МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

Институт инженерной и экологической безопасности
(наименование института полностью)

20.04.01 Техносферная безопасность
(код и наименование направления подготовки)

Управление пожарной безопасностью
(направленность (профиль))

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)

на тему Технология обеспечения безопасности электроустановок

Обучающийся А.А. Самарский _____
(Инициалы Фамилия) (личная подпись)

Научный руководитель к.т.н., доцент А.В. Краснов
(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Консультант к.э.н., доцент Т.Ю. Фрезе
(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Тольятти 2024

Содержание

Введение……...4
Термины и определения……..8
Перечень сокращений и обозначений……...9
1 Исследование современных технологий обеспечения пожарной безопасности электроустановок……...10
1.1 Исследование технологических процессов, обеспечивающих пожарную безопасность электроустановок на современных промышленных предприятиях……...10
1.2 Анализ технических проблем, связанных с применением систем обеспечения пожарной безопасности электроустановок в промышленном производстве……17
2 Разработка рекомендаций по повышению эффективности технологий обеспечения пожарной безопасности электроустановок на промышленных предприятиях…….24
2.1 Анализ путей и методов совершенствования технологий обеспечения пожарной безопасности электроустановок на промышленных предприятиях……...24
2.2 Разработка рекомендаций по модернизации технологий обеспечения пожарной безопасности электроустановок на промышленных предприятиях……...37
3 Анализ эффективности применения усовершенствованных технологий обеспечения пожарной безопасности электроустановок на промышленных предприятиях…….50
3.1 Методика оценки технико-экономической эффективности применения усовершенствованных технологий обеспечения пожарной безопасности электроустановок на промышленных предприятиях……...51

3.2 Анализ и оценка эффективности разработанных усовершенствованных технологий обеспечения пожарной безопасности электроустановок на промышленных предприятиях……...71
Заключение…….76
Список используемых источников……..80

Введение

Обеспечение пожарной безопасности играет большую роль в целях надежности, бесперебойности функционирования и предотвращения материального ущерба объектам экономики, социальным объектам, собственникам жилья, сохранения здоровья и жизней гражданам. Пожар – это чрезвычайная ситуация в виде горения имущественных и иных ценностей и вышедшая на каком-то этапе из-под контроля людей. Достаточно часто возникновение возгорания происходит по вине человека в следствие разных причин.

С увеличением использования электроприборов и автоматизации промышленности возрастает и число электроустановок. Сложность и мощность современных электроустановок возрастают, что влечет за собой новые риски и потенциальные угрозы. Новые технологии требуют более тщательных решений в области безопасности.

Поэтому актуальность обеспечения пожарной безопасности электроустановок не вызывает сомнений и требует постоянного внимания как со стороны специалистов, так и со стороны руководителей организаций.

Объект исследования: пожарная безопасность электроустановок на объектах ООО «РН-Пожарная безопасность».

Предмет исследования: обеспечение пожарной безопасности электроустановок.

Цель исследования: повышение эффективности пожарной безопасности электроустановок путем оптимизации технологических решений.

Гипотеза исследования состоит в том, что применение инновационных технологических решений позволит оптимизировать технологию обеспечения пожарной безопасности электроустановок, если:

- провести исследование современных технологий обеспечения пожарной безопасности электроустановок;

- провести анализ путей и методов совершенствования технологий обеспечения пожарной безопасности электроустановок на промышленных предприятиях;
- разработать рекомендации по модернизации технологий обеспечения пожарной безопасности электроустановок на промышленных предприятиях.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- провести исследование технологических решений, обеспечивающих пожарную безопасность электроустановок на современных промышленных предприятиях;
- проанализировать технические проблемы, связанные с применением систем обеспечения пожарной безопасности электроустановок в промышленном производстве;
- провести анализ путей и методов совершенствования технологий обеспечения пожарной безопасности электроустановок на промышленных предприятиях;
- разработать рекомендации по оптимизации технологий обеспечения пожарной безопасности электроустановок на промышленных предприятиях.

Теоретико–методологическую основу исследования составили: научные публикации, учебники, учебные пособия по теме исследования.

Базовыми для настоящего исследования явились также: ресурсы патентных источников.

Методы исследования: статистический анализ, методы системного анализа, теории управления и имитационного моделирования.

Опытно-экспериментальная база исследования основана на базе ООО «РН-Пожарная безопасность».

Научная новизна исследования заключается в:

- выявлении области значений параметров влияние кабельной линии (сечение проводников, протяженность, уровень нагрузки) на пожарную нагрузку, в пределах которой увеличение сечения проводников по дополнительному требованию обеспечения необходимой чувствительности функции токовой отсечки автоматического выключателя к токам однофазного короткого замыкания может быть признано оправданным с позиций увеличения эффективности обеспечения пожарной безопасности;
- разработка способа применения устройства защитного отключения и устройства для измерения количества электричества в цепи утечки тока трехфазной электрической сети для обеспечения пожарной безопасности электроустановок.

Теоретическая значимость исследования включает изучение особенностей современных технологий обеспечения пожарной безопасности электроустановок.

Практическая значимость исследования заключается в применении устройства защитного отключения и устройства для измерения количества электричества в цепи утечки тока трехфазной электрической сети для обеспечения пожарной безопасности электроустановок.

Достоверность и обоснованность результатов исследования достигнута за счет анализа современных научно-исследовательских разработок ведущих российских и зарубежных специалистов в области пожарной безопасности и подтвержденной эффективностью разработанных решений объектов.

Личное участие автора в организации и проведении исследования состоит в выявлении области значений параметров влияние кабельной линии (сечение проводников, протяженность, уровень нагрузки) на пожарную нагрузку, в пределах которой увеличение сечения проводников по дополнительному требованию обеспечения необходимой чувствительности функции токовой отсечки автоматического выключателя к токам однофазного короткого замыкания может быть признано оправданным с

позиций увеличения эффективности обеспечения пожарной безопасности и разработке способа применения устройства защитного отключения и устройства для измерения количества электричества в цепи утечки тока трехфазной электрической сети для обеспечения пожарной безопасности электроустановок.

Апробация и внедрение результатов работы велись в течение всего исследования. Его результаты докладывались на следующих конференциях:

Участие в международной научной конференции технико-научного журнала «Точная наука» №153 (2024 год), выступление на тему: Выявление области значений параметров кабельной линии, в пределах которой обеспечивается необходимая чувствительность функции токовой отсечки автоматического выключателя.

На защиту выносятся:

- результаты исследования современных технологий обеспечения пожарной безопасности электроустановок;
- результаты анализа технических проблем, связанных с применением систем обеспечения пожарной безопасности электроустановок в промышленном производстве;
- результаты анализа путей и методов совершенствования технологий обеспечения пожарной безопасности электроустановок на промышленных предприятиях;
- предлагаемые рекомендации по модернизации технологий обеспечения пожарной безопасности электроустановок на промышленных предприятиях.

Структура магистерской диссертации. Работа состоит из введения, трех разделов, заключения, содержит 12 рисунков, 6 таблиц, список использованной литературы (44 источника). Основной текст работы изложен на 83 страницах.

Термины и определения

Критическая температура нагрева – это «температура фазового равновесия – температура вещества в критическом состоянии» [42].

Несущая способность – «способность выдерживать нагрузку при поддержании нормального функционирования» [44].

Противопожарная защита – это «совокупность организационно–технических мероприятий, конструктивных и объемно–планировочных решений, а также технических средств, направленных на предотвращение воздействия на людей опасных факторов пожара и ограничение материальных потерь от пожара» [21].

Теплоизолирующая способность – «это способность ограждающей конструкции при одностороннем огневом воздействии ограничивать рост температуры необогреваемой поверхности ниже установленных уровней» [41].

Устройство защитного отключения – это «коммутационный аппарат для защиты электрической цепи от токов утечки. В отличии от автоматического выключателя, защищающего проводку от короткого замыкания и значительных перегрузок, это устройство срабатывает только при возникновении токов утечки» [40].

Перечень сокращений и обозначений

АВ – автоматический выключатель.

АПВ – А – алюминий; означает, что жила выполнена из алюминия; П – провод; В – винил, изоляция из ПВХ пластиката, не распространяющего горение.

ВА – выключатель автоматический.

КЗ – короткое замыкание.

НПБ – нормы пожарной безопасности.

ОПЧ – открытые проводящие части.

ПБ – пожарная безопасность.

ПВХ – поливинлхлорид.

ТС СПЗ – технических средств системы противопожарной защиты

ТПЖ – токопроводящая жила провода.

ТТНП – трансформатор токов нулевой последовательности.

УДТ – устройство дифференциального тока.

УЗО – устройство защитного отключения.

УЗДП – устройство защиты от дугового пробоя.

ЭУ – электроустановка.

1 Исследование современных технологий обеспечения пожарной безопасности электроустановок

1.1 Исследование технологических процессов, обеспечивающих пожарную безопасность электроустановок на современных промышленных предприятиях

Мероприятия по обеспечению безаварийного производственного процесса в электроустановках подразделяются на организационные и технические.

«К техническим мероприятиям относятся действия, которые должен произвести электротехнический персонал при выполнении работ со снятием или без снятия напряжения. При снятии напряжения нужно принять меры по предотвращению случайного или ошибочного включения электроустановки. Случайное включение происходит в том случае, если ослабевают пружины толкателя, контакты приходят в действие и взаимодействуют, что вызывает подачу тока. Чтобы этого не произошло, между разъединителями или предохранителями нужно установить изоляционную прокладку, например, кембрики или гетинаксовые пластинки. На ножи надевают изоляционные колпаки. Если произойдет деформация, вызванная причинами природного или техногенного характера, ножи и контакты не встретятся – между ними будут проложены прокладки» [17].

Еще одна возможность несанкционированного включения ЭУ – человеческий фактор, ошибка персонала. Во избежание этого на приводах и ключах дистанционного управления вывешивают запрещающий плакат «Не включать, работают люди» или «Не включать, работа на линии».

Технические мероприятия при подготовке рабочего места со снятием напряжения в электроустановке:

- «выполнение отключений и принятие мер, препятствующих подаче напряжения вследствие ошибочного или самопроизвольного включения коммутационных аппаратов;
- вывешивание на приводах ручного и на ключах дистанционного управления запрещающих плакатов;
- проверка отсутствия напряжения на токоведущих частях, которые должны быть заземлены для защиты людей от поражения электрическим током;
- установка заземления; вывешивание указательных плакатов;
- ограждение при необходимости рабочих мест и оставшихся под напряжением токоведущих частей, вывешивание предупреждающих и предписывающих плакатов» [17].

«Указатели напряжения необходимо проверять своевременно. Работник должен быть обеспечен как УВН, так и индикатором наличия напряжения, при этом отсутствие напряжения проверяется только УВН. Электроустановку следует оснастить как минимум двумя указателями ВН. На указателе и на индикаторе должна быть наклейка с указанием даты следующего испытания не реже 1 раза в 12 месяцев» [29].

Обеспечение пожарной безопасности – это «комплекс мероприятий, который предполагает соблюдение ряда нормативно-правовых актов, стандартов и рекомендаций» [29].

Федеральный закон от 21.12.1994 № 69–ФЗ «О пожарной безопасности» «определяет общие правовые, экономические и социальные основы обеспечения пожарной безопасности в Российской Федерации, регулирует в этой области отношения между органами государственной власти, органами местного самоуправления, общественными объединениями, юридическими лицами, должностными лицами, гражданами, в том числе индивидуальными предпринимателями» [18].

Постановление Правительства РФ от 12 апреля 2012 года № 290 «О федеральном государственном пожарном надзоре» устанавливает «порядок

организации и осуществления федерального государственного пожарного надзора. Федеральный государственный пожарный надзор на подведомственных объектах определяет:

- порядок учета объектов надзора, в том числе представления в федеральный орган исполнительной власти, уполномоченный на решение задач в области пожарной безопасности, сведений об объектах надзора, в отношении которых указанные федеральные органы исполнительной власти не осуществляют федеральный государственный пожарный надзор;
- порядок и сроки проведения контрольных (надзорных) мероприятий;
- порядок осуществления профилактики рисков причинения вреда охраняемым законом ценностям;
- порядок обжалования решений, действий (бездействия) должностных лиц;
- квалификационные требования к государственным инспекторам по пожарному надзору» [20].

Постановление Правительства Самарской области №15 от 31.01.2008 «О противопожарной службе Самарской области» определяет задачи противопожарной службы Самарской области:

- «организация и осуществление профилактики пожаров;
- спасение людей и имущества при пожарах, оказание первой помощи;
- организация тушения пожаров;
- организация тушения ландшафтных (природных) пожаров (за исключением тушения лесных пожаров и других ландшафтных (природных) пожаров на землях лесного фонда, землях обороны и безопасности, землях особо охраняемых природных территорий;
- осуществление тушения пожаров;
- иные задачи в соответствии с законодательством Российской Федерации и законодательством Самарской области» [19].

Приказ МЧС РФ № 467 от 25.10.2017 «Об утверждении Положения о пожарно-спасательных гарнизонах» определяет:

- «порядок организации деятельности пожарно-спасательных гарнизонов, в том числе организации и осуществления гарнизонной службы, полномочия начальников и должностных лиц пожарно-спасательных гарнизонов по выполнению задач гарнизонной службы;
- порядок привлечения сил и средств подразделений пожарной охраны, пожарно-спасательных гарнизонов для тушения пожаров и проведения аварийно-спасательных работ» [21].

Правила противопожарного режима утвердили постановлением Правительства РФ от 16.09.2020 № 1479. Они устанавливают требования пожарной безопасности, определяющие порядок поведения людей, порядок организации производства и/или содержания территорий электроустановок в целях обеспечения пожарной безопасности [22].

Обеспечение пожарной безопасности объектов промышленности определяется характеристикой обращающихся в технологических процессах веществ и спецификой технологических процессов.

Большинство таких объектов характеризуется наличием взрывоопасных производств и технологических процессов с повышенным риском, связанным с высокими температурами и (или) давлениями в технологическом оборудовании, а также в значительной удельной массой взрывопожароопасных веществ.

Согласно требованиям ПТЭЭП, утвержденных приказом Минэнерго от 12.08.2022 № 811, «в каждой организации, эксплуатирующей ЭУ, должен быть в наличии перечень техдокументации» [23]. «Энергонадзор проверит, каким образом составлена документация, и сличит ее с фактическим состоянием электроустановок. Все мероприятия должны проводиться в соответствии с ПТЭЭП. ЭУ должны быть обеспечены в полном составе основными и допсредствами индивидуальной и коллективной защиты,

прошедшими своевременные испытания и имеющими подтверждение соответствия техрегламенту. Персонал должен пройти психиатрическое освидетельствование, а затем – предварительный и периодический медосмотр» [23].

Как известно, пожарная безопасность любого объекта включает комплекс технических решений и мероприятий, направленный на предотвращение пожара и комплекс технических решений и мероприятий противопожарной защиты.

Комплекс технических решений и мероприятий, направленный на предотвращение пожара, определяет систему предотвращения пожара в соответствии с главой 13 Федерального закона от 22.07.2008 № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» [33].

В таблице 1 приведены базовые сведения по способам исключения горючей среды в соответствии со статьей 49 № 123-ФЗ, где для отдельных пунктов указаны примеры.

Таблица 1 – Способы исключения горючей среды при проектировании электроустановок

Наименование способа	Описание, пути реализации
Применение негорючих веществ и материалов	«По возможности может рассматриваться для отдельных технологических процессов. Пример: замена взрывопожароопасных хладагентов в промышленных холодильных системах на негорючие» [29]
Ограничение массы и (или) объема горючих веществ и материалов	«Оптимизация технологических процессов, в том числе оптимальная организация хранения взрывопожароопасных веществ на складах» [29]
Использование наиболее безопасных способов размещения горючих веществ и материалов, а также материалов, взаимодействие которых друг с другом приводит к образованию горючей среды	Обеспечивается в первую очередь выполнением требований нормативных документов в области пожарной безопасности, требований промышленной безопасности и других требований
Изоляция горючей среды от источников зажигания (применение изолированных отсеков, камер, кабин)	«Применение герметичных технологических систем (определено требованиями промышленной безопасности), а также» [29]

Продолжение таблицы 1

Наименование способа	Описание, пути реализации
	«закрытых систем канализации взрывопожароопасных объектов» [29]
Поддержание безопасной концентрации в среде окислителя и (или) горючих веществ	В первую очередь реализуется на стадии разработки технологий (базовое проектирование) или при разработке конструктивных решений технологического оборудования. На стадии проектирования обеспечивается автоматизацией технологических процессов и противоаварийной защитой
Понижение концентрации окислителя в горючей среде в защищаемом объеме	Использование инертных сред. Например, хранение и транспортировка отдельных пирофорных веществ в атмосфере инертного газа (азота)
Механизация и автоматизация технологических процессов, связанных с обращением горючих веществ	Достигаемые цели: снижение степени участия человеческого фактора в возникновении пожаров; автоматическое поддержание безопасных режимов протекания процессов
Установка пожароопасного оборудования в отдельных помещениях или на открытых площадках	Регламентируется нормативными документами в области пожарной безопасности и требованиями пожарной безопасности. В базовом случае такая возможность определяется спецификой технологического процесса и применяемого оборудования
Применение устройств защиты производственного оборудования, исключающих выход горючих веществ в объем помещения, или устройств, исключающих образование в помещении горючей среды	Такие решения регламентируются различными требованиями технических регламентов и требованиями промышленной безопасности. Типичные примеры: противоаварийная защита технологического оборудования, установка предохранительных устройств, аварийная вентиляция производственных помещений
Удаление из помещений, технологического оборудования и коммуникаций пожароопасных отходов производства, отложений пыли, пуха	Такой способ в большей мере определяется выполнением требований к безопасной эксплуатации объектов капитального строительства, в частности, соблюдением требований противопожарного режима на производственных объектах

На основании приведенного перечня видно, что практически все решения и мероприятия по исключению образования горючей среды формируются на стадии разработки проектной документации, а в некоторых случаях – при разработке технологического процесса. В зарубежной практике

даже есть методология под названием Inherently safety design (присущая безопасность).

