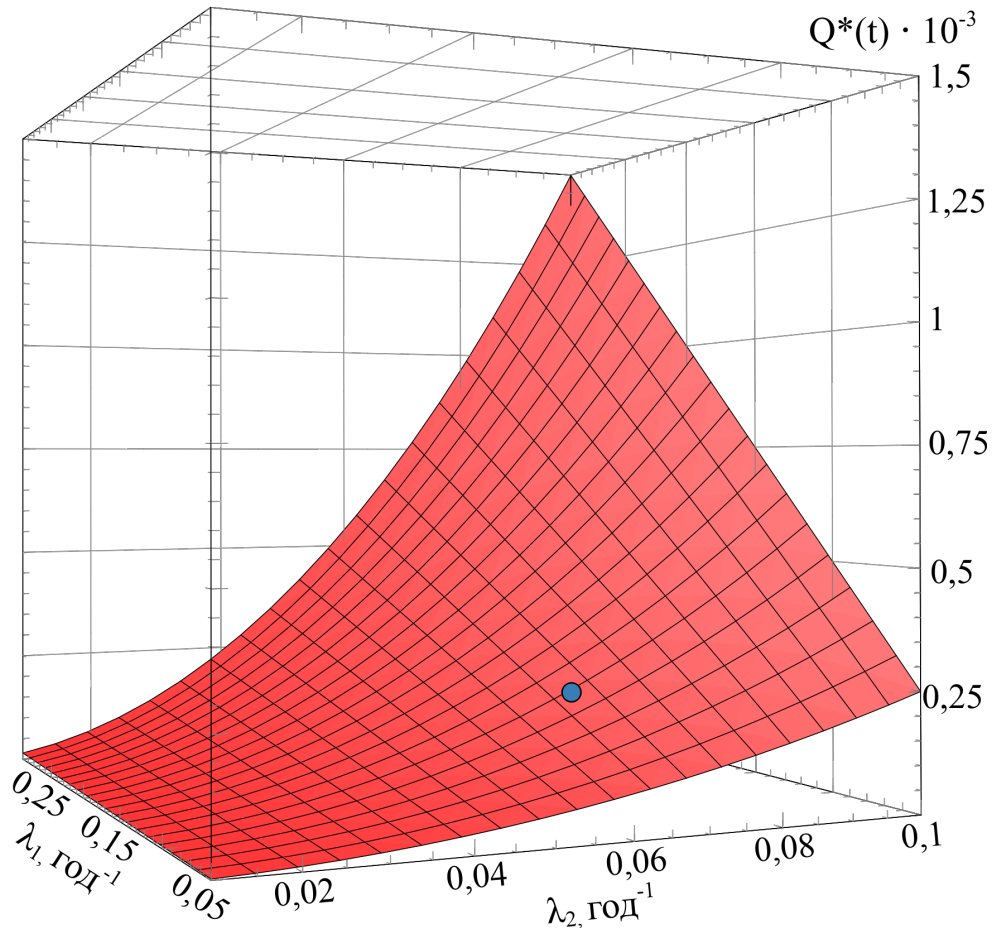


Рисунок 3.17 – Вероятность появления продолжительного к. з. в узле нагрузки от параметра потока появления к. з. λ_1 и параметра потока повреждений автоматической системы отключения защитного коммутационного аппарата λ_2

Формулу (3.110) представим в виде:

$$Q(t) = \left[1 - e^{-0,5\lambda_1\lambda_2^2\Theta_F^2 t}\right] \cdot \left[1 - (1 - q_0(C, \gamma, H, L))^{f_N(t)}\right]. \quad (3.114)$$

Формула (3.114) позволяет ответить на вопрос, является ли в данном конкретном случае появившееся продолжительное к. з. источником возникновения пожаров в электрифицированном помещении. Если при расчетах получится, что $Q(t) \leq 1 \cdot 10^{-6}$, где $t = 1$ год, тогда продолжительное к. з. не будет являться источником пожаров в электрифицированном помещении; в против-

ном случае — является.

Пример 3.1. Под наблюдением по плану $[NMT]$ в течение $T = 7$ лет находилось 20 складских электрифицированных помещений одного из металлургических заводов, т. е. $N_1 = 20$ узлов нагрузки. За время наблюдения в электрифицированной проводке (узел нагрузки) было зафиксировано $n_1 = 16$ случаев к. з.

За время наблюдения из $N_2 = 20$ автоматических выключателей из строя вышло $n_2 = 9$ из-за выявленных в результате диагностики отказов в системе их отключения. Среднее время отключения к. з. автоматическим выключателем принималось равным $d_1 = 0,2$ сек.

Для корректного сравнения с экспериментальными данными, приведенными в Смелков [5], принимаем количество частиц раскаленного металла $N_q = 1000$, что соответствует току короткого замыкания в месте повреждения равен 1570 А согласно таблицы 3.1.

Неработоспособное состояние системы отключения автоматического выключателя, установленного на вводе в каждое помещение, выявлялось в результате диагностической проверки. Проверки работоспособности системы отключения автоматического выключателя проводились с интервалом времени $\Theta_F = 1$ год.

Принималось во внимание то обстоятельство, что диагностика системы отключения автоматического выключателя абсолютно надежна, т. е. появление отказов в системе его отключения будет непременно обнаружена в результате диагностики и устранена, либо автоматический выключатель будет заменен на новый.

В качестве горючего материала на складах хранились деревянные контейнеры с оборудованием, рулоны бумаги и тюки хлопка.

Проводка относительно горючего материала в этих складских помещениях находилась на высоте $H = 3$ м, а расстояние от возможного появления источника инициирования воспламенения составляла $L = 6$ м. Материал проводника — алюминий.

Определить вероятность $Q(t)$ воспламенения горючего материала склада в течение года по причине случайного появления к. з. в электрической проводке.

Сравнить полученный результат с нормой ГОСТ 12.1.004-91, и если окажется, что $Q(1) > 1 \cdot 10^{-6}$, то разработать рекомендации по предотвращению

воспламенений в складском помещении.

Решение поставленной задачи.

Используя исходные данные примера находим:

$$\lambda_1 = \frac{n_1}{N_1 \cdot T} = \frac{16}{20 \cdot 7} = 0,1143 \text{ год}^{-1},$$

$$\lambda_2 = \frac{n_2}{N_2 \cdot T} = \frac{9}{20 \cdot 7} = 0,0643 \text{ год}^{-1},$$

$$\mu_1 = \frac{1}{d_1} = \frac{60 \cdot 60 \cdot 8760}{0,2} = 1,58 \cdot 10^8 \text{ год}^{-1},$$

$$\mu_2 = \frac{1}{\Theta_F - \frac{1}{\lambda_2}(1 - e^{-\lambda_2 \Theta_F})}} = \frac{1}{1 - \frac{1}{0,0643}(1 - e^{-0,0643})}} = 31,77 \text{ год}^{-1}.$$

Используя таблицу 3.3 для $H = 3$ м, $L = 6$ м и γ — материал алюминий, находим:

$$q(C, \gamma, H, L) = 0,3603.$$

Используя исходные данные, формулы (3.44) и (3.60), получим, что $\tau_1 = \sqrt{D_1}$, поэтому, воспользовавшись формулой (3.114), находим:

$$Q(1) = [1 - e^{-0,5 \cdot 0,1143 \cdot 0,0643^2 \cdot 1^1 \cdot 1}] \cdot 0,3603 = 8,5 \cdot 10^{-5}.$$

Сравнивая полученный результат с нормой ГОСТ 12.1.004-91 $1 \cdot 10^{-6}$, видим, что в нашем случае вероятность появления пожаров в складском помещении выше нормы в 85 раз.

Для обеспечения нормируемого уровня возникновения опасности возгорания (пожарной безопасности) складских помещений необходимо горючий материал перенести от возможного источника инициирования пожаров на 2,25 м дальше, т. е. $L = 8,25$ м, тогда используя таблицу 3.3 находим:

$$q_1(C, \gamma, H, L) = 0,0033.$$

Используя формулу (3.114) получим:

$$Q_1(1) = [1 - e^{-0,5 \cdot 0,1143 \cdot 0,0643^2 \cdot 1^1 \cdot 1}] \cdot 0,0033 = 0,78 \cdot 10^{-6}.$$

Следовательно для предотвращения воспламенений в исследуемых складских помещениях горючий материал, который находится на складе, достаточно перенести на расстояние $L = 8,25$ м от возможного места появления продолжительного к. з. (расположить опасную среду от трассы прохождения электрической проводки на расстоянии не менее 8,25 м).

В том случае, если из-за ограниченных размеров склада не удастся горючий материал расположить от трассы прохождения электрической проводки на требуемом расстоянии, тогда, чтобы обеспечить нормируемый уровень возникновения опасности возгорания (пожарной безопасности) склада, следует повысить надежность системы отключения вводного автоматического выключателя.

3.5 Выводы по разделу 3

1. Для определения опасности тепловых источников (электрическая искра, дуга, капли металла), причастности к воспламенению короткого замыкания, газосварки, резки металла необходима научно-обоснованная методика, позволяющая проводить расчёты с целью выявления возможных причин воспламенения.

2. Недостатком существующей методики в ГОСТ 12.1.004-91 является то, что в ней не учитывается ряд факторов:

- а) ускорение частиц металла при вылете;
- б) наличие сопротивления воздуха при движении частиц;
- в) случайный характер процесса образования расплавленных частиц и их характеристик;
- г) использование упрощенных критериев для определения возможности воспламенения горючего материала.

3. Разработана методика расчёта вероятности воспламенения горючего материала частицами раскаленного металла, образовавшегося в результате электрического взрыва в зависимости от материала проводников, высоты подвески H провода или кабеля, расстояния от места появления продолжительно-

го дугового к. з. и до ближайшей границы нахождения горючего материала L , расчетного тока короткого замыкания, которая применима для кабелей и проводов с алюминиевыми и медными жилами. Например, для алюминиевой электрической проводки, находящейся на высоте $H = 3$ м относительно горючего материала, расположенного на расстоянии $L = 6$ м, вероятность воспламенения хлопка составляет 0,36.

4. Безопасность электрифицированного помещения от возможных воспламенений можно обеспечить за счет оптимального расположения горючего материала относительно трассы прохождения электрической проводки, которое определяется с использованием графиков (рисунки 3.13 и 3.14).

5. В том случае, если ограничены размеры электрифицированного помещения и горючий материал не удастся расположить на рекомендованном расстоянии от прохождения трассы электрической проводки, тогда пожаробезопасность следует обеспечить за счет уменьшения вероятности появления продолжительного к. з.

РАЗДЕЛ 4

РАЗРАБОТКА МЕР ПО СНИЖЕНИЮ ОПАСНОСТИ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ
В СЕТЯХ 0,38 КВ, СВЯЗАННЫХ С ПЕРЕГРУЗКОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ
ПРОВОДКИ4.1 Методика экспериментального исследования динамики нагрева
электрической проводки 0,38/0,22 кВ

Периодические и случайные перегрузки в ЭП отрицательно сказываются на химических, физических и механических свойствах ее изоляции (старение, разрушение, воспламенение), а значит перегрузка с большей долей вероятности может быть как причиной воспламенения, так и промежуточным аварийным режимом с последующими проявлениями *к. з.*, утечек тока на землю и других источников воспламенения изоляции.

Таким образом, оперируя значениями интервалов времени до плавления изоляции ЭП при различных кратностях токов их перегрузок можно сформировать более точные критерии выбора уставок, усовершенствовать технические условия на разработку защит от перегрузок, а также расширить возможности математического моделирования интенсивности их отказов и, как следствие, вероятности появления воспламенения в узле нагрузки.

Современная промышленность выпускает множество видов кабельных изделий, но в большинстве случаев для прокладки внутренней проводки электрифицированных помещений используется негибкий монтаж при помощи проводов и силовых кабелей следующих типов:

- ППВ и АППВ — провода установочные с поливинилхлоридной (ПВХ) или виниловой изоляцией незащищенные;
- ВВГ и АВВГ — силовые кабели с ПВХ изоляцией.

Однако для некоторых способов прокладки внутренней проводки электрифицированных помещений есть необходимость использовать гибкий монтаж (зачастую почти вся электробытовая техника подключается через «удлинители») при помощи силовых (медных) проводов и шнуров следующих типов:

- ПВС — провод соединительный с ПВХ изоляцией;
- ШВВП — шнур соединительный с ПВХ изоляцией.

Также необходимо отметить, что все вышеперечисленные провода, кабели и

шнуры выполнены для умеренного климатического исполнения и подходят для России, Украины и др. европейских стран.

Применение ПВХ изоляции для кабельных изделий ВВГ (АВВГ), ППВ (АППВ), ПВС, ШВВП и др, обусловлено сочетанием хороших диэлектрических свойств и цены. Кроме ПВХ в эту группу входят такие полимеры как: винил, вестолит, виннол и др. Они представляют собой бесцветные, прозрачные пластмассы, термопластичные полимеры винилхлорида и отличаются химической стойкостью к щелочам, минеральным маслам, многим кислотам и растворителям.

Согласно ПУЭ длительно допустимый ток (номинальный ток) — это такой ток, который проходя по проводнику в течении длительного времени (более 3τ , где τ — постоянная, зависящая от его материала, конструкции, сечения, и способа прокладки, может изменяться от нескольких минут до нескольких часов) нагревает его до допустимой (номинальной) температуры (для ПВХ изоляции до $65...70^{\circ}\text{C}$). Таким образом, все токи, приводящие к нагреву более, чем на 70°C за $3 \cdot \tau$, являются токами перегрузки.

Для проведения необходимых измерений была разработана принципиальная схема экспериментального стенда, которая представлена на рисунке 4.1, а сами измерительные приборы приведены на фото (рисунки 4.2 и 4.3).

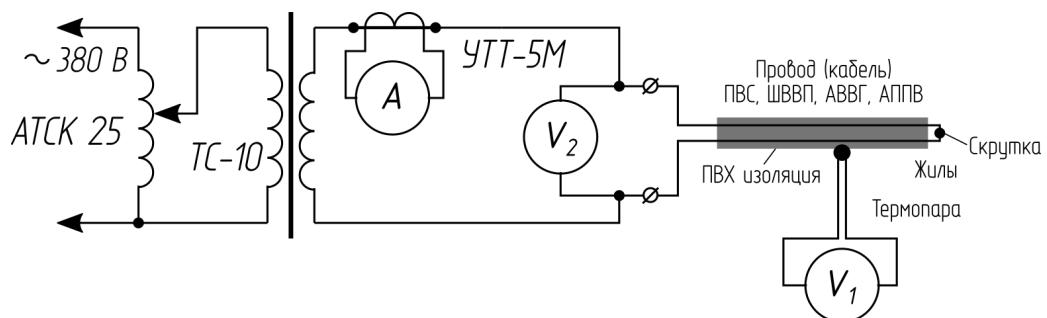


Рисунок 4.1 – Принципиальная схема экспериментального стенда для определения интервалов времени до плавления ПВХ изоляции кабельных изделий и динамики их нагрева

Приборы, используемые в схеме, имеют следующие технические характеристики: АТСК 25 — автотрансформатор, ТС-10 — силовой понижающий трансформатор, мультиметр FLUKE 8846А, мультиметр АРРА 109N с возможностью измерения температуры при помощи термопары до 750°C .

Для измерения интервалов времени проводилась видеозапись на сенсорный мобильный телефон Samsung J7.

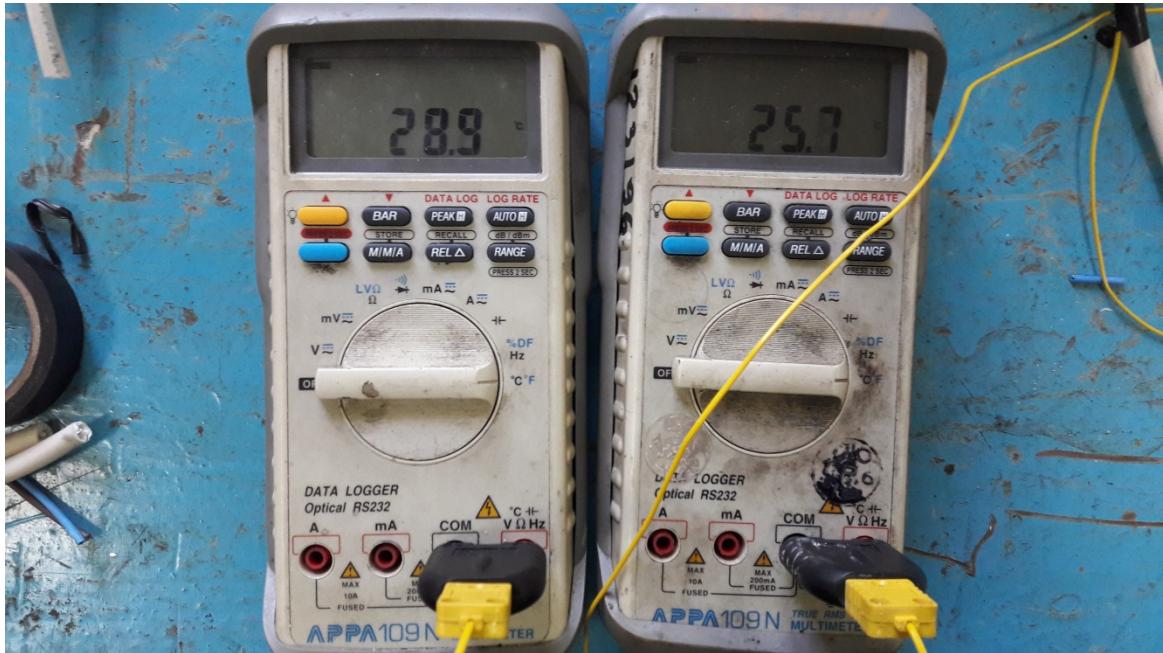


Рисунок 4.2 – Мультиметр APPA 109N



Рисунок 4.3 – Общий вид стенда: 1 — АТСК-25; 2 — ТС-10; 3 — короткая сеть

4.2 Экспериментальные исследования нагрева внутренней электрической проводки зданий в режимах перегрузки

Для I типа экспериментов согласно рекомендаций ПУЭ [85] выбирались кабельно-проводниковые изделия 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 мм²). Длина проводников составляла 0,3 м, с одной стороны они скручивались, а с другой зачищались (рисунок 4.4).

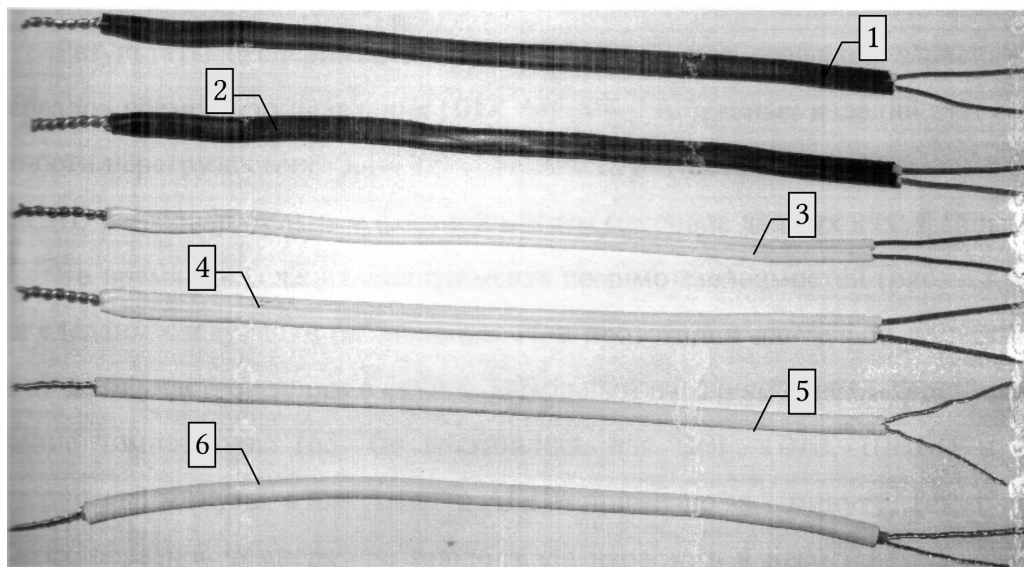


Рисунок 4.4 – Внешний вид кабельных изделий до проведения эксперимента, на фото представлены: 1 — ВВГ 2x1,5 мм²; 2 — АВВГ 2x2,5 мм²; 3 — ППВ 2x1,5 мм²; 4 — АППВ 2x2,5 мм²; 5 — ШВВП 2x0,75 мм²; 6 — ПВС 2x0,75 мм² [86]

Длина КППИ 0,3 м выбрана исходя из обеспечения падения напряжения на них не более 1%, что дало возможность уменьшить погрешности измерения тока и температуры. Однако увеличение сечения исследуемых образцов КППИ может приводить к искажению результатов измерения температуры и-за охлаждения через контактные соединения и места скруток [86].

Результаты эксперимента сведены в таблице 4.1, где указаны интервалы времени до начала плавления ПВХ изоляции в зависимости от сечения, типа кабельно-проводниковых изделий при изменении нагрузочного тока 20...100 А.

В таблице 4.2 приведен диапазон (разница) интервалов времени согласно таблице 4.1 для разных типов проводов и кабелей.

Во время проведения экспериментов помимо зависимостей (таблица 4.1) были сделаны следующие наблюдения: при протекании длительно допустимого тока по кабельным изделиям марок ВВГ, ШВВП, ПВС, АППВ, проложен-

ным открыто, через 3 минуты температура на границе жила-изоляция достигала $\approx 40^\circ\text{C}$, через 5 минут — $\approx 48^\circ\text{C}$, через 10 минут — $55...57^\circ\text{C}$ и в течение 20 минут достигала 59°C . Для тех же кабельных изделий, проложенных в защитной гофре или ПВХ при токах, допустимых для открытой прокладки температура может повышаться до $84,9^\circ\text{C}$, что является режимом перегрузки. Поэтому необходимо учитывать это и снижать ток до допустимого по ПУЭ [85] для закрытой прокладки в трубах.

Таблица 4.1 – Интервал времени до плавления ПВХ изоляции кабельных изделий (длина проводов 0,3 м)

Тип	Сечение	Ток, А									
		20	30	40	50	60	70	80	90	100	110
ВВГ	1,5	1800	575	250	140	80	50	40	30	—	—
	2,5	—	—	1100	700	500	360	275	220	—	—
	4	—	—	—	1750	1200	860	650	525	—	—
ППВ	1,5	1650	450	180	100	50	45	25	15	—	—
	2,5	—	1800	925	545	350	250	180	145	—	—
	4	—	—	—	1425	950	690	525	400	—	—
АВВГ	2,5	—	600	240	110	50	40	25	15	—	—
	4	—	—	1470	960	700	525	400	330	260	—
АППВ	2,5	1700	400	150	60	40	20	5	—	—	—
	4	—	—	1060	675	460	350	260	200	—	—
ПВС	1,5	1800	550	245	125	75	50	—	—	—	—
	2,5	—	1650	870	525	350	250	—	—	—	—
ШВВП	0,75	800	225	100	50	25	10	—	—	—	—
	1,5	1800	520	220	110	60	45	—	—	—	—
	2,5	—	1550	800	480	325	230	—	—	—	—

Начиная с 3-кратной перегрузки у всех кабельных изделий наступало расплавление изоляции с выделением хлористого водорода — для меди в пределах 1 минуты, а для алюминия в пределах 30 секунд. При расположении кабельных изделий параллельно земле ПВХ изоляция стекала с них. Первое плавление ПВХ изоляции происходило в местах скрутки из-за наличия повышенного переходного сопротивления в месте контактного соединения (т. е. здесь выделялась наибольшая мощность). У алюминия это проявлялось ярче, чем у меди, т. к. он имеет большую оксидную пленку. При 5-кратной перегрузке у АВВГ и АППВ примерно за 1 минуту происходило расплавление металла в месте скрутки, при этом иногда воспламенялась ПВХ изоляции [86].

II тип экспериментов был направлен на получение базы данных дина-

мических температурно-токовых характеристик жил кабельно-проводниковых изделий на границе с изоляцией.

Таблица 4.2 – Диапазон интервалов времени от начала роста тока (ненагруженное состояние) до плавления ПВХ изоляции разных типов проводов

Сечение жилы 1,5 мм ²								
Кратность тока K	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
ВВГ	1800	575	250	140	80	55	40	25
ШВВП	1800	520	220	110	60	45	—	—
ПВС	1800	550	245	125	75	50	—	—
ППВ	1650	450	180	100	50	40	25	15
Δ , с	150	125	70	40	30	15	15	10
δ , %	9,1	27,8	38,9	40	60	37,5	60	66,7
Сечение жилы 2,5 мм ²								
Кратность тока K	0,7	1	1,3	1,7	2	2,3	2,7	3
Ток I , А	20	30	40	50	60	70	80	90
ВВГ	—	1900	1100	700	500	360	275	220
ШВВП	—	1550	800	4880	325	230	—	—
ПВС	—	1650	870	525	350	250	—	—
ППВ	—	1800	925	545	350	250	180	145
Δ , с	—	350	300	220	175	130	—	—
δ , %	—	22,6	37,5	45,8	53,8	56,5	—	—

Среднее значение этой температуры по трем рядам измерений сравнивались с численным моделированием (п. 2.1) в аналогичных условиях (открытая прокладка). Здесь были выбраны 2-жильные кабельно-проводниковые изделия ПВС сечением 1,5...4 мм²; АВВГ сечением 2,5...4 мм², ШВВП сечением 1,5...2,5 мм². Длина проводников 1,5 м, схема проведения опытов аналогична I-му типу экспериментов.

Обработка результатов проводилась в среде MS Excel 2007.

В ходе проведения эксперимента у кабельных изделий ВВГ, АВВГ, ШВВП и ПВС часто после перегрузки, которая должна была разрушить их ПВХ изоляцию, наблюдалось полное сохранение целостности ПВХ оболочки. Но при внешней видимости, что кабельное изделие не разрушено, удаление ПВХ оболочки показывало полное разрушение внутренней изоляции жил. Примерно такие же результаты наблюдались и у кабельных изделий, помещавшихся

в гофру или ПВХ трубу. Также наблюдались случаи частичного разрушения ПВХ изоляции кабельного изделия — вся изоляция начинала оплавляться, но в какой-то момент в одном из мест происходило спаивание жил, т. е. появлялось к. з. При этом ПВХ изоляция кабельного изделия, находящаяся до места к. з., расплавлялась, а после места к. з. остывала и как бы оставалась целой. Поэтому, даже если заменить разрушенную часть кабельного изделия, а остальную оставить в последующей эксплуатации, ее разрушение наступит раньше нормированного срока.

Данные, полученные в ходе проведенных экспериментов, позволили расширить представление о поведении ПВХ изоляции в номинальных и аварийных перегрузочных режимах.

Так, сходимость экспериментальных и расчетных данных наблюдается в пределах $\pm 6\%$ при кратностях тока $K_i < 2$ по отношению к длительно допустимому $I_{\text{доп}}$. Для $K_i = 3; 4; 5$ расхождения достигают 16% (рисунки 4.5, Е.1–Е.2).