В таблице 2 приведены базовые сведения по способам исключения условий образования в горючей среде (или внесения в нее) источников зажигания

Таблица 2 – Способы исключения условий образования в горючей среде (или внесения в нее) источников зажигания

Наименование способа	Описание, пути реализации
Применение электрооборудования, соответствующего классу пожароопасной и (или) взрывоопасной зоны, категории и группе взрывоопасной смеси	Применение соответствующего взрывозащищенного оборудования в соответствии с требованиями технических регламентов
Применение в конструкции быстродействующих средств защитного отключения электроустановок или других устройств, исключающих появление источников зажигания	Реализуется при проектировании системы электроснабжения технологического комплекса
Применение оборудования и режимов проведения технологического процесса с защитой от статического электричества	«Учет требования нормативных документов в области пожарной безопасности по защите от статического электричества» [29]
Устройство молниезащиты зданий, сооружений и оборудования	«Обеспечение молниезащиты в соответствии с нормативными документами. Для отдельных объектов складов нефти и нефтепродуктов специальные требования к молниезащите установлены законодательством в области промышленной безопасности» [29]
Поддержание безопасной температуры нагрева веществ, материалов и поверхностей, которые контактируют с горючей средой	«Наиболее частые пример: выбор требуемого температурного класса взрывозащищенного электрооборудования, допустимая температура отопительных приборов во взрывопожароопасных помещениях» [29]
Применение способов и устройств ограничения энергии искрового разряда в горючей среде до безопасных значений	Наиболее знаковый пример: применение искробезопасных электрических цепей
Применение искробезопасного инструмента при работе с легковоспламеняющимися жидкостями и горючими газами	Также должно закладываться на стадии проектирования

Продолжение таблицы 2

Наименование способа	Описание, пути реализации
Ликвидация условий для теплового и (или) химического самовозгорания обращающихся веществ, материалов и изделий	Наиболее актуально для объектов хранения (складов). Достигается надлежащей организацией хранения. Пример: хранение баллонов с горючими газами в местах, защищенных от теплового излучения
Применение устройств, исключающих возможность распространения пламени из одного объема в смежный	Установка средств подавления и локализации пламени в технологических системах ЭУ (определено требованиями промышленной безопасности)

Таким образом, на основе положений Технического регламента о требованиях пожарной безопасности показаны примеры способов реализации организационно-технических мероприятий, направленных на предотвращение возникновения пожара на объектах с технологическими процессами. Такие способы крайне разнообразны и в зависимости от специфики могут затрагивать весь производственный объект в целом или отдельную составляющую такого объекта.

1.2 Анализ технических проблем, связанных с применением систем обеспечения пожарной безопасности электроустановок в промышленном производстве

Обеспечение пожаробезопасности на производственных объектах, объектах с массовым пребыванием людей выполняется многими средствами, в том числе техническими средствами противопожарной защиты (ТС СПЗ), целью применения которых обеспечивать защиту гражданам и материальным ценностям от действия опасных факторов сопровождающих пожары. В первую очередь при использовании таких средств должна быть обеспечена электробезопасность, для чего требуется открытые проводящие части (ОПЧ) заземлять.

«Влияние УЗ на пожарную опасность электрооборудования ТС СПЗ имеет особенности, на которые следует обратить внимание. В электрооборудовании (включая электрические сети здания) ежегодно возникает значительное количество пожаров. В соответствии с федеральной базой данных 2022 года в Российской Федерации 62 896 пожаров возникло от электрических изделий» [5].

К сожалению, «в статистике четких данных о влиянии заземления на количество пожаров не отражается. В технической литературе также отсутствует информация о проведенных научных исследованиях по оценке влияния особенностей типа заземления на пожарную безопасность электрооборудования СПЗ. Причастность УЗ к пожару устанавливается лишь при выполнении экспертных исследований по уголовным делам в ходе рассмотрения их в суде» [5].

Для предотвращения возникновения пожароопасного режима в работе электрооборудования необходимо использовать специальную аппаратуру и устройства электрозащиты. Однако, не редки случаи возникновения пожаров в следствие отказа функционирования данных устройств. Защита линий электропередач посредством ТС СПЗ обеспечивает пожаробезопасность, именно поэтому важна надежность работы указанных средств, заземления линий электропередач при любом режиме работы электрооборудования. Достаточно сложно без профессиональной подготовки найти неисправности, возникающие в технических средствах, по этой причине могут возникать аварийные пожароопасные режимы в линиях питания технических средств защиты, например, неисправное состояние аппарата защиты приведёт к возгоранию какого-либо элемента линии питания автоматической противопожарной системы, системы оповещения, что приведет к высокому уровню опасности.

«В электротехнике замыкание фазы на ОПЧ относится к аварийному режиму работы. При правильно спроектированной и исправной защите этот режим ограничивается по времени и не перерастает в пожароопасный, при

котором возникает источник зажигания с последующим распространением горения. Следовательно, этот аварийный режим становится пожароопасным, если примененная электрическая защита не выполняет своих функций. Характерные пожароопасные режимы при замыкании фазы на ОПЧ обладают особенностями, которые имеют некоторые различия при разных схемах, используемых для заземления электрооборудования и приборов» [17].

Результаты анализа практического использования в течении многих лет заземления линий электропитания доказали эффективность защиты работников от воздействия электротоком. Однако, устройства заземления (УЗ) могут повлиять на состояние пожарной безопасности электрооборудования, на условия возникновения возгорания и развития пожара, то есть быть причастными к данным факторам.

«В случае замыкания фазного проводника на заземленную оболочку возникает пожароопасный аварийный режим с локальным перегревом отдельных элементов электрооборудования и системы заземления с последующим возгоранием изоляционных материалов из-за возникающего сверхтока, с потерей работоспособности электрооборудования, в том числе и ТС СПЗ. При этом возможно загорание веществ и материалов, обращающихся в зоне электропроводки и электрооборудования, находящегося в аварийном режиме. Анализ систем заземления различных типов показал, что переход на электроснабжение зданий электропроводками с РЕ-проводником позволил повысить уровень электробезопасности людей, но при этом возросла пожарная опасность элементов электрической сети, электрооборудования и электрических приборов. Связано это с тем, что введение в сеть нулевого защитного проводника приводит к вероятности появления еще одного аварийного пожароопасного режима – замыкания фазного провода на РЕ-проводник дополнительно к возможным аварийным замыканиям на рабочий нулевой проводник» [17].

«В случае отсутствия защиты и возникновения пожароопасного режима замыкания фазы на ОПЧ проводники фазы и заземляющего провода могут нагреться до температур, при которых они становятся источниками зажигания для изоляционного материала проводов, кабелей и электрических приборов» [5]. Из этого следует, что все трехпроводные электрические сети с защитным РЕ-проводником должны быть оснащены устройствами защитного отключения дифференциального тока (УДТ) с учетом селективности их срабатывания.

На основе проводимых исследований многих стран мира следует отметить одну из наиболее часто встречаемых первопричин возникновения пожара при использовании электрооборудования – это наличие искрения и дугового разряда. Появление дефектов изоляции кабелей, плохой контакт электропроводов, некачественное исполнение монтажных, ремонтных работ являются причинами образования искрения и дугового разряда. Иногда искрение возникает в следствие несоответствия электроприборов нормативным требованиям. При искровом разряде повышение температуры может достигать значений в пределах 2500^0С – 7000^0С и такая температура при определенном значении тока способствует дуговому разряду. Таким образом возникает источник пожара.

Пожароопасным считается дуговой пробой с силой тока, превышающей 2,5 А, что эквивалентно нагрузке 550-600 Вт или половине мощности обычного электрического чайника.

Согласно статистике пожаров последних лет в России намечается устойчивый рост негативных последствий пожаров, вызванных неисправностями электропроводки или электрооборудования.

На первый взгляд, в электрических щитовых выбор средств и аппаратуры, обеспечивающих электробезопасность, на сегодняшний день недостаточен, в основном это автоматические выключатели, устройства защитного отключения. И оценить узость такого спектра выбора можно лишь при понимании принципа их действия.

Автоматический выключатель (АВ) – контактный коммутационный аппарат (механический или электронный), способный включать токи, проводить их и отключать при нормальных условиях в цепи, а также включать, проводить в течение нормированного (заданного) времени и автоматически отключать токи при нормированных ненормальных условиях в цепи, таких как токи короткого замыкания.

«Устройство защитного отключения (УЗО) или устройство дифференциального тока (УДТ), контактное коммутационное устройство, предназначено для того, чтобы включать, проводить и отключать электрические токи при нормальных условиях эксплуатации и размыкать контакты, когда дифференциальный ток достигает заданного значения при установленных условиях. В качестве УДТ используют автоматический выключатель, управляемый дифференциальным током, без встроенной защиты от сверхтока и автоматический выключатель, управляемый дифференциальным током, со встроенной защитой от сверхтока» [17].

АВ и УЗО не защищают цепь от дуговых пробоев. Например, плохой контакт в каком-то месте токоведущего пути не приводит к сверхтокам и/или токам утечки, поэтому ни АВ, ни УЗО не реагируют на ситуацию. УЗДП представляют собой 3-й этап в развитии средств защиты электрических цепей вместе с токовыми автоматами и УЗО (таблица 3).

Таблица 3 – Сравнение средств обеспечения пожарной безопасности электроустановок на промышленных предприятиях

Тип дугового пробоя	АВ	УЗО	УЗДП
Плохой контакт	Не обнаруживает	Не обнаруживает	Отключает цепь
Параллельное фаза-нейтраль	Может сработать слишком поздно (при ограниченном токе КЗ)	Не обнаруживает	Отключает цепь
Параллельное фаза-земля	Может сработать слишком поздно (при ограниченном токе КЗ)	Может не сработать (при импульсном характере искрения)	Отключает цепь

УЗДП предназначено для автоматического предупреждения пожара из-за дугового пробоя/опасного искрения в электрических цепях или электроустановках, подключенных через него к питающей сети (рисунок 1).

Рисунок 1 – Пример УЗДП

УЗДП визуально выглядит практически так же, как АВ или УЗО. Разница в «начинке» и принципе работы. Дуговой пробой возникает в местах нарушения нормального электрического контакта между элементами электрических цепей и электроустановок и проявляется в виде искровых разрядов между этими элементами, сопровождаясь повышенным тепловыделением и искрением. Искрение не распознается токовыми автоматами и УЗО, так как не вызывает роста тока и его утечку на землю.

УЗДП непрерывно анализирует совокупность параметров тока и напряжения сети, характерных для искрения. Момент пробоя в данном полупериоде характеризуется скачкообразным возрастанием модуля тока в защищаемой цепи, а также скачком напряжения фаза-ноль на клеммах УЗДП. Эти скачки и дают информацию, обрабатываемую электроникой УЗДП. При определенных величине, форме, полярности, времени и темпе следования этих скачков автоматика устройства принимает решение об отключении защищаемой цепи.

Выводы по первому разделу

Не стоит исключать случаи неисправного состояния заземляющих устройств технических средств противопожарной защиты. В тех случаях, когда защита от короткого замыкания не предусмотрена, либо находится в неисправном состоянии, вероятность возгорания при возникновении замыканий на открытые проводящие части очень высока в следствие разрушения изоляции термическим воздействием. Продолжительность короткого замыкания зависит от времени срабатывания защитных устройств в электросети, от времени перегорания (до разъединения) ТПЖ (токопроводящая жила провода).

В основном такая ситуация соответствует подающим к прибору питание проводам при образовании режима КЗ, когда происходит замыкание фазы на заземленное оборудование. Проведенное исследование еще раз доказало: уровень пожарной безопасности на линиях электропередач с учетом противопожарной защиты техническими средствами, взаимосвязан с надежностью работы автоматических выключателей, с состоянием электропроводов рабочих и защитных. Результаты исследования позволяют прийти к следующим выводам:

- состояние сопротивления заземляющих устройств электрооборудования, изменяющееся в процессе эксплуатации, не оказывает существенного влияния на пожарную опасность электросетей, электротехнического оборудования и электроприборов в зданиях;
- цепи питания электроприборов, металлические корпуса которых заземлены с помощью PE-проводника, в целях исключения возгораний в дежурном режиме должны иметь максимальную токовую защиту.

Также одной из самых частых причин возгорания в «электрических» пожарах является дуговой пробой или искрение, поэтому в исследовании сделан вывод о необходимости применения УЗДП.

2 Разработка рекомендаций по повышению эффективности технологий обеспечения пожарной безопасности электроустановок на промышленных предприятиях

2.1 Анализ путей и методов совершенствования технологий обеспечения пожарной безопасности электроустановок на промышленных предприятиях

При воздействии повышенных нагрузок на линии электропередач, в случае возникновения короткого замыкания происходит нагрев как токопроводящих жил, так и изоляции или защитного покрытия кабелей.

Повышение температуры изоляции проводников, защитного слоя кабелей в таких ситуациях до критического уровня, может привести к возгоранию электролинии. Защитное покрытие кабелей из ПВХ (поливинилхлорид) самовоспламеняется при температуре 350°С, хотя при таком уровне нагрева устойчивое горение не создается.

В соответствии с тепловой теорией зажигания, разработанной Я.Б. Зельдовичем, «зажигание становится возможным только в том случае, когда количество теплоты, выделенной источником зажигания, будет достаточным для нагрева критического объема горючего материала, в котором под действием этой теплоты произойдет самоускоряющаяся химическая реакция (количество выделившейся теплоты будет покрывать потери)» [10].

«Математическая формулировка процесса воспламенения базируется на одновременном учете явлений теплопередачи от жилы к изоляции, тепловыделения за счет химической реакции в изоляцию и диффузии горючего и кислорода в зону реакции» [10].

В случае образования условий дугового разряда при КЗ, полимерные материалы защитного покрытия кабелей загораются.

Физическая природа развития КЗ такова: в зоне контакта при определенных условиях происходит быстрый нагрев, в следствие которого в

точках соприкосновения металлические токопроводящие жилы расплавляются; если уровень тока достигает определенного значения, происходит вскипание металла, что приведет к разбрызгиванию металла; сечение проводника в таких местах становится меньше, а это создает условия еще большего нагрева в зоне КЗ. Расплавление токоведущих жил приводит к разрыву электролинии, исчезающее электромагнитное поде создает резкое повышение напряжения в местах разрыва, что создает условия пробоя в газовом промежутке, появляется искровой разряд, в следствие которого происходит переход одного вида энергии в другой – электромагнитной в электрическую, электрической в тепловую. Металлические токоведущий жилы плавятся, металл испаряется, что может привезти к пиролизу изоляции.

В целях предотвращения горения изоляционного покрытия кабелей в случае образования дугового разряда, необходимо определить предельные значения параметров, при достижении которых происходит возгорание изоляции из ПВХ материалов, что позволит правильно спланировать превентивные меры.

Хотя в современном научном мире имеется обширная база исследований о процессах горения самых разных материалов, следует признать, что процессы горения защитных покрытий кабелей из ПВХ материалов на сегодняшний день еще имеют вопросы, на которые исследователям необходимо найти ответы, поскольку решение данной проблемы позволит повысить уровень пожаробезопасности на производстве.

Различные научные источники приводят данные о критических условиях, при которых развивается процесс горения материалов при возникновении короткого замыкания и электрического разряда, а также различные эксплуатационные условия, влияющие на этот процесс. В ходе проведения данного исследования получены результаты, которые рекомендуется применять, когда в качестве промежутка в зоне разрыва проводника находится воздушная среда, кроме того, они поспособствуют

пониманию процесса возгорания и горения материалов из полимерных соединений.