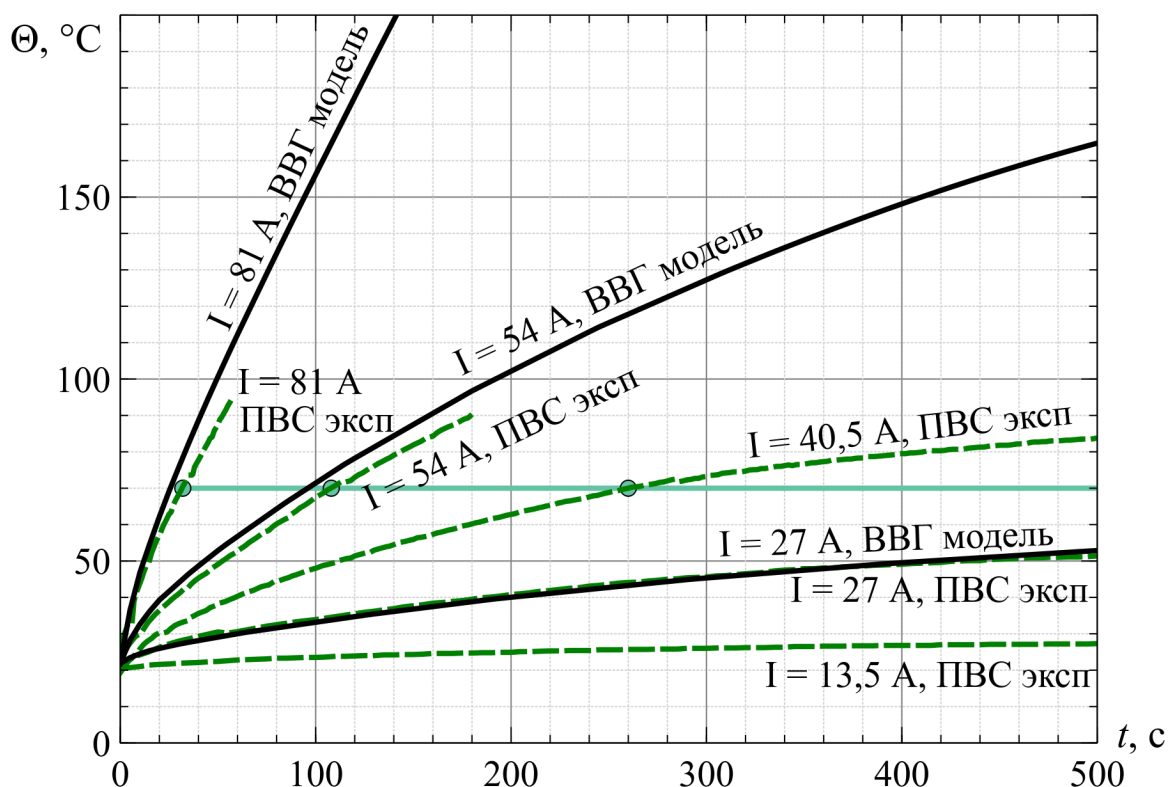


Рисунок 4.5 – Динамика нагрева на границе жила-изоляция двужильного кабеля ВВГ 2x2,5

Выявлено, что у кабельных изделий марок ВВГ, АВВГ, ШВВП и ПВХ из-за наличия ПВХ оболочки присутствует большее температурное запаздывание, чем у ППВ и АППВ, т. е. их общая ПВХ изоляция (изоляция жил и

оболочка) нагревается и остывает дольше. Данный факт может привести к более быстрому разогреву ПВХ изоляции при повторной перегрузке, поскольку она не успеет остыть после такого предыдущего режима. Данный эффект наблюдается и при размещении кабельных изделий в защитной гофре или ПВХ трубе, поэтому необходимо учитывать это при поиске компромисса между механическо-диэлектрической прочностью и охлаждением кабельных изделий.

После многократных перегрузок, даже если ПВХ изоляция не разрушалась, она зачастую становилась более твердой и хрупкой, т. е. ускоренно старела. А при плавлении (горении) ПВХ изоляция превращается в угольный порошок.

Также отмечено отличие характера нагрева кабельно-проводникового изделия, помещенного в защитную гофру или ПВХ (способ прокладки «ГФ») (рисунки 4.6, Е.3–Е.4).

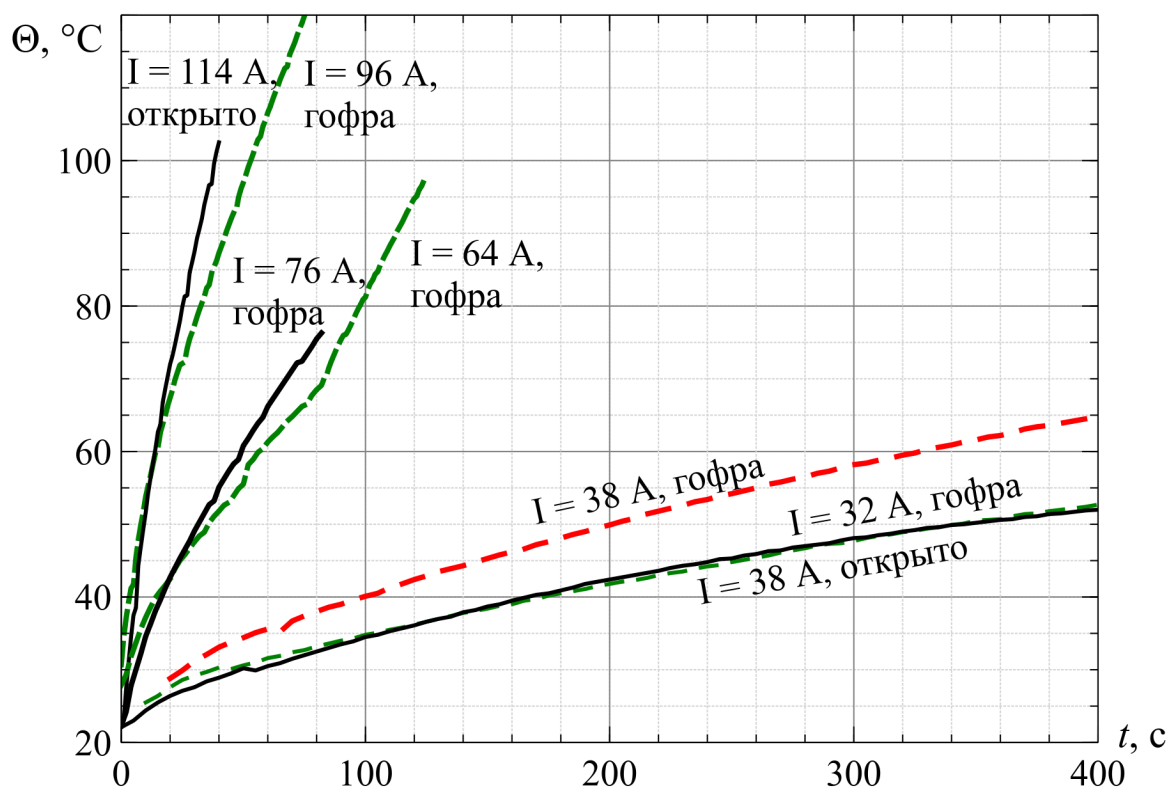


Рисунок 4.6 – Динамика нагрева на границе жила-изоляция двужильного кабеля ПВС 2x4 в гофре и открыто

Так, при одинаковых перегрузочных токах установившаяся температура нагрева $\Theta_{уст}$ превышает аналогичную для нагрузочного тока открытой прокладки (способ прокладки «ОТ»). Например, для ПВС 2x4 $I = 38$ А $\Theta_{уст}$ по-

сле времени нагрева 400 с составила $\Theta_{уст} = 52^{\circ}C$ (способ прокладки «ОТ») и $\Theta_{уст} = 65^{\circ}C$ (способ прокладки «ГФ»).

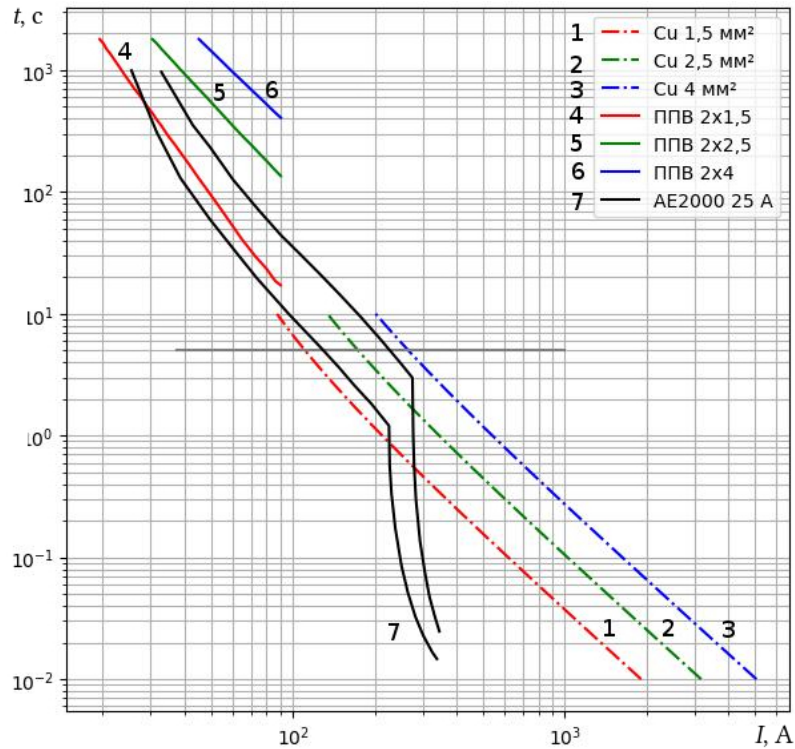
Вместе с тем, если принять номинальный нагрузочный ток открытой прокладки $I_{доп1} = 38$ А и прокладки в гофре $I_{доп2} = 32$ А, то динамические температурно-временные характеристики практически совпадают (рисунок 4.6), что необходимо учитывать при разработке алгоритма микропроцессорной тепловой защиты сети 220/380 В.

4.3 Разработка устройства защиты от перегрузки во внутренней электрической проводке зданий

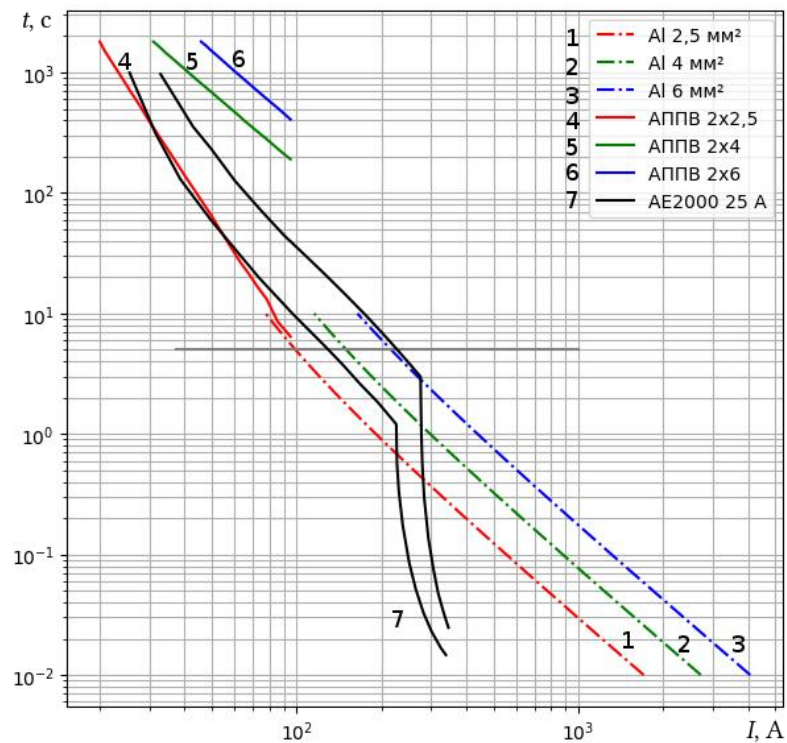
Ранее (70–80е гг. 20 в.) во ВНИИПО МЧС России проводились исследования об эффективности работы аппаратов защиты (АВ и предохранителей) применительно к токовременным характеристикам кабельно-проводниковых изделий [26]. Номенклатура этих изделий претерпела некоторые изменения, поэтому эти результаты были дополнены данными о корреляции допустимого времени нагрева КПП со временем срабатывания защиты (нагретое и холодное состояние аппаратов защиты).

Согласно ГОСТ Р МЭК 60949–2009 [50, 87] были рассчитаны время-токовые характеристики (ВТХ) медных и алюминиевых проводов сечением 1,5...4 мм², при которых температура жилы при *к. з.* достигает 160^oC. Эти характеристики были совмещены в одной системе координат с ВТХ автоматических выключателей серий ВА25, АЕ2000 (рисунок 4.7).

Проанализировав графики, можно сделать вывод о том, что не во всех случаях АВ, выбранные в соответствии с ПУЭ [85], обеспечивают своевременное отключение при *к. з.* В частности, в п. 3.1.11 ПУЭ требуется обеспечить кратность номинального тока расцепителя АВ (с нерегулируемой обратно зависящей от тока характеристикой) и тока трогания расцепителя АВ (с регулируемой обратно зависящей от тока характеристикой) по отношению к длительно допустимым токовым нагрузкам провода с ПВХ, резиновой аналогичной по тепловым характеристикам изоляцией (таблице 4.4) не более 100 %. Следует учесть, что согласно п. 7.3.97 ПУЭ во взрывоопасных зонах проводники отвлений к электродвигателям с короткозамкнутым ротором до 1 кВ должны быть во всех случаях защищены от перегрузок, а сечения их должны допускать длительную нагрузку не менее 125 % номинального тока электродвигателя.



а)



б)

Рисунок 4.7 – Совмещенные графики времятоковых характеристик автоматических выключателей и а) проводов с медными жилами типа ППВ сечениями 1,5...4 мм², б) и проводов с алюминиевыми жилами типа АППВ сечениями 2,5...6 мм²; 1–3 — токи к. з. получены по формулам [50] для термически допустимой температуры 160°С; 4–6 — время плавления ПВХ изоляции при установившемся токе, полученное экспериментально в [86]

Номинальный ток расцепителя АВ ($I_{н.расц} = 25 \text{ А}$) согласован с допустимыми токами медного провода сечением $2 \times 2,5 \text{ мм}^2$ или алюминиевого провода сечением $2 \times 4 \text{ мм}^2$ по условию, приведенному в п. 3.1.11 ПУЭ, но как следует из данных, представленных на рисунке 4.7, защитные характеристики АВ могут проходить выше ВТХ указанных проводов. Это приводит к их вероятному опасному для жизнедеятельности человека нагреву.

Для определения аналогичных зависимостей в режиме перегрузки $(1,5 \dots 5)I_{доп}$ совмещались ВТХ плавления изоляции двухжильных проводов, АВ и Пр (см. раздел 1, п. 1.3).

Таким образом, в сетях напряжением 220/380 В, защищаемых стандартными АВ и Пр, которые реагируют на токи перегрузки необходима разработка систем более совершенной защиты, основанных на микропроцессорных расцепителях [88, 89, 90].

На рисунке 4.8 показана характеристика АВ группы «С» [91]. Различные причины (предварительный нагрев расцепителя автомата, отклонения параметров при изготовлении) могут приводить к значительному разбросу характеристики АВ (кривые 1 и 2). При незначительном отклонении тока к. з. ниже порога срабатывания электромагнитного расцепителя (точка 1 на кривой 1) время срабатывания АВ определяется тепловым расцепителем и достигает 7 с (точка 2 на кривой 1). При прохождении через автомат тока $5 \cdot I_{н}$ в предварительно нагретом состоянии АВ должен сработать через 0,02 с (точка 3 на кривой 2), в холодном состоянии при такой нагрузке он отключится в пределах 9...20 с (для автоматов до 32 А и выше 32 А соответственно) — точка 4 на кривой 1.

Для обеспечения безопасности жилых и общественных зданий большое значение имеет предотвращение опасного перегрева, возникающего при сверхтоках с малыми кратностями $K = \frac{I}{I_{доп}} < 5$ по отношению к длительно допустимому току электрического провода или кабеля.

Перегрев изоляции проводников выше предельно допустимой температуры приводит к дальнейшему короткому замыканию (к. з.).

Поэтому актуальной является задача разработки научно обоснованного метода, а также способа его реализации для установления путем моделирования или обработки экспериментальных зависимостей нестационарного нагрева кабеля (провода) прогнозируемого времени допустимой перегрузки t_{off} , и устройства, реализующего этот способ.

Известный способ защиты электроустановок сетей жилых, администра-

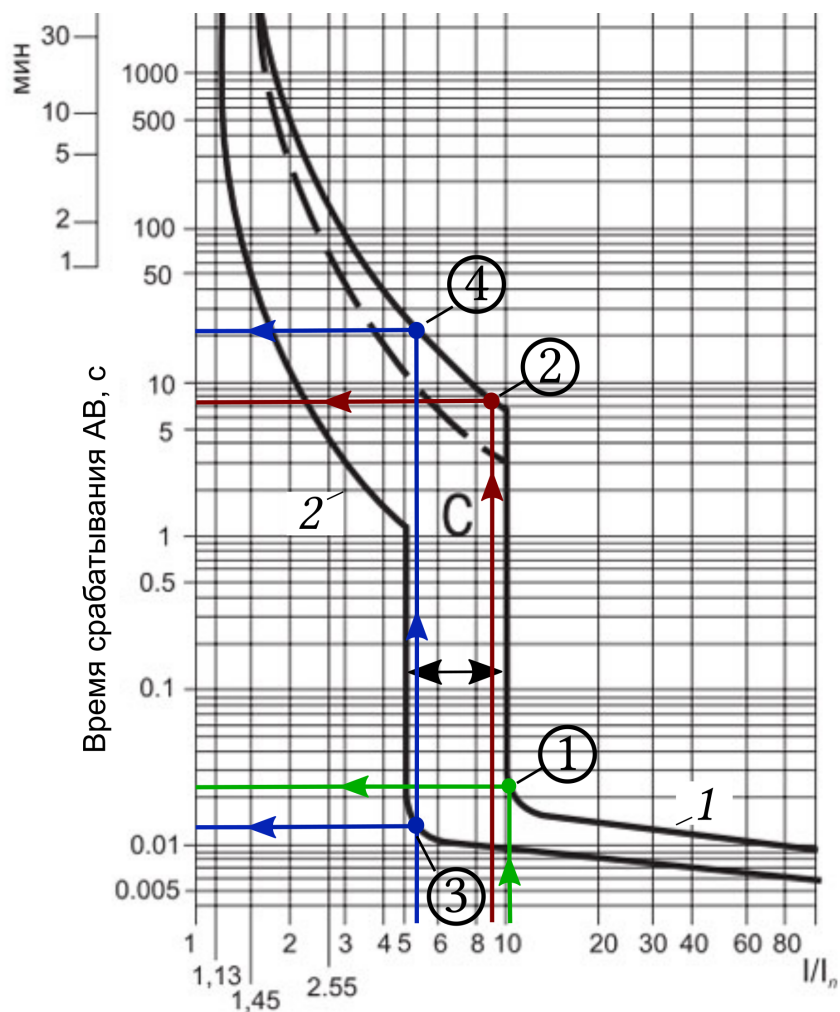


Рисунок 4.8 – Времятоковая характеристика автоматического выключателя группы «С»: 1 — верхняя граница разброса характеристик АВ; 2 — нижняя граница разброса характеристик АВ

тивных и коммерческих зданий основан на нагреве электрическим током биметаллической пластины, встроенной в АВ. Отключение защищаемого участка сети происходит при превышении изгиба пластины и механическом воздействии на расцепитель АВ [92].

Это достаточно простое по конструкции и широко применяемое устройство имеет следующие недостатки:

- требуется индивидуальный расчет, выбор и настройка измерительного органа под характеристики каждого присоединения сети, что при отсутствии интеллектуализации представляется сложной задачей;

- не учитывается влияние внешних факторов на изгиб биметаллической пластины, что приводит к наличию значительной зоны разброса характеристик срабатывания АВ по времени при одном и том же токе до 20 раз;

- при кратностях тока $K = 1,2...1,45$ возможны дополнительный недопу-

стимый перегрев кабеля (провода) сети и уменьшение его срока службы, т. к. стандартные АВ, как правило, в таком режиме работы сети нечувствительны.

Известен способ максимальной токовой защиты (МТЗ) с избирательной чувствительностью к токам удаленных к. з. и пусковым токам асинхронных двигателей АД [93, 94, 95], однако он не может использоваться в режимах перегрузки электрическим током, поскольку не учитывает нагрев проводов сети в зависимости от их параметров. Попытка решить аналогичную задачу применительно к интеллектуальной защите двигателей предпринималась в [96, 97], где использовалась тепловая модель нагрева-охлаждения, а также время-токовая защитная характеристика. Анализ такой защиты показал, что требуется его дальнейшая разработка и переориентация на электрораспределения в сетях с проводами наиболее распространенных типов (ПВС, ШВВП, АППВ, АВВГ, ВВГ, ВВГнг и т. п.), имеющими резиновую или поливинилхлоридную изоляцию сечением 1,5...4 мм², а в дальнейшем для больших сечений.

Таким образом, защита участка электрической сети от опасных перегрузок предполагает оптимизацию контроля защитных время-токовых характеристик и динамики теплового режима провода, за счет чего обеспечивается своевременное отключение этого участка, предотвращение повреждения провода или кабеля и увеличение срока эксплуатации.

Для того, чтобы получить тепловую модель нагрева-охлаждения провода или кабеля электрической сети, необходимо знать время достижения его изоляцией предельно допустимой температуры нагрева. Согласно [96] предупреждающий сигнал Warning подается микропроцессорным устройством тепловой защиты (МПТЗ), если текущее превышение температуры проводника над температурой окружающей среды $\tau > 1,1 \cdot \tau_{class}$, а сигнал на отключение Danger — при $\tau > 1,4 \cdot \tau_{class}$, где τ_{class} — допустимое превышение температуры для соответствующего класса изоляции. Для изоляции из ПВХ пластиката нагревостойкого $\tau_{class} = 70^\circ\text{C} - \Theta_{o.c.}$, а ПВХ пластика не нагревостойкого $\tau_{class} = 60^\circ\text{C} - \Theta_{o.c.}$, где $\Theta_{o.c.}$ — температура окружающей среды.

Предлагаемый способ защиты [98, 99] распределительной электрической сети от сверхтоков (токов перегрузки) включает дискретное измерение мгновенных значений фазного тока провода сети, преобразования мгновенных значений токов в действующие значения фазного тока, определения среднего действующего значения тока, определения кратности тока K_i , которая равна отношению среднего действующего значения тока к допустимому действующему

щему току проводника, определения текущего перегрева провода, отключения защищаемого участка сети при превышении значений определенных параметров над допустимыми, дополнительно определяются установившийся перегрев провода, постоянная времени нагрева провода и прогнозируемое время допустимой перегрузки при кратности тока K_i больше единицы.

При этом текущий перегрев провода определяется по зависимости:

$$\tau = \tau_{уст} - (\tau_{уст} - \tau_i) \cdot \exp\left(\frac{-\Delta t}{T_H}\right), \quad (4.1)$$

где τ — текущий перегрев провода, °С; $\tau_{уст}$ — установившийся перегрев провода, °С; τ_i — текущий перегрев провода на предыдущем шаге дискретизации по времени, °С, Δt — шаг дискретизации по времени, с; T_H — постоянная времени нагрева, с.

Прогнозируемое время допустимой перегрузки определяют по зависимости:

$$t_{off} = -T_H \cdot \ln\left(\frac{\tau_{уст} - \tau_{off}}{\tau_{уст} - \tau}\right), \quad (4.2)$$

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

Затем прогнозируемое время допустимой перегрузки t_{off} сравнивают с допустимым временем отключения T_{off} , и если $t_{off} \leq T_{off}$, производят автоматическое отключение защищаемого участка сети, в противном случае t_{off} сравнивают с временем предупреждения T_{warn} , и при $t_{off} \leq T_{warn}$ подается предупреждающий сигнал про возможность повреждения провода [100].

Целесообразно установившийся перегрев определять по зависимости:

$$\tau_{уст} = \tau_{\Theta} \cdot K_i^2 = C_0 \cdot I^2, \quad (4.3)$$

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

Постоянную времени нагрева провода можно определить по зависимости:

$$\begin{cases} T_H = T_{H0} + (T_{H1} - T_{H0}) \cdot K_i^2, & K_i \leq 1, \\ T_H = T_{H1} + C_1 \cdot (K_i - 1) + C_2 \cdot (K_i^2 - 1) & K_i > 1; \end{cases} \quad (4.4)$$

где $T_{н0}$ и $T_{н1}$ — постоянные времени нагрева при $K_i = 0$ и $K_i = 1$ соответственно; C_0, C_1, C_2 — эмпирические коэффициенты, зависящие от материала провода и способа его прокладки (таблица 4.3).

Таблица 4.3 – Пояснения к уравнениям (4.3), (4.4)

Марка КППП		C_0	$T_{н0}$	$T_{н1}$	C_1	C_2
ПВС	2x1,5	0,103	237,72	426,53	-79,547	6,8
	2x2,5	0,05	250	286,47	-40,105	3,025
	2x4	0,022	174	187,23	-13,06	0,714
АВВГ	2x2,5	0,103	250	286,47	-40,105	3,025
	2x4	0,048	160	187,2	-13,01	0,714

Суть разработанного способа поясняется рисунками, где на рисунке 4.9 представлена блок-схема алгоритма защиты распределительной электрической сети от токов перегрузки; на рисунке 4.10 — зависимость установившегося перегрева провода от кратности тока (пунктиром обозначен условный установившийся перегрев, которого достиг бы провод при отсутствии его плавления, необходимый для реализации тепловой модели); на рисунке 4.11 — зависимость постоянной времени нагрева провода от кратности тока.

Способ защиты распределительной электрической сети от токов перегрузки осуществляют следующим образом.

В качестве провода защищаемой части сети используют, например, медный двухжильный провод с поливинилхлоридной изоляцией сечением 2,5 мм², проложенный в условиях открытой прокладки. Осциллограмма тока и нагрева провода представлена на рисунке 4.14 (защитное отключение заблокировано).

Лабораторный образец микропроцессорного защитного устройство (МЗУ) в собранном виде приведено на рисунке 4.12, а стенд для исследований — на рисунке 4.13.

МЗУ с датчиками тока ACS712 [101] на основе эффекта Холла и исполнительным механизмом подключают последовательно в начало защищаемой части сети. В память МЗУ задают исходную информацию, которую настраивают в зависимости от параметров защищаемого провода: способ прокладки, сечение, материал, температура окружающей среды, соответствующая характеристикам нагрева провода из холодного состояния, $\Theta_{off} = 70^\circ\text{C}$ — максимально допустимая температура нагрева провода данного класса изоляции E , из чего следует, что максимально допустимый перегрев провода $\tau_{off} = \Theta_{off} - \Theta_{о.с.} = 70 - 25 = 45^\circ\text{C}$.

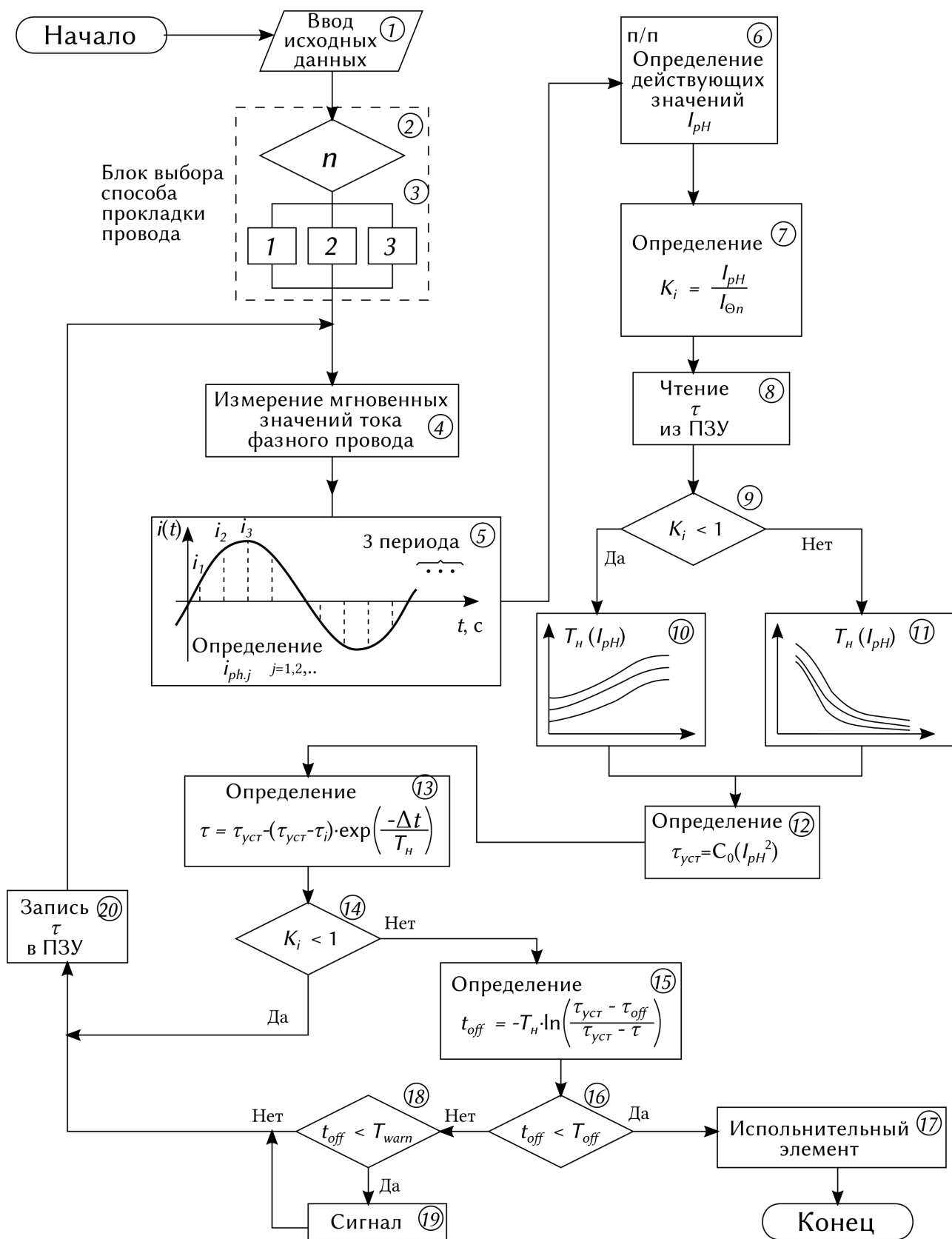


Рисунок 4.9 – Блок-схема алгоритма защиты распределительной электрической сети от токов перегрузки

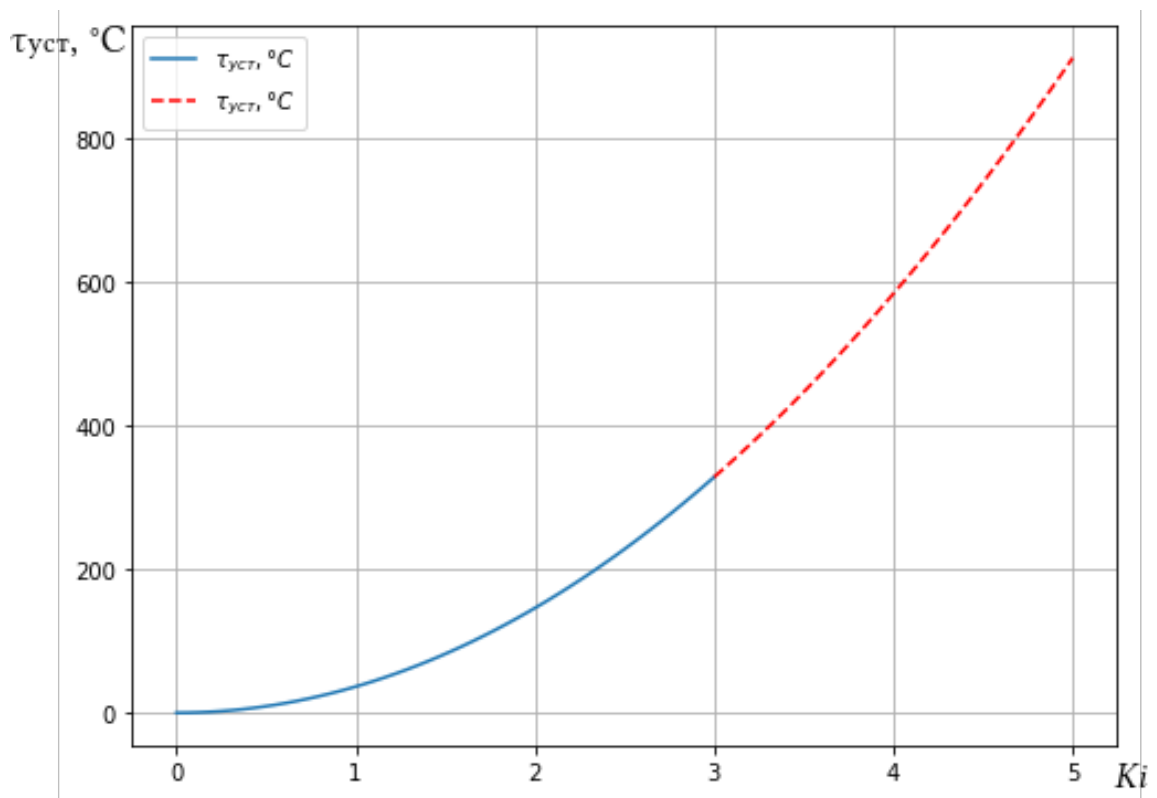


Рисунок 4.10 – Зависимость установившегося перегрева провода ПВС 2x2,5 мм² от кратности тока по отношению к допустимому при открытой прокладке

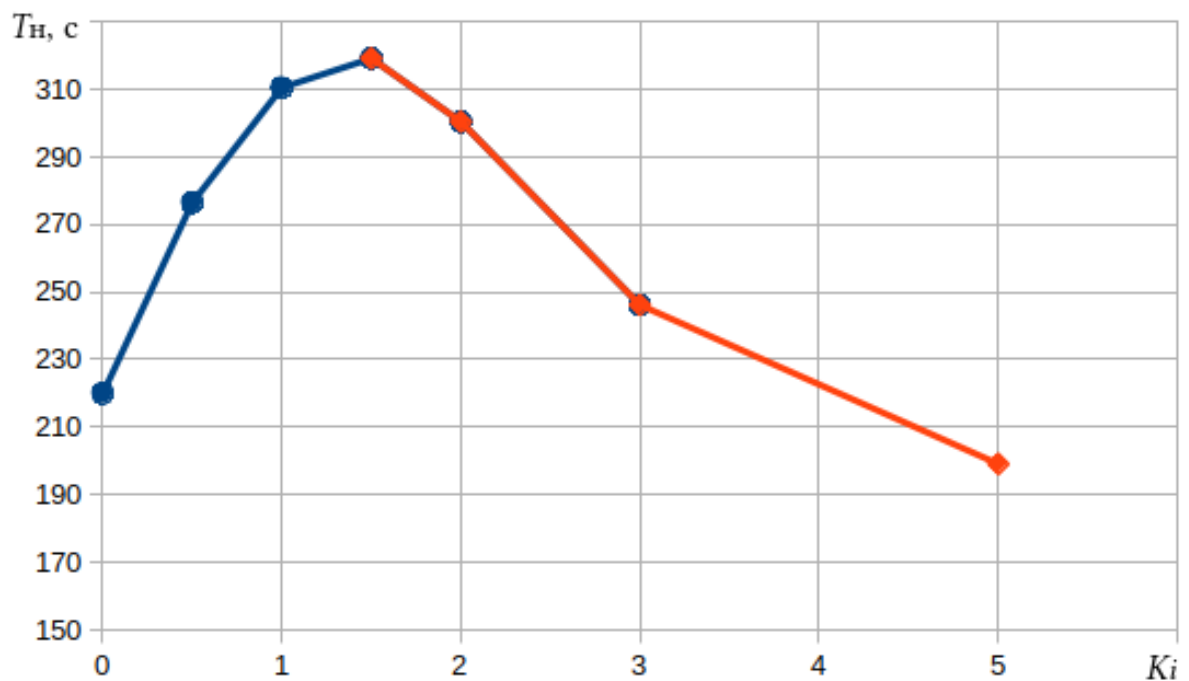


Рисунок 4.11 – Зависимость постоянной времени нагрева провода ПВС 2x2,5 мм² от кратности тока по отношению к допустимому при открытой прокладке

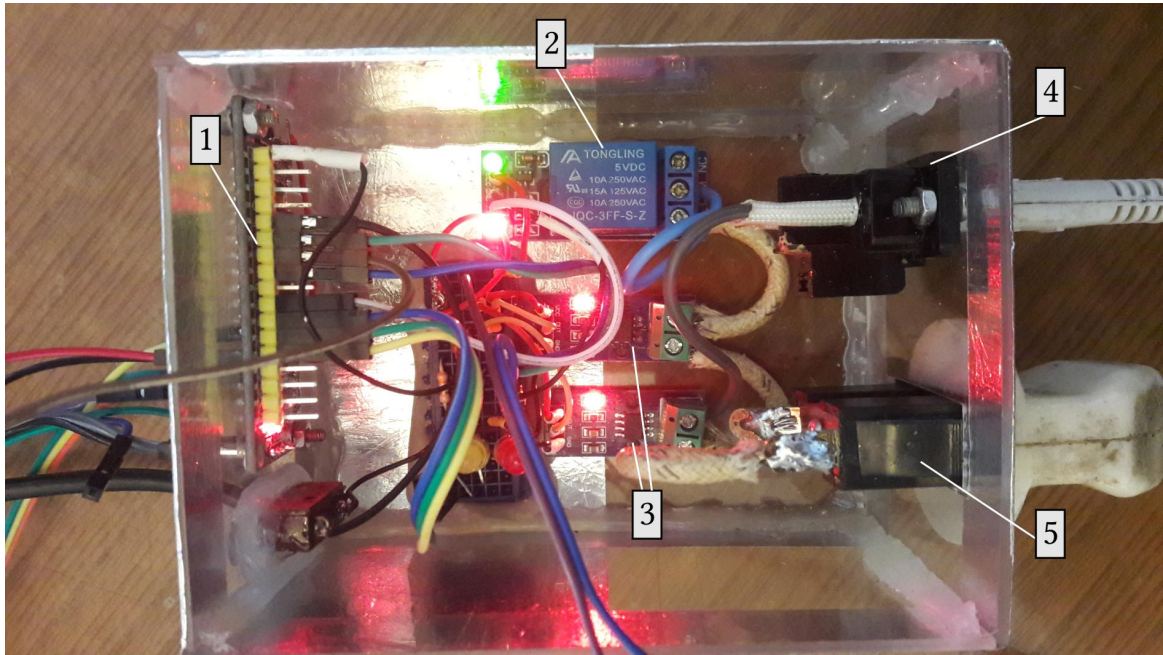


Рисунок 4.12 – Испытуемый образец устройства тепловой защиты: 1 — плата микроконтроллера STM32F103C8T6; 2 — выходное реле JQC-3FF-S-Z 220 В/10 А; 3 — датчик тока ACS712 30 А; 4 — входной зажим; 5 — выходной зажим

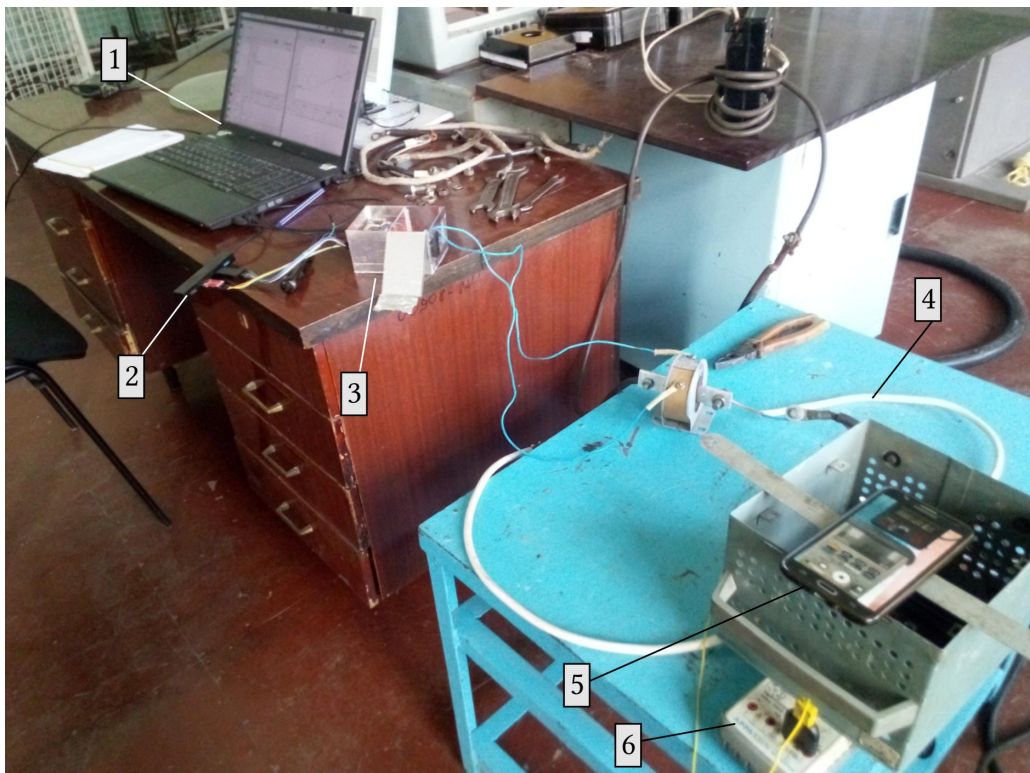


Рисунок 4.13 – Стенд для проведения экспериментов: 1 — ПК; 2 — программатор МК; 3 — тестируемый МПТЗ; 4 — исследуемый проводник; 5 — видеосъемка показателей термопары; 6 — мультиметр АРРА 109N.

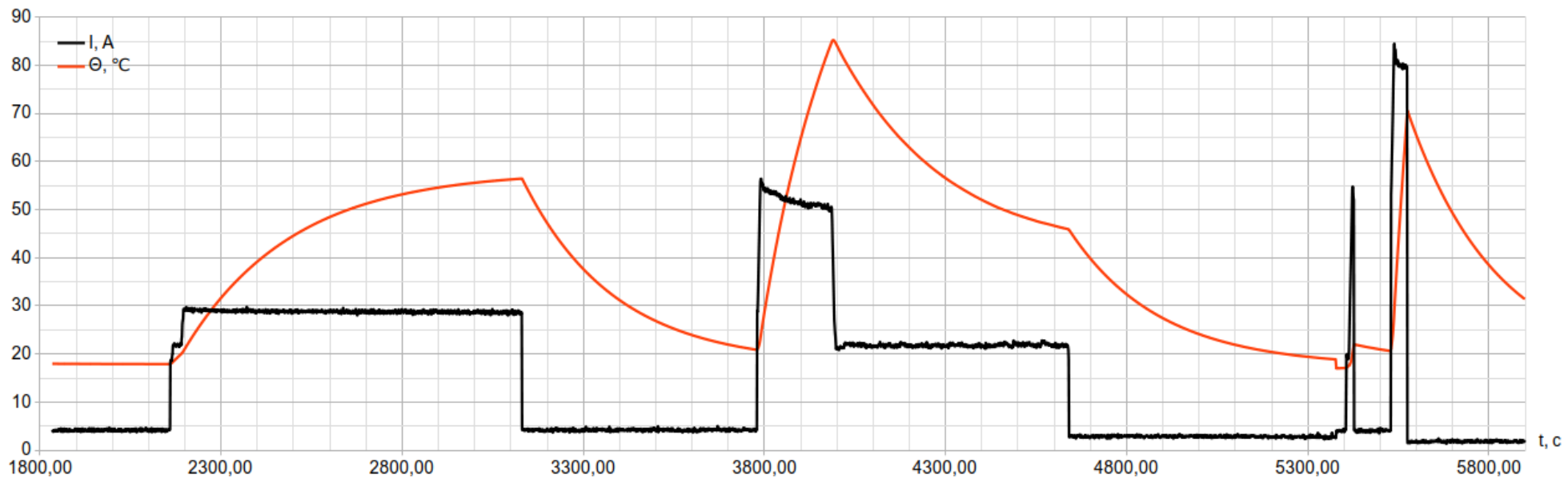


Рисунок 4.14 – Осциллограмма тока и температуры нагрева провода

С помощью МЗУ осуществляют дискретные измерения мгновенных значений фазного тока провода сети. Измерения проводят в течение 3-х периодов промышленной частоты, при этом за один период 20 мс выполняют 10 измерений с шагом дискретизации, равным 2 мс.

Затем осуществляют преобразование измеренных мгновенных значений токов в действующее значение тока фазного провода [102] и определяют кратность тока K_i , равную отношению действующего значения тока к номинальному значению тока 30 А, которая составляет, например, $K_i = 68/30 = 2,27$. В таблице 4.4 представлены допустимые значения токов проводов с алюминиевыми и медными жилами сечением 1,5...6 мм² для различных способов прокладки: $n = 1$ — открытые условия прокладки, $n = 2$ — двухжильный провод в трубе, $n = 3$ — трехжильный провод в трубе.

Таблица 4.4 – Настройка МПТЗ в зависимости от способа прокладки, сечения и материала кабеля (провода)

Материал защищаемого провода/сечение, мм ²	Номинальный ток эквивалентного АВ с $I_{н.а.}$, А	Номинальное значение тока (уставка) МЗУ, А		
		$n = 1$	$n = 2$	$n = 3$
		$I_{\Theta 1}$	$I_{\Theta 2}$	$I_{\Theta 2}$
Медь / 1,5	16	23	18	15
Медь / 2,5	25	30	25	21
Медь / 4	32	41	32	27
Алюминий / 2,5	16	24	19	16
Алюминий / 4	25	32	25	21
Алюминий / 6	32	39	31	26

При инициализации МПТЗ задается исходная информация, которая настраивается в зависимости от типоразмера и способа прокладки провода или кабеля (таблица 4.4).

По предлагаемым зависимостям определяют установившийся перегрев провода, равный 231 °С, что превышает максимально допустимый перегрев провода, и постоянную времени нагрева провода, которая составляет $T = 289$ с.

Затем определяют текущий перегрев провода по зависимости (4.1), который при условии неизменности тока через 15 с относительно начального перегрева провода, равного 20 °С, составляет - 30,6 °С, через 25 с. - 37,5 °С, а через 36,2 с - 44,84 °С. Значение текущего перегрева записывают в постоянную память МЗП.

Далее определяют прогнозируемое время допустимой перегрузки по

зависимости (4.2). Затем определяют прогнозируемое время допустимой перегрузки по зависимости 4.2, значение которого соответственно составляет 21,6 с, 11,4 с и 0,25 с.

Прогнозируемое время допустимой перегрузки сравнивают с допустимым временем отключения T_{off} (время действия исполнительного механизма с учетом запаса $\approx 0,4$ с.), и при $t_{off} = 0,25$ с, то есть $t_{off} \leq T_{off}$, осуществляют автоматическое отключение защищаемой части сети, оказывая влияние на исполнительный механизм МЗУ.

При $t_{off} > T_{off}$ (21,6 и 11,4 с), прогнозируемое время допустимой перегрузки t_{off} сравнивают со временем предупреждения $T_{warn} (> 20$ с), и в случае $t_{off} \leq T_{warn}$ (11,4 с) подают предупредительный сигнал о возможности повреждения провода, а при $t_{off} > T_{warn}$ (21,6 с) продолжают работу МЗУ.

Таким образом, благодаря оптимизации контроля времятоковых характеристик и динамики теплового режима провода обеспечивается возможность корректного и своевременного отключения защищаемой части сети, обеспечивается предотвращение повреждения провода при токах перегрузки, увеличивая срок эксплуатации распределительной электрической сети. МЗУ при работе по приведенному алгоритму формирует новые, более совершенные по сравнению с существующими, защитные свойства бытовых и коммерческих распределительных сетей в режиме перегрузки электрическим током и при замыканиях через переходное сопротивление или сопротивление электрической дуги.

Принципиальная схема устройства, реализующего разработанный способ защиты электрической сети от перегрузки поясняется на рисунке 4.15.

Принципиальная схема устройства МПТЗv1.0 (рисунок 4.15) работает следующим образом.

После проведения монтажных работ — подключения через выводы NEUT и LINE в разрез фазного проводника и источника питания PS1 220/5 В устройство МПТЗv1.0 готово к эксплуатации.

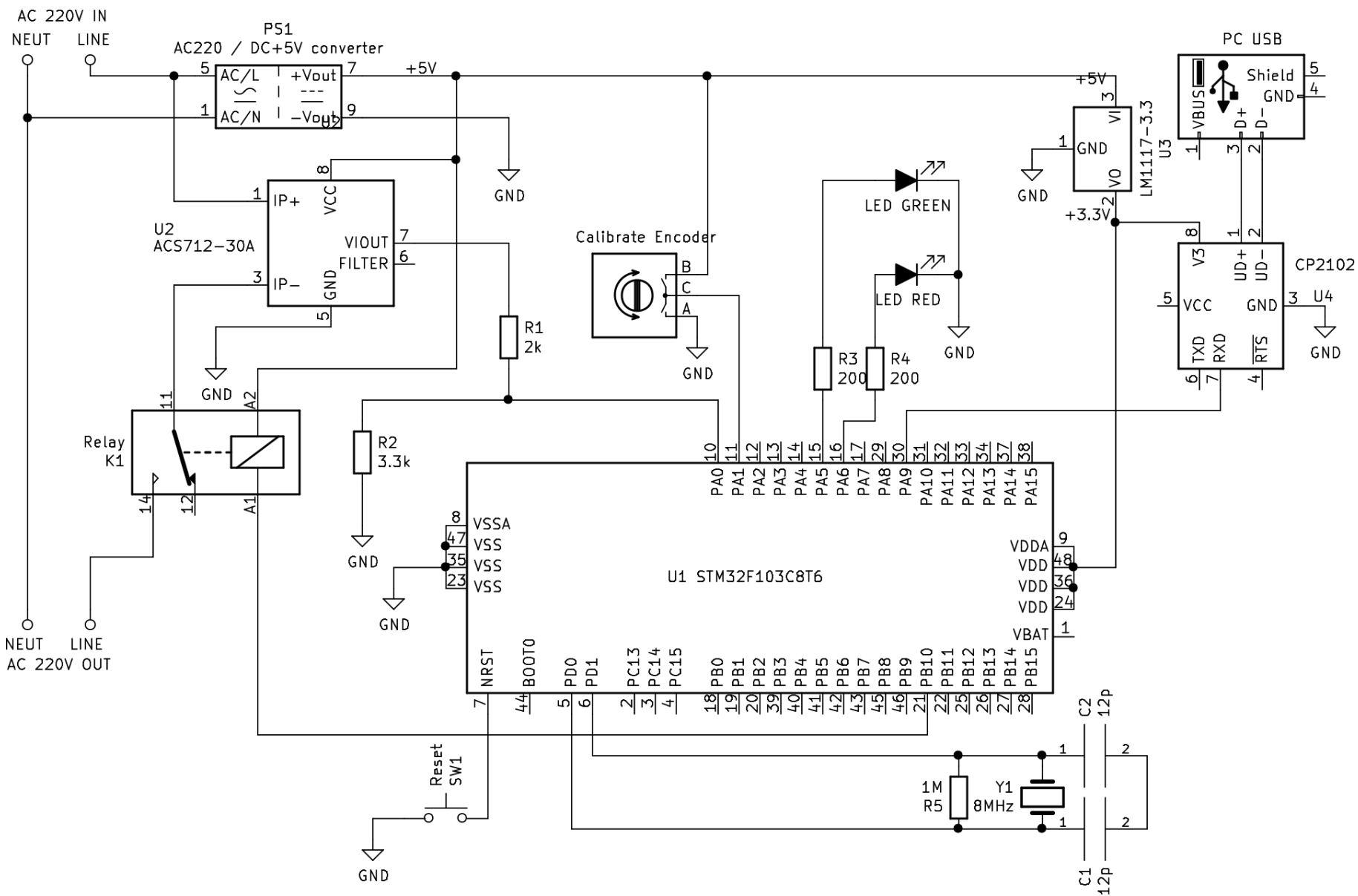


Рисунок 4.15 – Принципиальная схема устройства МПТЗv1.0

В каждом из проводов, подключенных к аппарату защиты однофазной электрической сети (фазном и нейтральном), или только в фазном проводе выполняют измерение токов (рисунок 4.15, датчик тока $U2$) и их аналогово-цифровое преобразование в дискретные значения $i_{ph.j}$ (микроконтроллер $U1$, порт $PA1$), затем определяют действующие значения тока I_{ph} методом интегрирования квадратов дискретных значений $i_{ph.j}^2$ и определяют коэффициент, равный отношению значения тока I_{ph} и тока уставки тепловой защиты I_{Θ} , как $K_i = I_{ph}/I_{\Theta}$.

Отдельные вычислительные и логические операции, которые выполняет МПТЗ, реализуются программно.

Рассмотрим особенности применения полученной защитной характеристики МПТЗ для наиболее широко используемых в электроустановках сетей жилых, административных и коммерческих зданий кабельно-проводниковых изделий типов ПВС (аналогичны ВВГ), ШВВП, АВВГ, АППВ. Они отличаются конструкцией (плоские, круглые), толщиной и составом изоляции. В частности, провод ШВВП с однослойной изоляцией имеет меньшую постоянную времени нагрева и требует применения дополнительной защитной характеристики. Необходимо учесть и разброс в данных измерений температуры жил, вызванный особенностями проведения экспериментов (рисунок 4.16).

Для устранения этих погрешностей защитной характеристики предлагается в выражениях (4.1), (4.2) учитывать коэффициент запаса $K_3 = 1,2$ или $1,4$ и находить установившийся перегрев провода как $\tau_{уст}/K_3$, а постоянную времени нагрева (охлаждения) как $T_1 \cdot K_3$.

Для оценки характеристик устройства МПТЗv1.0 в номинальном режиме (нагрев-охлаждение) и в режиме перегрузки по току было проведено экспериментальное исследование, состоящее в исследовании температурного нагрева жилы кабеля в точке его контакта с изоляцией (рисунок 4.1), измеренное по методике, изложенной в п. 4.1 и температуры нагрева, рассчитанные с помощью тепловой модели МПТЗv1.0 (рисунки 4.10, 4.11) и сохраненные в память ПК с использованием мостового контроллера USB-UART CP2102 в оболочке SVisual v107.

Программа для МК STM32F103C8T6 [103] написана на языке программирования Rust v1.31 и загружалась во Flash-память с помощью программатора ST-Link v2.0 [104].