«Под воздействием электрической дуги, в момент короткого замыкания в кабельном изделии, процесс вынужденного воспламенения носит двухстадийный характер» [34]:

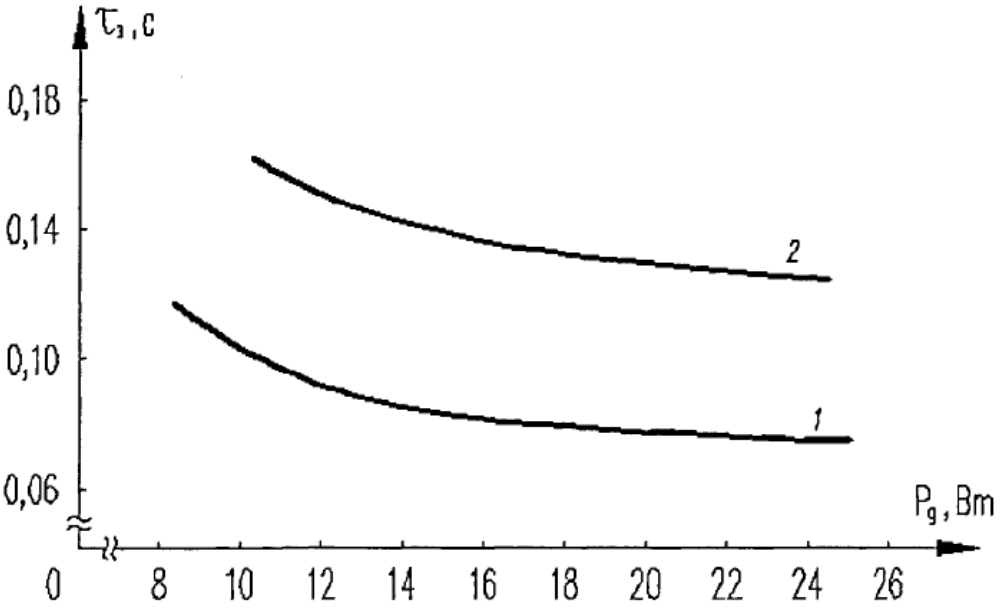
- «на первом этапе, под действием высокотемпературного источника зажигания (электрической дуги) происходит локальный разогрев до температуры термической деструкции полимерной изоляции кабельного изделия, и выделение легковоспламеняющихся продуктов пиролиза;
- на втором этапе, происходит локальное воспламенение продуктов пиролиза» [34].

При температуре воспламенения нагреваться будет лишь малый участок материала, остальной проводник останется в прежнем состоянии, то есть чтобы полимерная изоляция проводника начала гореть устойчиво, источник высокой температуры должен оказывать длительное воздействие.

Согласно существующим представлениям о процессе зажигания твердых материалов, «для зажигания необходимо не только нагреть поверхность материала до температуры, при которой идет интенсивный пиролиз, но и создать в поверхностном слое необходимый градиент температур. При увеличении толщины материала (в кабельном изделии общую толщину может составлять: индивидуальная изоляция, общая изоляция, оболочка) улучшаются условия для теплоотвода в более глубокие слои материала. Таким образом, для создания необходимого градиента температур требуется большая длительность дугового разряда» [16].

Основным параметром пожароопасности при планировании превентивных мер от возгорания изоляционного покрытия кабелей из полимерных составов при дуговом электрическом разряде является либо минимальное значение энергии, при котором воспламеняется изоляция, либо длительность задержки воспламенения, зависящая мощности электрической

дуги. Экспериментальным путем в данной работе удалось определить длительность задержки возгорания изоляции кабеля из полимерных составов в зависимости от мощности дугового разряда. Эксперименты проводились на образцах с разной толщиной изоляции (рисунок 2).



(1 - при толщине ПВХ образца – 1 мм; 2 – при толщине ПВХ образца 2 мм)

Рисунок 2 – Экспериментальная зависимость времени задержки зажигания от мощности электрического разряда [16]

На основании полученных экспериментальным путем результатов, можно сделать вывод: чем меньше время воздействия дугового разряда на изоляцию из полимерных составов, тем ниже вероятность возгорания кабеля.

«Одними из наиболее пожароопасных режимов в кабельных линиях и электропроводках распределительных и групповых сетей до 1 кВ являются короткие замыкания и перегрузки. Сюда можно отнести перегрузки, связанные как с перегрузками технологических агрегатов, так и связанные с неправильным выбором защитной аппаратуры, сечения кабелей и проводов» [37].

Электропроводки и кабельные линии должны быть защищены:

- «от токов короткого замыкания в конце защищаемого участка линии;

– от токов перегрузки» [37].

Как правило, защита электролиний и оборудования от перегрузок, КЗ в распределительной или групповой сети напряжением до 1кВ выполняется посредством автоматических выключателей, предохранителей.

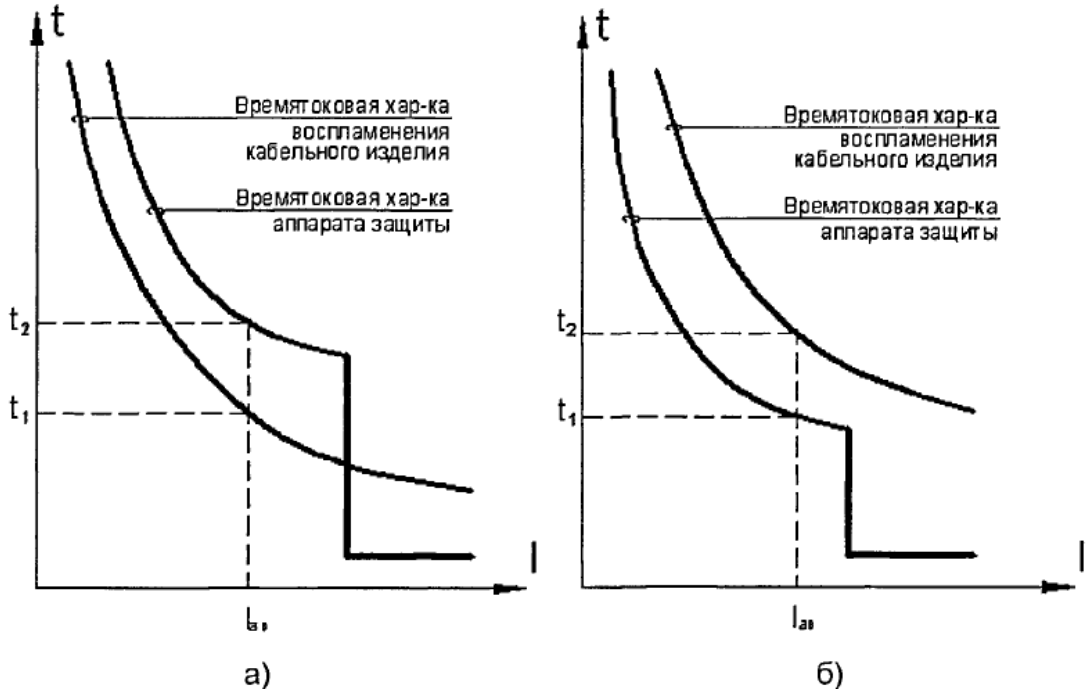
Одним из основных пожароопасных проявлений электрического тока является то, что «при его протекании по токоведущим жилам кабельного изделия последние нагреваются. При больших кратностях аварийного тока (токах перегрузки и КЗ), происходит значительное выделение тепловой энергии. В связи с чем возможен нагрев токоведущих жил и изоляционных покровов кабельного изделия до критических температур – температуры воспламенения собственной изоляции, а также температуры разрушения, перегорания жилы» [30].

Для предотвращения возгорания изоляции электрических кабелей в случае возникновения КЗ, дугового разряда используют аппараты защиты, принципом работы которых основывается на взаимодействии двух времятоковых характеристик – характеристика самого защищающего устройства (это может быть автоматический выключатель, предохранитель) и характеристика кабельной изоляции.

«В случае расположения времятоковой характеристики воспламенения кабельного изделия ниже времятоковой характеристики аппарата защиты, время действия защиты больше времени достаточного для воспламенения изоляции кабельного изделия, то есть аппарат не обеспечивает функцию защиты данного кабельного изделия от воспламенения в аварийном режиме его работы» [30]. Взаимное расположение времятоковых характеристик аппарата защиты и воспламенения кабельного изделия показано на рисунке 3.

«В случае расположения времятоковой характеристики воспламенения кабельного изделия и времятоковой характеристики аппарата защиты, времятоковая характеристика воспламенения кабельного изделия расположена выше защитной времятоковой характеристики аппарата,

аппарат защиты обеспечивает отключение аварийного режима в кабельном изделии до воспламенения его изоляции» [12].



(а – в случае невозможности защиты от воспламенения; б – в случае успешной защиты от воспламенения)

Рисунок 3 – Взаимное расположение времятоковых характеристик аппарата защиты и воспламенения кабельного изделия [12]

Итак, организация защиты кабелей или электролиний распределительной сети напряжением до 1 кВ от возгорания при электродуговом разряде выполняется с помощью автоматических выключателей или предохранителей с учетом времятоковых характеристик изоляции.

Необходимо отметить, что «применение такого способа защиты кабелей и электропроводок от возгорания имеет существенный недостаток – нормативная база, справочные источники, техническая документация производителей не содержат сведений по времятоковым характеристикам» [3].

В целях эксперимента была «использована затрубленная защита провода АПВ 1х2,5 мм^2, так как длительно допустимый ток данного кабельного изделия составляет 24 А, тогда как номинальный ток автоматического выключателя А3163 – 50 А» [25].

Часть представленной работы была посвящена исследованиям средств защиты и вопросам воздействия характеристик этих средств на возникновение возгорания изоляции кабелей распределительных сетей с напряжением до 1 кВ.

Анализ взаиморасположения данных характеристик приводит к выводу, что «автоматические выключатели АЕ25, С60а-25, а также предохранитель ПП24-25 успешно выполняют функцию защиты от воспламенения изоляции кабельного изделия. В случае применения автоматического выключателя ВА51-25 при кратности аварийных токов 9-16$I_Н$ существует большая вероятность воспламенения изоляции провода. Необходимо обратить внимание, что аварийный ток с кратностью 9-16$I_Н$ соответствует току однофазного КЗ» [2].

Проанализируем времятоковые характеристики на возгорание изоляции электропроводов учитывая отношение тока при аварийном режиме к величине длительно допустимого тока. Для провода марки АПВ 1х2,5 мм^2 график характеристики располагается ниже графика провода марки АПВ 1х6 мм^2, что объясняется следующим фактом: длительно допустимый ток для кабеля с меньшей площадью сечением обладает большей плотностью, чем у кабеля с большей площадью сечения. Кабели с меньшей площадью сечения при нормальных режимах работы имеют длительно допустимое значение 65°С.

«В условиях же адиабатического процесса нагрева, характерного при мгновенном нагреве токоведущих жил при протекании аварийных токов в кабельном изделии, теплоотдача в окружающую среду из рассмотрения исключается. В данном случае температура токоведущих жил кабельных изделий меньшего сечения, при одинаковой кратности аварийного тока

растет значительно быстрее, чем у проводников кабельных изделий больших сечений. Следовательно, длительность аварийного тока достаточная для воспламенения изоляции кабельного изделия меньшего сечения значительно меньше, чем для кабельного изделия большего сечения» [4].

Можно констатировать следующее положение: кабельные линии с большей площадью сечения обладают времятоковыми характеристиками, графики которых располагаются выше, чем у рассматриваемых. Поэтому, проводя подбор аппаратов защиты электролиний на основании действующих нормативных требований, защита электролиний (кабельные, электропроводки) от возникновения возгорания в случае возникновения экстремальных условий будет эффективной.

«Аварийные режимы в кабельных линиях представляют опасность не только с точки зрения возможности воспламенения собственной изоляции, но, также, и за счет выброса из зоны замыкания частиц металлов, которые, разлетаясь на значительные расстояния, могут явиться причиной загораний, пожаров и взрывов» [13].

«Возможность выполнения защиты от данного фактора пожарной опасности кабелей и проводов основывается на концепции о существовании критического времени действия аварийных токов, в течение которого расплавление жилы провода, а, следовательно, и появления пожароопасных частиц металлов исключается. При этом роль ограничителя длительности аварийных токов выполняет аппарат защиты» [13].

В данной исследовательской работе проводилось моделирование условий КЗ на проводах марки АПВ 1х2,5мм^2 и АПВ 1х4мм^2. Для моделирования были выбраны 2 режима – глухое металлическое (соединение токопроводящих жил выполнялось до подачи напряжения) и дуговое (соединение проводов, находящихся под напряжением). Визуальным способом оценивался разброс металлических частей при КЗ.

Экспериментальным путем для 2-х вышеназванных режимов были установлены критические значения длительности прохождения тока КЗ, не

образующие вскипание и разбрызгивание металла в местах смыкания проводов марки АПВ 1х2,5 мм^2 и АПВ 1х4 мм^2.

Полученные в результате проведения экспериментов данные позволяют провести выбор аппаратов защиты по времятоковым характеристикам, следует выбирать аппараты с времятоковыми характеристиками, значения которых меньше экспериментальных. Проведение отбора аппаратов по такому принципу позволит избежать образование искр в случае образования КЗ, что существенно повышает уровень пожаробезопасности.

Полученные экспериментальные данные были использованы для выявления влияния времятоковой характеристики аппарата защиты, предназначенного для распределительной сети напряжением до 1 кВ, на образование разбрызгивания металла в месте образования КЗ. Основные результаты исследования проиллюстрированы на рисунках 4 и 5.

На рисунке 3 представлены «времятоковые характеристики образования частиц металла в зоне дугового, и глухого металлического КЗ, для провода АПВ 1х2,5 мм^2, а также времятоковые характеристики аппаратов защиты, выбранных в соответствии с нормативными требованиями» [3].

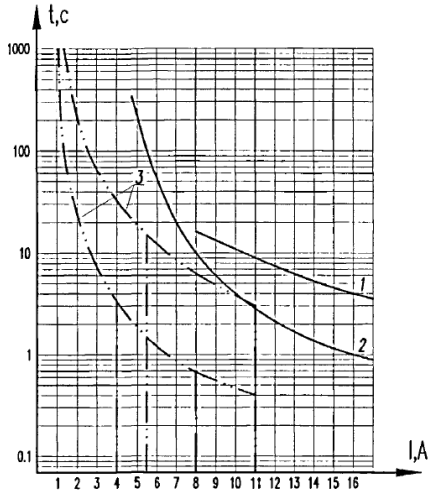


Рисунок 4 – Исследование влияния характеристик аппаратов защиты на выброс частиц металла для АПВ 1х2,5 мм^2 [3]

«Взаимное расположение времятоковых характеристик показывает, что при защите выполненной автоматическими выключателями существует вероятность образования частиц металлов в зоне работы теплового расцепителя, и зависит от разброса защитных характеристик автоматического выключателя. При защите выполненной предохранителем полностью исключается образование частиц металлов. Аналогичный результат получен при защите выполненной автоматическим выключателем с током электромагнитной отсечки» [3].

На рисунке 5 изображены «времятоковые характеристики образования частиц металла в зоне дугового, и глухого металлического КЗ, для провода АПВ 1х4 мм^2, а также времятоковые характеристики защитных аппаратов, соответствующих данному сечению провода» [3].

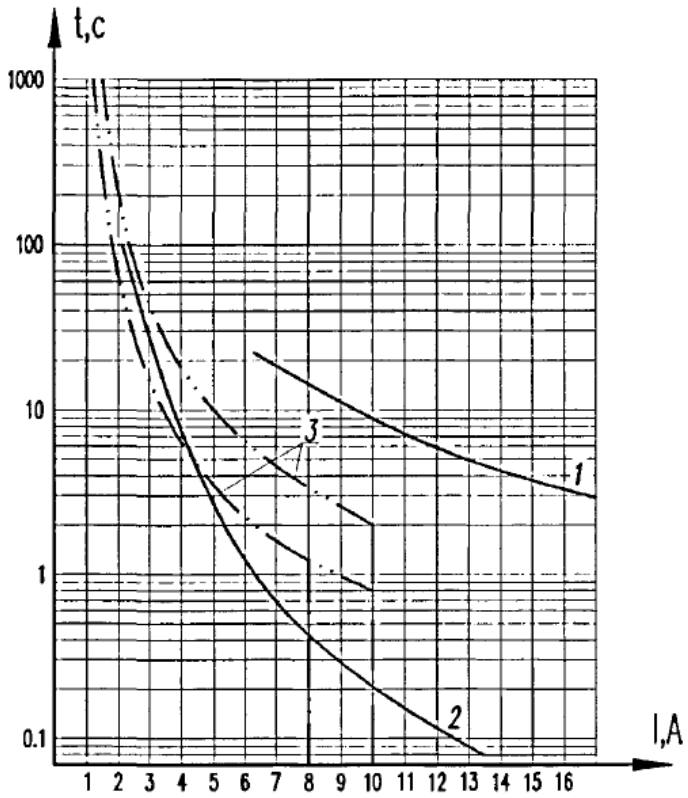
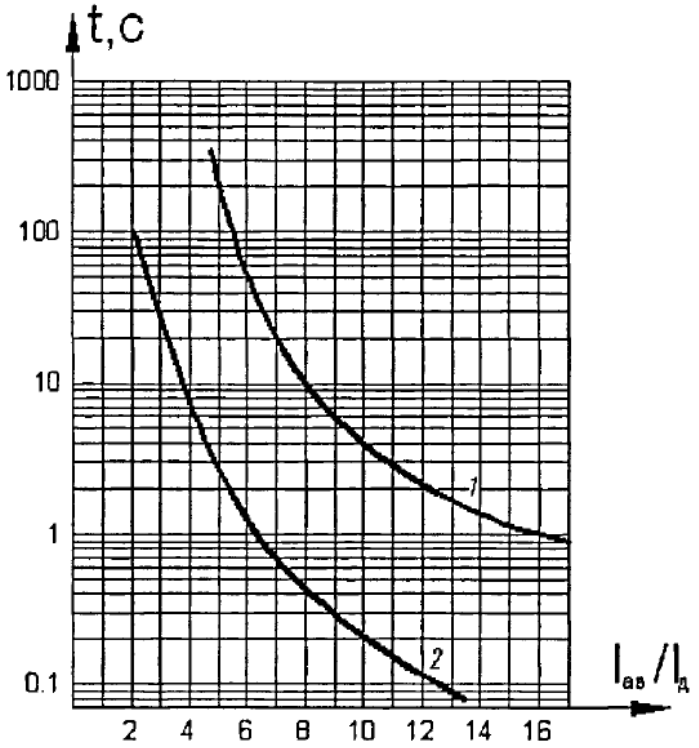


Рисунок 5 – Исследование влияния характеристик аппаратов защиты на выброс частиц металла для АПВ 1х4 мм^2 [3]

«Взаимное расположение данных характеристик показывает, что при выполнении защиты электропроводки автоматическими выключателями, последние не обеспечивают защиту от образования и выброса из зоны КЗ пожароопасных частиц металлов. При выполнении защиты предохранителем, однозначного ответа об эффективности дать нельзя, поскольку эффективность защиты будет зависеть от разброса защитной характеристики предохранителя» [3]. При сравнении времятоковых характеристик образования частиц металла для проводов АПВ 1х2,5 мм^2 и АПВ 1х4 мм^2, получен несколько неожиданный результат.