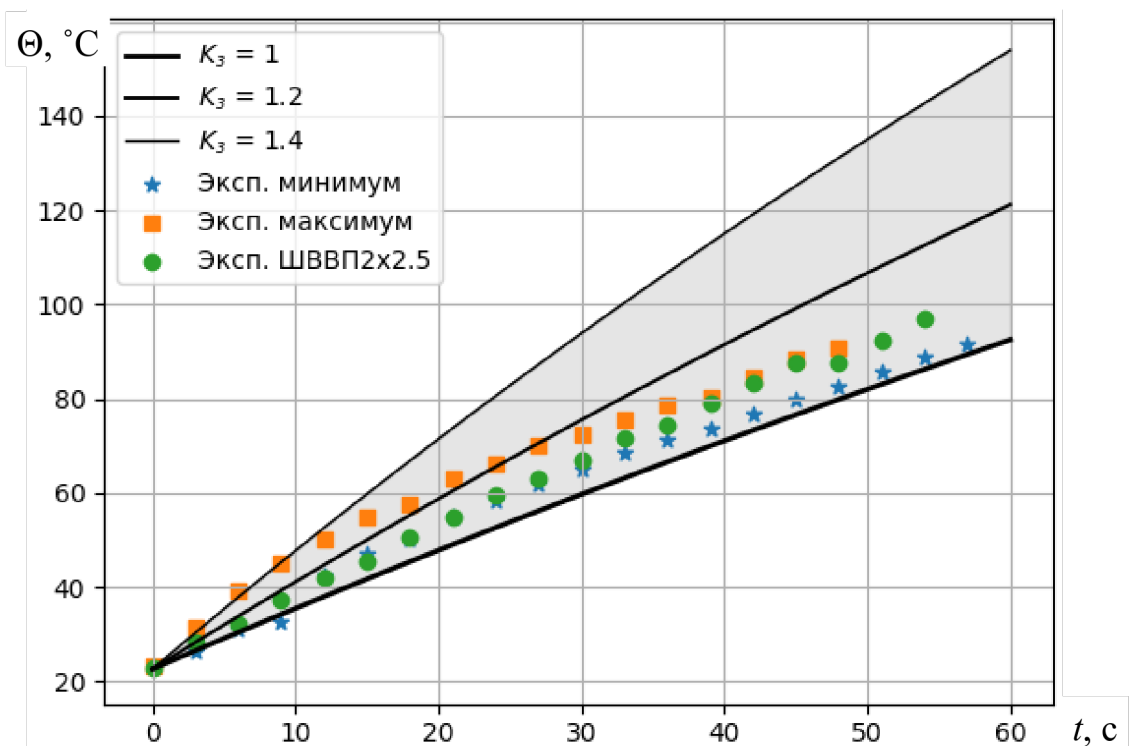
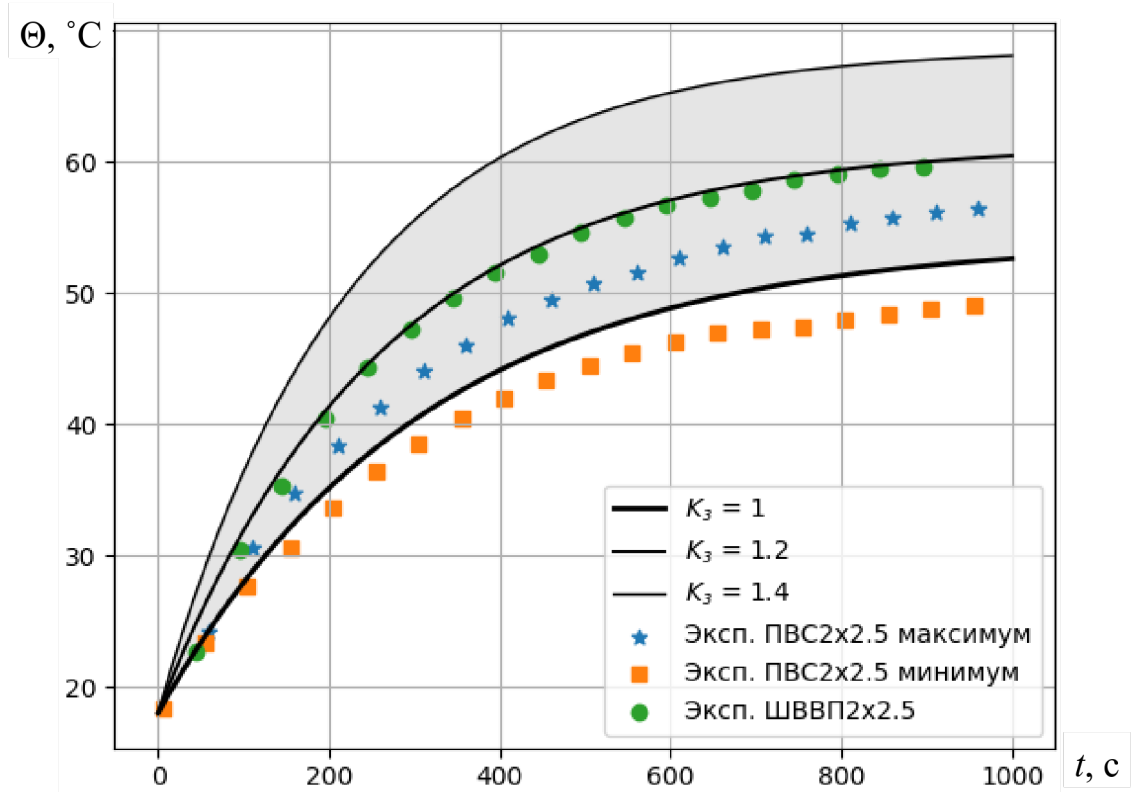


Рисунок 4.16 – Корректировка защитных характеристик МПТЗ для двухжильных медных проводов сечением 2,5 мм²: а — $K_i = 1$; б — $K_i = 3$

Результаты экспериментов, проведенных с медным двухжильным проводом ПВС 2x2,5 мм², имеющим ПВХ изоляцию в условиях открытой прокладки проиллюстрирован осциллограммами тока I и температуры нагрева Θ (рисунок 4.14).

Из них можно сделать вывод о совпадении режимов изменения тока и соответствующего направления смены температурных режимов нагрев-охлаждение провода.

4.4 Выводы по разделу 4

1. Проведены экспериментальные исследования в области зависимости стойкости ПВХ изоляции современных низковольтных электрических сетей (НЭС) к перегрузкам, получены зависимости интервалов времени до плавления ПВХ изоляции при разной кратности токов перегрузок для наиболее распространенных кабельных изделий, а именно силовых кабелей марок ВВГ 2x1,5...2x4 мм² и АВВГ 2x2,5...2x4 мм², проводов установочных марки ППВ 2x1,5...2x4 мм² и АППВ 2x2,5...2x4 мм², шнура соединительного марки ШВВП 2x0,75...2x2,5 мм² и провода соединительного марки ПВС 2x0,75...2x4 мм². Это позволило расширить классическое представление о поведении ПВХ изоляции в номинальных и аварийных режимах эксплуатации.

2. Широко используемые кабельно-проводниковые изделия типов ПВС, ВВГ, ШВВП, АВВГ, АППВ имеют конструктивные отличия (однослойная/двухслойная изоляция, плоский/круглый), поэтому их установившиеся температуры нагрева подвержены разбросу до $\pm 66,7\%$, причем этот разброс возрастает при увеличении K_i .

3. Разработан и изготовлен лабораторный образец микропроцессорной тепловой защиты (МПТЗ), которая позволяет предотвращать опасное действие режимов сверхтоков (перегрузки и *к. з.* через большие переходные сопротивления) в электрической проводке 220 В и увеличивать срок их эксплуатации за счет оптимизации контроля ВТХ и динамики теплового режима провода, что дает возможность обеспечить своевременное отключение защищаемого участка цепи.

4. Получены зависимости установившегося перегрева $\tau_{уст}$ и постоянной времени нагрева T_H проводов ПВС 2x1,5...2x4, АВВГ 2x2,5...2x4 от кратности тока K_i по отношению к допустимому при открытой прокладке в виде уравне-

ний (4.3), (4.4) и определены коэффициенты C_0 , C_1 , C_2 этих уравнений.

5. Для учета особенностей характеристик нагрева кабельно-проводниковых изделий, применяемых в жилых и административных зданиях, предлагается в выражениях (4.1), (4.2) учитывать коэффициент запаса $K_3 = 1,2$ или $1,4$ и находить установившийся перегрев провода как $\tau_{уст}/K_3$, а постоянную времени нагрева (охлаждения) как $T_1 \cdot K_3$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация представляет собой завершённую научно-квалификационную работу, в которой на основании выполненных теоретических и экспериментальных исследований решена актуальная научная задача повышения безопасности обслуживающего персонала помещений, в которых эксплуатируются электрические сети 0,38/0,22 кВ с глухозаземленной нейтралью, путем раскрытия закономерности проявления перегрузок и к. з. в электрической сети, совершенствования защитной функции, что позволило достичь нормируемой отраслевыми документами вероятности возникновения аварийной ситуации, а также обосновать параметры тепловой защиты электрических сетей с возможностью непрерывного мониторинга их теплового состояния.

Полученные в диссертации результаты позволяют сформулировать следующие выводы:

1. Статистика пожаров показывает, что на территории Донецкой Народной Республики в 2016 г. произошло 5513 пожаров. Из них 11,1% возгораний произошло вследствие нарушения правил устройства и эксплуатации электроустановок. В России из 40390 общего количества пожаров от электроустановок, на которых погибло 1765 человек, 29731 (73,61%) связаны с электрическими проводками и кабельными линиями (данные 2017 г.). Что показывает необходимость совершенствования методов и средств защиты от указанных опасных для персонала факторов в электроустановках.

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 двужильных 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 сходи-

мость 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 воспламенению горючих материалов [84], 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 (алюминий, медь, сталь), 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_3 , который изменяет вид температурно-токовой защитной характеристики МПТЗ и согласовывает ее с типом провода или кабеля.

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

к. з. — короткое замыкание;

ПКЗ — продолжительное короткое замыкание;

НПУЭЭ — нарушение правил устройства и эксплуатации электрооборудования

ЭП — электрическая проводка;

УЗО — устройство защитного отключения;

МПТЗ — микропроцессорная тепловая защита;

КППП — кабельно-проводниковая продукция;

ЗКА — защитный коммутационный аппарат;

ПВХ — поливинилхлорид;

ССБТ — Система стандартов безопасности труда;

ПУЭ — Правила устройства электроустановок;

Θ — температура, $K(^{\circ}C)$; $\Theta_{кр}$ — критическая температура воспламенения, $K(^{\circ}C)$;

d_p — эквивалентный диаметр горячей частицы, м;

ρ — плотность, $кг/м^3$;

c — теплоемкость, $Дж/(кг \cdot K)$;

α — коэффициент теплоотдачи, $Вт/(м^2 \cdot K)$;

$\lambda_1; \lambda_2$ — параметры потока появления *к. з.* в подконтрольных узлах нагрузки и повреждений автоматической системы отключения ЗКА;

Θ_F — интервал времени между диагностикой системы отключения защитного коммутационного аппарата;

$Q(t)$ — вероятность появления пожаров в электрифицированном помещении в течение времени t ;

$Q^*(t)$ — вероятность появления продолжительного дугового *к. з.* в узле нагрузки;

τ — перегрев провода, $^{\circ}C$; $\tau_{уст}$ — установившийся перегрев провода, $^{\circ}C$;

T_n — постоянная времени нагрева, с.

Δt — шаг дискретизации по времени, с;

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бершадский, И. А.* Анализ статистики пожаров по электротехническим причинам и состояния устройств защиты в сетях 0,4 кВ [Текст] / И. А. Бершадский, А. В. Згарбул // Пожарная безопасность. — 2017. — № 4. — С. 119—125.
2. *Маслов, А. В.* Разработка методов и способов повышения пожарной безопасности распределительных сетей до 1 кВ на промышленных предприятиях [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.09.03 / Маслов Альберт Владимирович. — Москва : Московский энергетический институт, 2006. — 128 с.
3. *Смелков, Г. И.* Анализ статистических данных о пожарной опасности электрических изделий [Текст] / Г. И. Смелков, А. И. Рябиков // Энергобезопасность и энергосбережение. — 2009. — 1(25). — С. 4—8.
4. *Костюков, А. Ф.* Некоторые методы профилактического контроля состояния установочных электропроводок [Текст] / А. Ф. Костюков // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. — 2014. — 2(112). — С. 129—131.
5. *Смелков, Г. И.* Пожарная безопасность электропроводок [Текст] / Г. И. Смелков. — Москва : ООО "КАБЕЛЬ", 2009. — 328 с.
6. *Полухин, О. В.* Автоматизированный метод исследования пережигающего действия дугового короткого замыкания [Текст] / О. В. Полухин // Ползуновский вестник. — 2012. — № 4. — С. 116—120.
7. Пожары и пожарная безопасность в 2017 году: Статистический сборник [Текст] / под ред. Д. М. Гордиенко. — Москва : ВНИИПО, 2018. — 125 с.
8. *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.

9. *Гудим, В. І.* Аналіз стану та причин виникнення пожеж електричного походження у побутовому секторі [Текст] / В. І. Гудим, П. Г. Столярчук, Ю. І. Рудик // Пожежна безпека: Збірник наукових праць. — Львів, 2004. — № 5. — С. 116—121.
10. *Коваль, О. М.* Технічні засоби підвищення рівня пожежної безпеки побутових електромереж [Текст] / О. М. Коваль // Пожежна безпека: Збірник наукових праць. — Львів, 2007. — № 11. — С. 11—16.
11. *Смелков, Г. И.* Возникновение пожаров от коротких замыканий в электропроводах [Текст] / Г. И. Смелков, П. А. Фетисов. — М. : Стройиздат, 1989. — С. 11—65.
12. *Markiewicz, H.* Bezpieczenstwo elektroenergetyce. Zagadnienia wybrane [Текст] / H. Markiewicz. — Warszawa : Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 2002. — 379 с.
13. *Омельченко, В. Т.* Теория процессов на контактах [Текст] / В. Т. Омельченко. — Харьков : Высшая школа. Изд-во Харьк. ун-те, 1979. — 128 с.
14. *Веревкин, В. Н.* Пожарная опасность электрических контактов и контактных соединений [Текст] / В. Н. Веревкин, Г. И. Смелков. — М. : Изд-во «ПТФ-МИЭЭ», 2009. — 140 с.
15. Вплив якості на технології монтажу ізолюваних проводів і кабелів на пожежну небезпеку електрифікованого об'єкта [Текст] / С. В. Сольоний [и др.] // Науковий вісник УкрНДІПБ. — 2011. — 2(24). — С. 145—150.
16. *Пат. на винахід 80325 Україна, МПК(2006) G01R 27/02, G01R 31/08.* Аналіз опору двопровідних електричних мереж до 1000 В [Текст] : 80325 Україна / В. І. Гудим [и др.]. — № а200508664 ; заявл. 12.09.2005 ; опубл. 10.09.2007, Бюл. № 14. — 5 с. : ил.
17. *Babrauskas, V.* Fires due to Electric Arcing: Can 'Cause' Beads Be Distinguished from 'Victim' Beads by Physical or Chemical Testing? [Text] / V. Babrauskas // Fire and Materials. — 2003. — P. 189–201.
18. *Koller, L.* Heating effects of short-circuit current impulses on contacts and conductors - Part I [Text] / L. Koller, B. N6vak, G. Tevan // IEEE Transactions on Power Delivery. — 2008. — Vol. 23, no. 1. — P. 221–227.

19. *ГОСТ 12.1.004-91*. ССБТ. Пожарная безопасность. Общие требования [Текст]. — Взамен ГОСТ 12.1.004-85 ; введ. 01.07.92. — М. : Изд-во стандартов, 1992. — 77 с.
20. Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности: приказ МЧС России от 30.06.2009 №382 (в ред. Приказов МЧС России от 12.12.2011 №749 и от 02.12.2015 №632). [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_90833.
21. Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах: приказ МЧС РФ от 10.07.2009 №404 (в ред. приказа МЧС РФ от 14.12.2010 №649) [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_91229.
22. *ГОСТ 12.1.044-89*. ССБТ. Пожаровзрывобезопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения [Текст]. — Взамен ГОСТ 12.1.044-84 ; введ. 01.01.91. — М. : ФГУП "Стандартинформ", 1989. — 100 с.
23. *ГОСТ Р 50571.15-97*. Электроустановки зданий. Часть 5. Выбор и монтаж электрооборудования. Глава 52. Электропроводки [Текст]. — Введ. 01.07.97. — М. : ИПК Издательство стандартов, 2004. — 15 с.
24. *Соболев, Н. П.* Исследование электрического взрыва тонких проволочек [Текст] / Н. П. Соболев // ЖЭТФ. — 1947. — Т. 17, Л1. — С. 986—997.
25. *Рубис, А. С.* Математическая проверка версии возникновения пожара от искр, образовавшихся в результате проведения огневых работ и аварийных режимов электросети / А. С. Рубис, А. М. Анисяев // Теорія та практика судової експертизи і криміналістики. — 2010. — С. 499—504.
26. Установление причины пожара. Применяемые методы. — Информационное письмо / НИИ пожарной безопасности и проблем чрезвычайных ситуаций. — Минск, 2002.
27. *Мыльников, М. Т.* Общая электротехника и пожарная профилактика в электроустановках: Учебник для пожарно-технических училищ [Текст] / М. Т. Мыльников. — Москва : Стройиздат, 1985. — 311 с.

28. *Методические рекомендации. Экспертное исследование после пожара контактных узлов электрооборудования в целях выявления признаков больших переходных сопротивлений* [Электронный ресурс]. — Введ. 09.06.2008. — ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2008.
29. *Schweber, B. e-Fuses, Part 2: Building or buying an e-Fuse* [Электронный ресурс] / B. Schweber. — 2018. — Режим доступа: <https://www.analogictips.com/e-fuses-part-2-building-buying-e-fuse-faq/>.
30. *Гельман, М. В. Преобразовательная техника. Учебное пособие* [Текст] / М. В. Гельман, Н. М. Дудкин, К. А. Преображенский. — Челябинск : Издательский центр ЮУрГУ, 2009. — 425 с.
31. *Алексамян, И. Э. Комбинированное устройство защиты электроустановок сельскохозяйственного назначения* [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.20.02 / Алексамян Ирина Эдуардовна. — Брянск : Брянская государственная сельскохозяйственная академия, 2013. — 171 с.
32. *Компанеец, Б. С. Оценка противопожарной эффективности предохранителей в электроустановках зданий* [Текст] / Б. С. Компанеец // Вестник КрасГАУ. — 2012. — № 1. — С. 167—170.
33. *Ярошик, С. Типы и характеристики и устройство автоматических выключателей* [Электронный ресурс] / С. Ярошик. — 2015. — Режим доступа: https://electrica-shop.com.ua/articles/84.tipi_i_harakteristiki_avtomaticheskikh_viklyuchateley.
34. *Аушев, И. Ю. Выбор аппаратов защиты электропроводок с учетом времятоковых характеристик* [Текст] / И. Ю. Аушев // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ - Энергетика : научно-технический и производственный журнал. — 2009. — № 3. — С. 35—41.
35. *Аушев, И. Ю. Анализ существующей методики выбора аппаратов защиты с точки зрения обеспечения пожарной безопасности электропроводки* [Текст] / И. Ю. Аушев // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. — 2008. — 2(24). — С. 71—81.
36. *Бершадский, И. А. Разработка САПР для проектирования электроснабжения цеха на напряжении 0,4 кВ* [Текст] / И. А. Бершадский, А. П. Ковалёв, А. В. Згарбул // ЭЛЕКТРО. — 2015. — № 4. — С. 47—52.

37. *Аушев, И. Ю.* Влияние времятоковой характеристики аппаратов защиты на пожарную безопасность кабельных изделий [Текст] / И. Ю. Аушев // Вестник БНТУ. — 2010. — № 1. — С. 62—67.
38. *Аушев, И. Ю.* Влияние времятоковой характеристики аппаратов защиты на пожарную безопасность кабельных изделий [Текст] / И. Ю. Аушев // Вестник БНТУ. — 2010. — № 1. — С. 62—68.
39. *Гужов, Н. П.* Системы электроснабжения: Учебное пособие [Текст] / Н. П. Гужов, В. Я. Ольховский, Д. А. Павлюченко. — Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2006. — 154 с.
40. *Babrauskas, V.* Mechanisms and modes for ignition of low-voltage PVC wires, cables, and cords [Text] / V. Babrauskas, F. Science // Fire & Materials 2005. — 2005. — October. — P. 291–309.
41. *Черкасов, В. Н.* Пожарная опасность электропроводок при аварийных режимах [Текст] / В. Н. Черкасов, Н. П. Костарев. — Москва : Энергоатомиздат, 2002. — 377 с.
42. *Айзенберг, Б. И.* Защита электрических установок плавкими предохранителями [Текст] / Б. И. Айзенберг. — Москва : Госэнергоиздат, 1963. — 127 с.
43. *Ежиков, Н. И.* Разработка устройства интеллектуальной защиты участка электросети : тех. отч. / Н. И. Ежиков. — 2018. — 35 с.
44. *Kotb, M. F.* Over Current Protection Relay using Arduino Uno for Future Renewable Electric Energy Delivery and Management (FREEDM) System [Text] / M. F. Kotb, M. El-Saadawi, E. H. El-Desouky // European Journal of Electrical Engineering and Computer Science. — 2018. — Vol. 2, no. 5. — P. 38–44.
45. *Hazel, T. G.* Implementing Back-Up Protection Using Microprocessor Based Multifunction Relays [Text] / T. G. Hazel, J. Tastet, B. Lusson. — 2001.
46. *Зализный, Д. И.* Математическая модель тепловых процессов одножильного силового кабеля [Текст] / Д. И. Зализный // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. — 2012. — № 1. — С. 25—34.

47. Математическое моделирование тепловых процессов в силовых кабелях с пластмассовой изоляцией [Текст] / Д. И. Зализный [и др.] // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого. — 2009. — № 3. — С. 65—75.
48. Сапунков, М. Л. Устройство адаптивной токовой защиты электрических сетей от однофазных замыканий на землю [Текст] / М. Л. Сапунков, Д. Н. Пеленев, Р. И. Мухаметшин // Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. — 2013. — № 6. — С. 128—133.
49. Super-fast electronic circuit breaker [Text] / A. Gupta [et al.] // International Journal of Novel Research in Electrical and Mechanical Engineering. — 2016. — Vol. 3, no. 1. — P. 29–34.
50. ГОСТ Р МЭК 60949–2009. Расчет термически допустимых токов короткого замыкания с учетом неадиабатического нагрева [Текст]. — Введ. 27.12.02. — М. : Стандартинформ, 2009. — 12 с.
51. Коваль, О. М. Вплив елементів та структури внутрішніх електричних мереж житлового сектору на їх пожежну небезпеку [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 21.06.02 / Коваль Олександр Мирославович. — Київ : Український науково-дослідний інститут пожежної безпеки, 2008. — 162 с.
52. Бершадский, И. А. Математическая модель зажигания горючих веществ частицами металла, образующимися при КЗ в электропроводке [Текст] / И. А. Бершадский, А. В. Згарбул, Н. М. Халявинская // Вестник СПб университета ГПС МЧС России. — 2018. — № 3. — С. 54—64.
53. Юрків, Б. М. Математичне моделювання процесів нагрівання провідників внутрішніх електричних мереж житлових та громадських будівель [Текст] / Б. М. Юрків, В. І. Гудим, О. Б. Назаровець // Пожежна безпека. — 2015. — № 26. — С. 59—64.
54. Бухмиров, В. В. Расчет коэффициента конвективной теплоотдачи (основные критериальные уравнения) [Текст] / В. В. Бухмиров. — Иваново : Ивановский государственный энергетический университет, 2007. — 39 с.

55. *Аушев, И. Ю.* Предотвращение пожароопасного действия электрического тока в электропроводах напряжением 220 В [Текст] / И. Ю. Аушев // Вестник командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. — 2013. — 2(18). — С. 73—80.
56. *Аушев, И. Ю.* Динамика нагрева многожильного изолированного проводника электрическим током [Текст] / И. Ю. Аушев, Ю. А. Станкевич, К. Л. Степанов // Вестник командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. — 2012. — 2(16). — С. 87—96.
57. *Бершадский, И. А.* Расчет нестационарного нагрева электропроводки 0,4 кВ [Текст] / 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—36.
58. *Сошников, С. А.* Снижение пожарной опасности коротких замыканий в электроустановках объектов агропромышленного комплекса [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.20.02 / Сошников Сергей Александрович. — Барнаул : Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова, 2008. — 132 с.
59. *Смелков, Г. И.* Методы определения причастности к пожарам аварийных режимов в электротехнических устройствах [Текст] / Г. И. Смелков, А. А. Александров, В. А. Пехотиков. — М. : Стройиздат, 1980. — 58 с.
60. *Греков, С. П.* Реакционная активность органических материалов и их пожароопасность [Текст] / С. П. Греков, П. С. Пашковский, В. П. Орликова // Науковий вісник УкрНДІПБ. — 2015. — Т. 2, вып. 32, № 2. — С. 26—31.
61. *Мареев, В. В.* Основы методов конечных разностей [Текст] / В. В. Мареев, Е. Н. Станкова. — С.-Пб. : Изд-во С.-Петербургского университета, 2012. — 64 с.
62. *Кузнецов, Г. В.* Разностные методы решения задач теплопроводности: учебное пособие [Текст] / Г. В. Кузнецов, М. А. Шеремет. — Томск : Изд-во ТПУ, 2007. — 172 с.

63. *Зюзина, Е.* Консервативные разностные схемы на неравномерных сетках для волнового уравнения [Текст] / Е. Зюзина, П. Матус // *Фізико-математичне моделювання та інформаційні технології*. — 2005. — № 2. — С. 133—142.
64. *Глушков, Д. О.* Об устойчивости зажигания смесового твердого топлива локальным источником ограниченной энергоемкости [Текст] / Д. О. Глушков, Г. В. Кузнецов, П. А. Стрижак // *Физика горения и взрыва*. — 2014. — Т. 50, № 6. — С. 54—60.
65. Зажигание модельных смесевых топливных композиций одиночной, нагретой до высоких температур частицей [Текст] / А. В. Захаревич [и др.] // *Физика горения и взрыва*. — 2008. — Т. 44, № 5. — С. 54—57.
66. *Згарбул, А. В.* Пожарная опасность раскаленных частиц алюминиевых токопроводящих жил при коротких замыканиях в электропроводках [Текст] / А. В. Згарбул, И. А. Бершадский, А. П. Ковалёв // *Вестник института гражданской защиты Донбасса*. — 2016. — 2(6). — С. 21—30.
67. *Ковалёв, А. П.* Оценка пожарной опасности сети 0,4/0,22 кВ при её эксплуатации [Текст] / А. П. Ковалёв, О. Я. Солёная // *Электричество*. — 2014. — № 11. — С. 36—44.
68. *Тихомиров, В. И.* Марковские процессы [Текст] / В. И. Тихомиров, М. А. Маронов. — М. : Сов. радио, 1977. — 489 с.
69. *Ковалёв, А. П.* О проблемах оценки безопасности электротехнических объектов [Текст] / А. П. Ковалёв // *Электричество*. — 1991. — № 8. — С. 50—55.
70. *Броди, С. М.* Расчет и планирование испытаний систем на надежность [Текст] / С. М. Броди, О. Н. Власенко, Б. Г. Марченко. — Киев : Советское радио, 1970. — 192 с.
71. *Сандлер, Д.* Техника надежности систем. Пер. с англ. [Текст] / Д. Сандлер. — М. : Наука, 1966. — 300 с.
72. *Кемени, Д. Ж.* Конечные цепи Маркова [Текст] / Д. Ж. Кемени, Д. Снел. — М. : Наука, 1970. — 271 с.

73. *Ковалёв, А. П.* О причастности коротких замыканий в электрической проводке 0,4/0,22 кВ к пожарам в электрифицированных помещениях [Текст] / А. П. Ковалёв, И. А. Бершадский, А. В. Згарбул // Промышленная энергетика. — 2018. — № 4. — С. 60—65.
74. *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.
75. *Ватин, Н. И.* Определение характеристик сварочных искр для расчета их удаления в циклоне [Текст] / Н. И. Ватин, К. И. Стрелец, М. Б. Китаин // Инженерно-строительный журнал. — 2011. — № 5. — С. 25—31.
76. *Очков, В. Ф.* Дифференциальные уравнения – полет капли воды [Электронный ресурс] / В. Ф. Очков, К. К. Чжо // ВОДООЧИСТКА. ВОДОПОДГОТОВКА. ВОДОСНАБЖЕНИЕ. — 2014. — 3(75). — С. 50—56.
77. *Доля, П. Г.* Основы работы в системе MATLAB [Электронный ресурс] / П. Г. Доля. — Харьков : Харьковский Национальный Университет, 2011. — 204 с.
78. *Иванов, А. В.* Моделирование случайных величин, систем массового обслуживания и случайных процессов. Часть 3 [Текст] / А. В. Иванов, А. П. Иванова. — М. : МИИТ, 2006. — 52 с.
79. *Sutlović, E.* Analysis of conductor clashing experiments [Text] / E. Sutlović, I. Ramljak, M. Majstrovic // Electrical Engineering. — 2019. — Vol. 101, no. 2. — P. 467–476.
80. *Ramljak, I.* Statistical analysis of conductor clashing particles in low-voltage distribution network [Text] / I. Ramljak, E. Sutlović, M. Majstrovic // INFOTEN-JAHORINA. — 2015. — Vol. 14. — P. 284–288.
81. Comparison of Aluminium and Copper Particle Critical Diameter Produced in Overhead Line Conductor Clashing [Electronic Resource] / M. Majstrovic [et al.] // The Role of Exergy in Energy and the Environment / ed. by S. Nižetić, A. Papadopoulos. — Springer International Publishing AG, 2018. — P. 13–26.

82. *Ковалёв, А. П.* Оценка пожарной опасности сети 0,4/0,22 кВ в промышленных электрифицированных помещениях [Текст] / А. П. Ковалёв, О. Я. Солёная // Промышленная энергетика. — 2013. — № 11. — С. 43—46.
83. *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.
84. Методика оценки вероятности возникновения пожароопасных ситуаций в электрифицированных помещениях с напряжением 0,4/0,22 кВ [Текст]. — Донецк : ГОУВПО «ДОННТУ» и НИИГД «Респиратор», 2020. — 40 с.
85. Правила устройства электроустановок. Изд. 7-е [Текст]. — М. : Кнорус, 2015. — 491 с.
86. *Солёная, О. Я.* Прогнозирование, мониторинг и предупреждение возникновения источников возгорания горючего материала в электрифицированных помещениях [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.26.01 / Солёная О. Я. — Донецк : Донецкий национальный технический университет, 2014. — 215 с.
87. Циркуляр № Ц-02-98. О проверке кабелей на невозгорание при воздействии тока короткого замыкания [Текст]. — Минск, 1998.
88. *Грищук, Ю. С.* Автоматический выключатель с микроконтроллерным расцепителем [Текст] / Ю. С. Грищук, Т. В. Сухоставцева // Вестник Нац. техн. ун-та "ХПИ". — 2008. — № 7. — С. 36—40.
89. *Добрянский, М. В.* Устройство токовой защиты на базе микроконтроллера [Текст] / М. В. Добрянский, А. Ю. Ромашкина // Международный студенческий научный вестник. — 2016. — № 2.
90. *Ishwar, A. M.* Microcontroller based electronic circuit breaker [Text] / A. M. Ishwar, B. Santosh // International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET). — 2016. — Vol. 3. — P. 569–571.

91. *ГОСТ Р 50345-2010 (МЭК 60898-1:2003)*. Автоматические выключатели для защиты от сверхтоков бытового и аналогичного назначения [Текст]. — Взамен ГОСТ Р 50345-99 ; введ. 01.01.12. — М. : Стандартинформ, 2011.
92. Электротехнический справочник. Т.2. Электротехнические изделия и устройства [Текст] // / под ред. Под общ. ред. профессоров МЭИ. — М. : Энергоатомиздат, 2003. — С. 359—363.
93. *Пат. на винахід 114380 Україна, МПК(2006) H02H 3/08, H02H 7/00, H01H 73/02*. Спосіб максимального струмового захисту з вибірковою чутливістю до струмів віддалених коротких замикань та пускових струмів асинхронних електродвигунів [Текст] : 114380 / О.С. Кобозєв [и др.]. — № а201605401 ; заявл. 18.05.2016 ; опубл. 25.05.2017, Бюл. № 10.
94. *Пат. на винахід 86078 Україна, МПК(2009) H02H 3/08, H02H 7/00, H01H 73/00*. Спосіб швидкодіючого максимального струмового захисту електричних кіл (варіанти) [Текст] : 86078 / Г. М. Гапоненко, В. В. Омельченко, О. С. Кобозєв. — № а200701189 ; заявл. 05.02.2007 ; опубл. 25.03.2019, Бюл. № 6.
95. *Середа, О. Г.* Захист асинхронних електродвигунів побутових приладів від струмів перевантаження з урахуванням нелінійних спотворень фазного струму [Текст] / О. Г. Середа, І. С. Варшимова // Електротехніка і Електромеханіка. — 2015. — № 3. — С. 14—19.
96. *Арещенко, Б. В.* Разработка алгоритмов устройств интеллектуальной защиты двигателей [Текст] / Б. В. Арещенко // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. — 2008. — 1(17). — С. 100—106.
97. *Яворский, В. П.* Совершенствование алгоритмов защит от перегрузок синхронных генераторов [Текст] / В. П. Яворский // XIX Международная научно-практическая конференция «СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ» Секция 1: Электроэнергетика. — 2013. — С. 113—114.

98. *Бершадский, И. А.* Обоснование способа защиты электрической сети напряжением 220 В от перегрузок с учетом нестационарного нагрева электропроводки [Электронный ресурс] / И. А. Бершадский, А. В. Згарбул, А. А. Кулиш // Вестник Донецкого национального технического университета. — 2019. — 2(16). — С. 71—79.
99. Перспективы создания микропроцессорной защиты от возгораний электропроводки бытовых потребителей [Текст] / 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.
100. *Mnati, M. J.* A smart voltage and current monitoring system for three phase inverters using an android smartphone application [Text] / M. J. Mnati, A. Van den Bossche, R. F. Chisab // Sensors (Switzerland). — 2017. — Vol. 17, no. 4.
101. Fully Integrated, Hall Effect-Based Linear Current Sensor with 2.1 kVRMS Voltage Isolation and a Low-Resistance Current Conductor [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.sparkfun.com/datasheets/BreakoutBoards/0712.pdf>.
102. *Sun, B. B.* Low-cost solution for measuring input power and RMS current [Text] / B. B. Sun // Application Note, Texas Instruments. — 2013.
103. *Огородников, И. Н.* Микропроцессорная техника : введение в Cortex-M3. Учебное пособие [Текст] / И. Н. Огородников. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2015. — 116 с.
104. Практическое руководство по программированию STM-микроконтроллеров [Текст] / С. Н. Торгаев [и др.]. — Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2015. — 111 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Расчет коэффициентов разностной сетки в цилиндрической системе с переменным шагом

Проведем разложение функции температуры в условных точках в ряд Тейлора второй степени.

$$f(z_0 - h_{z-}) = f(z_0) - f'(z_0) \cdot h_{r-} + \frac{1}{2} f''(z_0) \cdot h_{z-}^2 + 0(h_{z-}^2); \quad (\text{A.1})$$

$$f(z_0 + h_{z+}) = f(z_0) + f'(z_0) \cdot h_{r+} + \frac{1}{2} f''(z_0) \cdot h_{z+}^2 + 0(h_{z+}^2). \quad (\text{A.2})$$

Подставим уравнения А.1 и А.2 в выражение $F(z_0) = a_0 f(z_0) + a_1 f(z_0 - h_{z-}) + a_2 f(z_0 + h_{z+})$, где a_0 , a_1 и a_2 — неизвестные коэффициенты.

$$F(z_0) = (a_0 + a_1 + a_2) f(z_0) + (-a_1 h_{z-} + a_2 h_{z+}) f'(z_0) + \frac{1}{2} (a_1 h_{z-}^2 + a_2 h_{z+}^2) f''(z_0) + 0(h_{z-}^2) + 0(h_{z+}^2).$$

Наилучшая аппроксимация будет получена, если a_0 , a_1 и a_2 удовлетворяют системе уравнения:

$$\begin{cases} a_0 + a_1 + a_2 & = 0, \\ -a_1 h_{z-} + a_2 h_{z+} & = 0, \\ \frac{1}{2} (a_1 h_{z-}^2 + a_2 h_{z+}^2) & = 1. \end{cases} \quad (\text{A.3})$$

Введем вспомогательные коэффициенты $k_z = \frac{h_{z+}}{h_{z-}}$ и $k_r = \frac{h_{r+}}{h_{r-}}$.

Для оси z решение выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} a_0 + a_1 + a_2 & = 0, \\ -a_1 h_{z-} + a_2 k_z h_{z-} & = 0, \\ \frac{1}{2} (a_1 h_{z-}^2 + a_2 k_z^2 h_{z-}^2) & = 1. \end{cases}$$

Выразим a_1 из второго уравнения и подставим в третье:

$$a_1 = a_2 \cdot k_z$$

$$(a_2 k_z h_{z-}^2 + a_2 k_z^2 h_{z-}^2) = 2.$$

$$h_{z-}(k_z + 1) = h_{z-} \left(\frac{h_{z+}}{h_{z-}} + 1 \right) = h_{z-} + h_{z+} = 2 \cdot h_z$$

$$a_2 = \frac{2}{k_z h_{z-}^2 + k_z^2 h_{z-}^2} = \frac{2}{k_z \cdot h_{z-} \cdot h_{z-} \cdot (k_z + 1)} = \frac{2}{h_{z+} \cdot 2 \cdot h_z} = \frac{1}{h_{z+} \cdot h_z}; \quad (\text{A.4})$$

$$a_1 = \frac{2 \cdot k_z}{k_z h_{z-}^2 + k_z^2 h_{z-}^2} = \frac{2}{h_{z-}^2 + k_z \cdot h_{z-}^2} = \frac{2}{h_{z-} \cdot h_{z-} \cdot (k_z + 1)} = \frac{1}{h_{z-} \cdot h_z}; \quad (\text{A.5})$$

$$\begin{aligned} a_0 &= -(a_1 + a_2) = - \left(\frac{1}{h_{z-} \cdot h_z} + \frac{1}{h_{z+} \cdot h_z} \right) = - \frac{h_{z+} + h_{z-}}{h_{z+} \cdot h_{z-} \cdot h_z} = \\ &= - \frac{2 \cdot h_z}{h_{z+} \cdot h_{z-} \cdot h_z} = - \frac{2}{h_{z+} \cdot h_{z-}}. \end{aligned} \quad (\text{A.6})$$

Для аппроксимации по оси r система уравнений А.3 примет следующий вид:

$$\begin{cases} b_0 + b_1 + b_2 & = 0, \\ -b_1 h_{r-} + b_2 h_{r+} & = \frac{1}{r}, \\ \frac{1}{2}(b_1 h_{r-}^2 + b_2 h_{r+}^2) & = 1. \end{cases} \quad (\text{A.7})$$

$$b_1 = b_2 \cdot k_r - \frac{1}{r_i \cdot h_{r-}}$$

$$\left[b_2 k_r - \frac{1}{r_i \cdot h_{r-}} \right] \cdot h_{r-}^2 + b_2 k_r^2 h_{r-}^2 = b_2 k_r h_{r-}^2 + b_2 k_r^2 h_{r-}^2 - \frac{h_{r-}^2}{r \cdot h_{r-}} = 2$$

$$b_2 k_r h_{r-}^2 (k_r + 1) = 2 + \frac{h_{r-}}{r_i} = \frac{2r_i + h_{r-}}{r_i}$$

$$b_2 k_r = \frac{2r_i + h_{r-}}{r_i h_{r-}^2 (k_r + 1)} = \frac{2r_i + h_{r-}}{r_i \cdot h_{r-} \cdot h_{r-} (k_r + 1)} = \frac{2r_i + h_{r-}}{2 \cdot r_i \cdot h_{r-} \cdot h_r}$$

$$b_2 = \frac{2r_i + h_{r-}}{2 \cdot r_i \cdot h_{r-} \cdot h_r \cdot \frac{h_{r+}}{h_{r-}}} = \frac{2r_i + h_{r-}}{2 \cdot r_i \cdot h_{r+} \cdot h_r} \quad (\text{A.8})$$

$$\begin{aligned} b_1 &= \frac{2r + h_{r-}}{2 \cdot r_i \cdot h_{r-} \cdot h_r} - \frac{1}{r_i \cdot h_{r-}} = \frac{2r_i + h_{r-} - 2h_r}{2 \cdot r_i \cdot h_{r-} \cdot h_r} = \\ &= \frac{2r_i + h_{r-} - (h_{r-} + h_{r+})}{2 \cdot r_i \cdot h_{r-} \cdot h_r} = \frac{2r_i - h_{r+}}{2 \cdot r_i \cdot h_{r-} \cdot h_r}; \end{aligned} \quad (\text{A.9})$$

$$b_0 = - \left(\frac{2r_i - h_{r+}}{2 \cdot r_i \cdot h_{r-} \cdot h_r} + \frac{2r_i + h_{r-}}{2 \cdot r_i \cdot h_{r+} \cdot h_r} \right) = - \frac{(2r_i - h_{r+}) \cdot h_{r+} + (2r_i + h_{r-}) \cdot h_{r-}}{2 \cdot r_i \cdot h_{r-} \cdot h_{r+} \cdot h_r};$$

$$b_0 = - \frac{2r_i h_{r+} - h_{r+}^2 + 2r_i h_{r-} + h_{r-}^2}{2 \cdot r_i \cdot h_{r-} \cdot h_{r+} \cdot h_r} = - \frac{2r_i + h_{r-} - h_{r+}}{r_i \cdot h_{r-} \cdot h_{r+}}; \quad (\text{A.10})$$

Окончательно получаем:

$$A_r = \frac{2 \cdot r_i + h_{r-}}{2 \cdot r_i} \cdot \frac{\lambda}{h_r \cdot h_{r+}}; \quad C_r = \frac{2 \cdot r_i - h_{r+}}{2 \cdot r_i} \cdot \frac{\lambda}{h_r \cdot h_{r-}}; \quad B_r = A_r + C_r + \frac{\rho \cdot c}{\tau}. \quad (\text{A.11})$$

$$A_z = \frac{\lambda}{h_z \cdot h_{z+}}; \quad C_z = \frac{\lambda}{h_z \cdot h_{z-}}; \quad B_z = A_z + C_z + \frac{\rho \cdot c}{\tau} = \frac{2 \cdot \lambda}{h_{z+} \cdot h_{z-}} + \frac{\rho \cdot c}{\tau}. \quad (\text{A.12})$$

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Программа моделирования нагрева горючего материала раскаленной частицей
цилиндрической формы

Б.1 Основные уравнения (Rust)

```

1 use ndarray::prelude::*;
2 use std::f64::consts::PI;
3 use ndarray::{s};
4 use crate::vectorized::VectorizedMath;
5 pub type Mv = Array1<f64>;
6 pub type Mx = Array2<f64>;
7 pub type MvV<'a> = ArrayView1<'a, f64>;
8 pub type MxV<'a> = ArrayView2<'a, f64>;
9
10 fn get_a_boundaryII(at: MvV, h: f64) -> Mv {
11     2. * at.to_owned() / (2. * at.to_owned() + h * h)
12 }
13 fn get_b_boundaryII(at: MvV, l: MvV, h: f64, T: MvV, q: f64) -> Mv {
14     let ath = 2. * at.to_owned() + h * h;
15     T.to_owned() * h * h / &ath + at.to_owned() * 2. * h * q / l / &ath
16 }
17 fn get_T_boundaryII(at:MvV, l:MvV, h:f64, T_pr:MvV, a_pr:MvV, b_pr:MvV, q:f64
18 )-> Mv {
19     let h2 = h * h;
20     let at2 = 2. * at.to_owned();
21     (at2.to_owned() * b_pr + T_pr.to_owned() * h2 - at2.to_owned() * h * q / l)
22     / ((1. - a_pr.to_owned()) * &at2 + h2)
23 }
24 pub fn grid_from_h(h: &Mv) -> Mv {
25     let mut X = Mv::zeros(h.len() + 1);
26     let mut x = 0.;
27     for i in 0..h.len() {
28         x += h[i];
29         X[i + 1] = x;
30     }
31     X
32 }
33 fn get_ABC(l1: MvV, l2: MvV, roc_t: MvV, hp: f64, hn: f64) -> (Mv, Mv, Mv) {
34     let h = (hp + hn) / 2.;
35     let A = l2.to_owned() / (hn * h);
36     let C = l1.to_owned() / (hp * h);
37     let B = &A + &C + roc_t;
38     (A, B, C)
39 }

```

```

40 fn get_ABCr(r:f64, l1:MvV, l2:MvV, roc_t:MvV, hp:f64, hn:f64) -> (Mv, Mv, Mv) {
41     let h = (hp + hn) / 2.;
42     let A = l2.to_owned() * (2. * r + hp) / (2. * r * hn * h);
43     let C = l1.to_owned() * (2. * r - hn) / (2. * r * hp * h);
44     let B = &A + &C + roc_t;
45     (A, B, C)
46 }
47 fn get_F(roc_t: &Mx, T: &Mx, Q: &Mx) -> Mx {
48     roc_t * T + Q
49 }
50 fn get_a_zn_from_ABCF(A: MvV, B: MvV, C: MvV, a_pr: MvV) -> (Mv, Mv) {
51     let zn = -C.to_owned() * a_pr + B;
52     (A.to_owned() / &zn, zn)
53 }
54 fn get_b_from_ABCF(zn: MvV, C: MvV, F: MvV, b_pr: MvV) -> Mv {
55     (C.to_owned() * b_pr + F) / zn
56 }
57 fn get_Q_termdec(Qk0: f64, ro: f64, E: f64, T: MxV) -> Mx {
58     let Rt = 8.3144621;
59     (Qk0 * ro) * ((-E / Rt) / T.to_owned()).exp()
60 }
61 #[allow(dead_code)]
62 pub fn get_depth(z: &Mv, z1: f64, T: &Mx, T0: f64) -> Option<f64> {
63     for (i, temp) in T.row(0).iter().enumerate() {
64         if temp >= &(T0 + 1.) {
65             return Some(z1 - z[i]);
66         }
67     }
68     None
69 }
70 pub struct Material {
71     pub l: f64, // Теплопроводность
72     pub ro: f64, // Плотность
73     pub c: f64, // Теплоемкость
74 }
75 pub fn Cylinder(Nr: usize, Nz: usize, t: f64, t_end: f64, Nr1: isize, Nz1: isize,
76     Nz2: isize, hr: &Mv, hz: &Mv, m1: Material, m2: Material, m3: Material, E3: f64,
77     Qk03: f64, T0: f64, Tp: f64, stop: bool) -> (Mx, Mx, bool, f64, String) {
78     // Выделяем память
79     let mut Ar = Mx::zeros((Nr - 1, Nz));
80     let mut Br = Mx::zeros((Nr - 1, Nz));
81     let mut Cr = Mx::zeros((Nr - 1, Nz));
82     let mut ZNr = Mx::zeros((Nr - 1, Nz));
83     let Az = Mx::zeros((Nz - 1, Nr));
84     let mut Az = Az.t().to_owned();
85     let Bz = Mx::zeros((Nz - 1, Nr));
86     let mut Bz = Bz.t().to_owned();
87     let Cz = Mx::zeros((Nz - 1, Nr));
88     let mut Cz = Cz.t().to_owned();

```

```

89   let ZNz = Mx::zeros((Nz - 1, Nr));
90   let mut ZNz = ZNz.t().to_owned();
91   let mut ar = Mx::zeros((Nr - 1, Nz));
92   let mut br = Mx::zeros((Nr - 1, Nz));
93   let az = Mx::zeros((Nz - 1, Nr));
94   let mut az = az.t().to_owned();
95   let bz = Mx::zeros((Nz - 1, Nr));
96   let mut bz = bz.t().to_owned();
97   let mut Q = Mx::zeros((Nr, Nz));
98   let O = Mx::zeros((Nr, Nz));
99   // Определяем теплофизические параметры в каждой точке сетки
100  let Material {l: l1, ro: ro1, c: c1} = m1;
101  let Material {l: l2, ro: ro2, c: c2,} = m2;
102  let Material {l: l3, ro: ro3, c: c3} = m3;
103  let mut l = Mx::from_elem((Nr, Nz), l1);
104  let mut ro = Mx::from_elem((Nr, Nz), ro1);
105  let mut c = Mx::from_elem((Nr, Nz), c1);
106  let (K1, K2, K3) = (ro1 * c1 / t, ro2 * c2 / t, ro3 * c3 / t);
107  l.slice_mut(s![..Nr1, Nz1..Nz2]).fill(l2);
108  ro.slice_mut(s![..Nr1, Nz1..Nz2]).fill(ro2);
109  c.slice_mut(s![..Nr1, Nz1..Nz2]).fill(c2);
110  l.slice_mut(s![.., ..Nz1]).fill(l3);
111  ro.slice_mut(s![.., ..Nz1]).fill(ro3);
112  c.slice_mut(s![.., ..Nz1]).fill(c3);
113
114  //на границах раздела сред используем эффективные значения
115  //теплофизических параметров
116  l.slice_mut(s![..Nr1, Nz1..Nz1 + 1]).fill((l2 + l3) / 2.);
117  l.slice_mut(s![Nr1.., Nz1..Nz1 + 1]).fill((l1 + l3) / 2.);
118  l.slice_mut(s![..Nr1, Nz2..Nz2 + 1]).fill((l1 + l2) / 2.);
119  l.slice_mut(s![Nr1..Nr1 + 1, Nz1..Nz2]).fill((l1 + l2) / 2.);
120  let mut K = &ro * &c / t;
121  K.slice_mut(s![..Nr1, Nz1..Nz1 + 1]).fill((K2 + K3) / 2.);
122  K.slice_mut(s![Nr1.., Nz1..Nz1 + 1]).fill((K1 + K3) / 2.);
123  K.slice_mut(s![..Nr1, Nz2..Nz2 + 1]).fill((K1 + K2) / 2.);
124  K.slice_mut(s![Nr1..Nr1 + 1, Nz1..Nz2]).fill((K1 + K2) / 2.);
125  let at = &l / &K;
126  let R = grid_from_h(&hr);
127  for i in 1..Nr - 1 {
128      if i == Nr1 as usize {
129          // определяем прогоночные коэффициенты на границе сред 2 и 1
130          let ABC = get_ABcR(
131              R[i],
132              l.row(i).slice(s![..Nz1]),
133              l.row(i).slice(s![..Nz1]),
134              K.row(i).slice(s![..Nz1]),
135              hr[i - 1],
136              hr[i],
137          );

```

```

138     Ar.row_mut(i).slice_mut(s![..Nz1]).assign(&ABC.0);
139     Br.row_mut(i).slice_mut(s![..Nz1]).assign(&ABC.1);
140     Cr.row_mut(i).slice_mut(s![..Nz1]).assign(&ABC.2);
141     let ABC = get_ABCr(
142         R[i],
143         l.row(i - 1).slice(s![Nz1..Nz2 + 1]),
144         l.row(i + 1).slice(s![Nz1..Nz2 + 1]),
145         K.row(i).slice(s![Nz1..Nz2 + 1]),
146         hr[i - 1],
147         hr[i],
148     );
149     Ar.row_mut(i).slice_mut(s![Nz1..Nz2 + 1]).assign(&ABC.0);
150     Br.row_mut(i).slice_mut(s![Nz1..Nz2 + 1]).assign(&ABC.1);
151     Cr.row_mut(i).slice_mut(s![Nz1..Nz2 + 1]).assign(&ABC.2);
152     let ABC = get_ABCr(
153         R[i],
154         l.row(i).slice(s![Nz2 + 1..]),
155         l.row(i).slice(s![Nz2 + 1..]),
156         K.row(i).slice(s![Nz2 + 1..]),
157         hr[i - 1],
158         hr[i],
159     );
160     Ar.row_mut(i).slice_mut(s![Nz2 + 1..]).assign(&ABC.0);
161     Br.row_mut(i).slice_mut(s![Nz2 + 1..]).assign(&ABC.1);
162     Cr.row_mut(i).slice_mut(s![Nz2 + 1..]).assign(&ABC.2);
163 } else {
164     let ABC = get_ABCr(R[i], l.row(i), l.row(i), K.row(i),
165         hr[i - 1], hr[i]);
166     Ar.row_mut(i).assign(&ABC.0);
167     Br.row_mut(i).assign(&ABC.1);
168     Cr.row_mut(i).assign(&ABC.2);
169 }
170 }
171 for j in 1..Nz - 1 {
172     if j == Nz1 as usize {
173         // определяем прогоночные коэффициенты на границе сред 3 и 2, 3 и 1
174         let ABC = get_ABC(
175             l.column(j - 1),
176             l.column(j + 1),
177             K.column(j),
178             hz[j - 1],
179             hz[j],
180         );
181         Az.column_mut(j).assign(&ABC.0);
182         Bz.column_mut(j).assign(&ABC.1);
183         Cz.column_mut(j).assign(&ABC.2);
184     } else if j == Nz2 as usize {
185         // определяем прогоночные коэффициенты на границе сред 2 и 1
186         let ABC = get_ABC(

```



```

187         l.column(j - 1).slice(s![..Nr1 + 1]),
188         l.column(j + 1).slice(s![..Nr1 + 1]),
189         K.column(j).slice(s![..Nr1 + 1]),
190         hz[j - 1],
191         hz[j],
192     );
193     Az.column_mut(j).slice_mut(s![..Nr1 + 1]).assign(&ABC.0);
194     Bz.column_mut(j).slice_mut(s![..Nr1 + 1]).assign(&ABC.1);
195     Cz.column_mut(j).slice_mut(s![..Nr1 + 1]).assign(&ABC.2);
196     let ABC = get_ABC(
197         l.column(j).slice(s![Nr1 + 1..]),
198         l.column(j).slice(s![Nr1 + 1..]),
199         K.column(j).slice(s![Nr1 + 1..]),
200         hz[j - 1],
201         hz[j],
202     );
203     Az.column_mut(j).slice_mut(s![Nr1 + 1..]).assign(&ABC.0);
204     Bz.column_mut(j).slice_mut(s![Nr1 + 1..]).assign(&ABC.1);
205     Cz.column_mut(j).slice_mut(s![Nr1 + 1..]).assign(&ABC.2);
206     } else {
207         let ABC = get_ABC(l.column(j), l.column(j), K.column(j),
208             hz[j - 1], hz[j]);
209         Az.column_mut(j).assign(&ABC.0);
210         Bz.column_mut(j).assign(&ABC.1);
211         Cz.column_mut(j).assign(&ABC.2);
212     }
213 }
214 let mut fire = false;
215 ar.row_mut(0).assign(&get_a_boundaryII(at.row(0), hr[0]));
216 for i in 1..Nr - 1 {
217     let aZN = get_a_zn_from_ABCF(Ar.row(i), Br.row(i), Cr.row(i), ar.row(i - 1));
218     ar.row_mut(i).assign(&aZN.0);
219     ZNr.row_mut(i).assign(&aZN.1);
220 }
221 az.column_mut(0)
222     .assign(&get_a_boundaryII(at.column(0), hz[0]));
223 for j in 1..Nz - 1 {
224     let aZN = get_a_zn_from_ABCF(Az.column(j), Bz.column(j), Cz.column(j),
225         az.column(j - 1));
226     az.column_mut(j).assign(&aZN.0);
227     ZNz.column_mut(j).assign(&aZN.1);
228 }
229 // Определяем расчетный шаг сетки по времени
230 let Nt = (t_end / t) as usize;
231 // Определяем поле температуры в начальный момент времени
232 let mut T = Mx::from_elem((Nr, Nz), T0);
233 T.slice_mut(s![..Nr1, Nz1..Nz2]).fill(Tp);
234 let mut dV = Mx::zeros((Nr - 1, Nz - 1));
235 for i in 0..Nr - 1 {

```

```

236     for j in 0..Nz - 1 {
237         dV[[i, j]] = PI * (2. * hr[i] * R[i] + hr[i] * hr[i]) * hz[j];
238     }
239 }
240 // Проводим интегрирование нестационарного уравнения теплопроводности
241 let mut time = 0.;
242 let mut Fr;
243 let mut Fz;
244 let mut Tc = T.to_owned();
245 let mut rstr = String::new();
246 #[cfg(feature="progressbar")]
247 let mut pb = pbr::ProgressBar::new(Nt as u64 + 1);
248 for tN in 1..Nt + 1 {
249     #[cfg(feature="progressbar")]
250     pb.inc();
251     time = (tN as f64) * t;
252     // решаем СЛАУ в направлении оси Or для определения поля температуры на
253     // промежуточном временном слое рассчитываем энерговыделение в разогретом слое
254     Q.slice_mut(s![.., ..Nz1])
255         .assign(&get_Q_termdec(Qk03, ro3, E3, T.slice(s![.., ..Nz1])));
256     Fr = get_F(&K, &T, &Q);
257     Tc = T.to_owned();
258     br.row_mut(0)
259         .assign(&get_b_boundaryII(at.row(0), l.row(0), hr[0], T.row(0), 0.));
260     for i in 1..Nr - 1 {
261         let beta = get_b_from_ABCF(ZNr.row(i), Cr.row(i), Fr.row(i),
262             br.row(i - 1));
263         br.row_mut(i).assign(&beta);
264     }
265     // определяем значение температуры на правой границе на основе правого
266     // граничного условия
267     let Trow = T.row(Nr - 1).to_owned();
268     T.row_mut(Nr - 1).assign(&get_T_boundaryII(
269         at.row(Nr - 1),
270         l.row(Nr - 1),
271         hr[Nr - 2],
272         Trow.view(),
273         ar.row(Nr - 2),
274         br.row(Nr - 2),
275         0.,
276     ));
277     // определяем неизвестное поле температуры на промежуточном временном слое
278     for i in (0..Nr - 1).rev() {
279         let Trow = T.row(i + 1).to_owned() * ar.row(i) + br.row(i);
280         T.row_mut(i).assign(&Trow);
281     }
282     // решаем СЛАУ в направлении оси Oz для определения поля температуры
283     // на целом временном слое определяем начальные прогоночные коэффициенты
284     // на основе нижнего граничного условия