На приведенном рисунке 6 изображены 2 характеристики возникновения металлических частиц в случае дугового КЗ на проводах марки АПВ 1х4 мм^2 и АПВ 1х2,5 мм^2, причем характеристика первого провода (АПВ 1х4 мм^2) расположена ниже второго.



1 – для провода АПВ 1х2,5 мм^2; 2 – для провода АПВ 1х4 мм^2

Рисунок 6 – Времятоковые характеристики выброса частиц металла из зоны дугового замыкания [3]

Сложно найти объяснение данному фактору на основании теории, можно предположить следующее: «одни и те же токи КЗ, способные образовать дуговой разряд, формируют в проводнике с большей площадью сечения лучшие условия, при которых происходит расплавление металла на поверхности и его разбрызгивание» [3]. Однако, длительность полного расплавления проводящей жилы, имеющей большее сечение (в данном случае 4 мм^2), будет больше по сравнению с жилами, имеющих меньшее сечение (2,5 мм^2).

Итак, следует выдвинуть такое предположение: объективная возможность расплавления металла токоведущих жил и его разбрызгивание в месте возникновения КЗ не связана с площадью сечения жилы.

Поскольку при возникновении короткого замыкания на кабельных сетях практически всегда образуется электрический дуговой разряд, можно утверждать, что применяемая защита линий с помощью аппаратов, выбираемых по действующим нормативам, обладает не высокой противопожарной эффективностью от вероятного расплавления и разбрызгивания металла, приводящие к вероятному горению изоляции.

«Необходимо также отметить, что наибольшей пожарной опасностью с точки зрения выброса частиц металла токопроводящих жил, обладают кабельные изделия с алюминиевыми жилами. Это связано с тем, что горящие алюминиевые частицы, образующиеся при КЗ, значительно опаснее медных частиц, образовавшихся в аналогичных условиях. Один грамм алюминия при сгорании выделяет 32,2 кДж теплоты, что в 11 раз больше, чем при сгорании 1 г меди. Кроме того, следует отметить, что медь при атмосферном давлении даже при высоких температурах не горит в воздухе, поэтому и пожарная опасность этих частиц значительно ниже» [14].

Экспериментальные и теоретические исследования подтверждают эффективность использования аппаратов защиты, обеспечивающих пожарную безопасность линий электропередач с напряжением до 1 кВ в

следствие образования высоких температур в токопроводящих жилам, вызванных сверхтоками.

Установленная аппаратная защита, выбор которой осуществлялся на основании нормативных требований, может не гарантировать пожаробезопасность в условиях экстремальных ситуаций, т.к. образование источника, обладающего необходимой для возгорания мощностью, не исключается.

«Как показывает практика эксплуатации кабельных линий и электропроводок, наиболее пожароопасным фактором является дуговой разряд в зоне замыкания» [32]. Объяснить данный факт можно следующим образом:

- «температура в месте воздействия дуги достигает 5000-8000° С, то есть электрическая дуга является высокотемпературным источником зажигания, способным прожечь изоляцию кабельного изделия, и при определенном времени воздействия воспламенить ее;
- защита, выполненная в соответствии с существующими требованиями, не обладает достаточным быстродействием по отношению к данному пожароопасному фактору» [32].

«При таком построении защиты, традиционная защитная аппаратура, как правило, практически мгновенно отключает поврежденный участок токовой отсечкой в случае протекания токов междуфазных КЗ. Но, по отношению к однофазным КЗ, токовая отсечка часто оказывается нечувствительной. В данном случае однофазное КЗ попадает в зону действия теплового расщепителя, с обратно зависимой от тока характеристикой. Время срабатывания теплового расщепителя аппарата защиты может составлять десятки секунд, что способствует длительному воздействию высокотемпературного источника зажигания, и возгоранию кабельного изделия» [6].

Рассмотрим такое техническое предложение по повышению уровня пожаробезопасности: «проблема обеспечения максимально быстрого

срабатывания защитной аппаратуры при возникновении токов КЗ на фазе может быть решена увеличением чувствительности по токам отсечек в защитных устройствах. Но, к сожалению, применение такого решения возможно не ко всем ситуациям» [6].

Общеизвестен тот факт, что токи при однофазном КЗ, происходящих в распределительных сетях напряжением до 1 кВ, намного меньше, чем токи при трехфазном КЗ. Как показала практика повысить чувствительность токовых отсечек в защитных устройствах для тока однофазного КЗ имеет определенную сложность.

Для обеспечения действенной защиты электролиний, обеспечивающих подачу энергии к источникам потребления, которые не обладают пусковыми режимами, можно использовать автоматические выключатели малой кратности токов срабатывания для отсечек, поскольку повышение чувствительности токовых отсечек устройств защиты при однофазных КЗ не требуется. Для таки случаев следует применять автоматические выключатели, имеющих кратность токов отсечки в пределах 3 – 5 от номинального тока.

2.2 Разработка рекомендаций по модернизации технологий обеспечения пожарной безопасности электроустановок на промышленных предприятиях

В целях обеспечения пожаробезопасности электролиний проводились исследования о степени влияния характеристик выбираемых средств защиты, которые показали наличие высокого уровня рисков возникновения пожара при однофазном КЗ в сетях с напряжением до 1 кВ (распределительные, групповые сети).

«Объясняется данный фактор не высоким уровнем чувствительности и быстродействия срабатывания средств защиты при однофазном КЗ, в

следствие чего при длительном горении электрической дуги в месте образования КЗ создаются условия» [30]:

- «прожиганию кабеля и воспламенению полимерных материалов изоляции и защитных покровов под действием высокотемпературного источника зажигания (электрической дуги);
- созданию благоприятных условий для образования и выброса из зоны дугового замыкания пожароопасных частиц металлов токопроводящих жил кабельного изделия» [30].

«Образование электрической дуги имеет свойство ограничения тока, что способствует уменьшению тока однофазного КЗ, а это в свою очередь обеспечивает снижение чувствительности защитных устройств (предохранители, автоматические выключатели), что ведет к более длительной задержке срабатывания данных средств защиты» [36]. Таким образом увеличивается время действия дугового разряда на материалы кабельной линии, приводящее к образованию расплавленного металла и его разбрызгивания, что создает условия к возгоранию изоляции кабельной линии и в других местах или к возгоранию строительных элементов.

Существует самый надежный способ не допустить возникновения пожара – это предотвратить образование источников возгорания, обладающих необходимой для возгорания энергией.

Тепловая энергия любого источника зажигания в электрической цепи определяется как:

$$Q = I^2Rt \quad (1)$$

где «I – значение аварийного тока в электрической цепи (тока КЗ), А;

К – значение сопротивления элемента, являющегося источником зажигания (эквивалентное сопротивление электрической дуги), Ом;

Т – продолжительность протекания аварийного тока I, с» [31].

Основываясь на анализе формулы 1 можно предположить мероприятия по снижению энергии источника зажигания:

- «снижение значения тока КЗ;
- снижение времени воздействия источника зажигания на горючий материал» [11].

«На основании существующих данных о характеристиках огнестойкости полимерных материалов и данных об образовании расплавления токоведущих жил с разбрызгиванием металла в зонах однофазного КЗ, можно с уверенностью говорить, что сокращение времени горения дуги в значительной мере обеспечивает снижение вероятности» [1]:

- «воспламенения защитных покровов и изоляции кабельных изделий;
- выброса из зоны КЗ пожароопасных частиц металлов.
- решение задачи повышения быстродействия защиты по отношению к токам однофазного КЗ в распределительных сетях с глухозаземленной нейтралью до 1 кВ может быть выполнено несколькими способами:
- обеспечением чувствительности токовой отсечки автоматического выключателя к току однофазного КЗ в кабельной линии;
- применением дифференциальной защиты» [1].

«Значительное сокращение времени срабатывания средств защиты в случае возникновения однофазного КЗ может быть достигнуто через повышение чувствительности тока отсечек по отношению к току КЗ, которое можно представить» [1]:

$$I_{\text{отс}} \leq \text{К}_{\text{н}} \cdot I_{\text{окз}} \qquad (2)$$

где «$\text{I}_{\text{отс}}$ – значение тока срабатывания электромагнитной отсечки автоматического выключателя;

$\text{I}_{\text{окз}}$ – значение тока однофазного КЗ;

$\text{К}_{\text{н}}$ – коэффициент надежности отстройки» [1].

«В случае защиты электроприемников без пусковых токов, выполнение условия осуществляется применением автоматических выключателей с низкой кратностью токов отсечки» [1].

Для обеспечения защиты при наличие высоких нагрузок при включении электродвигателей требуется провести настройку устройств защиты с учетов пиковой величины пусковой нагрузки. С учетом данного фактора для достижения необходимого уровня чувствительности токовой отсечки автоматических средств защиты следует намеренно увеличить значение тока при однофазных КЗ таким способом:

- «использованием нулевого защитного проводника с сечением равным фазному;
- увеличением сечения токоведущих жил кабеля» [7].

«Кабельные линии рекомендуется прокладывать с использованием кабелей, имеющих фазные жилы, нулевые рабочие, нулевые защитные одного сечения. Такой способ выбора кабелей наиболее экономичен и целесообразен, но в случае необходимости, когда таких мер недостаточно, можно увеличить сечение токопроводящих жил кабеля. Но данная мера (увеличение сечения токопроводящих жил), целью которой служит увеличение чувствительности и быстродействия срабатывания автоматических выключателей по токам отсечки, нежелательна, поэтому возникает необходимость выбора иных средств защиты кабелей от однофазного КЗ. В последние годы использование устройств защитного отключения (УЗО и УЗДП), срабатывание которых рассчитано на величину дифференциального тока, относится к наиболее эффективным способам защиты людей от электротока» [7].

«Другим не менее важным свойством УЗО и УЗДП является его способность осуществлять защиту от возгораний и пожаров, возникающих на объектах вследствие возможных повреждений изоляции, неисправностей электропроводки и электрооборудования» [35].

«В основе принципа действия УЗО и УЗДП дифференциального типа используется электромагнитный сумматор токов (дифференциальный трансформатор тока). Значение суммарного магнитного потока наведенного в сердечнике такого трансформатора равно нулю, если режим работы трансформатора будет нормальный. В ситуациях, когда происходит замыкание фазы на корпус, имеющий заземление, появляется ток утечки. Этот ток утечки создает разбалансировку магнитных потоков, в следствие которого появляется дифференциальный ток во вторичной обмотке. Когда величина этого тока будет выше значений уставки, произойдет выключение аварийного участка исполнительным механизмом защиты» [35].

«Однофазные КЗ в распределительных и групповых сетях до 1 кВ обладают низкой кратностью токов (особенно это касается удаленных участков распределительной сети). Аппараты защиты от сверхтоков, выбранные по существующим критериям выбора, не обладают достаточной чувствительностью к токам однофазного КЗ. УЗО и УЗДП дифференциального типа за счет своего принципа работы выявляет однофазные замыкания любой кратности, и быстро (не более 0,1 с) отключает аварийный участок от питающей сети» [35].

Причинами возникновения КЗ в кабельных линиях чаще всего служат повреждения и дефекты изоляции, возникновение токов утечек на землю в следствие механических повреждений, разрушения, старения изоляционного покрытия кабеля. Благодаря устройствам защитного отключения, срабатывающих на ток утечки, электроустановка отключается от электропитания при создании аварийного режима, таким образом предотвращаются перегрев проводников, образование электрической дуги, искрение и вероятное возгорание.

Итак, основное положительное качество УЗО и УЗДП дифференциального типа – это своевременное установление тока утечки в самых начальных моментах образования КЗ и предотвращение дальнейшего развития пожароопасной ситуации в кабельных линиях.

Когда в местах с дефектом и повреждением изолирующего покрытия от появления тока утечки выделяется достаточное для образования возгорания количество энергии, а далее и развития процесса горения, устройства защитного отключения (дифференциальные автоматы) служат в качестве единственного высокоэффективного средства предотвращения пожара.

УЗО и УЗДП – это устройства обеспечения пожаробезопасности для кабельных и проводных электролиний.

В соответствии с нормативными требованиями обеспечения пожаробезопасности все жилые, административные, бытовые объекты должны быть оборудованы УЗО и УЗДП на входах электролиний в строение. Данные устройства должны иметь номинальный дифференциальный ток отключения в 300 мА. Такое значение отключающего тока выбрано с учетом тока утечки, соответствующего нормальному режиму работы электросетей (распределительной или групповой).

Однако широкое использование УЗО и УЗДП на объектах промышленного предназначения имеет определенные проблемы:

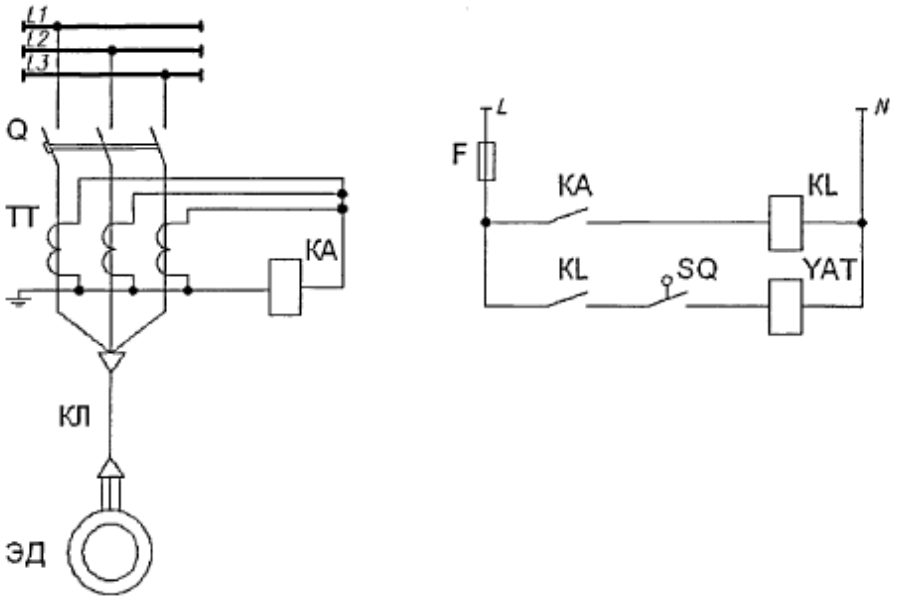
- «номинальные токи такой аппаратуры не превышают 125 А, что не покрывает весь диапазон необходимых токов аппаратов защиты используемых в распределительных сетях систем электроснабжения;
- данная аппаратура не обладает достаточной устойчивостью к токам КЗ на промышленных объектах» [9].

В следствие чего возникает необходимость подбора иных технических предложений, позволяющих достичь эффективный уровень противопожарной защиты кабельных соединений.

На промышленных предприятиях следует использовать защиту на основе значения тока нулевой последовательности, что позволяет оценить не симметрию в линиях электропередач.