```

```

285 Fz = get_F(&K, &T, &0);
286 bz.column_mut(0).assign(&get_b_boundaryII(
287     at.column(0),
288     l.column(0),
289     hz[0],
290     T.column(0),
291     0.,
292 ));
293 for j in 1..Nz - 1 {
294     let beta = get_b_from_ABCF(ZNz.column(j), Cz.column(j),
295         Fz.column(j), bz.column(j - 1));
296     bz.column_mut(j).assign(&beta);
297 }
298 // определяем значение температуры на верхней границе,
299 let Tcol = T.column(Nz - 1).to_owned();
300 T.column_mut(Nz - 1).assign(&get_T_boundaryII(
301     at.column(Nz - 1),
302     l.column(Nz - 1),
303     hz[Nz - 2],
304     Tcol.view(),
305     az.column(Nz - 2),
306     bz.column(Nz - 2),
307     0.,
308 ));
309 // используя соотношение (7) определяем неизвестное поле температуры
310 // на промежуточном временном слое
311 for j in (0..Nz - 1).rev() {
312     let Tcolumn = T.column(j + 1).to_owned() * az.column(j) + bz.column(j);
313     T.column_mut(j).assign(&Tcolumn);
314 }
315 let dTkap = Tc.slice(s![..Nr1, Nz1 + 1..Nz2]).to_owned() -
316     T.slice(s![..Nr1, Nz1 + 1..Nz2]);
317 let dQkap = K2 * (dTkap * dV.slice(s![..Nr1, Nz1 + 1..Nz2])).scalar_sum();
318 let dQmat = (Q.slice(s![..(Nr - 1) as isize, ..Nz1]).to_owned() *
319     dV.slice(s![.., ..Nz1])).scalar_sum();
320 if stop && (dQmat > dQkap) {
321     fire = true;
322     rstr +=
323         "\Выполнено условие зажигания (выдQ_>_передQ)";
324     rstr += &format!(
325         "\nQ_выдел_={0:.4e}_{2}, \tQ_перед_={1:.4e}_{2}",
326         dQmat, dQkap, "Джс/"
327     );
328     break;
329 }
330 if stop && (T.slice(s![.., ..Nz1]).map(|x| (x > &Tp) as usize)
331     ).scalar_sum() > 0 {
332     fire = true;
333     rstr += "\Выполнено условие зажигания (T>нТ)";

```

```

334         break;
335     }
336 }
337 (T, Tc, fire, time, rstr)
338 }

```

Б.2 Взаимодействие с базой данных SQLite3 (Python3)

```

1  #[allow(non_snake_case)]
2  mod heat;
3  use self::heat::*;
4  mod vectorized;
5  use numpy::{IntoPyArray, PyArray1};
6  use pyo3::prelude::{pymodule, PyModule, PyResult, Python, Py, ToPyObject};
7  use pyo3::types::PyTuple;
8  #[pymodule]
9  fn cylinder(_py: Python, m: &PyModule) -> PyResult<()> {
10     #[pyfn(m, "cylinder")]
11     fn cylinder_py(py: Python, Nr: usize, Nz: usize, t: f64, t_end: f64,
12         Nr1: isize, Nz1: isize, Nz2: isize, hr: &PyArray1<f64>,
13         hz: &PyArray1<f64>, l1: f64, ro1: f64, c1: f64, l2: f64, ro2: f64,
14         c2: f64, l3: f64, ro3: f64, c3: f64, E3: f64, Qk03: f64, T0: f64,
15         Tp: f64, stop: bool) -> PyResult<Py<PyTuple>> {
16         let hr = hr.as_array();
17         let hz = hz.as_array();
18         let hr = Mv::from_iter(hr.iter().map(|x| *x));
19         let hz = Mv::from_iter(hz.iter().map(|x| *x));
20         // газ
21         let m1 = Material {l: l1, ro: ro1, c: c1};
22         // горячая«» частица
23         let m2 = Material {l: l2, ro: ro2, c: c2};
24         // горючий материал
25         let m3 = Material {l: l3, ro: ro3, c: c3};
26         let (temp, temp_c, fire, tend, rstr) = Cylinder(Nr, Nz, t, t_end,
27             Nr1, Nz1, Nz2, &hr, &hz, m1, m2, m3, E3, Qk03, T0, Tp, stop);
28         let temp = temp.into_pyarray(py).to_object(py);
29         let temp_c = temp_c.into_pyarray(py).to_object(py);
30         let fire = fire.to_object(py);
31         let tend = tend.to_object(py);
32         let rstr = rstr.to_object(py);
33         let res_t = PyTuple::new(py, &[temp, temp_c, fire, tend, rstr]);
34         Ok(res_t.into())
35     }
36     Ok(())
37 }

1  from numpy import array, zeros, ones, exp, arange, size, pi as pi
2  from heat_NG4 import *
3  from grid import *
4  import matplotlib

```

```

5 import matplotlib.pyplot as plt
6 import numpy as np
7 import time
8 import cylinder
9 from datetime import datetime
10 basefile='Heat.db'
11 def solve_point (Tp, GRID, GAZ, CH, TOP, T0, τ, tmax, task_id,
12     basefile, SAVE_T):
13     Nr, Nz, Nr1, Nz1, Nz2, hr, hz = GRID['Nr'], GRID['Nz'], GRID['Nr1'],
14     GRID['Nz1'], GRID['Nz2'], GRID['hr'], GRID['hz']
15     s_message = (f'начТ={Tp}K\n'
16         f'Частица: H={zp*1e3:.2f}мм, d={2*rp*1e3:.2f}мм\n'
17         f'Область (RxZ): {Nr}x{Nz}τ. τ={τ}с')
18     print(s_message)
19     time.sleep(1)
20
21     T, dT, fire, tend, rstr = cylinder.cylinder(Nr, Nz, τ, tmax, Nr1,
22         Nz1, Nz2, hr, hz, GAZλ., GAZρ., GAZ.c, CHλ., CHρ., CH.c, TOPλ.,
23         TOPρ., TOP.c, TOP.E, TOP.Qk0, T0, Tp, True)
24
25     hw = get_depth(T, T0, GRID)
26     endtime = datetime.now()
27     if fire:
28         e_message = (rstr + f"\n\воспламенение за t={tend:.4}с"
29             f"\Глубина прогрева hw={hw*1e3:.4}мм")
30     else:
31         e_message = f"\воспламенения не произошло ({tmax}с)"
32     e_message += "\Расчет окончен в: {}".format(endtime.isoformat(""))
33     print(e_message+"\n")
34     if PLOT:
35         ax = plot_temperature(plt.figure(), T, GRID)
36         plt.show()
37     DIR = f"/media/music/SimulationData/{GAZ.name}_{CH.name}_{TOP.name}/"
38     save_results(DIR, basefile, SAVE_T, task_id, GRID, GAZ, CH, TOP, T,
39         dT, T0, Tp, τ, tmax, hw, fire, endtime, tend)
40     return fire, tend, s_message+'\n'+e_message
41
42 (task_id, _, _, PLOT, SAVE_T, TELEGRAM, Tp, rp, zp, T0, Nr, Nz, τ, rl, zh,
43     gridPerc, gridK, tmax), GAZ, CH, TOP = get_task(basefile)
44 change_status (task_id, 2, basefile)
45 z1 = (zh-zp)/2
46 (Nr1, hr) = make_nonuniform_grid(Nr, (rp, rl-rp), gridPerc, gridK)
47 (Nz1, Nz2), hz = make_nonuniform_grid(Nz, (z1, zp, zh-(z1+zp)), gridPerc, gridK)
48 r = grid_from_h(hr)
49 z = grid_from_h(hz)
50 GRID = {'r':r, 'z':z, 'hr':hr, 'hz':hz,
51     'rp':rp, 'zp':zp, 'rl':rl, 'zh':zh, 'z1': z1,
52     'Nr':Nr, 'Nz':Nz, 'Nr1':Nr1, 'Nz1':Nz1, 'Nz2':Nz2,
53     'gridPerc': gridPerc, 'gridK': gridK}

```

```

54 }
55
56 if Tp:
57     message = solve_point (Tp, GRID, GAZ, CH, TOP, T0, τ, tmax, task_id,
58 basefile, SAVE_T)
59 else:
60     from scipy.optimize import curve_fit
61     def func(x, a, b, c):
62         return a * x**b + c
63
64     Tign = [350, 3000]
65     tends = []
66     τ_data = []
67     T_data = []
68     ε = 10 # K
69     i = 0
70     k = 0.7
71     popt = [100, -1, 500]
72     while (Tign[1]-Tign[0]) > ε:
73         i += 1
74         print(f"Итерация №_{i}")
75         if len(τ_data) > 7:
76             τ_data = τ_data[1:]
77             T_data = T_data[1:]
78         if len(τ_data) > 3:
79             try:
80                 popt, _ = curve_fit(func, τ_data, T_data, p0=popt)
81                 newtime = tends[-1][1]*1.5
82                 Tpf = int(func(newtime, *popt))
83                 if newtime > tmax:
84                     Tign = max(Tign[0], int(func(tmax, *popt)))
85                 break
86             except:
87                 Tpf = -1000
88         if i == 1:
89             Tp = Tign[1]
90         elif len(τ_data) > 3 and Tign[0] < Tpf < Tign[1]:
91             Tp = Tpf
92         else:
93             Tp = int(Tign[0] + (Tign[1]-Tign[0])*k)
94         fire, tend, message = solve_point (Tp, GRID, GAZ, CH, TOP, T0, τ, tmax,
95 task_id, basefile, SAVE_T)
96         if fire:
97             if len(tends) > 0:
98                 Tp1, tend1 = tends[-1]
99                 tg = (tend1-tend)/(Tp1-Tp)
100                tends.append((Tp, tend))
101                Tign[1] = Tp
102                τ_data.append(tend)

```

```
103         T_data.append(Tp)
104     else:
105         Tign[0] = Tp
106     if len(tends) > 1 and tg != 0:
107         Tp1, tend1 = tends[-1]
108         Tp0 = (tmax-tend1)/tg+Tp1
109         if Tp0 > Tign[0]:
110             print(f"Интервал_{Tign}_K_изменен_на_{[Tp0, Tign[1]]}_K")
111             Tign[0] = max(Tign[0], Tp0)
112     message += f"\Критическая_температура_воспламенения_T_{Tign}_K"
113
114     change_status (task_id, 1, basefile)
```

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Программа расчета вероятностных характеристик опасности раскаленных частиц

В.1 Основные алгоритмы

```

1  from numpy import sqrt, cos, sin, pi, array, linspace, zeros, exp, arange, log, abs
2  from numpy.random import random as rand
3
4  from scipy.integrate import ode, trapz
5
6  chastitsi = {
7      'M45' : {
8          'p' : 7860, #плотность стали при 25 C
9          'Tpl': 1400, #Температура плавления стали M45, C
10         'Cp' : 561+0.2*1400, #удельная теплоемкость расплава углеродистой стали
11         'Ck' : 561+0.2*20, #удельная теплоемкость углеродистой стали
12         'Ckr': 317750 #удельную теплоту кристаллизации, Джкг/
13     },
14     'Al' : {
15         'p' : 2699,
16         'Tpl': 650,
17         'Cp' : 1090, #удельная теплоемкость расплава алюминия
18         'Ck' : 903, #удельная теплоемкость алюминия
19         'Ckr': 393000 #удельная теплота кристаллизации, Джкг/
20     },
21     'Cu' : {
22         'p' : 8920,
23         'Tpl': 1085,
24         'Cp' : 545, #удельная теплоемкость расплава меди
25         'Ck' : 385, #удельная теплоемкость меди
26         'Ckr': 205000 #удельная теплота кристаллизации, Джкг/}
27     }
28 }
29 class Chastitsa():
30     def __init__(self, mtype):
31         self.mtype = mtype
32         self.__dict__.update(chastitsi[mtype])
33 class Shar(Chastitsa):
34     def __init__(self, mtype):
35         super().__init__(mtype)
36         self.Cx = 0.47 # коэффициент сопротивления формы шара
37     @property
38     def d(self): return self._d
39     @d.setter

```



```

40     def d(self, d):
41         self._d = d
42         self.F = pi*d**2/4 # площадь сечения
43         self.S = pi*d**2 # площадь поверхности
44         self.V = pi*d**3/6 # объем
45         self.m = self.V*self.rho. # масса
46     def alpha(self, S):
47         return 3*pi*self._d*S*mu.
48     def beta(self, S):
49         return self.Cx*Sp.*self.F/2
50
51     sredi = {
52         'Air': {
53             'rho': 1.184, #воздух при 25 C
54             'nu': 15.06e-6, #кинематическая вязкость воздуха при 20 C
55             'lambda': 0.0259, #коэффициент теплопроводности воздуха пр 20 C
56             'mu': 1.85e-5 #динамическая вязкость воздуха при 25 C
57         }
58     }
59     class Sreda():
60         def __init__(self, mtype = 'Air'):
61             self.mtype = mtype
62             self.__dict__.update(sredi[mtype])
63
64     def integratefly(K, S, alpha, nu, h):
65         g=9.81
66         k1 = K*alpha.(S)/K.m
67         k2 = K*beta.(S)/K.m
68         Y0 = [0, nu*cos(alpha), h, nu*sin(alpha)]
69         ts = []
70         Ys = []
71         def f(t, y):
72             v = sqrt(y[1]**2 + y[3]**2)
73             return [ y[1], -(k1+k2*v)*y[1],
74                     y[3], -g-(k1+k2*v)*y[3] ]
75         def solout(t, y):
76             ts.append(t)
77             Ys.append(y.copy())
78             if (y[2] <= 0 and y[3] < 0):
79                 return -1
80
81         od = ode(f).set_integrator('dopri5', max_step=0.025, nsteps=2000)
82         od.set_solout(solout)
83         od.set_initial_value(Y0, 0)
84         od.integrate(1000)
85         return [array(ts), array(Ys)]
86
87     def kristaltime(K, S, tend, vk, T0, Tn):
88         Re = vk*K.d/Sv. #число Ренольдса

```

```

89     Nu = 0.62*Re**0.5 #критерий Нусельта
90     alf = Nu*Sλ./K.d #коэффициент теплоотдачи капли металла
91     #время полета капли металла в расплавленном жидком() состоянии
92     taur = (K.Cp*K.m/(alf*K.S))*log((Tn-T0)/(K.Tpl-T0))
93     #время полета капли, в течение которого происходит ее кристаллизация
94     taukr = K.m*K.Ckr/(alf*K.S*(K.Tpl-T0))
95     if tend < taur: # Частица расплавлена
96         Tkon = T0+(Tn-T0)*exp(-alf*K.S/(K.Cp*K.m)*tend)
97         state = 1
98     elif tend > taur and tend <= (taur+taukr): # Частица кристаллизуется
99         Tkon = K.Tpl
100        state = 2
101     else: # Частица застыла
102         Tkon = T0+(K.Tpl-T0)*exp(-alf*K.S/(K.Cp*K.m)*(tend-(taur+taukr)))
103         state = 3
104     return Tkon, state, taur, taukr
105
106 def neiman(Vf, Df, va, vb, da, db, N):
107     v = linspace(va,vb,500) # разбиваем диапазон на 500 точек
108     d = linspace(da,db,500) # разбиваем диапазон на 500 точек
109     V = Vf(v) # считаем плотность
110     D = Df(d) # считаем плотность
111     mV = max(V) # находим макс. значение
112     mD = max(D) # находим макс. значение
113
114     VX = zeros(N) # пустой массив под числа
115     DX = zeros(N)
116     ALF = zeros(N)
117     i = 0 # счетчик
118     while i < N: # пока не наберем нужно колво чисел
119         # генерируем случайные координаты
120         # скорости:
121         vx = va + (vb-va)*rand()
122         vy = mV*rand()
123         # диаметра:
124         dx = da + (db-da)*rand()
125         dy = mD*rand()
126         if (vy <= Vf(vx)) and (dy <= Df(dx)): # если точка попала под оба графика
127             # генерируем случайное значение угла
128             ALF[i] = pi*rand()-pi/2
129             VX[i] = vx # сохраняем координату
130             DX[i] = dx
131             i = i+1 # увеличиваем счетчик
132     return ALF, VX, DX

```

В.2 Моделирование разлета шарообразных частиц (Python3)

```

1  from particle import *
2  from tqdm import trange
3  from time import time
4  tms = time()
5
6  K = Shar('Al')
7  S = Sreda()
8  Nk = 1000
9  N = 300
10
11 H = array([0.1, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10])
12 print('Выбор случайных характеристик частиц')
13
14 # интервал скоростей:
15 va = 0.5
16 vb = 10
17 # интервал диаметров:
18 da = 0.1
19 db = 3
20
21 # формула плотности вероятности
22 # плотность распред. начальных скоростей
23 Vf = lambda v: 0.22894*v**2*exp(-0.7278*v**1.05)
24 # плотность распред. диаметров частиц
25 Df = lambda d: 12.8*d**0.8*exp(-3.8*d**0.9)
26 lH = len(H)
27 ALF = zeros((N, Nk))
28 D = zeros((N, Nk))
29 V = zeros((N, Nk))
30     = zeros((lH, N, Nk))
31 v0 = zeros((lH, N, Nk))
32 d = zeros((lH, N, Nk))
33
34 for i in range(N): # для увеличения точности результата используем 100 попыток
35     ALF[i,:], V[i,:], D[i,:] = neiman(Vf, Df, va, vb, da, db, Nk)
36 D = D*1e-3 # перевод из мм в м
37 print('Время_расчета: {:.2f}_с_'.format(time() - tms))
38 tms = time()
39 print('Расчет_дальности_и_времени_полета_частиц')
40 for k in range(lH):
41     alpha[k,:,:] = ALF
42     v0[k,:,:] = V
43     d[k,:,:] = D
44
45 vk = zeros((lH,N,Nk))
46 tend = zeros((lH,N,Nk))
47 L = zeros((lH,N,Nk))

```

```

48 for k in trange(lH, desc="H"): # расчет для разных высот
49     for i in trange(N, desc="N", position=0):
50         for j in range(Nk):
51             K.d = d[k,i,j]
52             t, Y = integratefly(K, S,  $\alpha$ [k,i,j], v0[k,i,j], H[k])
53             vk[k,i,j] = trapz(t, sqrt(Y[:,1]**2+Y[:,3]**2))/t[-1]
54             tend[k,i,j] = t[-1]
55             L[k,i,j] = Y[-1,0]
56
57 print('Время_расчета:_{:.2f}_c_'.format(time() - tms))
58 import pickle
59 with open('/home/burrbull/data_Sh_Al300.pkl', 'wb') as f:
60     data = {'H': H, ' $\alpha$ ':  $\alpha$ , 'v0': v0, 'd': d, 'K': K, 'S': S, 'N': N, 'Nk': Nk,
61            'vk': vk, 'tend': tend, 'L': L}
62     pickle.dump(data, f)

```

В.3 Расчет температуры частиц в момент касания горючего материала и вероятности его воспламенения (Python3)

```

1 from particle import *
2 import matplotlib.pyplot as plt
3 import pickle
4 with open('/home/burrbull/data_Sh_Al300.pkl', 'rb') as f:
5     data = pickle.load(f)
6 H,  $\alpha$ , v0, d, K1, S, N, Nk, vk, tend, L = [data[k] for k in ('H', ' $\alpha$ ', 'v0',
7     'd', 'K', 'S', 'N', 'Nk', 'vk', 'tend', 'L')]
8 K = Shar('Cu')
9 L0 = arange(0, 20.1, 0.05)
10 Ti = arange(0, 2260, 20)
11 lH = len(H)
12 lL0 = len(L0)
13 lTi = len(Ti)
14 Tn = 2250 #Температура капли металла начальная, C
15 T0 = 20 #Температура воздуха на момент возникновения пожара окружающей ( среды), C
16 T = zeros((lH, N, Nk))
17 State = zeros((lH, N, Nk))
18 print('Расчет_конечных_температур\n')
19 from tqdm import trange
20 from time import time
21 tms = time()
22 for k in trange(lH): # расчет для разных высот
23     for i in range(N):
24         for j in range(Nk):
25             K1.d = d[k,i,j] # диаметр капли металла
26             Tkon, state, taur, taukr = kristaltime(K1, S, tend[k,i,j],
27             vk[k,i,j], T0, Tn)
28             T[k,i,j] = Tkon
29             State[k,i,j] = state

```

```

30 print('Время_расчета:_{:.2f}_с_\n'.format(time() - tms))
31 tms = time()
32 print('Расчет_вероятностей_разлета_частиц_и_их_температур\n')
33 nsum = zeros((LH,LL0))
34 Tsum = zeros((LH,LL0,LTi))
35 for k in trange(LH):      # расчет для разных высот
36     for i in range(N):
37         for j in range(Nk):
38             TQ = 0.67e6*(d[k,i,j])**1.55/21**0.9 # время горения Смелков
39             nsum[k,:] += (L[k,i,j] >= L0)# * (tend[k,i,j] <= TQ)
40 print('Время_расчета:_{:.2f}_с_\n'.format(time() - tms))
41
42 nsum = nsum/N # число долетевших частиц
43 p00 = nsum/Nk # вероятность преодоления частицей расстояния L0 при 1 попытке
44 #%%
45 Icont = [100, 150, 200, 250, 300, ]
46 Ncont = [60, 107, 157, 207, 257 ]
47 Ikz = [650, 750, 850, 900, 1000, 1100, 1200, 1300, 1400, 1500, 1600, 1700]
48 Nkz = [40, 110, 190, 240, 350, 460, 570, 690, 810, 920, 1050, 1150]
49 def PfromNcn(p00, Nch):
50     return 1 - (1 - p00)**Nch
51 import numpy as np
52 def PtoI(p00, I, x, y):
53     Nch = np.interp(I, x, y)
54     print(f"N_{Nch}_частиц")
55     return Nch, PfromNcn(p00, Nch)
56 ls = ['- ', '- ', '- ', '-.', ':', '- ', '- ', '-.', ':']
57 lw = [1, 1.5, 3, 2, 4, 2, 3, 1, 2]
58
59 Nch, p3 = PtoI(p00, 172, Icont, Ncont)
60 from matplotlib import rc
61 Hp = [0.1, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10]
62 iHp = [i for i,h in enumerate(H) if h in Hp]
63 print(iHp)
64
65 fig = plt.figure()
66 j=0
67 for i in iHp:
68     plt.plot(L0, p3[i], c='k', ls=ls[j], lw = lw[j]) #p3
69     j += 1
70 legend = plt.legend([str(i) for i in Hp],title="Высота_$$,_м$$")
71 plt.setp(legend.get_title(),fontname="Liberation_Serif")
72 plt.setp(legend.get_title(),fontsize=16)
73 plt.grid()
74
75 plt.title(f"Вероятность_воспламенения_алюминиевой_частицей")
76 plt.tick_params(axis='both', which='major', labelsize=15)
77 plt.xlabel('$L$, м$', fontsize=16)
78 ylabel = plt.ylabel(f'и$Q_{>1}$из_{int(Nchч)}', fontsize=16)

```

```
79 plt.setp(ylabel, fontname="Liberation_Serif")
80
81 plt.xlim(0, 12)
82 plt.ylim(-0.01, 1)
83 plt.show()
```

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Прошивка микроконтроллера МПТЗ (Rust, фрагмент)

```

1  #![no_main]
2  #![no_std]
3  #![allow(non_snake_case)]
4  #![allow(non_camel_case_types)]
5
6  #![allow(deprecated)]
7
8  extern crate panic_halt;
9  use rtfm::app;
10 use heapless::consts::{U20, U2};
11 use svisual_stm32f1::prelude::*;
12
13 // Математика sqrt(), ln(), exp()
14 use libm::F32Ext;
15 use embedded_hal::digital::v2::OutputPin;
16
17 use stm32f1xx_hal::{
18     adc::{self, Adc, AdcDma, SetChannels, Scan},
19     dma::{self, CircBuffer},
20     gpio::{
21         gpioa::{PA5, PA6, PA7, PA0, PA1, PA2},
22         piob::{PB6, PB7, PB5, PB10},
23         Alternate, OpenDrain, Output, PushPull, Analog
24     },
25     i2c::{self, BlockingI2c},
26     prelude::*,
27     serial::{self, Serial, TxDma1},
28     pac::{self, I2C1, ADC1},
29     timer::{self, Timer, CountdownTimer},
30 };
31
32 // Пирометр
33 use mlx9061x::Mlx9061x;
34 type Mlx = Mlx9061x<BlockingI2c<I2C1, (PB6<Alternate<OpenDrain>>,
35     PB7<Alternate<OpenDrain>>)>>;
36 pub struct AdcPins(PA0<Analog>, PA2<Analog>);
37 impl SetChannels<AdcPins> for Adc<ADC1> {
38     fn set_samples(&mut self) {
39         self.set_channel_sample_time(0, adc::SampleTime::T_28);
40         self.set_channel_sample_time(2, adc::SampleTime::T_28);
41     }
42     fn set_sequence(&mut self) {
43         self.set_regular_sequence(&[0, 2, 0, 2]);

```

```

44     }
45 }
46 // Константы
47 const ITERS: usize = 20; // Кол. итераций в цикле
48 const REPEAT: usize = 2; // Кол. повторений для усреднения замера
49 const PHASES: usize = 2; // Кол. фаз (A+B+C) или (A+N) или др.
50 const BUFSIZE: usize = ITERS * REPEAT * PHASES;
51
52 const OFFSET_A: usize = 0;
53 const OFFSET_N: usize = 2;
54
55 // — Калибровочные константы —
56 const ZERO_A: i32 = 0;
57 const ZERO_N: i32 = -20;
58 const SCALE_A: f32 = 30. / 2048. * 1.361; // Адел[[]]
59 const SCALE_N: f32 = 30. / 2048. * 1.361;
60 const SHUNT_A: f32 = 40.;
61 const SHUNT_N: f32 = 40.;
62 //
63 // 3.3 V — 4096
64 // 60 A — 4096
65 // —————
66
67 // Максимальная допустимая температура
68 const TETA_DOP: f32 = 70.;
69 const T_OFF: f32 = 1.; // Время отключения
70 const T_WARN: f32 = 15.; // Время на сигнал
71
72 // Подключение модуля с константами, описывающими провод здесь( не приводится)
73 mod wire;
74
75 pub struct Leds {
76     off: PA5<Output<PushPull>>,
77     warn: PA6<Output<PushPull>>,
78     mtz: PA7<Output<PushPull>>,
79     rele: PB10<Output<PushPull>>,
80 }
81
82 #[app(device = crate::pac, monotonic = rtfm::cyccnt::CYCNT, peripherals = true)]
83 const APP: () = {
84     struct Resources {
85         #[init([0; crate::BUFSIZE]; 2)]
86         adcbuffer: [[u16; crate::BUFSIZE]; 2],
87         adc_cb: CIRCBuffer<u16; crate::BUFSIZE>, AdcDma<AdcPins, Scan>,
88         leds: Leds,
89         #[init([0.; crate::ITERS])]
90         ph_a: [f32; crate::ITERS],
91         #[init([0.; crate::ITERS])]
92         ph_n: [f32; crate::ITERS],

```



```

93     #[init(17.)]
94     teta_sr: f32,
95     #[init(0.)]
96     tau: f32,
97     mlx: Mlx,
98     tx: TxDma1,
99     #[init(wire::Wire::Cu(wire::S::S25))]
100    wire: wire::Wire,
101    svmap: svisual::SV<U2, U20>,
102    b4: PB5<Output<PushPull>>,
103    t2: CountdownTimer<crate::pac::TIM2>,
104 }
105 extern "C" {
106     fn EXTI0();
107 }
108
109 #[init(resources = [adcbuffer])]
110 fn init(c: init::Context) → init::LateResources {
111     let mut flash = c.device.FLASH.constrain();
112     let mut rcc = c.device.RCC.constrain();
113     let clocks = rcc.cfgr.use_hse(8.mhz()).freeze(&mut flash.acr);
114     let mut afio = c.device.AFI0.constrain(&mut rcc.apb2);
115     let channels = c.device.DMA1.split(&mut rcc.ahb);
116     let mut gpioa = c.device.GPIOA.split(&mut rcc.apb2);
117     let mut gpiob = c.device.GPIOB.split(&mut rcc.apb2);
118     let leds = Leds {
119         off : gpioa.pa5.into_push_pull_output(&mut gpioa.crl),
120         warn: gpioa.pa6.into_push_pull_output(&mut gpioa.crl),
121         mtz : gpioa.pa7.into_push_pull_output(&mut gpioa.crl),
122         rele : gpiob.pb10.into_push_pull_output(&mut gpiob.crh),
123     };
124     let mut pb5 = gpiob.pb5.into_push_pull_output(&mut gpiob.crl);
125     // Настройка USART 1
126     let tx = gpioa.pa9.into_alternate_push_pull(&mut gpioa.crh);
127     let rx = gpioa.pa10;
128     let serial = Serial::usart1(
129         c.device.USART1,
130         (tx, rx),
131         &mut afio.mapr,
132         serial::Config::default().baudrate(460_800.bps()),
133         clocks,
134         &mut rcc.apb2,
135     );
136     let tx = serial.split().0.with_dma(channels.4);
137     // Интерфейс I2C для пирометра
138     let scl = gpiob.pb6.into_alternate_open_drain(&mut gpiob.crl);
139     let sda = gpiob.pb7.into_alternate_open_drain(&mut gpiob.crl);
140     let i2c = BlockingI2c::i2c1(
141         c.device.I2C1,

```

```

142     (scl, sda),
143     &mut afio.mapr,
144     i2c::Mode::Fast {
145         frequency: 400_000,
146         duty_cycle: i2c::DutyCycle::Ratio16to9,
147     },
148     clocks,
149     &mut rcc.apb1,
150     10_000,
151     3,
152     10_000,
153     20_000,
154 );
155 let mlx = Mlx9061x::new(i2c, mlx9061x::ADDRESS);
156 // Setup ADC
157 let mut adc1 = adc::Adc::adc1(c.device.ADC1, &mut rcc.apb2, clocks);
158 // Пины АЦП
159 let i_a = gpioa.pa0.into_analog(&mut gpioa.crl);
160 let i_n = gpioa.pa2.into_analog(&mut gpioa.crl);
161 // Установка таймера 3 для АЦП // каждую 1 мс измерение
162 // Использовать сигнал Update для тактирования slave АЦП()
163 let tim3 = Timer::tim3(c.device.TIM3, &clocks, &mut rcc.apb1)
164     .start_master(1000.hz(), crate::pac::tim2::cr2::MMSW::UPDATE);
165 adc1.set_external_trigger(crate::pac::adc1::cr2::EXTSELW::TIM3TRGO);
166 // Таймер 2: Считывание температуры, передача данных на ПК по UART
167 let mut tim2 = Timer::tim2(c.device.TIM2, &clocks, &mut rcc.apb1)
168     .start_count_down(20.hz());
169 let mut adc_dma = channels.1;
170 // Слушать события → вызывать прерывания
171 adc_dma.listen(dma::Event::HalfTransfer);
172 adc_dma.listen(dma::Event::TransferComplete);
173 tim2.listen(timer::Event::Update);
174 // И1— канал DMA
175 let adc_dma = adc1.with_scan_dma(AdcPins (i_a, i_n), adc_dma);
176 pb5.set_low().unwrap();
177 init::LateResources {
178     adc_cb: adc_dma.circ_read(c.resources.adcbuffer),
179     leds,
180     mlx,
181     tx,
182     svmap: svisual::SV::new(),
183     b4: pb5,
184     t2: tim2,
185 }
186 }
187 /// Обработка прерывания от Таймера 2
188 #[task(binds = TIM2, resources = [t2, teta_sr, mlx, tx, svmap])]
189 fn send_data(mut c: send_data::Context) {
190     c.resources.t2.wait().ok();

```

```

191     let mut svmap = None;
192     c.resources.svmap.lock(|sv| {
193         sv.next(|s| {
194             svmap = Some(s.clone());
195         });
196     });
197     let tx = c.resources.tx;
198     if let Some(s) = svmap {
199         tx.send_package_dma(b"CB", &s);
200     }
201 }
202 /// Обработка прерывания от DMA
203 #[task(binds = DMA1_CHANNEL1, priority = 3, spawn = [algorithm],
204 resources = [b4, adc_cb, ph_a, ph_n])]
205 fn take_half_of_circular_buffer(
206     take_half_of_circular_buffer::Context { resources, spawn }:
207     take_half_of_circular_buffer::Context) {
208     let mut ph_a = resources.ph_a;
209     let mut ph_n = resources.ph_n;
210     resources.b4.toggle().unwrap();
211     resources
212         .adc_cb
213         .peek(|buf, _half| {
214             // пока DMA пишет в другую половину буфера, мы обрабатываем
215             take_phase(buf, OFFSET_A, ZERO_A, &mut ph_a);
216             take_phase(buf, OFFSET_N, ZERO_N, &mut ph_n);
217             spawn.algorithm().unwrap();
218         })
219         .unwrap();
220 }
221 #[task(priority = 2, resources = [leds, ph_a, ph_n, teta_sr, tau, wire, svmap])]
222 fn algorithm(mut c: algorithm::Context) {
223     let Leds {off: led_off, warn: led_warn, mtz: led_mtz, rele: led_rele } =
224         c.resources.leds;
225     let sv = c.resources.svmap;
226     let teta_sr = *c.resources.teta_sr;
227     let tau = c.resources.tau;
228     let mut Ia = 0.;
229     c.resources.ph_a.lock(|ph_a| {
230         Ia = rms(&ph_a, SCALE_A*SHUNT_A);
231     });
232     let mut In = 0.;
233     c.resources.ph_n.lock(|ph_n| {
234         In = rms(&ph_n, SCALE_N*SHUNT_N);
235     });
236     sv.add_float_value(b"Ia", Ia).ok();
237     let I = Ia;
238     //let I = (Ia + In) / 2.;
239     let ind = wire::get_index(*c.resources.wire);

```

```

240     let Ki = I / wire::I_DOP[ind];
241     // MT3
242     if Ki > 10. {
243         led_mtz.set_high().unwrap();
244         led_off.set_high().unwrap();
245         led_rele.set_high().unwrap();
246     } else {
247         led_mtz.set_low().unwrap();
248         let tau_ust = parabola(I, &wire::TAU[ind]);
249         let Th: f32;
250         if Ki > wire::T_PIK[ind] {
251             Th = parabola(Ki, &wire::TN_R[ind]);
252         } else {
253             Th = parabola(Ki, &wire::TN_L[ind]);
254         }
255         let tau_off = TETA_DOP - teta_sr;
256         if tau_ust > tau_off {
257             let t_off = danger_time(tau_off, Th, *tau, tau_ust);
258             if t_off < T_OFF {
259                 led_off.set_high().unwrap();
260                 led_rele.set_high().unwrap();
261             } else if t_off < T_WARN {
262                 led_warn.set_high().unwrap();
263             } else {
264                 led_warn.set_low().unwrap();
265             }
266         }
267         *tau = tau_after(0.02, Th, *tau, tau_ust);
268         // добавить запись в память
269         sv.add_float_value(b"tau", *tau + teta_sr).ok();
270     }
271 }
272 };
273 /// Разбиение общего буфера на отдельные каждый для своей фазы
274 fn take_phase(buf: &[u16; BUFSIZE], offset: usize, zero: i32,
275     phase: &mut [f32; ITERS]) {
276     for i in 0..ITERS {
277         let mut sum = 0.;
278         for j in 0..REPEAT {
279             sum += buf[offset + i * REPEAT * PHASES + j * PHASES] as f32
280         }
281         let aver = (sum / (REPEAT as f32)) - zero as f32;
282         phase[i] = aver;
283     }
284 }
285 fn resolve(phase: &mut [f32; ITERS], zeros: &[f32; ITERS]) {
286     for i in 0..ITERS {
287         phase[i] -= zeros[i];
288     }

```

```
289 }
290 /// Расчет RMS: действующего значения
291 fn rms(phase: &[f32; ITERS], scale: f32) -> f32 {
292     let sum = phase.iter().fold(0., |acc, &i| acc + i * i);
293     ((sum as f32) / (ITERS as f32)).sqrt() * scale
294 }
295 fn tau_after(dt: f32, T: f32, tau0: f32, tau_ust: f32) -> f32 {
296     tau_ust - (tau_ust - tau0) * (-dt / T).exp()
297 }
298 fn danger_time(tau_off: f32, Th: f32, tau0: f32, tau_ust: f32) -> f32 {
299     -Th * ((tau_ust - tau_off) / (tau_ust - tau0)).ln()
300 }
301 fn parabola(x: f32, koef: &[f32; 3]) -> f32 {
302     koef[0] * x*x + koef[1]*x + koef[2]
303 }
```

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Моделирование процесса нагрева электропроводки в среде Comsol Multiphysics

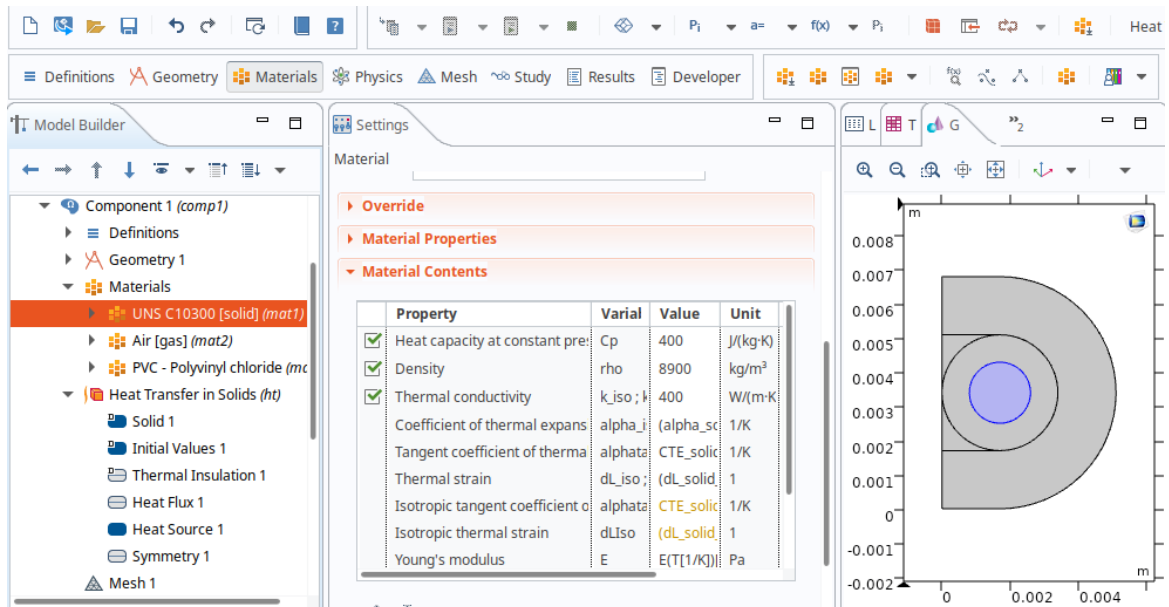


Рисунок Д.1 – Окно программы Comsol Multiphysics: свойства меди

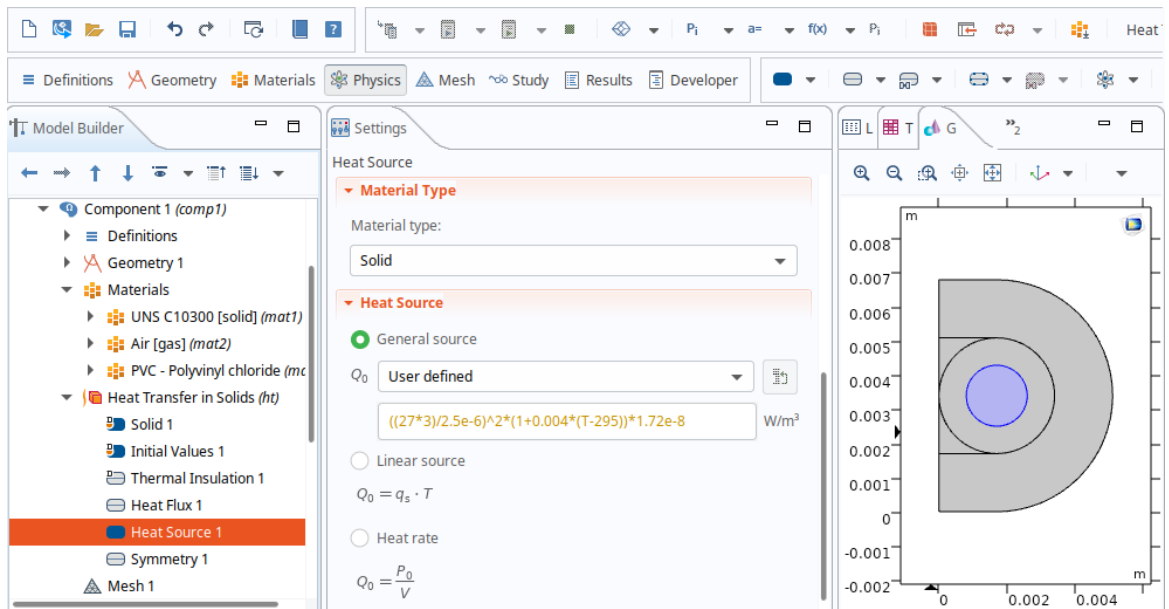


Рисунок Д.2 – Окно программы Comsol Multiphysics: свойства источника тока

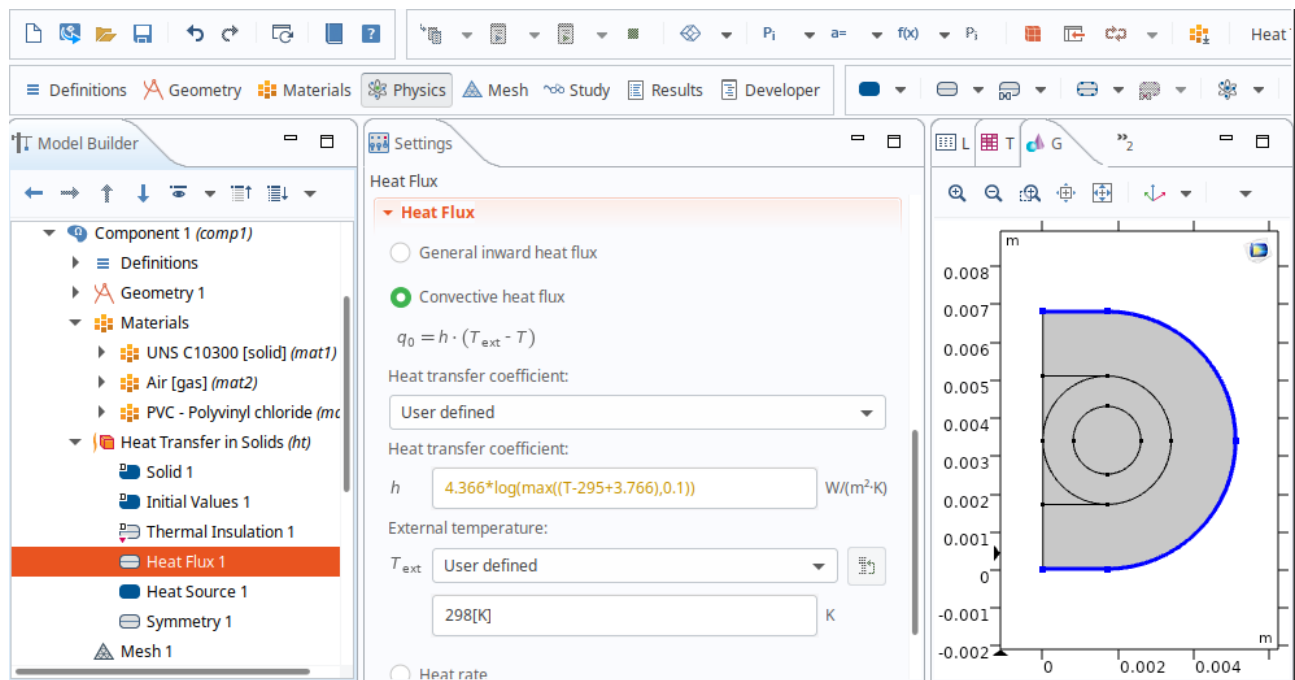


Рисунок Д.3 – Окно программы Comsol Multiphysics: граничные условия теплообмена

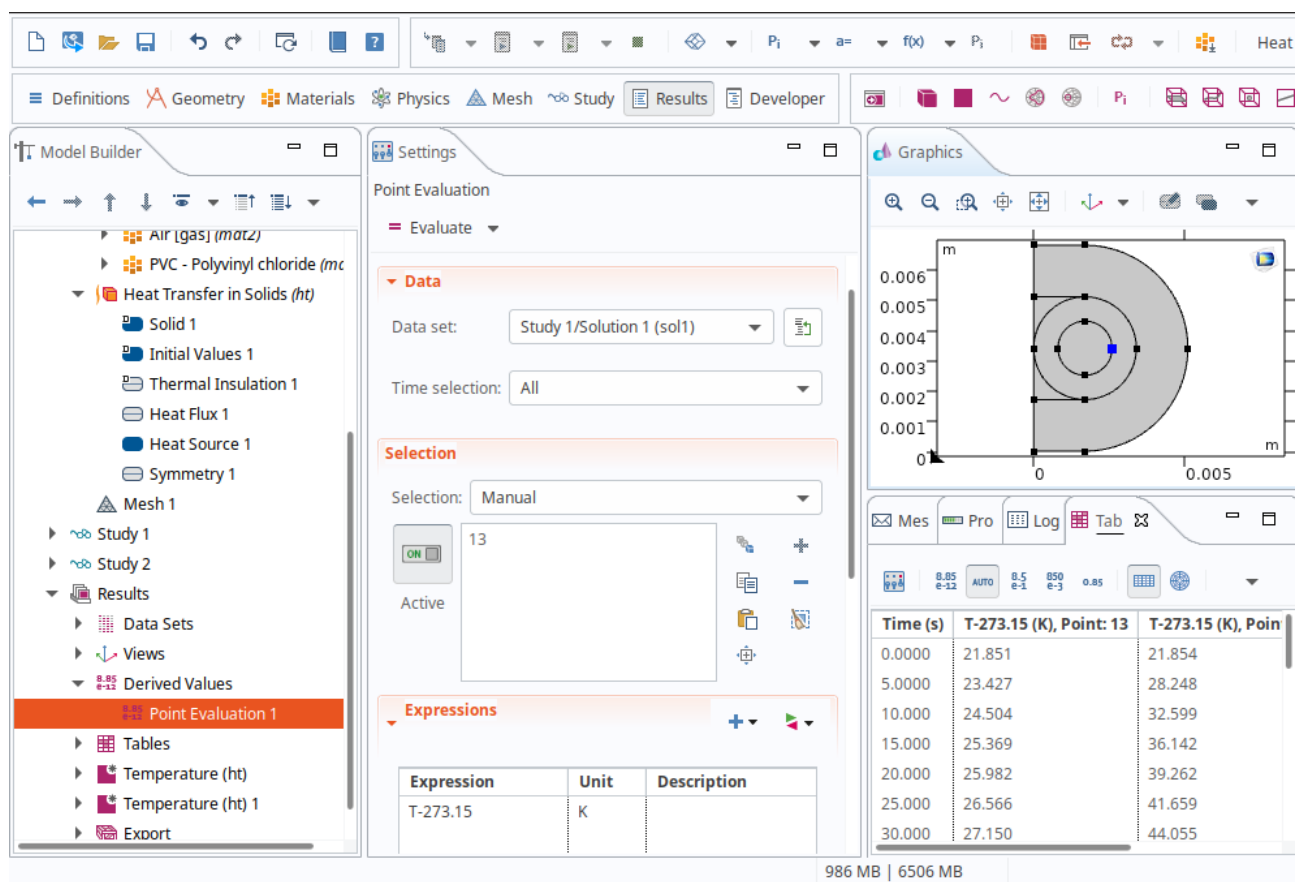


Рисунок Д.4 – Окно программы Comsol Multiphysics: результаты расчетов температуры на границе жила–изоляция

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

Результаты экспериментов нагрева 2-жильных проводов

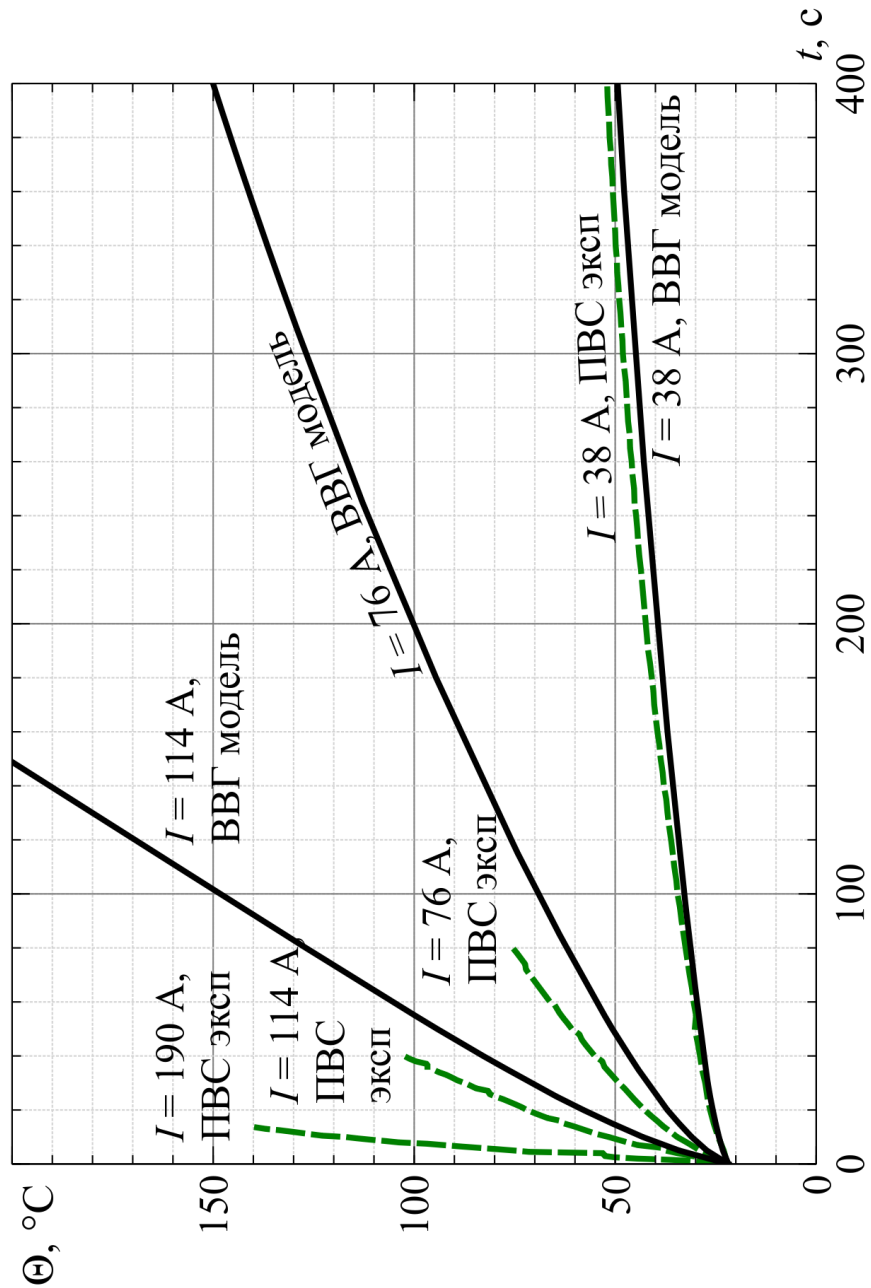


Рисунок Е.1 – Динамика нагрева на границе жила-изоляция двухжильного кабеля ВВГ 2x4

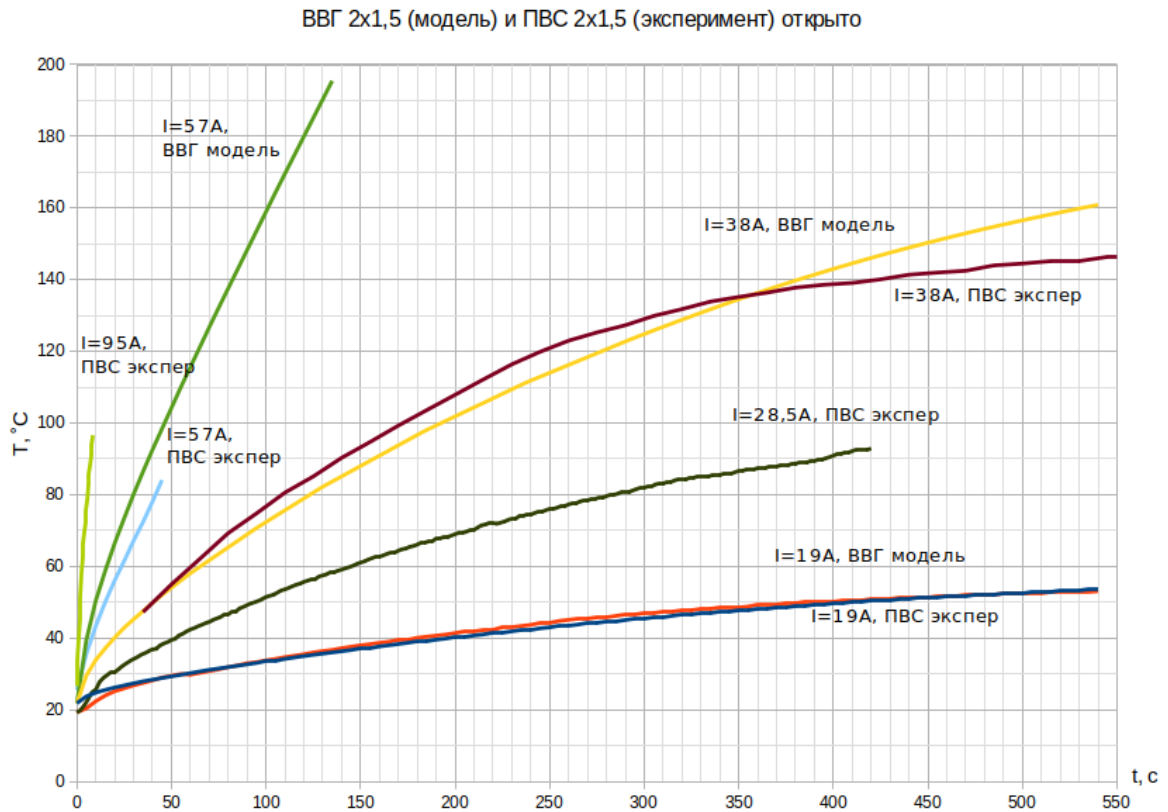


Рисунок Е.2 – Динамика нагрева на границе жила-изоляция двужильных кабеля ВВГ 2x1,5 и провода ПВС 2x1,5