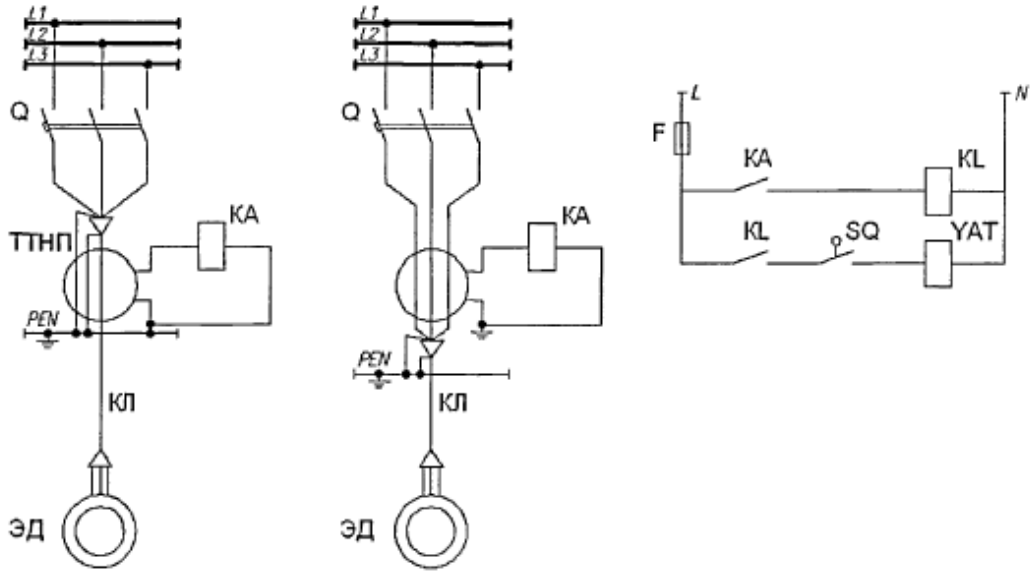
В данном случае возможно применение выносной релейной защиты, выполненной по принципу фильтра токов нулевой последовательности

(рисунок 7). Или с использованием трансформатора токов нулевой последовательности (ТТНП) (рисунок 8). Выносная релейная защита, основанная на фильтрах токов нулевой последовательности, представляет собой важный инструмент для обеспечения безопасности и надежности энергетических систем. Это решение сочетает в себе высокую эффективность, возможность интеграции с другими системами автоматизации и постоянный мониторинг, что делает его незаменимым в современных условиях эксплуатации электрических сетей.



«КА – реле тока; KL – промежуточное реле; YAT – независимый расцепитель автоматического выключателя» [9]

Рисунок 7 – Выносная релейная защита от однофазных КЗ [9]



«КА – реле тока; KL – промежуточное реле; YAT – независимый расцепитель автоматического выключателя» [9]

Рисунок 8 – Выносная релейная защита от однофазных КЗ с использованием ТТНП [9]

«Трехфазные электродвигатели являются симметричной нагрузкой, следовательно, появление тока нулевой последовательности свидетельствует о замыкании на заземленные проводящие части электрооборудования, а также на защитный или нулевой рабочий проводник кабеля, то есть об однофазном КЗ. Поскольку эта защита по принципу действия не требует отстройки от пускового тока электродвигателя, то выигрыш в чувствительности по сравнению с токовой отсечкой автоматического выключателя получается весьма значительным» [15].

«Если разделка кабеля выполнена между ТТНП и автоматическим выключателем, то для предотвращения излишних отключений при КЗ на соседних линиях или от блуждающих токов, замыкающихся по броне кабеля, заземляющий проводник брони кабеля присоединяют по бифилярной схеме – пропускают обратно сквозь окно ТТНП рядом с кабелем. На участке между ТТНП и кабельной разделкой изолируют от земли и корпуса ТТНП, металлическую оболочку, броню и заземляющий проводник. При использовании четвертой жилы кабеля в качестве защитного проводника ее следует подсоединять так же, как заземляющий проводник брони, или

разместить ТТНП между разделкой кабеля и автоматическим выключателем, а заземляющий и защитный проводники подключить помимо ТТНП» [15].

Выносная релейная защита обладает некоторыми недостатками, среди которых достаточно усложненная схема защиты, массивность, обязательное наличие управляющих цепей.

Автоматические выключатели с расцепителями получили широкое распространение, поскольку обеспечивают высокую надежность защиты электролиний при создании режима однофазного короткого замыкания.

Защита срабатывает благодаря полупроводниковым расцепителям или блоку ТТНП (встроен в автоматических выключателях). Это совершенно новые разработки, наиболее прогрессивное решение проблем защиты. Производство подобных выключателей ведется в разных странах, в том числе и в России. Но следует отметить наличие незначительного номенклатурного ряда данных расцепителей в нашей стране, они выпускаются на номинальный ток от 250 А и выше. Производителям таких средств защиты с меньшими величинами номинальных токов экономически не выгодно их выпускать в следствие низкого спроса.

Сложившееся положение дел с производством таких средств защиты может быть изменено в лучшую сторону с введением в нормативные требования новых положений о быстродействии защиты от однофазных КЗ.

Также эффективен другой способ защиты – «через ограничение тока КЗ, поскольку уменьшение тока КЗ всего лишь на 30% обеспечивает снижение энергии источника зажигания практически в 2 раза» [35].

Задачу ограничения токов короткого замыкания можно решить несколькими способами:

- «рациональным построением распределительных сетей систем электроснабжения объектов;
- использованием токоограничивающих реакторов;
- использованием токоограничивающей защитной аппаратуры» [39].

Достаточно перспективно в настоящее время направление по защите электролиний от КЗ и его факторов – это внедрение автоматических выключателей токоограничивающего действия. Современный рынок подобных электротехнических средств защиты представлен зарубежными и отечественными производителями.

Автоматические выключатели токоограничивающего действия обеспечивают пропускание тока КЗ меньшего значения, чем расчетный ток при аварийном режиме без использования в линии электропередачи средств защиты.

«Данный эффект достигается различными конструкторскими решениями, но все они основаны на введении в электрическую цепь дополнительного сопротивления в момент размыкания контактов. Например, в токоограничивающих автоматических выключателях серии А3700Б контакты, имеющие специальную конструкцию, при больших токах КЗ, сразу же отбрасываются электродинамическими силами, вводя в цепь сопротивление дуги, и затем уже не соприкасаются, т.к. своевременно срабатывает электромагнитный расцепитель. Выключатели серии Compact NS фирмы Schneider Electric обладают исключительной токоограничивающей способностью благодаря технологии двойного размыкания и возникновению двух последовательных напряжений дугового разряда с очень крутым волновым фронтом» [8].

Токоограничивающая способность автоматических выключателей такого типа выражается в виде кривых токоограничения, рисунок 9.

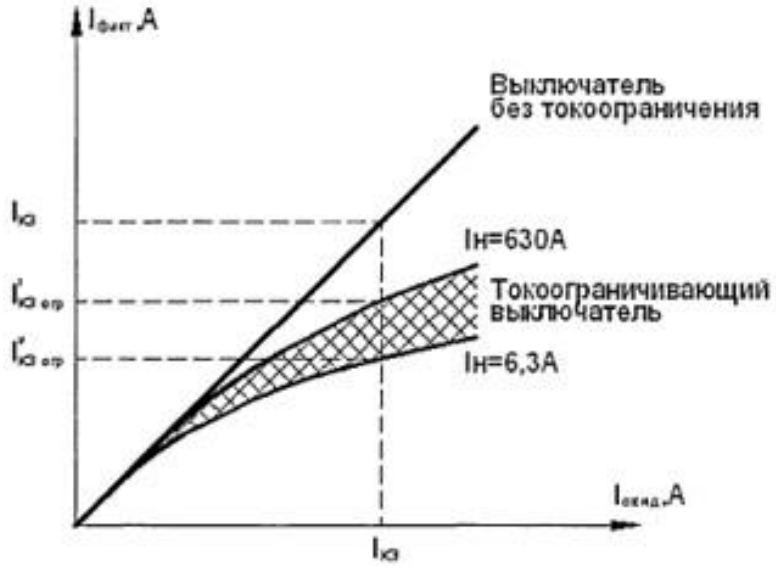


Рисунок 9 – Обобщенная характеристика токоограничения [8]

«Анализ кривых токоограничения показывает, что зависимость токоограничения не линейна, то есть токоограничивающий эффект автоматического выключателя зависит от значений ожидаемого тока повреждения. Для современных автоматических выключателей токоограничение может составлять до 800%» [43].

Следовательно, включение в распределительные электролинии токоограничивающих автоматических выключателей позволяет в значительной мере повысить пожаробезопасность при аварийных ситуациях за счет сокращения возможности обеспечить устойчивое возгорание электрической дугой кабельных линий или электропроводки.

Использование средств защиты токоограничивающего действия в распределительных сетях электроснабжения, кроме повышения уровня пожаробезопасности способно значительно снизить негативное воздействие токов КЗ на параметры работы электроустановок:

- «термическое воздействие – уменьшение нагрева проводников, увеличивает срок службы, как кабельных изделий, так и других элементов системы электроснабжения. Снижается вероятность

повреждения при дальнейшей эксплуатации, а, следовательно, повышается надежность системы электроснабжения объекта в целом;

- электродинамическое воздействие – уменьшение электродинамических сил сокращает опасность деформирования или нарушения целостности контактов и шин, что повышает надежность и пожаробезопасность работы системы электроснабжения объекта в целом;
- электромагнитное воздействие – уменьшение помех, воздействующих на приборы измерения и автоматики, расположенных вблизи с силовыми сетями;
- экономия – метод каскадного включения, использующий токоограничивающую способность выключателей, позволяет устанавливать на отходящей линии токоограничивающего выключателя аппараты, номинальный ток отключения которых меньше ожидаемого тока короткого замыкания. Их отключающая способность усиливается благодаря токоограничивающей способности аппарата на входе» [39].

«Но, несмотря на все достоинства этим выключателям присущи те же самые недостатки, что и обычным автоматическим выключателям, связанные с недостаточной чувствительностью и быстродействием к токам однофазного КЗ. Следовательно, эти выключатели не обеспечивают достаточной надежности защиты с точки зрения пожарной безопасности кабельных линий до 1кВ» [38].

«На основании вышеизложенного, в целях повышения пожарной безопасности кабельных линий и электропроводок, предлагается внести изменения, связанные с требованием повышения быстродействия защиты к однофазным КЗ» [38]:

- «распределительные сети до 1 кВ должны иметь надежную, быстродействующую защиту от токов КЗ, обеспечивающую

наименьшее время отключения, с соблюдением, при этом, требований селективности защит;

- при выполнении защиты с помощью автоматического выключателя токовая отсечка должна быть чувствительной не только к междуфазным, но, а также и к однофазным КЗ в конце защищаемого участка;
- в случае значительного завышения сечения токоведущих жил кабельного изделия в связи с повышением чувствительности токовой отсечки защитного аппарата, рекомендуется применение дифференциальной защиты токов нулевой последовательности» [38].

Выводы по второму разделу

На основании существующих данных о влиянии дугового разряда на характеристики огнестойкости полимерных материалов, можно констатировать следующее: основным параметром пожароопасности является минимальное значение энергии, необходимой для воспламенения либо величина временной задержки возгорания, зависящей от мощности электрической дуги.

Анализ исследований позволил установить следующее: выбор средств защиты электролиний, проведенный на основе действующих нормативных требований, обеспечивает эффективную защиту от факторов, угрожающих возникновением пожара таких, как высокие температуры проводников в следствие повышения токов в аварийных режимах.

Рассмотрев характеристики устройств защиты, которые были отобраны с учетом действующих нормативных требований защиты электролиний от воздействия КЗ, следует отметить, что данные устройства обладают недостаточной чувствительностью и быстродействием срабатывания по току однофазного КЗ, а это грозит повышением уровня пожароопасности в кабельных электросетях напряжением до 1 кВ.

Обеспечение распределительных сетей до 1 кВ защитными устройствами (автоматические выключатели) позволяет отключить

аварийный участок при возникновении однофазного КЗ с помощью тепловых расцепителей, время срабатывания которых обратнозависимо от тока, следовательно возрастает время негативного влияния дугового разряда на характеристики изоляции кабеля, тем самым создаются условия возгорания и развития пожара, что было подтверждено проведением лабораторных исследований.

В исследовательской работе проведен анализ методов обеспечения быстродействующей защиты электролиний от однофазного КЗ, установлена эффективность применения рассматриваемых методов защиты для конкретных условий на промышленных объектах.

На основании проведенных исследования было установлено, что для обеспечения пожаробезопасности кабельных электролиний необходимо внедрение быстродействующей защиты при возникновении однофазного КЗ.

3 Анализ эффективности применения усовершенствованных технологий обеспечения пожарной безопасности электроустановок на промышленных предприятиях

3.1 Методика оценки технико-экономической эффективности применения усовершенствованных технологий обеспечения пожарной безопасности электроустановок на промышленных предприятиях

В предыдущем разделе подробно рассматривался вопрос относительно рекомендаций по выбору оптимальных сечений электропередающих проводников распределительных сетей переменного тока напряжением до 1000 вольт. Было показано, что помимо уже существующих методических подходов, целесообразно дополнительно учитывать критерий обеспечения максимально возможной чувствительности токовой отсечки автоматического выключающего аппарата к однофазным коротким замыканиям непосредственно в конце защищаемого им участка электропередающего проводника.

Согласно предварительным оценочным расчетам, удовлетворение данного дополнительного требования по обеспечению максимально высокой чувствительности токовой защиты АВР может потребовать незначительного увеличения поперечных размеров проводящих жил используемого кабеля, что на первый взгляд может показаться малоэффективным с точки зрения затрат на его приобретение и монтаж.

Для полной и всесторонней оценки целесообразности внедрения нового добавочного критерия при выборе сечений, а также определения точных пределов допустимых решений с учетом как технических, так и экономических аспектов, необходим комплексный расчетный анализ с проведением большого числа численных экспериментальных моделирований.

При этом основной предпосылкой для проведения данного исследования является ожидаемая положительная экономическая эффективность использования кабелей с несколько большими, чем минимально допустимые, сечениями проводов. Проектируя систему электроснабжения, следует учитывать такой фактор: не всегда экономически выгоден выбор в пользу оптимального выбора сечения кабеля, поскольку размер потерь энергии может превысить размеры дополнительных расходов при выборе кабеля большей мощности. Именно поэтому при выборе кабеля следует исходить из экономически целесообразного сечения кабеля, чем выбора сечения по оптимальным нагрузкам.

«Несомненно, параметры однофазного короткого замыкания в конечной части кабельной линии, а также изменение величины напряжения как в нормальном, так и пусковом режимах работы электрооборудования, зависят не столько от сечения проводников, сколько от протяженности кабельного пути передачи электроэнергии. Следовательно, вторым важным критерием проектирования должна стать максимально допустимая протяженность кабельной магистрали заданной емкости сечения, удовлетворяющая сразу двум условиям: чувствительности токовой характеристики автоматического выключателя к току асимметричного замыкания, а также пределам допустимого отклонения показаний напряжения на терминалах потребителя энергии» [30].

Таким образом, критерии расчета, необходимые для определения области допустимого завышения сечения, можно разделить на две группы:

- технические критерии расчета;
- экономические критерии расчета.

Представляется целесообразным структурировать технические требования, предъявляемые к расчёту оптимальных параметров электропередающих кабелей распределительных сетей, в соответствии с действующими в отрасли методическими подходами и новыми предлагаемыми положениями. К постоянно существующим параметрам,

учитываемым при подобных расчётах, следует отнести критерий минимально допустимого сечения проводящих жил кабеля, обеспечивающего допускаемый по нормативам температурный режим их работы при эксплуатации.

Для гарантированного соблюдения нормируемого теплового режима в процессе длительной эксплуатации кабельной линии величина расчётного рабочего тока, протекающего по жилам кабеля, не должна превышать значение длительно допустимого тока, установленного для кабеля данного типа с конкретным поперечным размером проводников. Помимо этого, необходимо обязательно учитывать требование к времени срабатывания защитных устройств при однофазном коротком замыкании непосредственно в конце защищаемого участка кабельной линии:

$$I_p = K_{\text{п}} \cdot I_{\text{доп}}, \quad (3)$$

где I_p – «расчетный ток нагрузки» [36];

$I_{\text{доп}}$ – «длительно допустимый ток кабельного изделия при нормальных условиях прокладки» [36];

$K_{\text{п}} = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4$ – «поправочный коэффициент на условия прокладки и характер нагрузки» [36];

k_1 – «коэффициент учитывающий характер нагрузки (при повторно-кратковременном и кратковременном режиме работы электроприемников)» [36];

k_2 – «коэффициент, учитывающий отклонение температуры, окружающей кабель среды от расчетной» [36];

k_3 – «коэффициент прокладки, учитывающий количество совместно проложенных кабелей» [36];

$k_4 = 0{,}8$ – «необходим в случае прокладки кабельной линии во взрывоопасной зоне класса В-1а» [36].

Таким образом, минимально допустимое сечение кабельной линии должно удовлетворять следующему условию:

$$I_{\text{доп}} \geq \frac{I_p}{K_{\text{п}}}, \quad (4)$$

«Максимально допустимая длина кабельной линии по допустимому отклонению напряжения на зажимах электроприемника в нормальном режиме работы» [36].