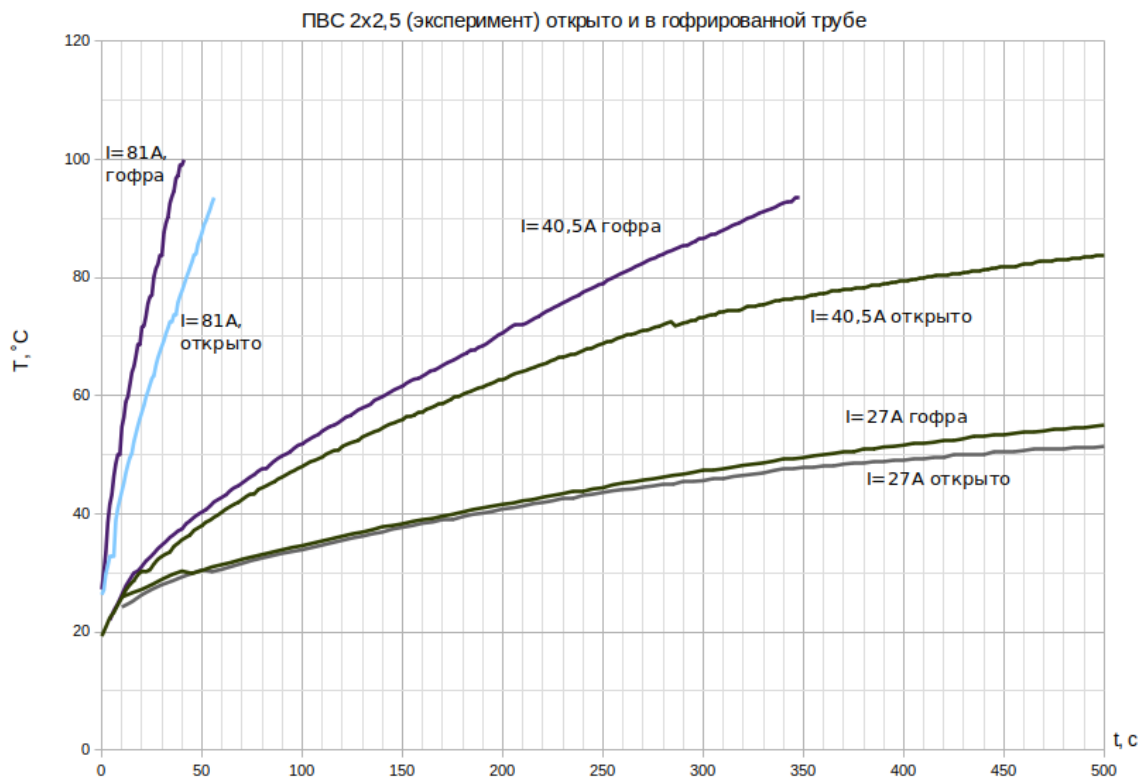


Рисунок Е.3 – Динамика нагрева на границе жила-изоляция двужильного провода ПВС 2x2,5 в гофре и открыто

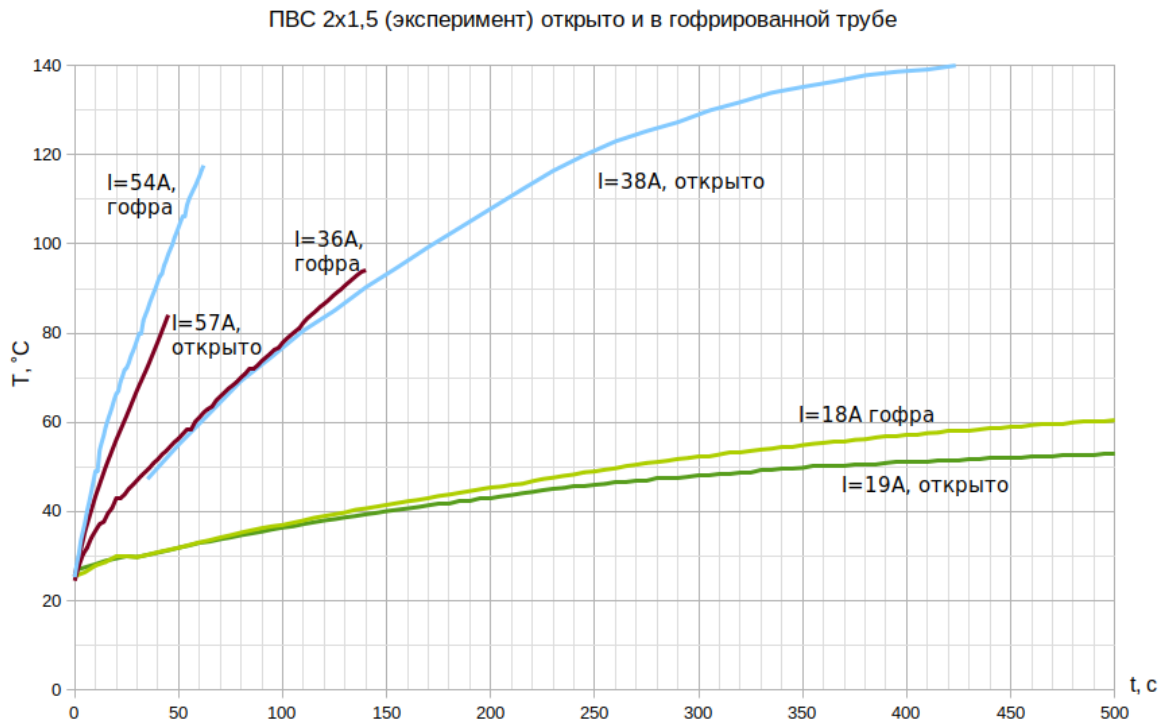


Рисунок Е.4 – Динамика нагрева на границе жила-изоляция двужильного провода ПВС 2x1,5 в гофре и открыто

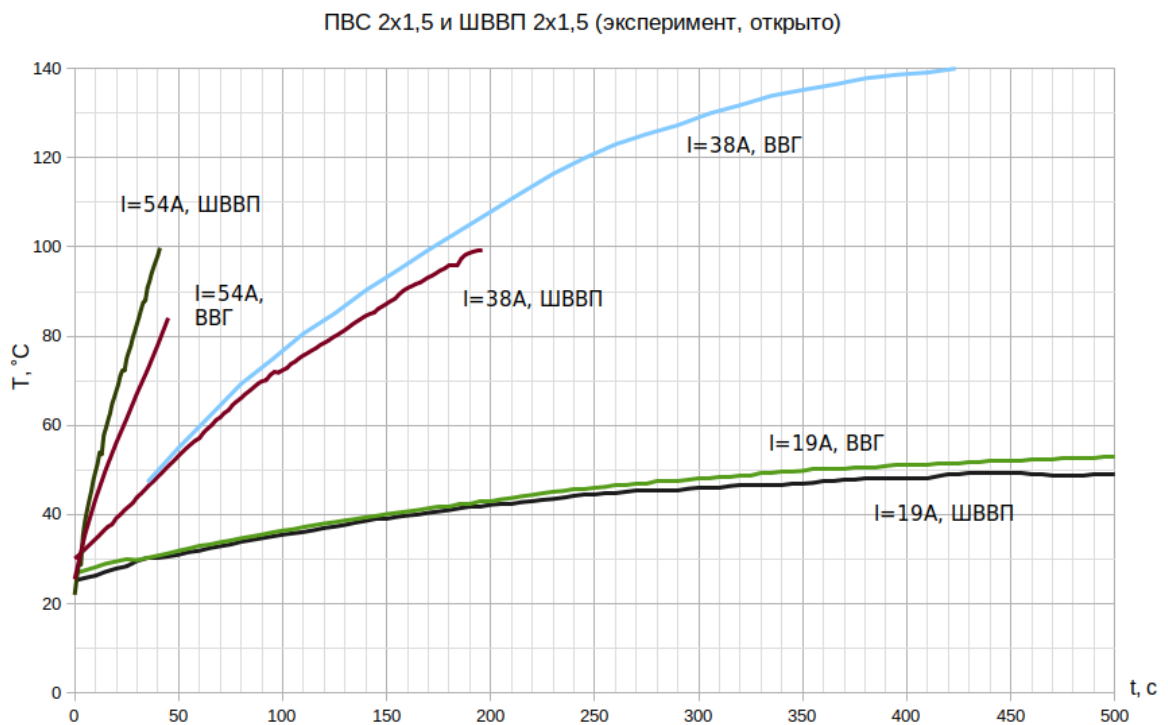


Рисунок Е.5 – Динамика нагрева на границе жила-изоляция двужильных проводов ПВС 2x1,5 и ШВВП 2x1,5 открыто

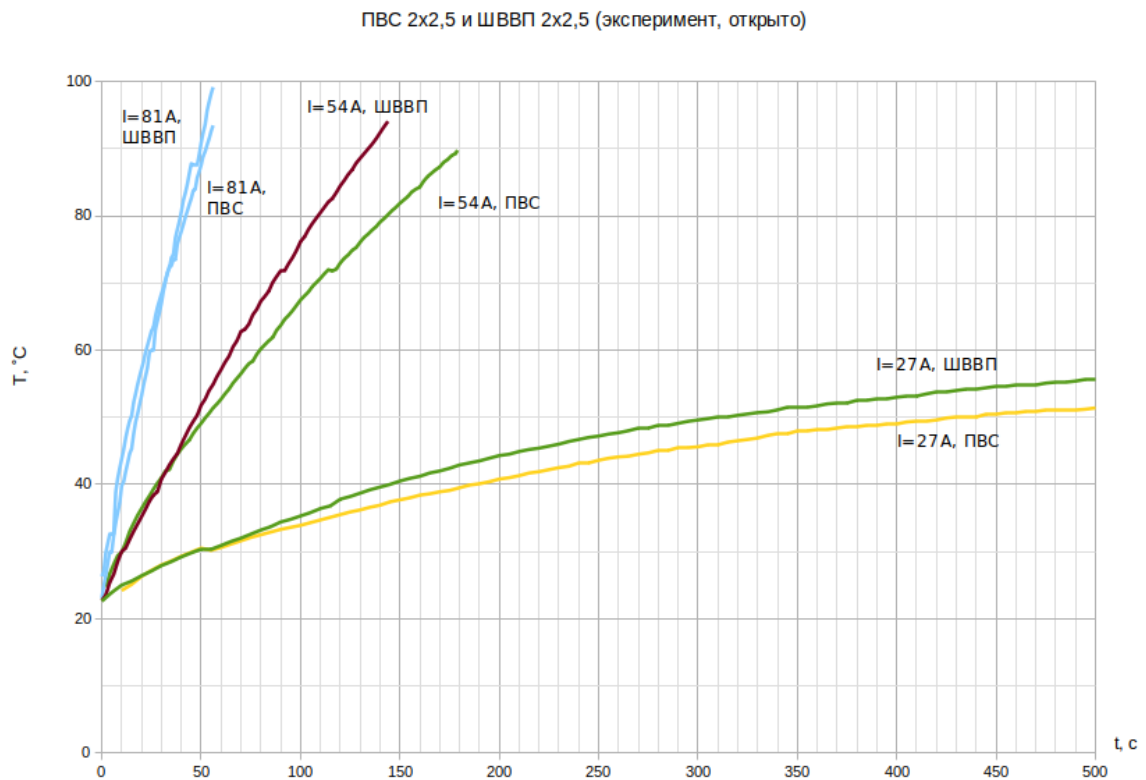


Рисунок Е.6 – Динамика нагрева на границе жила-изоляция двужильных проводов ПВС 2x1,5 и ШВВП 2x2,5 открыто

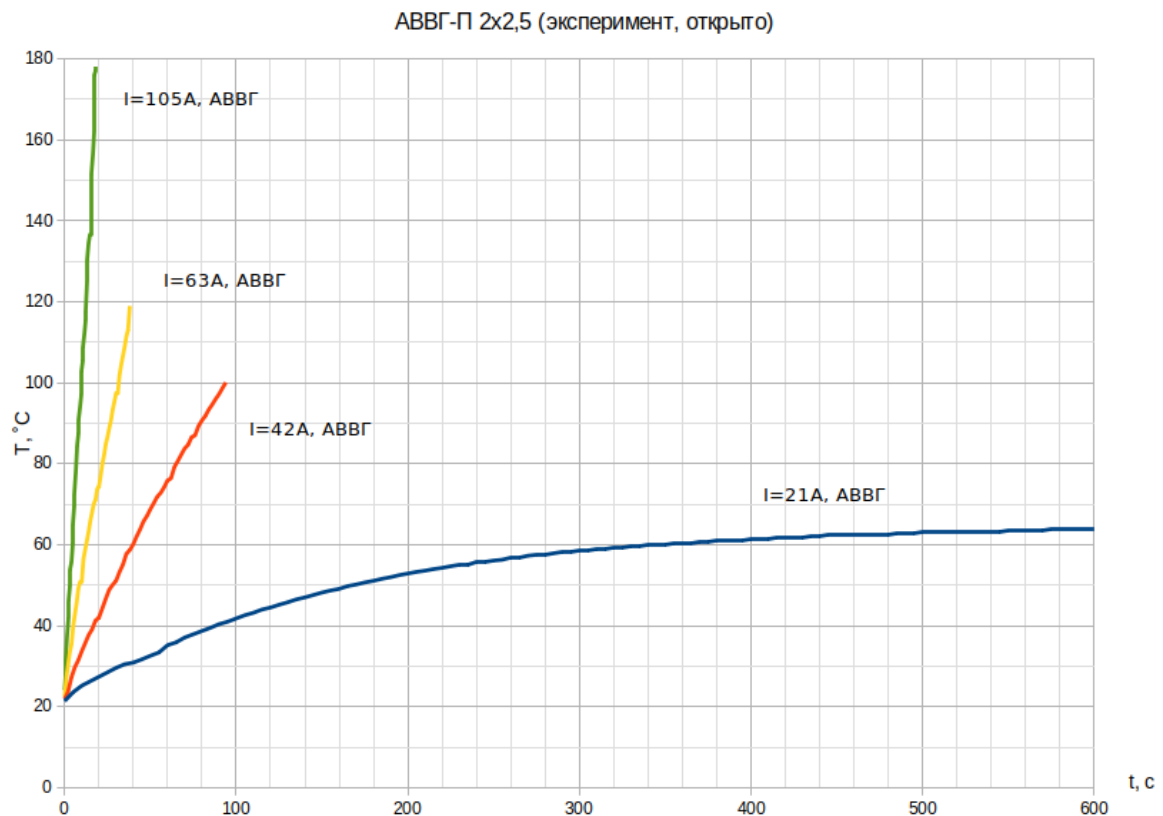


Рисунок Е.7 – Динамика нагрева на границе жила-изоляция двужильного кабеля АВВГ-П 2x2,5 открыто

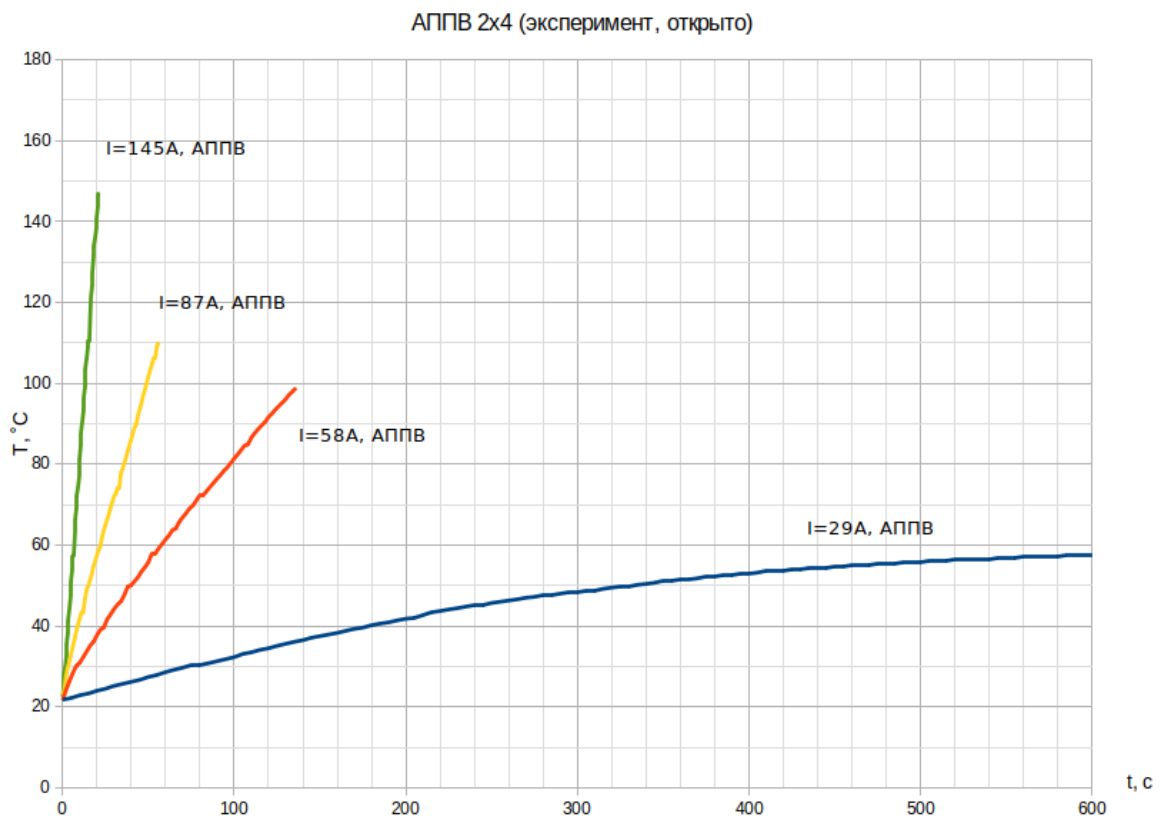


Рисунок Е.8 – Динамика нагрева на границе жила-изоляция двужильного провода АППВ 2х4 открыто

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж

Документы, подтверждающие внедрение результатов диссертационной
работы

МИНИСТЕРСТВО ПО ДЕЛАМ ГРАЖДАНСКОЙ ОБОРОНЫ, ЧРЕЗВЫЧАЙНЫМ
СИТУАЦИЯМ И ЛИКВИДАЦИИ ПОСЛЕДСТВИЙ СТИХИЙНЫХ БЕДСТВИЙ ДНР
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ ДНР

Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела, пожарной
безопасности и гражданской защиты «РЕСПИРАТОР»

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
«Донецкий национальный технический университет»



**МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ВЕРОЯТНОСТИ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ПОЖАРООПАСНЫХ
СИТУАЦИЙ В ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННЫХ ПОМЕЩЕНИЯХ
С НАПРЯЖЕНИЕМ 0,4/0,22 КВ**

Донецк, 2019 г.

Соответствует оригиналу:
Ученый секретарь диссертационного
совета Д 01.008.01

И.А.Бершадский

УТВЕРЖДАЮ

Директор
НИИГД "Респиратор"

В.Г. Агеев

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе
ГОУВПО «ДонНТУ»

С.В. Борщевский

**МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ВЕРОЯТНОСТИ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ПОЖАРООПАСНЫХ
СИТУАЦИЙ В ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННЫХ ПОМЕЩЕНИЯХ**

С НАПРЯЖЕНИЕМ 0,4/0,22 КВ

(I редакция)

От НИИГД "Респиратор": Подпись

д. т.н. с.н.с. Мамаев В. В. *Мамаев*

От ДонНТУ:

Подпись

д.т.н. проф. Ковалёв А. П. *А. Ковалев*

д.т.н. доц. Бершадский И. А. *И. Бершадский*

аспирант Згарбул А. В. *А. Згарбул*

к.т.н. доц. Москвина И. И. *И. Москвина*

к.т.н. доц. Шевченко О. А. *О. Шевченко*

@ Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела, пожарной безопасности и гражданской защиты «РЕСПИРАТОР»

Донецкий национальный технический университет

Издание официальное. Перепечатка воспрещена

Соответствует оригиналу:
Ученый секретарь диссертационного
совета Д 01.008.01

И.А.Бершадский



ДОНЕЦКАЯ НАРОДНАЯ РЕСПУБЛИКА
 МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
МАКЕЕВСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
по безопасности работ в горной промышленности
МакНИИ

ул. Лихачева, 60, Горняцкий район, г. Макеевка, 86108
 телефоны: (062) 300-11-32, (0623) 22-22-18, факс (0623)22-19-00
 e-mail: maknii2014@gmail.com <http://mupmaknii.se-ua.net>



«УТВЕРЖДАЮ»
 Заместитель директора
 по научной работе МакНИИ, к.т.н
 О.А. Демченко

_____ 2019 г.

АКТ

об использовании результатов диссертационной работы
 ассистента кафедры «Электроснабжение промпредприятий и
 городов» ГОУ ВПО «ДонНТУ» Згарбула А.В.

«Разработка методов обеспечения пожаробезопасности установочных электропроводок 0,4 кВ при их эксплуатации»,
 представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук

Комиссия в составе: главного механика МакНИИ Ивченко А.А.,
 начальника энергослужбы Малышко Ю.И., заведующего отделом электрооборудования Горошко И.П. подтверждает, что научные положения и результаты, содержащиеся в диссертации Згарбула А.В. используются в МакНИИ следующим образом:

способ защиты электрической сети напряжением 220 В от перегрузок с учетом нестационарного нагрева провода при контроле рабочей температуры распределительных сетей в корпусе № 1 отдела электрооборудования, корпусе № 2 отдела электрооборудования и в здании учебно-курсового комбината МакНИИ в процессе проведения планового осмотра и ревизии.

Главный механик

А.А. Ивченко

Начальник энергослужбы

Ю.И. Малышко

Заведующий отделом электрооборудования

И.П. Горошко

Соответствует оригиналу:
 Ученый секретарь диссертационного
 совета Д 01.008.01

И.А.Бершадский



ДОНЕЦКАЯ НАРОДНАЯ РЕСПУБЛИКА
 МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
МАКЕЕВСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
по безопасности работ в горной промышленности
МакНИИ

ул. Лихачева, 60, Горняцкий район, г. Макеевка, 86108
 телефоны: (062) 300-11-32, (0623) 22-22-18, факс (0623)22-19-00
 e-mail: maknii2014@gmail.com <http://mupmaknii.se-ua.net>



«УТВЕРЖДАЮ»
 Заместитель директора
 по научной работе МакНИИ, к.т.н

О.А. Демченко
 О.А. Демченко

_____ 2019 г.

АКТ

об использовании результатов диссертационной работы
 ассистента кафедры «Электроснабжение промпредприятий и
 городов» ГОУ ВПО «ДонНТУ» Згарбула А.В.

«Разработка методов обеспечения пожаробезопасности установочных
 электропроводок 0,4 кВ при их эксплуатации»,
 представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук

Комиссия в составе:

Зав. отделом электрооборудования

Горошко И.П

Зав. лабораторией искробезопасности

Гладков А.Ю

Старший научный сотрудник
 отдела электрооборудования, к.т.н

Муфель Л.А

Соответствует оригиналу:
 Ученый секретарь диссертационного
 совета Д 01.008.01

И.А.Бершадский

подтверждает, что научные положения и результаты, содержащиеся в диссертации Згарбула А.В. используются в ГУ «МакНИИ» следующим образом:

методика оценки причастности коротких замыканий в электрической проводке к пожарам, основанная на математической модели зажигания горючих веществ частицами металла использована при разработке Технических требований к устройствам защиты от короткого замыкания в рамках выполняемой НИР «Провести исследования и разработать технические требования к устройству защиты от короткого замыкания нового поколения» № гос. регистрации № гос. регистрации 0118D000086.

Старший научный сотрудник
отдела электрооборудования, к.т.н
(Руководитель НИР)



Муфель Л.А

Зав. лабораторией искробезопасности,
руководитель НИР



Гладков А.Ю

Зав. отделом электрооборудования



Горошко И.П

Соответствует оригиналу:
Ученый секретарь диссертационного
совета Д 01.008.01

И.А.Бершадский



**ДОНЕЦКАЯ НАРОДНАЯ РЕСПУБЛИКА
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

283001, г. Донецк, ул. Артема, 58 тел.: (062) 337-17-33, 335-75-62, факс: (062) 304-12-78
эл. почта: donntu.info@mail.ru

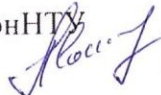
27.12.2019 № 30-12/248
На № _____

Диссертационный совет Д. 01.008.01
при Донецком национальном
техническом университете

СПРАВКА

об участии в научно-исследовательских работах кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий и городов» ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет» аспиранта Згарбула А.В.

С 2015 по 2019 г. Згарбул А.В. являлся исполнителем научно-исследовательских работ Н22-15 «Развитие методов оценки пожарной безопасности электрических сетей 0,4/0,22 кВ», Н10-16 «Параметры живучести узлов нагрузки и искробезопасности электроэнергетического оборудования», Н22-17 «Развитие методов оценки и обеспечения пожаробезопасности электрифицированных помещений, искро- и электробезопасности шахтных электрических сетей».

Начальник научно-исследовательской части ДонНТУ
д-р техн. наук, доцент  А.Л. Сотников

Проректор по научной работе ДонНТУ
д-р техн. наук, профессор  С.В. Борщевский



Соответствует оригиналу
ученый секретарь диссертационного
совета Д 01.008.01

И.А. Бершадский



ДОНЕЦКАЯ НАРОДНАЯ РЕСПУБЛИКА
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«МАКЕЕВСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ПО БЕЗОПАСНОСТИ РАБОТ В ГОРНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ»
МакНИИ

ул. Лихачева, 60, Горняцкий район, г. Макеевка, 86132
телефоны: (062) 300-11-32, (0623) 22-22-18, факс (0623)22-19-00
e-mail: maknii2014@inbox.ru, http://maknii.jimdo.com

20.05.2019 № 14/1030

СПРАВКА

об участии в заседании круглого стола «Новые способы и средства обеспечения безопасности применения электрической энергии в шахтах»

15 мая 2019 г.

г. Макеевка

Дана аспиранту ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет» Згарбулу Андрею Викторовичу в том, что он принял участие в заседании круглого стола «Новые способы и средства обеспечения безопасности применения электрической энергии в шахтах», проведенного в Государственном учреждении «Макеевский научно-исследовательский институт по безопасности работ в горной промышленности» МакНИИ в рамках V Международного научного форума Донецкой Народной Республики «Инновационные перспективы Донбасса: инфраструктурное и социально-экономическое развитие».

В ходе проведения круглого стола аспирант Згарбул А. В. выступил с докладом «Совершенствование метода расчетной оценки искробезопасности для сложных электрических цепей горношахтного оборудования».

В обсуждении доклада приняли участие учёные и компетентные специалисты ГУ «Макеевский научно-исследовательский институт по безопасности работ в горной промышленности» МакНИИ; ГУ «Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт взрывозащищённого электрооборудования НИИВЭ; ГУ «Научно-исследовательский институт «Автоматгормаш им. В.А. Антипова», ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет», специалисты угледобывающих предприятий Донецкой Народной Республики.

Результаты научных исследований, изложенные в докладе, участниками круглого стола признаны актуальными и рекомендованы для включения в перечень рекомендаций итогового документа (меморандума) V Международного научного форума Донецкой Народной Республики «Инновационные перспективы Донбасса: инфраструктурное и социально-экономическое развитие».

Заместитель директора
по научной работе, канд. техн. наук



О.А. Демченко

Соответствует оригиналу:
Ученый секретарь диссертационного
совета Д 01.008.01

И.А. Бершадский

**ДОНЕЦКАЯ НАРОДНАЯ РЕСПУБЛИКА
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
“ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ”**

283001, г. Донецк, ул. Артема, 58 тел.: (062) 337-17-33, 335-75-62, факс: (062) 304-12-78
эл. почта: donntu.info@mail.ru

27.12.2019 № 30-12/249

На № _____

Диссертационный совет Д. 01.008.01
при ГОУВПО ДОНЕЦКИЙ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

СПРАВКА

о внедрении результатов диссертационной работы
Згарбула Андрея Викторовича на тему «Обоснование параметров тепловой
защиты установочных электропроводок 0,38 кВ для повышения безопасности
их эксплуатации», представленной на соискание ученой степени кандидата
технических наук по специальности 05.26.01 – Охрана труда (по отраслям)
(технические науки)

Результаты диссертационной работы Згарбула А.В. «Обоснование параметров тепловой защиты установочных электропроводок 0,38 кВ для повышения безопасности их эксплуатации», использованы в образовательной деятельности ГОУВПО ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ:

- для чтения курсов «Микропроцессорная техника», «Противоаварийная автоматика электротехнических комплексов», «Методы оценки надежности электрооборудования» для студентов специальности «Электроснабжение» направления «Электроэнергетика и электротехника»;
- при выполнении дипломного проектирования, а также выпускных магистерских работ студентов указанной специальности.

Использование результатов диссертационной работы позволяет повысить уровень по соответствующим разделам изучаемых курсов.

Проректор по научной работе
ГОУВПО ДОНЕЦКУ
доктор техн. наук профессор



С.В. Борщевский

Соответствует оригиналу:
Ученый секретарь диссертационного
совета Д 01.008.01

И.А. Бершадский