«Падение напряжения на участке кабельной линии можно записать в следующем виде» [36]:

$$\Delta U_{\text{н}} = \sqrt{3} \cdot I_p (r \cdot cos\varphi_{\text{н}} + x \cdot sin\varphi_{\text{н}}) \cdot L, \quad (5)$$

где I_p – «расчетный ток нагрузки» [36];

г, х – «удельное активное и индуктивное сопротивления кабельной линии» [36];

$cos\varphi_{\text{н}}(sin\varphi_{\text{н}})$ – «коэффициент мощности в номинальном режиме работы электрооборудования» [36];

L – «длинна кабельной линии, м» [36].

Таким образом, «максимальная длина кабеля, при которой падение напряжения в кабельной линии не превышает допустимого, составляет» [36]:

$$L_{max\Delta U_{\text{н}}} = \frac{\Delta U_{\text{н}}}{\sqrt{3} \cdot I_p (r \cdot cos\varphi_{\text{н}} + x \cdot sin\varphi_{\text{н}})}, \quad (6)$$

где $\Delta U_{\text{н}}$ – «допустимая потеря напряжения в кабельной линии в нормальном режиме работы (2...5%$U_{\text{НОМ}}$)» [36].

«Максимальная длина кабельной линии по допустимому отклонению напряжения на зажимах электродвигателя в режиме пуска. Падение

напряжения в кабельной линии в режиме пуска электродвигателя составляет» [36]:

$$\Delta U_{\text{п}} = \sqrt{3} \cdot I_{\text{п}}(r \cdot cos\varphi_{\text{п}} + x \cdot sin\varphi_{\text{п}}) \cdot L, \quad (7)$$

где $I_{\text{п}}$ – «значение пускового тока электродвигателя» [36];

г, х – «удельное активное и индуктивное сопротивления кабельной линии» [36];

$cos\varphi_{\text{н}}(sin\varphi_{\text{н}})$ – «коэффициент мощности в режиме пуска электродвигательной нагрузки» [36];

L – «длина кабельной линии, м» [36].

Таким образом, «максимальная длина кабеля, при которой падение напряжения в кабельной линии не превышает 20% $U_{НОМ}$» [36]:

$$L_{max\Delta U_{\text{п}}} = \frac{\Delta U_{\text{п}}}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{п}}(r \cdot cos\varphi_{\text{п}} + x \cdot sin\varphi_{\text{п}})}, \quad (8)$$

где $\Delta U_{\text{п}}$ – «допустимая потеря напряжения в режиме пуска электродвигателя (20% $U_{НОМ}$)» [36].

К числу предлагаемых дополнительных параметров, которые следует учитывать при расчёте оптимальных технических характеристик электропередающих кабелей, можно отнести максимально допустимую эксплуатационную длину кабельного провода, обеспечивающую требуемую чувствительность действия режима токовой отсечки в защитном автоматическом выключателе к возникающим токам при однофазном коротком замыкании в конце линии.

Одним из важнейших условий при рассмотрении данного дополнительного критерия является обеспечение чувствительности функции токовой отсечки защитного устройства к величине тока, формирующегося в месте однофазного короткого замыкания на конце рассматриваемого участка

кабельной линии. При этом, учитывая, что подобные аварийные режимы в реальных условиях эксплуатации кабельных систем электроснабжения обычно сопровождаются возникновением дугового разряда, в расчётах целесообразно заранее прогнозировать возможное влияние последнего на фактическую величину тока утечки в момент однофазного замыкания, выражение примет следующий вид:

$$I_{\text{отс}} \leq \text{К}_{\text{н}} \cdot \text{К}_{\text{д}} \cdot I_{\text{окз}}, \quad (9)$$

где $I_{\text{отс}}$ – «значение тока срабатывания токовой отсечки» [36];

$I_{\text{окз}}$ – «значение тока однофазного КЗ без учета влияния дуги» [36];

$\text{К}_{\text{н}} = 0{,}9$ – «коэффициент надежности отстройки защиты» [36];

$\text{К}_{\text{д}} = 0{,}8$ – «поправочный коэффициент, учитывающий влияние активного сопротивления дуги в зоне замыкания» [36].

«Согласно методу симметричных составляющих, ток однофазного КЗ рассчитывается по формуле» [36]:

$$I_{\text{окз}} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}}{\sqrt{(2r_{1\Sigma} + r_{0\Sigma})^2 + (2x_{1\Sigma} + x_{0\Sigma})^2}}, \quad (10)$$

где $U_{\text{ном}}$ – «номинальное линейное напряжение» [36];

$r_{1\Sigma}, x_{1\Sigma}$ – «соответственно суммарное активное и индуктивное сопротивления прямой последовательности цепи до точки КЗ» [36];

$r_{0\Sigma}, x_{0\Sigma}.$ – «соответственно суммарное активное и индуктивное сопротивления нулевой последовательности цепи до точки КЗ» [36].

Переходим к приближенной формуле:

$$I_{\text{окз}} = \frac{U_{\text{ф}}}{Z_{\text{ф}-0}} = \frac{U_{\text{ном}}}{\sqrt{3} \cdot z_{\text{ф}-0} \cdot L}, \quad (11)$$

где $U_{\text{ном}}$ – «номинальное линейное напряжение» [36];

$U_{\text{ф}}$ – «номинальное фазное напряжение, В» [36];

$Z_{\text{ф}-0}$ – «сопротивление петли фаза ноль, Ом» [36];

$z_{\text{ф}-0}$ – «удельное сопротивление петли фаза-ноль, Ом/м» [36];

L – «длинна кабельной линии, м» [36].

Из формулы 7, с учетом формулы 9, можно найти «максимальную длину кабельной линии, при которой токовая отсечка аппарата защиты чувствительна к току однофазного КЗ» [36]:

$$L_{max\text{окз}} = \frac{0.7 \cdot U_{\text{ном}}}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{отс}} \cdot z_{\text{ф}-0}}, \quad (12)$$

«Определение максимальной длинны кабельной линии, удовлетворяющей техническим условиям (критериям) выбора» [36]:

$$L_{max} = min\{L_{max\Delta U_{\text{н}}};\ L_{max\Delta U_{\text{п}}};\ L_{max\text{окз}}\}, \quad (13)$$

«Выбор оптимального сечения проводников и жил кабеля исключительно на основании существующего в отраслевых методиках критерия экономической плотности электрического тока» [36], на первый взгляд, может показаться достаточно обоснованным подходом. Однако более детальный анализ данного метода показывает, что его использование может приводить к ошибочным и неточным результатам технико-экономических расчетов при проектировании электроснабжающих систем, а также находиться в некотором логическом противоречии с принципами оптимизации затрат в энергетике. Кроме того, в силу постоянного роста стоимости электроэнергии значения показателя экономической плотности

тока, рекомендуемые нормативами, со временем морально устаревают и требуют пересмотра.

В связи с вышеизложенным, наиболее целесообразным подходом к определению экономически обоснованного выбора сечений кабелей представляется применение метода сравнения приведённых годовых затрат на содержание и эксплуатацию линий с различными вариантами сечений. При этом расчёт суммарных приведённых затрат может быть произведён с учётом формулы, включающей как капитальные вложения на приобретение и монтаж кабеля, так и сопутствующие эксплуатационные издержки в виде потерь активной мощности при её транспортировке по кабельной линии. Данный подход позволит выявить наиболее оптимальное решение с точки зрения минимизации общих затрат:

$$З = С_э + 0{,}15 \cdot К, \quad (14)$$

где З – затраты;

$С_э$ – эксплуатационные расходы;

К – капиталовложения.

При транспортировке любого определенного объема электрической мощности S на любое установленное расстояние L по какому-либо кабельному тракту, а равно с учетом текущих показателей цены на электроэнергию $С_о$ на розничном рынке, объема первоначальных капитальных вложений K, необходимых для закупки необходимого количества кабеля определенного типа и проводников и осуществления его монтажа на местности с соблюдением всех требований безопасности и надежности, а также прогнозируемых расходов $С_э$ на регулярное техническое обслуживание и содержание данной кабельной линии в течение всего расчетного срока ее эксплуатации, величина итоговой суммы всех перечисленных приведенных к общей временной базе годовых затрат в денежном выражении будет принципиально зависеть от конкретных

поперечных геометрических размеров F каждой отдельной проводящей жилы, используемой непосредственно в этом кабеле для передачи заданной мощности S.

Выбрав вариант кабеля с наименьшим значением совокупных дисконтированных затрат по сравнению со всеми рассмотренными альтернативами, можно вполне определить и указать наиболее рациональное и оптимальное с точки зрения минимизации общих финансовых затрат сечение каждой отдельной проводящей жилы, которое будет в состоянии обеспечить надежную транспортировку заданного объема электрической мощности S в рассматриваемых конкретных условиях данного проекта (заданное расстояние транспортировки L, текущая стоимость энергоресурсов C_o и прочие существенные параметры).

В эксплуатируемых на территории страны низковольтных распределительных сетях переменного тока с напряжением до 1000 В, основная доля ежегодных издержек на содержание и обслуживание, как правило, приходится именно на расходы, связанные с неизбежными потерями активной электрической энергии в процессе её передачи по кабельным линиям. Таким образом, можно записать, что:

$$\mathrm{C_э} = \Delta\mathrm{P} \cdot \tau \cdot \mathrm{C_0} = I^2 R \cdot \tau \cdot C_0 = I^2 r_{\text{уд}} L \cdot \tau \cdot C_0 = \left(I^2 r_{\text{уд}} \cdot \tau \cdot C_0\right) \cdot L, \qquad (15)$$

где ΔP – «потери активной мощности» [36];

τ – «время потерь (время нахождения кабельной линии под нагрузкой)» [36];

C_0 – «стоимость электроэнергии» [36];

I – «значение тока нагрузки» [36];

R – «активное сопротивление кабельной линии длинной L» [36];

$r_{\text{уд}}$ – «удельное активное сопротивление кабельной линии» [36];

L – «длина кабельной линии, м» [36].

«Стоимость электроэнергии вычисляется в зависимости от установленного тарифа за электроэнергию» [36].

При одноставочном:

$$\mathrm{C}_0 = \alpha, \tag{16}$$

При двуставочном:

$$\mathrm{C}_0 = \alpha + {}^{\beta}/_{\tau}, \tag{17}$$

где α – «ставка за потребленную электроэнергию» [36];

β – «ставка двуставочного тарифа за заявленную мощность в часы максимума энергосистемы» [36].

Капитальные затраты можно представить в следующем виде:

$$\mathrm{К} = k_{\text{уд}} \cdot L, \tag{18}$$

где $k_{\text{уд}}$ – удельные капитальные затраты,

Согласно формуле 12 и формуле 15 можно записать:

$$\mathrm{З} = \left(I^2 r_{\text{уд}} L \cdot t \cdot C_0 + 0{,}15 \cdot k_{\text{уд}}\right) \cdot L = \mathrm{з}_{\text{уд}} \cdot L, \tag{19}$$

Так как:

$$\mathrm{з}_{\text{уд}} = I^2 r_{\text{уд}} L \cdot t \cdot C_0 + 0{,}15 \cdot k_{\text{уд}}, \tag{20}$$

Получаем:

$$З = з_{уд} \cdot L, \quad (21)$$

где $з_{уд}$ – удельные годовые приведенные затраты.

Таким образом, сечение токоведущих жил кабельного изделия, имеющее наименьшие удельные приведенные затраты, является экономически эффективным:

$$F_{эк} \rightarrow min(з_{уд}), \quad (22)$$

Целью данных расчетных исследований является определение области допустимых значений завышения сечения, а также, определение максимально допустимых длин кабельных линий исходя из условий:

- допустимого отклонения напряжения на зажимах электроприемника в нормальном режиме работы;
- допустимого отклонения напряжения на зажимах электродвигателя в режиме пуска;
- чувствительности токовой отсечки защитного автоматического выключателя к току однофазного КЗ в конце защищаемой кабельной линии.

Учитывая, что проблема обеспечения достаточной чувствительности функции токовой отсечки автоматических выключателей занимает одно из ключевых мест в вопросах повышения надежности и безопасности защиты асинхронных электродвигателей, в ходе проведенных численных расчетов и моделирований в качестве основных потребителей электроэнергии были использованы ее математические модели асинхронных двигателей с наиболее распространенным дефектом в виде короткого замыкания в обмотке ротора.

Экономическая составляющая исследования базировалась на реальных значениях тарифов на электрическую энергию, установленных органами государственного регулирования цен и тарифов. Стоимостные характеристики различных типоразмеров кабельной продукции были взяты в

соответствии с официальным прайс-листом одного из крупнейших российских производителей – ОАО «Электрокабель». Численное моделирование проводилось для четырех наиболее востребованных в распределительных сетях переменного тока напряжением до 1 кВ типоразмеров кабелей:

- «АВВГ – силовой кабель с алюминиевыми жилами, с ПВХ изоляцией в ПВХ оболочке, голый;
- АВБбШв – силовой кабель с алюминиевыми жилами, с ПВХ изоляцией с защитным покровом БбШв;
- ВВГ – силовой кабель с медными жилами, с ПВХ изоляцией в ПВХ оболочке, голый;
- ВБбШв – силовой кабель с алюминиевыми жилами, с ПВХ изоляцией с защитным покровом БбШв» [36].

Анализ результатов расчета позволил сделать следующие выводы.

Исследованиями была выявлена область значений параметров кабельной линии (сечение проводников, протяженность, уровень нагрузки), в пределах которой увеличение сечения проводников по дополнительному требованию обеспечения необходимой чувствительности функции токовой отсечки автоматического выключателя к токам однофазного короткого замыкания может быть признано оправданным с позиций экономической эффективности. Отмечается, что указанная зона экономически целесообразных параметров значительно шире при использовании кабелей с алюминиевыми проводниками благодаря их более низкой стоимости.

Было получено экспериментальное подтверждение выявленного ранее сужения пределов указанной зоны безопасной эксплуатации электрической магистрали с увеличением значения нагрузки, обусловленного более низкой максимально допустимой плотностью разрешенного электрического тока для крупногабаритных высоковольтных электропроводов большей протяженности и, соответственно, меньшими потерями при транспортировке электроэнергии на значительные расстояния. Дополнительно проведенные

исследования также однозначно показали наличие определенной критической максимальной протяженности данной высоковольтной кабельной трассы, до которой с точки зрения обеспечения наибольшей степени защиты всей системы от однофазных коротких замыканий и повреждений изоляции проводников является целесообразным и эффективным использование функции быстрого выключения путем токовой блокировки в автоматическом выключателе, расположенном в начальной точке магистрали и обеспечивающем ее немедленное отключение при превышении максимально допустимого значения тока с целью предотвращения дополнительных последующих повреждений и возможного возгорания. Данная критическая длина составляет:

- для кабелей с алюминиевыми токоведущими жилами – 200 м;
- для кабелей с медными токоведущими жилами – 120 м.

В тех случаях, когда фактическая протяженность реально эксплуатируемой кабельной линии по каким-либо причинам превышает определённую критическую граничную величину, для которой функция токовой отсечки автоматического выключателя, установленного на стороне подстанции, ещё может обеспечить в полной мере достаточную защиту от однофазных коротких замыканий, целесообразно применение специализированных инженерных решений по такой защите. К указанным решениям можно отнести использование дополнительных выносных быстродействующих устройств релейной защиты, блоков релейной защиты с функцией дистанционной индикации или автоматических выключателей, оснащенных специальной функцией очень быстрой и высокочувствительной токовой защиты для обеспечения оперативной отсечки тока при возникновении однофазного короткого замыкания на любом участке кабельной линии.

Другим вариантом являются специальные блоки релейной защиты, которые могут не только отслеживать состояние сети, но и предоставлять

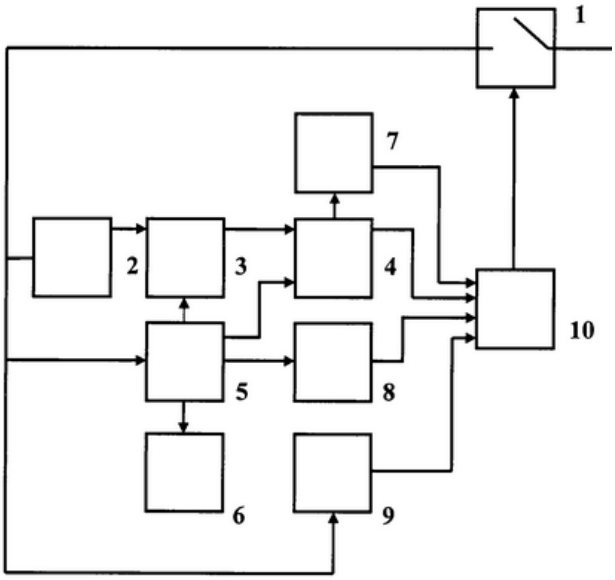
дистанционную индикацию аварийных событий. Это позволяет оперативно реагировать на неисправности и минимизировать риски.

Помимо предлагаемых мероприятий для обеспечения пожарной безопасности электроустановок на электроустановках промышленных предприятиях ООО «РН-Пожарная безопасность», филиал «Сибирь» предлагается использование устройств защитного отключения. В настоящее время, устройство защитного отключения (УЗО) и устройство защиты от дугового пробоя (УЗДП), реагирующее на дифференциальный ток, в основном используется, как эффективное средство защиты человека от поражения электрическим током. К ценным свойствам устройств защитного отключения (УЗО) следует отнести эффективность противопожарной защиты при таких аварийных ситуациях, как износ и дефекты изоляции, некачественное исполнение электролиний, неисправности электрооборудования. Стоит остановиться не ряде технических предложений, в которых используются УЗО.

Патент под авторством Ю.И. Бабец предлагает «устройство защиты от дугового пробоя, содержащее датчик дифференциального тока, устройство сравнения, индикатор состояния УЗДП, исполнительный орган, в цепь управления которого включен ключ, отличающееся тем, что устройство снабжено микросхемой индикатора тока утечки, схемой временной задержки срабатывания по току утечки, схемой срабатывания по превышению напряжения сети, схемой дистанционного управления срабатывания, подающими сигнал на ключ, универсальной схемой питания УЗДП, как от однофазной, так и от трехфазной сети. Полезная модель относится к электротехнике, к классу автоматических устройств защиты людей от поражения электрическим током и повышения пожаробезопасности жилых зданий» [26]. Сущность технического решения показана на рисунке 10.

Основные причины, препятствующие получению необходимых для исследования технических результатов и характеристик, заключаются в отсутствии в рассматриваемых устройствах нескольких ключевых

компонентов и функций. Это микросхема контроля и регистрации величины тока утечки, алгоритм временной задержки срабатывания для недопущения ложных срабатываний при кратковременных утечках тока, а также схемы реагирования на превышение питающего напряжения сети. Кроме того, отсутствует система дистанционного управления срабатыванием за счет коммутации выходного ключа, что снижает удобство эксплуатации.



«1 – исполнительный орган, 2 – датчик дифференциального тока, 3 – устройство сравнения, 4 – микросхема индикатора тока утечки, 5 – универсальная схема питания, 6 – индикатор состояния УЗДП, 7 – схема временной задержки срабатывания по току утечки, 8 – схема дистанционного управления срабатывания, 9 – схема срабатывания по превышению напряжения сети, 10 – ключ» [26]

Рисунок 10 – Устройство защиты от дугового пробоя по патенту автора Ю.И. Бабец

Все это приводит к недостаточной стабильности работы по току утечки, отсутствию температурной стабильности функционирования и более высокому энергопотреблению.

Такие устройства не могут одновременно обеспечивать защитой группу взаимосвязанных линий и потребителей. Кроме того, отсутствует возможность их интеграции с системами пожарной сигнализации и удаленного диспетчерского управления, что снижает их функциональные

возможности. Недостатком данного устройства является также то, что в нем не обеспечивается контроль количества электричества в цепи утечки тока после срабатывания УЗДП, при генерировании обратной ЭДС отключаемыми электродвигателями и разряде батарей статических конденсаторов в трехфазных электрических сетях.

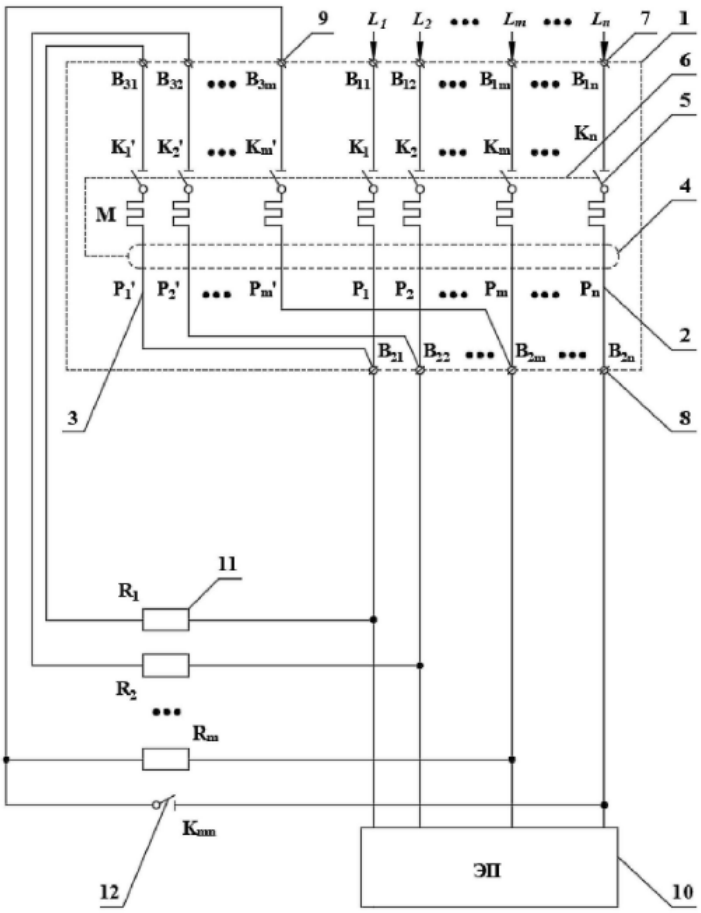
Кроме того, в этих УЗДП нет универсальной схемой питания, как от однофазной, так и от трехфазной сети. Это не дает возможности реализации работы УЗДП как в однофазных, так и в трехфазных сетях, то есть сужает функциональные возможности УЗДП.

Еще одно техническое решение, рассмотренное в настоящем исследовании – устройство защиты от дугового пробоя, предлагаемое в патенте под авторством В.С. Мельникова [27].

Устройство дифференциального тока, содержащее основные и дополнительные полюсы, подвижные и неподвижные контакты, общий синхронизатор подвижных контактов и общий датчик обнаружения дифференциального тока всех полюсов, также имеющее выводы для соединения каждого основного полюса с источником питания и с электроприёмником, при этом каждый дополнительный полюс соединён последовательно навстречу с одним основным полюсом, отличающееся тем, что содержит как минимум два основных полюса и как минимум один дополнительный полюс, одна сторона каждого дополнительного полюса имеет отдельный вывод для соединения с дополнительной нагрузкой, а другая сторона соединена с одним выводом, соединённым с той же дополнительной нагрузкой, с электроприёмником и с основным полюсом(рисунок 11).

Техническим результатом является регулярная внутренняя структура, при которой внешние элементы и соединения также однообразно упорядочены, а многофункциональная конструкция собирается из практически одинаковых полюсов в автоматический выключатель, управляемый дифференциальным током. Унифицированное таким образом

устройство будет выполнять все функции по предотвращению аварий, пожаров и защите различных электроустановок, обеспечивая соединение с источником питания, контроль дифференциального тока и своевременное полное отключение.



1 – устройство дифференциального тока, 2 – основные полюса, 3 – дополнительные полюса, 4 – общий датчик обнаружения, 5 – подвижные контакты, 6 – общий синхронизатор, 7 – выводы B_{11}-B_{1n}, 8 – выводы B_{21}-B_{2n}, 9 – отдельные выводы, 10 – электроприемник, 11 – дополнительная нагрузка, 12 – разомкнутый выключатель

Рисунок 11 – Устройство защиты от дугового пробоя по патенту автора В.С. Мельникова

Достигнутый результат также упростит монтаж, в том числе соединение с применением стандартных элементов, при эксплуатации исключит контроль дополнительных устройств, а в случае отказа облегчит и ускорит диагностику.

Новое техническое решение отличается от аналога тем, что устройство дифференциального тока содержит как минимум два основных полюса и как минимум один дополнительный полюс, одна сторона каждого дополнительного полюса имеет отдельный вывод для соединения с дополнительной нагрузкой, а другая сторона соединена с одним выводом, соединённым с той же дополнительной нагрузкой, с электроприёмником и с основным полюсом. Дополнительно устройство может иметь как минимум в одном основном полюсе встроенную защиту от сверхтока и индикатор отключения, указывающий причину отключения от сверхтока или от дифференциального тока. Также выводы, соединённые с электроприёмником, и отдельные выводы, соединённые с дополнительной нагрузкой, для разных полюсов могут иметь соединение между собой через нормально разомкнутый выключатель, управляемый средствами автоматики или вручную. Кроме того, в одном варианте подвижные и неподвижные контакты разных полюсов могут располагаться вдоль монтажной планки параллельно друг другу и группироваться в блок основных полюсов и блок дополнительных полюсов. В другом варианте подвижные и неподвижные контакты разных полюсов могут располагаться вдоль монтажной планки параллельно друг другу и группироваться парами, каждая из которых будет состоять из основного полюса и дополнительного полюса.

Как показано в описании устройства и в описании его функций, указанная техническая проблема устранена. Независимо от числа фаз и числа соединений с электроприёмником детали (полюсы) и соединения выводов выполняются единообразно.

Устройство защитного отключения оснащено высокоточным полупроводниковым интегральным датчиком тока, предназначенным для обнаружения и измерения величины скрытой утечки электрического тока через изоляцию цепей питания. Данный сложный микроэлектронный блок на базе транзисторных сенсоров позволяет повысить стабильность и точность реагирования устройства на аварийные и опасные режимы работы,

вызванные протеканием токов утечки. Благодаря интеграции датчика также достигается улучшение температурной устойчивости функционирования защитного механизма, снижение энергопотребления электронных цепей обработки сигналов и возможность использования более дешевых конденсаторов в электрической схеме благодаря снижению напряжения питания. Таким образом, интеграция программируемого микрочипа повышает надежность работы устройства и его эксплуатационные характеристики в целом.

На практическом уровне внедрение предлагаемой полезной модели позволяет достичь ряда значимых положительных результатов, обусловленных как совершенствованиями в технологии изготовления устройства, так и оптимизацией его эксплуатационных характеристик. К числу таких результатов, прежде всего, следует отнести существенное повышение устойчивости работоспособности устройства и его способности стабильно функционировать в различных, в том числе экстремальных, режимах без сбоев и отказов. Кроме того, достигается улучшение показателей надежности и бесперебойности выполнения основных функций во времени. Помимо этого, оптимизация конструктивной схемы и компоновки узлов расширяет функциональные возможности изделия, позволяя реализовать дополнительные режимы работы и увеличить сферы его применения. Таким образом, основной технический эффект заключается в комплексном повышении ключевых показателей и характеристик.

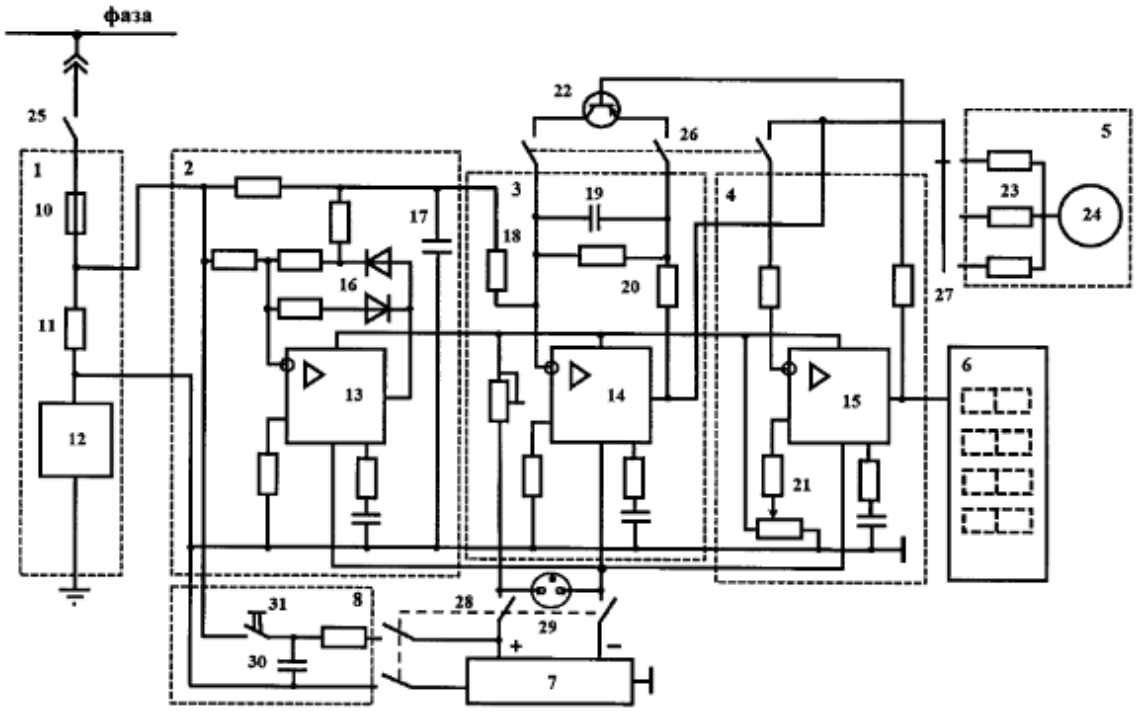
Поскольку данное техническое решение обладает несомненными преимуществами, то в настоящем исследовании оно предлагается к использованию.

В дополнение к предлагаемому техническому предлагается использование устройства проверки исправности УЗДП, применяемое в аппаратах защиты от токов утечки, принцип действия которого заключается в имитации включения человека в электрическую сеть при помощи кнопки

проверки и подачи напряжения в цепь утечки тока через эквивалентное сопротивление 1 кОм и дополнительный заземлитель [28].

Серийно выпускаемые УЗДП оснащены блоком проверки исправности, состоящим из кнопки проверки и активного сопротивления, имитирующего прикосновение человека к фазе электрической сети. Измерение контролируемых параметров осуществляется на специализированных стендах путем измерения тока в цепи исполнительного реле и определения времени срабатывания УЗДП, что увеличивает трудоемкость проведения проверки и испытания.

Принципиальная электрическая схема устройства приведена на рисунке 12.



1 – блок имитации, 2 – выпрямитель, 3 – интегратор, 4 – преобразователь напряжение-частота, 5 – регистрирующий прибор, 6 – цифровой индикатор, 7 – блок питания, 8 – блок контроля исправности устройства, 9 – блок управления, 10 – предохранитель, 11 – шунтирующее сопротивление, 12 – имитатор, 13, 14, 15 – операционный усилитель, 16 – точечные диоды, 17 – конденсаторный фильтр, 18, 20 – резистор, 19 – конденсатор, 21 – регулировочный резистор, 22 – транзистор, 23 – балластные сопротивления, 24 – миллиамперметр, 25, 28 – выключатель, 26, 27 – переключатели, 29 – сигнальная лампа, 30 – зарядка конденсатора, 31 – кнопка

Рисунок 12 – Принципиальная электрическая схема устройства

Применение предлагаемой полезной модели позволит осуществить проверку исправности УЗДП, повысить уровень защиты человека, прикоснувшегося к токоведущей части или корпусу электрооборудования, находящегося под напряжением, и обеспечить безопасность эксплуатации электрических сетей.

3.2 Анализ и оценка эффективности разработанных усовершенствованных технологий обеспечения пожарной безопасности электроустановок на промышленных предприятиях

Рамки данного исследования не позволяют дать полное представление об экономической эффективности перечисленных способов по созданию пожаробезопасности, поэтому проведем расчет. Расходы по внедрению устройства защитного отключения от дугового пробоя приведены в таблице 4.

Таблица 4 – План финансового обеспечения мероприятия

Наименование мероприятия	Основание	Стоимость, руб.	Срок реализации	Ответственный
Устройство защитного отключения от дугового пробоя	План мероприятий по улучшению пожарной безопасности на 2025 г.	201 450	4 кв. 2025 г.	Главный инженер

Смета расходов на мероприятие представлена в таблице 5.

Таблица 5 – Смета расходов на мероприятие

Наименование работ	Расчет стоимости
Стоимость оборудования, руб.	111 000
Стоимость проектирования, руб.	30 000
Стоимость монтажных работ, руб.	60 450
Итого, руб.	201 450

Экономический эффект:

$$Э_г = У - З, \quad (23)$$

где «$Э_г$ – годовой экономический эффект, руб.;

У – величина потерь организации при пожаре, руб.;

З – затраты на реализацию мероприятия, руб» [24].

$$Э_г = 450000 - 201450 = 248550 \text{ руб.}$$

Итак, предварительно экономический эффект является положительным значением.

Экономическая эффективность мероприятия:

$$Э = \frac{У}{З}, \quad (24)$$

где «$Э_г$ – годовой экономический эффект, руб.;

У – величина потерь организации при пожаре, руб.;

З – затраты на реализацию мероприятия, руб» [24].

$$Э = \frac{450000}{201450} = 2{,}23$$

Чистый экономический эффект:

$$ЧЭЭ = \sum Э_t - З_t, \quad (25)$$

где «$Э_t$ – результаты, достигнутые на t-ом шаге расчета;

$З_t$ – затраты, осуществляемые на этом шаге, включая капитальные вложения» [24].

Чистый дисконтированный доход:

$$ЧДД = \sum_{t=0}^{T} (Э_t - З_t + А_t) \frac{1}{(1+Е)^t}, \quad (26)$$

где «$Э_t$ – результаты, достигнутые на t-ом шаге расчета;

$З_t$ – затраты, осуществляемые на этом шаге, включая капитальные вложения» [24].

Срок окупаемости:

$$Т_{ок} = Т\text{-}\frac{ЧДД_Т}{ЧДД_{Т+1}\text{-}ЧДД_Т}, \quad (27)$$

где «ЧДД – чистый дисконтированный доход» [24].

Индекс доходности:

$$ИД = \frac{\sum_{t=0}^{T}(Э_t+А_t)(1+Е)^{т\text{-}1}}{\sum_{t=0}^{T} К_t(1+Е)^{т\text{-}1}}, \quad (28)$$

где «$Э_t$ – результаты, достигнутые на t-ом шаге расчета» [24].

Результаты расчет экономической эффективности предлагаемого мероприятия представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Интегральные показатели эффективности мероприятия

Наименование показателей	Значение показателей по годам, руб.				
	1	2	3	4	5
Капитальные вложения	201 450	0	0	0	0
Ежегодные затраты	-	12500	12500	12500	12500
Амортизация	-	2500	2500	2500	2500
Эффект	248550	248550	248550	248550	248550
ЧЭЭ	47100	236050	236050	236050	236050
ЧДД с нарастающим итогом	37680	190840	190840	190840	190840
Срок окупаемости	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Индекс доходности	1,27				

Выводы по третьему разделу

Исследованиями была выявлена область значений параметров кабельной линии (сечение проводников, протяженность, уровень нагрузки), в пределах которой увеличение сечения проводников по дополнительному требованию обеспечения необходимой чувствительности функции токовой отсечки автоматического выключателя к токам однофазного короткого замыкания может быть признано оправданным с позиций экономической эффективности. Отмечается, что указанная зона экономически целесообразных параметров значительно шире при использовании кабелей с алюминиевыми проводниками благодаря их более низкой стоимости.

Было получено экспериментальное подтверждение выявленного ранее сужения пределов указанной зоны безопасной эксплуатации электрической магистрали с увеличением значения нагрузки, обусловленного более низкой максимально допустимой плотностью разрешенного электрического тока для крупногабаритных высоковольтных электропроводов большей протяженности и, соответственно, меньшими потерями при транспортировке электроэнергии на значительные расстояния.

Дополнительно проведенные исследования также однозначно показали наличие определенной критической максимальной протяженности данной высоковольтной кабельной трассы, до которой с точки зрения обеспечения наибольшей степени защиты всей системы от однофазных коротких замыканий и повреждений изоляции проводников является целесообразным и эффективным использование функции быстрого выключения путем токовой блокировки в автоматическом выключателе, расположенном в начальной точке магистрали и обеспечивающем ее немедленное отключение при превышении максимально допустимого значения тока с целью предотвращения дополнительных последующих повреждений и возможного возгорания.

Помимо предлагаемых мероприятий для обеспечения пожарной безопасности электроустановок на электроустановках промышленных

предприятиях ООО «РН-Пожарная безопасность». Филиал «Сибирь» предлагается использование устройств защитного отключения.

На практическом уровне внедрение предлагаемой полезной модели позволяет достичь ряда значимых положительных результатов, обусловленных как совершенствованиями в технологии изготовления устройства, так и оптимизацией его эксплуатационных характеристик. К числу таких результатов, прежде всего, следует отнести существенное повышение устойчивости работоспособности устройства и его способности стабильно функционировать в различных, в том числе экстремальных, режимах без сбоев и отказов.

Кроме того, достигается улучшение показателей надежности и бесперебойности выполнения основных функций во времени. Помимо этого, оптимизация конструктивной схемы и компоновки узлов расширяет функциональные возможности изделия, позволяя реализовать дополнительные режимы работы и увеличить сферы его применения. Таким образом, основной технический эффект заключается в комплексном повышении ключевых показателей и характеристик.

Рассчитанный экономический эффект составил 248550 руб., экономическая эффективность мероприятия 2,23 при сроке окупаемости 0,2 года.

Заключение

В первом разделе проведено исследование причин неисправной работы средств противопожарной защиты в электроустановках. В тех случаях, когда защита от короткого замыкания не предусмотрена либо находится в неисправном состоянии, вероятность возгорания при возникновении замыканий на открытые проводящие части очень высока в следствие разрушения изоляции термическим воздействием. Продолжительность короткого замыкания зависит от времени срабатывания защитных устройств в электросети, от времени перегорания (до разъединения) ТПЖ (токопроводящая жила провода).

В основном такая ситуация соответствует подающим к прибору питание проводам при образовании режима КЗ, когда происходит замыкание фазы на заземленное оборудование. Проведенное исследование еще раз доказало: уровень пожарной безопасности на линиях электропередач с учетом противопожарной защиты техническими средствами, взаимосвязан с надежностью работы автоматических выключателей, с состоянием электропроводов рабочих и защитных. Результаты исследования позволяют прийти к следующим выводам:

- состояние сопротивления заземляющих устройств электрооборудования, изменяющееся в процессе эксплуатации, не оказывает существенного влияния на пожарную опасность электросетей, электротехнического оборудования и электроприборов в зданиях;
- цепи питания электроприборов, металлические корпуса которых заземлены с помощью PE-проводника, в целях исключения возгораний в дежурном режиме должны иметь максимальную токовую защиту.

Также одной из самых частых причин возгорания в «электрических» пожарах является дуговой пробой или искрение, поэтому в исследовании сделан вывод о необходимости применения УЗДП.

Во втором разделе, на основании существующих данных о влиянии дугового разряда на характеристики огнестойкости полимерных материалов, можно констатировать следующее: основным параметром пожароопасности является минимальное значение энергии, необходимой для воспламенения либо величина временной задержки возгорания, зависящей от мощности электрической дуги. Анализ исследований позволил установить следующее: выбор средств защиты электролиний, проведенный на основе действующих нормативных требований, обеспечивает эффективную защиту от факторов, угрожающих возникновением пожара таких, как высокие температуры проводников в следствие повышения токов в аварийных режимах.

Рассмотрев характеристики устройств защиты, которые были отобраны с учетом действующих нормативных требований защиты электролиний от воздействия КЗ, следует отметить, что данные устройства обладают недостаточной чувствительностью и быстродействием срабатывания по току однофазного КЗ. Обеспечение распределительных сетей до 1 кВ защитными устройствами (автоматические выключатели) позволяет отключить аварийный участок при возникновении однофазного КЗ с помощью тепловых расцепителей, время срабатывания которых обратнозависимо от тока, следовательно возрастает время негативного влияния дугового разряда на характеристики изоляции кабеля, тем самым создаются условия возгорания и развития пожара, что было подтверждено проведением лабораторных исследований. В исследовательской работе проведен анализ методов обеспечения быстродействующей защиты электролиний от однофазного КЗ, установлена эффективность применения рассматриваемых методов защиты для конкретных условий на промышленных объектах. На основании проведенных исследования было установлено, что для обеспечения

пожаробезопасности кабельных электролиний необходимо внедрение быстродействующей защиты при возникновении однофазного КЗ.

В третьем разделе исследованиями была выявлена область значений параметров кабельной линии (сечение проводников, протяженность, уровень нагрузки), в пределах которой увеличение сечения проводников по дополнительному требованию обеспечения необходимой чувствительности функции токовой отсечки автоматического выключателя к токам однофазного короткого замыкания может быть признано оправданным с позиций экономической эффективности. Отмечается, что указанная зона экономически целесообразных параметров значительно шире при использовании кабелей с алюминиевыми проводниками благодаря их более низкой стоимости.

Было получено экспериментальное подтверждение выявленного ранее сужения пределов указанной зоны безопасной эксплуатации электрической магистрали с увеличением значения нагрузки, обусловленного более низкой максимально допустимой плотностью разрешенного электрического тока для крупногабаритных высоковольтных электропроводов большей протяженности и, соответственно, меньшими потерями при транспортировке электроэнергии на значительные расстояния. Дополнительно проведенные исследования также однозначно показали наличие определенной критической максимальной протяженности данной высоковольтной кабельной трассы, до которой с точки зрения обеспечения наибольшей степени защиты всей системы от однофазных коротких замыканий и повреждений изоляции проводников является целесообразным и эффективным использование функции быстрого выключения путем токовой блокировки в автоматическом выключателе, расположенном в начальной точке магистрали и обеспечивающем ее немедленное отключение при превышении максимально допустимого значения тока с целью предотвращения дополнительных последующих повреждений и возможного возгорания.

Помимо предлагаемых мероприятий для обеспечения пожарной безопасности электроустановок на электроустановках промышленных предприятиях ООО «РН-Пожарная безопасность». Филиал «Сибирь» предлагается использование устройств защиты от дугового пробоя.

На практическом уровне внедрение предлагаемой полезной модели позволяет достичь ряда значимых положительных результатов, обусловленных как совершенствованиями в технологии изготовления устройства, так и оптимизацией его эксплуатационных характеристик. К числу таких результатов, прежде всего, следует отнести существенное повышение устойчивости работоспособности устройства и его способности стабильно функционировать в различных, в том числе экстремальных, режимах без сбоев и отказов. Кроме того, достигается улучшение показателей надежности и бесперебойности выполнения основных функций во времени. Помимо этого, оптимизация конструктивной схемы и компоновки узлов расширяет функциональные возможности изделия, позволяя реализовать дополнительные режимы работы и увеличить сферы его применения. Таким образом, основной технический эффект заключается в комплексном повышении ключевых показателей и характеристик.

Список используемых источников

1. Аверьянова С. А. Теория гашения дуги в электрических аппаратах. СПб. : Издательство Политехнического университета, 2020. 68 с.
2. Актерский Ю. Е., Смирнов А. С. Повышение эффективности снижения рисков чрезвычайных ситуаций на опасных производственных объектах // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. 2022. №1. С. 9-16.
3. Аушев И. Ю. Выбор аппаратов защиты электропроводок с учетом времятоковых характеристик. М. : Энергетика, 2019. 150 с.
4. Богуцкий С. Ю., Шидловский Г. Л., Иванов А. Н. Исследование технических средств систем противопожарной сигнализации при расследовании пожаров // Проблемы управления рисками в техносфере. 2023. №1. С. 20-32.
5. Боков Г. В. Особенности влияния заземления электрооборудования на систему противопожарной защиты // Пожарная безопасность. 2024. №4. С. 22-29.
6. Бурашников Ю. М., Максимов А. С., Сысоев В. Н. Производственная безопасность на предприятиях. М. : Дашков и К, 2022. 518 с.
7. Веремейчик А. И. Особенности горения электрический дуги // Проблемы управления рисками в техносфере. 2021. №5. С. 14-19.
8. Выключатели серии Compact NS фирмы Schneider Electric [Электронный ресурс] : Электротовары Schneider серия Compact NS. URL: https://schneider-russia.ru/market/brand/compact-ns (дата обращения: 14.05.2024).
9. Душкин Н. Д. Устройства защитного отключения. М. : Энергосервис, 2018. 144 с.
10. Зельдович Я. Б., Баренблатт Г. И., Либрович В. Б., Махвиладзе Г. М. Математическая теория горения и взрыва. М.: Наука, 1980. 345 с.

11. Козлитин А. А. Развитие пожара от источников зажигания разной мощности // Научный вестник НИИГД «Респиратор». 2024. №4. С. 43-51.

12. Кон Е. Л. Пожарная безопасность организаций. М. : ПожКнига, 2024. 262 с.

13. Лоскутов Н. В., Мироньчев А. В., Чижков А. Г. Осуществление государственного контроля за системами пожарной сигнализации // Проблемы управления рисками в техносфере. 2021. №1. С. 7-15.

14. Минкин А. Н., Едимичев Д. А., Пожаркова И. Н., Трояк Е. Ю., Осавелюк П. А. Пожарная безопасность электроустановок: учебное пособие. Новосибирск : Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2023. 230 с.

15. Набатов К. А. Электрические аппараты распределительных устройств. Тамбов : Издательство Тамбовского государственного технического университета, 2017. 96 с.

16. Нейман Л. А. Электрические аппараты. Электрическая дуга. Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2023. 123 с.

17. Никольский О. К. Основы эксплуатации электроустановок. М. : Директ-Медиа, 2023. 412 с.

18. О пожарной безопасности [Электронный ресурс] : Федеральный закон от 21.12.1994 № 69–ФЗ (ред. от 08.08.2024). URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_5438/ (дата обращения: 29.09.2024).

19. О противопожарной службе Самарской области [Электронный ресурс] : Постановление Правительства Самарской области №15 от 31.01.2008 (ред. от 28.03.2022). URL: https://docs.cntd.ru/document/945018710 (дата обращения: 30.09.2024).

20. О федеральном государственном пожарном надзоре [Электронный ресурс] : Постановление Правительства РФ от 12 апреля 2012 года № 290

(ред. от 17.04.2024). URL: http://docs.cntd.ru/document/902341612 (дата обращения: 23.09.2024).

21. Об утверждении Положения о пожарно–спасательных гарнизонах [Электронный ресурс] : Приказ МЧС РФ № 467 от 25.10.2017 (ред. от 28.02.2020). URL: https://docs.cntd.ru/document/542610976 (дата обращения: 24.08.2024).

22. Об утверждении Правил противопожарного режима в Российской Федерации [Электронный ресурс] : Постановление Правительства РФ от 16.09.2020 № 1479 (ред. 30.03.2023). URL: https://docs.cntd.ru/document/565837297 (дата обращения: 02.11.2024).

23. Об утверждении Правил технической эксплуатации электроустановок потребителей электрической энергии [Электронный ресурс] : Приказ Минэнерго России от 12.08.2022 № 811. URL: https://docs.cntd.ru/document/351621634 (дата обращения: 15.10.2024).

24. Оценка эффективности мероприятий по обеспечению техносферной безопасности [Электронный ресурс]: Методические указания. URL: https://edu.rosdistant.ru/course/view.php?id=3014 (дата обращения: 05.09.2024).

25. Павликова К. А., Майс Д. А., Бахтина И. А. Сохранение работоспособности кабельных линий в условиях пожара // Ползуновский Альманах. 2023. №2. С. 12-19.

26. Патент РФ № 119933U1. Устройство защиты от дугового пробоя / Бабец Ю.И.; правообладатель: ЗАО «Корпоративный институт электротехнического приборостроения»; заявл. 06.04.2012; опубл. 27.08.2012. Бюлл. №24. 6 с.

27. Патент РФ №198910U1. Устройство защиты от дугового пробоя / Мельников В.С.; правообладатель: Мельников В.С.; заявл. 27.05.2020; опубл. 03.08.2020. Бюлл. №22. 9 с.

28. Патент РФ №221437U1. Устройство для измерения количества электричества в цепи утечки тока трехфазной электрической сети / Пичуев А.В.; заявл. 25.05.2023; опубл. 07.11.2023. Бюлл. №31. 10 с.

29. Сидоров А. И. Пожарная безопасность электроустановок. Челябинск : ЮУрГУ, 2023. 125 с.

30. Собурь С. В. Пожарная безопасность электроустановок. М. : ПожКнига, 2022. 224 с.

31. Сорокин А. В. Источники зажигания и горючие среды. Опасные факторы пожара // Современные технологии обеспечения безопасности. 2022. №5. С. 357-359.

32. Степаненко А. В. Пожарная безопасность объектов. Тольятти: Тольяттинский государственный университет, 2017. 114 с.

33. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности [Электронный ресурс] : Федеральный закон РФ от 22.07.2008 №123 (ред. от 25.12.2023). URL: https://docs.cntd.ru/document/902111644 (дата обращения: 15.09.2024).

34. Трофимов А. С. Электрофизические процессы в электрической дуге. Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2021. 115 с.

35. Тупов В. В. Исследование устройства защитного отключения. М. : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2024. 21 с.

36. Черных Р. А., Карлова О. В., Плотников С. М. Электроснабжение и энергосбережение на предприятии. Новосибирск : Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнёва, 2021. 92 с.

37. Широков Ю. А. Пожарная безопасность на предприятии. СПб. : Лань, 2022. 364 с.

38. Abdurrahman H. An Analytical Study of Power System under the Fault Conditions using different Methods of Fault Analysis // Power Systems. 2021. №6. P. 16-24.

39. Aljarrah R. Assessment of Fault Level in Power // School of Electrical and Electronic Engineering. 2020. №1. P. 96-108.

40. Anderson P. Protective Device Characteristics // Wiley-IEEE Press. 2022. №1. Pp. 47-107.

41. Yousefi Y. Thermal Conductivity and Specific Heat Capacity of Insulation materials at Different Mean Temperatures // Journal of Physics. 2021. №8. Pp. 44-49.

42. Faizull M. Critical temperatures, pressures, heat capacities // The Journal of Chemical Thermodynamics. 2021. №4. Pp. 14-19.

43. Lythall R. Calculation of Fault Currents in Electrical Networks: Circuit-breaker Selection. University of Michigan, 2020. 71 p.

44. Zaytjan K. Determination of the bearing capacity of a building and structures of energy facilities // Sciences. 2023. №9. Pp. 27-33.